

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MODELAGEM DA FORÇA DE USINAGEM NO**  
**FRESAMENTO DE FACEAMENTO DE ALTO**  
**AVANÇO DO AÇO ABNT 1045**

Autor: **Edinaldo Luciano da Silva**  
Orientador: **Prof. Dr. João Roberto Ferreira**

Itajubá, julho de 2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MODELAGEM DA FORÇA DE USINAGEM NO  
FRESAMENTO DE FACEAMENTO DE ALTO  
AVANÇO DO AÇO ABNT 1045**

Autor: **Edinaldo Luciano da Silva**

Orientador: **Prof. Dr. João Roberto Ferreira**

Curso: **Mestrado em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, julho de 2014

MG – Brasil

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

S586m

Silva, Edinaldo Luciano da

Modelagem da força de usinagem no fresamento de faceamento  
de alto avanço do Aço ABNT 1045 / Edinaldo Luciano da Silva. –  
Itajubá, (MG) : [s.n.], 2014.

96 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Volume delimitador. 2. Detecção de intrusos. 3. Classificador  
semi-supervisionado. I. Ferreira, João Roberto, orient. II. Universi-  
dade Federal de Itajubá. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MODELAGEM DA FORÇA DE USINAGEM NO**  
**FRESAMENTO DE FACEAMENTO DE ALTO**  
**AVANÇO DO AÇO ABNT 1045**

Autor: **Edinaldo Luciano da Silva**

Orientador: **Prof. Dr. João Roberto Ferreira**

Composição da Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Fernando Teixeira Filho – CEFET/MG**

**Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa – IEPG/UNIFEI**

**Prof. Dr. João Roberto Ferreira - Presidente – IEPG/UNIFEI**

## **Dedicatória**

*Aos meus pais  
e aos meus irmãos.*

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por estar presente em todos os momentos da minha vida, iluminando meu caminho, dando forças e sabedoria para vencer novos obstáculos.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. João Roberto Ferreira, pela competência, dedicação, paciência e amizade.

Ao Prof. Dr. Gilbert Silva, pela colaboração.

Ao Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes, pela colaboração e amizade.

Ao prof. Giovani Costa de Oliveira.

Aos amigos, Adriano Cássio Baldim, Leonardo Albergaria Oliveira, José Veríssimo Ribeiro de Toledo e Emerson Barsottini.

À empresa 3N Ferramentaria, pelo patrocínio na usinagem dos corpos de prova usados nos experimentos em laboratório.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelos seus dedicados professores e funcionários, pela oportunidade concedida para realização deste trabalho e pelo convívio profissional.

O CNPQ, através do programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, Pedro e Dalva, que sempre me incentivaram na formação e no desenvolvimento cultural.

*"Não devemos ter medo das novas ideias! Elas podem significar a diferença entre o triunfo e o fracasso."  
(Napoleon Hill)*

## Resumo

**SILVA, E. L.** Modelagem da Força de Usinagem no Fresamento de Faceamento de Alto Avanço do Aço ABNT 1045. 2014, 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Nos últimos anos, a crescente demanda do mercado consumidor por produtos mais acessíveis, tem feito com que as indústrias de manufatura invistam em novas tecnologias e processos de fabricação, visando baixar custos e aumentar a produtividade. A usinagem é um dos mais importantes processos de fabricação. Dentre eles, o fresamento com alto avanço por dente, que pode ser aplicado com o uso de fresas com pequenos ângulos de posição, devido ao efeito de afinamento dos cavacos. Embora a profundidade axial de corte seja limitada à menos de 2 mm, o avanço elevado torna-se um método de fresamento altamente produtivo. No processo de desbaste, a máxima taxa de remoção de material por unidade de tempo dentro do intervalo de máxima eficiência é o foco principal para muitas empresas de usinagem. Nesta operação verificam-se altos esforços de corte e desgaste significativo da ferramenta. O presente trabalho apresenta a modelagem da força de usinagem máxima e média (RMS) no fresamento de faceamento de alto avanço do aço ABNT 1045. A metodologia de superfície de resposta foi utilizada para modelar a força de usinagem, com a estratégia de entrada direta e sentido de corte concordante. Neste contexto, também foi avaliada a estratégia por rolagem, sendo que em cada estratégia foram analisados o desgaste de flanco, a vida da ferramenta e o volume de cavaco removido.

### **Palavras-chave:**

Fresamento de faceamento, Alto avanço, Modelamento, Força de usinagem, Estratégia de entrada, Vida da ferramenta.

## **Abstract**

**SILVA, E. L.** Machining Force Modeling in the High Feed Face Milling of the AISI 1045 Steel. 2014. 96 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.

In the last years, the growing market consumer demand for more affordable products has made the manufacturing industries invest in new technologies and processes in order to lower costs and increase of productivity. Machining is one of the most important manufacturing processes, including high feed milling that can be applied with the use of small position angle cutters due to the thin chip shaped. Although the axial depth of cut is limited to less than 2 mm, the high feed milling becomes a highly productive processes. In roughing process, the maximum rate of material removal per unit time within the range of maximum efficiency interval is the main focus for many machining industries. In this type of operation high machining forces and significantly tool wear are presented. In this work was presented a modeling of maximum and average (RMS) machining forces in the high feed face milling of the AISI 1045 steel. The response surface methodology was used for the machining forces modeling with direct entry strategy and down cutting. In this context was also evaluated the scroll entry strategy, where flank wear, tool life and volume of chip removed will be analyzed.

### ***Keywords:***

Face milling, High feed, Modeling, Machining forces, Cutting entry strategy, Tool life.

## Sumário

<b>Sumário</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vi</b>
<b>Simbologia</b>	<b>vii</b>
<b>Letras Latinas</b>	<b>vii</b>
<b>Letras Gregas</b>	<b>viii</b>
<b>Abreviaturas e Siglas</b>	<b>viii</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Importância do tema	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Estrutura do trabalho	3
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>5</b>
<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>5</b>
2.1 Considerações iniciais	5
2.2 Tipos de fresamento	6
2.2.1 Fresamento tangencial	7
2.2.2 Fresamento frontal	8
2.3 Fresa de alto avanço por dente	9
2.4 Tipos de corte	10
2.4.1 Fresamento concordante	10
2.4.2 Fresamento discordante	11
2.5 Forças e potencias de usinagem	12
2.5.1 Forças de usinagem no corte ortogonal	15

2.5.2	Potência de usinagem -----	15
2.5.3	Pressão específica de corte -----	17
2.6	Desgastes e avarias de ferramentas -----	18
2.6.1	Mecanismos de desgaste -----	24
2.6.2	Medição do desgaste -----	24
2.7	Formação do cavaco -----	25
2.7.1	Corte Ortogonal -----	26
2.8	Estratégias de usinagem -----	28
2.8.1	Estratégias de entrada direta -----	28
2.8.2	Estratégias de entrada por rolagem -----	29
2.8.3	Estratégias de entrada por rampa -----	31
2.9	Aço ABNT 1045 -----	32
2.10	Modelagem das forças de usinagem -----	33
2.11	Projeto e Análise de Experimentos -----	34
2.11.1	Metodologia de Superfície de Resposta -----	37
2.11.2	Arranjo Composto Central -----	38
<b>CAPÍTULO 3</b> _____		<b>41</b>
<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> _____		<b>41</b>
3.1	Considerações iniciais -----	41
3.2	Materiais -----	42
3.3	Máquina -----	43
3.4	Ferramenta -----	43
3.5	Instrumentos de medição -----	44
3.6	Planejamento experimental -----	45
3.7	Aplicação da metodologia de superfície de resposta -----	46
3.8	Medição de esforços -----	47
3.9	Ensaio de vida da ferramenta -----	50
<b>CAPÍTULO 4</b> _____		<b>51</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> _____		<b>51</b>
4.1	Considerações iniciais -----	51
4.2	Aquisição das forças de usinagem -----	51
4.3	Modelagem das forças de usinagem -----	53
4.3.1	Análise de variância -----	53

4.3.2	Análise dos resíduos -----	61
4.3.3	Superfícies de resposta-----	63
4.4	Força ativa e potência de corte-----	66
4.5	Forma macroscópica do cavaco-----	69
4.6	Ensaio de vida e estratégias de corte-----	70
<b>CAPÍTULO 5</b>	_____	<b>73</b>
<b>CONCLUSÕES</b>	_____	<b>73</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros-----	74
<b>CAPÍTULO 6</b>	_____	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	_____	<b>75</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Operação de fresamento de topo (Sandvik, 2013, adaptado).-----	6
Figura 2.2 - (a) Fresamento tangencial discordante e (b) Fresamento tangencial concordante (Sandvik, 2013).-----	7
Figura 2.3 - Seção do cavaco no fresamento tangencial (Diniz et al., 2010). -----	8
Figura 2.4 - Fresamento frontal: a) simétrico comum; b) assimétrico concordante. -----	8
Figura 2.5 - Fresamento de topo (a) Fresamento de topo esférico (b) (Sandvik, 2013).-----	9
Figura 2.6 - CoroMill 210 fresa de faceamento com alto avanço (Sandvik, 2013). -----	9
Figura 2.7 - Fresamento concordante (Sandvik, 2013).-----	11
Figura 2.8 - Fresamento discordante (Sandvik, 2013). -----	12
Figura 2.9 - Força de usinagem e suas diversas componentes para o fresamento (Diniz et al., 2010). -----	13
Figura 2.10 - Direção das forças passivas para diferentes geometrias de fresas (Sandvik, 2013). -----	14
Figura 2.11 - Círculo de Merchant (Merchant, 1954). -----	15
Figura 2.12 - Desgaste de flanco (Sandvik, 2013).-----	19
Figura 2.13 - Desgaste de entalhe (Sandvik, 2013). -----	20
Figura 2.14 - Desgaste de cratera (Sandvik, 2013).-----	20
Figura 2.15 - Deformação plástica (Sandvik, 2013). -----	21
Figura 2.16 - Trincas de origem térmicas (Sandvik, 2013).-----	22
Figura 2.17 - Lascamento da aresta de corte (Sandvik, 2013).-----	23
Figura 2.18 - Quebra da aresta de corte (Sandvik, 2013). -----	23
Figura 2.19 - Desgaste uniforme de flanco, conforme ISO 8688-1 (1989). -----	25
Figura 2.20 - Modelo para o mecanismo de formação do cavaco em corte ortogonal. -----	26
Figura 2.21 - Exemplo de corte ortogonal (Machado et al., 2011). -----	27
Figura 2.22 - Estratégias de: a) compensação; b) zig-zag; c) direção única (Toh, 2004). -----	28
Figura 2.23 - Entrada direta com grande espessura de cavaco na entrada e saída do dente da peça (Sandvik, 2013). -----	29
Figura 2.24 - Entrada por rolagem, espessura de cavaco na saída bem pequena (Sandvik, 2013). -----	30

Figura 2.25 - Entrada hipotética ideal isolando-se o fenômeno da espessura do cavaco (adaptado de Zanuto, 2012).-----	30
Figura 2.26 - Estratégia de entrada por rampa radial (Sandvik, 2013). -----	31
Figura 2.27 - Desgaste de flanco para diferentes estratégias de entrada (Ventura, et al., 2011).32	
Figura 2.28 - Tipos de CCD. -----	39
Figura 2.29 - Arranjo Composto Central para Três Fatores adaptado de Paiva, (2006). -----	40
Figura 3.1 - Dimensões do corpo de prova do aço ABNT 1045.-----	42
Figura 3.2 - Sistema de fixação do corpo de prova para aquisição das forças de usinagem.---	42
Figura 3.3 - Sistema de fixação do corpo de prova para os ensaios de vida. -----	43
Figura 3.4 - Centro de usinagem Fadal (LAM). -----	43
Figura 3.5 - Fresa Coromill 210 (Sandvik, 2013). -----	44
Figura 3.6 - Instrumentos de medição de desgaste, microscópio Olympus. -----	45
Figura 3.7 - Força de usinagem e suas componentes.-----	48
Figura 3.8 - Componentes das forças de usinagem aqusitadas pelo dinamômetro.-----	49
Figura 4.1 - Valores para as forças de usinagem máximas.-----	52
Figura 4.2 - Valores para as forças de usinagem médias. -----	52
Figura 4.3 - Análise dos efeitos principais da ANOVA para as força de usinagem máxima. -58	
Figura 4.4 - Análise dos efeitos principais da ANOVA para as força de usinagem média. ----	59
Figura 4.5 - Análise de resíduos para força de usinagem máxima. -----	62
Figura 4.6 - Análise de resíduos para força de usinagem média. -----	62
Figura 4.7 - Força de usinagem máxima em função de $v_c \times f_z$ ; $a_p=1$ mm.-----	64
Figura 4.8 - Força de usinagem máxima em função de $v_c \times a_p$ ; $f_z=1,25$ mm. -----	64
Figura 4.9 - Força de usinagem máxima em função de $a_p \times f_z$ ; $v_c=180$ m/mm. -----	64
Figura 4.10 - Força de usinagem média em função de $v_c \times f_z$ ; $a_p=1$ mm. -----	65
Figura 4.11 - Força de usinagem média em função de $a_p \times v_c$ ; $f_z=1,25$ mm.-----	65
Figura 4.12 - Força de usinagem média em função de $a_p \times f_z$ ; $v_c=180$ m/min. -----	65
Figura 4.13 - Composição da força ativa (Ft). -----	67
Figura 4.14 - Forma macroscópica dos cavacos. -----	69
Figura 4.15 - Volume de cavaco removido entre as duas estratégias de entrada de corte. ----	71
Figura 4.16 - Desgaste de flanco em função tempo corte.-----	71
Figura 4.17 - Degaste de flanco para as duas estratégia de entrada, direta e por rolagem. ----	72

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características fundamentais das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos (Adaptado de Gomes, 2010). -----	36
Tabela 3.1 - Composição química do aço ABNT 1045.-----	42
Tabela 3.2 - Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios. -----	46
Tabela 3.3 - Matriz experimental -----	47
Tabela 4.1 - Matriz das respostas experimentais.-----	54
Tabela 4.2 - Análise de Variância para força de usinagem máximas. -----	55
Tabela 4.3 - Análise de Variância para força de usinagem médias. -----	55
Tabela 4.4 - Matriz das respostas experimentais ajustada. -----	56
Tabela 4.5 - Análise de Variância ajustado para força de usinagem máxima. -----	57
Tabela 4.6 - Análise de Variância ajustado para força de usinagem média.-----	57
Tabela 4.7 - Termos ajustados para força de usinagem máxima. -----	60
Tabela 4.8 - Termos ajustados para força de usinagem média.-----	60
Tabela 4.9 - Ajuste e variação dos modelos reduzidos finais. -----	61
Tabela 4.10 - Força ativa e potência de usinagem. -----	68

## Simbologia

### Letras Latinas

A	Área da seção de corte
$a_e$	Profundidade radial de corte
ap	Profundidade axial de corte
Dc	Diâmetro de corte
Fap	Força de apoio
Fc	Força de corte
Fe	Força efetiva de corte
Ff	Força de avanço
Fp	Força passiva ou de profundidade
Ft	Força de ativa
Fu	Força de usinagem
Fx	Componente de força no eixo x
Fy	Componente de força no eixo y
fz	Avanço por dente
Fz	Componente de força no eixo z
h	Espessura do cavaco
k	Número de variáveis independentes
kc	Força específica de corte
$k_s$	Pressão específica de corte
KT	Profundidade da cratera
Pa	Potência de acionamento
Pc	Potência de corte
P-value	Valor p ou probabilidade estimada
Q	Volume de cavaco removido
$R^2$	Coefficiente de determinação
$R^2(\text{adj})$	Coefficiente de determinação ajustado

$v_b$	Desgaste de flanco
$VB_B$	Desgaste de flanco médio
$VB_{Bmax}$	Desgaste de flanco máximo
$VB_N$	Desgaste de entalhe
$v_c$	Velocidade de corte
$v_f$	velocidade de avanço
$x_r$	Ângulo de posição da ferramenta
$y$	Resposta de interesse

## Letras Gregas

$\Sigma$	Somatório
$x_i$	Variáveis independentes
$\alpha$	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
$\beta$	Coefficiente do modelo matemático a ser estimado
$\beta_i$	Coefficientes a serem estimados
$\varepsilon$	Erro experimental
$\varphi$	Ângulo da direção do avanço

## Abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$Al_2O_3$	Óxido de alumínio
C	Carbono
CCC	Arranjo de Corpo Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central <i>ou</i> <i>Central Composite Design</i>

CCF	Arranjo de Face Centrada
CCI	Arranjo de Corpo Inscrito
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DOE	<i>Design of Experiments</i>
IEM	Instituto de Engenharia Mecânica
IEPG	Instituto de Engenharia de Produção e Gestão
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAM	Laboratório de Automação Manufatura
Mn	Manganês
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i>
P <sub>max</sub>	Fósforo máximo
R	Raio
RMS	<i>Root Mean Square</i>
S <sub>max</sub>	Enxofre máximo

## Capítulo 1

# INTRODUÇÃO

### 1.1 Importância do tema

No cenário industrial a otimização dos processos de fabricação visa à obtenção de produtos com o menor custo e o menor tempo de produção. Os processos de usinagem tem grande importância e estão presentes nos mais diversos processos de transformação da indústria. Entre eles, podemos citar os processos de fresamento como um dos mais aplicados nesta indústria. Um levantamento histórico indica que a operação de fresamento surgiu em 1918. O fresamento de faceamento é uma operação com vasto emprego na indústria atual em função de seu alto rendimento, além da boa qualidade superficial e precisão dimensional das peças usinadas. Existem diversas variáveis que influenciam o processo, como o ângulo de posição da aresta de corte, o avanço por dente, a velocidade de corte, a profundidade axial de corte e a profundidade radial de corte. O conhecimento e o controle destas variáveis durante a usinagem é de suma importância, por isto a necessidade de um planejamento experimental bem elaborado.

O fresamento com alta velocidade de avanço pode ser a chave para um processo produtivo a baixo custo. É um método que permite tempos de usinagem relativamente baixos comparados com os métodos convencionais. Com uma pequena profundidade axial de corte e alto avanço por dente, proporciona maiores velocidades de avanço o que dá maior taxa de remoção de material do que o processo de fresamento convencional. É um método com

grandes vantagens, como por exemplo, as forças de apoio ou força passiva se dirigem ao fuso da máquina, na direção axial do eixo árvore da máquina, o que reduz as vibrações e, por sua vez aumenta a vida útil da ferramenta. O fresamento de faceamento de alto avanço tem grande aplicação na indústria metal-mecânica, principalmente na área de usinagem de moldes e matrizes. O fresamento de alto avanço pode ser inserido dentro do conceito da usinagem em altas velocidades de corte (HSM), muito em voga atualmente, buscando maior volume de cavaco removido na unidade de tempo (Sandvik, 2013).

Segundo Bonetti et al. (2010), quanto maior for a profundidade radial de corte ( $a_e$ ), maior será o contato da aresta de corte com a peça, o que contribui para a elevação das forças de usinagem. Na operação de desbaste verificam-se altos esforços de corte e com a redução do passo da fresa aumentam as forças de usinagem, independentemente do aumento da velocidade de corte (Braga et al., 2011). De acordo com Ribeiro et al. (2006), dentre os parâmetros avaliados em seu trabalho, o avanço por dente foi o mais expressivo na análise dos fatores que influenciaram para elevação das forças de usinagem. Segundo Rigatti (2010), quanto menor a velocidade de corte, associado ao maior avanço por dente eleva significativamente as forças de usinagem. Banin Jr. et al. (2009) revelam que o avanço por dente ( $f_z$ ) tem influência expressiva na tensão residual máxima de compressão quando age simultaneamente com a velocidade de corte.

As estratégias de entrada da ferramenta na peça em processos de fresamento podem trazer ganhos de produtividade. Alguns trabalhos têm apresentado diferentes estratégias de corte para melhorar o processo de fresamento, analisando como critério de fim de vida o desgaste de flanco do inserto. Ventura et al. (2011) experimentou diversas estratégias de corte que comprovaram a influência da entrada da ferramenta no processo, sendo elas a entrada direta, entrada com avanço reduzido, entrada por rolagem e por rampa radial.

O modelamento de forças de usinagem em processo de fresamento é muito importante, pois permite prever a potência demandada pelo processo de forma mais próxima da realidade, principalmente em fresas de geometrias especiais. As fresas de alto avanço, possuem pequeno ângulo de posição, que alteram a forma do cavaco, fazendo com que os modelos tradicionais de força não representam de forma precisa o comportamento da mesma em função dos vários parâmetros de corte. Assim, o projeto de experimentos como a superfície de resposta, que será utilizada neste trabalho, permite obter modelos empíricos com dados operacionais de máquina medidos e controlados em laboratório.

Nesse contexto, o presente trabalho pretende modelar a força de usinagem máxima e média medida por um dinamômetro, em função da velocidade de corte, avanço por dente e

profundidade axial de corte, no processo de fresamento por faceamento. Na modelagem será verificada a influência destas variáveis de forma isolada, assim como através de suas interações nas forças de usinagem. Este trabalho também pretende avaliar duas estratégias de entrada da ferramenta na peça: entrada direta e por rolagem, e nestes casos monitorar a vida da ferramenta e o volume de cavaco removido.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo principal modelar as forças de usinagem máxima e média (RMS) no fresamento de faceamento de alto avanço do aço ABNT 1045 utilizando uma fresa de topo com ângulo de posição de  $10^\circ$ , com sentido de corte concordante e com estratégia de entrada direta da fresa na peça. Como objetivo secundário pretende-se analisar a estratégia de entrada de corte por rolagem avaliando-se a vida da ferramenta. Nas duas estratégias serão analisados o desgaste de flanco da fresa e o volume de cavaco removido.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

O primeiro capítulo tem como objetivo a introdução do problema de pesquisa.

O capítulo 2 apresenta os conceitos necessários para a fundamentação teórica desta pesquisa. São apresentados os principais conceitos relacionados ao processo de fresamento, estratégias de entrada da fresa na peça e uma análise das pesquisas anteriores desenvolvidas sobre esse tema, bem como técnicas de experimentação como a Metodologia de Superfície de Resposta.

O capítulo 3 apresenta as ferramentas, os equipamentos utilizados, detalhando materiais, ferramentas, os equipamentos empregados e as etapas seguidas em cada fase do trabalho.

No capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais, como medição dos esforços de corte, adequação do modelo e análise de vida da ferramenta.

O capítulo 5 descreve as conclusões e sugestões para estudos futuros.

No capítulo 6 é descrito as referências bibliográficas do referido trabalho.

## Capítulo 2

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 2.1 Considerações iniciais

No presente capítulo será apresentada uma revisão teórica sobre o tema tratado neste trabalho. Buscou-se a maior quantidade de informações relacionadas ao assunto, visando elaborar e apresentar uma revisão sobre os principais tópicos abordados, por meio de pesquisas na literatura. Os principais temas abordados nesta revisão estão divididos em três grupos: processo de fresamento, usinagem de desbaste do aço ABNT 1045 e estratégias de corte. As operações de fresamento de topo podem ser definidas pelos seguintes movimentos.

✓ O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo, fazendo com que cada uma das arestas cortantes retire uma porção de material.

✓ O movimento de avanço é geralmente feito pela própria peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina, a qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, o que lhe dá a forma e a dimensão desejadas. A Figura 2.1 mostra esquematicamente 2 exemplos de operações de fresamento de topo com seus movimentos principais.

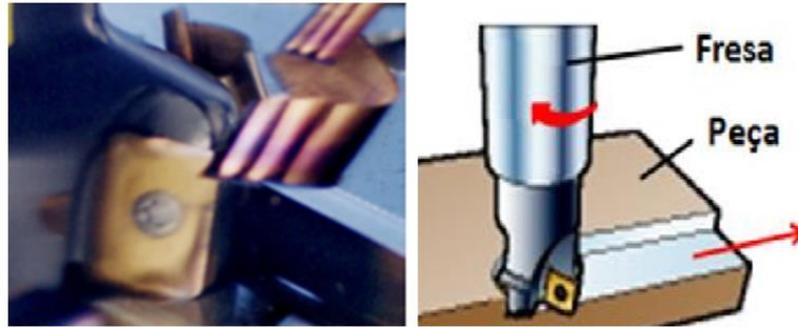


Figura 2.1 - Operação de fresamento de topo (Sandvik, 2013, adaptado).

O fresamento ainda que complexo, é um dos processos de usinagem com grande emprego na indústria de manufatura e é um dos mais importantes devido a aspectos como alta taxa de remoção de material e produção de formas com boa precisão dimensional e geométrica, além de ser um processo de elevada flexibilidade, sendo aplicado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades, entre outras (Marcelino et al., 2004).

## 2.2 Tipos de fresamento

O processo de fresamento pode ser classificado de várias formas. Na posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta tem-se: fresamento horizontal e fresamento vertical ou inclinado (Diniz et al., 2010). Conforme a norma ABNT NBR 6175, existem dois tipos básicos de fresamento, segundo a disposição dos dentes da fresa, e um terceiro que é a junção dos tipos básicos:

- ✓ Fresamento cilíndrico tangencial: processo destinado à obtenção de superfícies planas paralelas ao eixo de rotação da ferramenta;
- ✓ Fresamento frontal: processo destinado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta;
- ✓ Fresamento composto: em alguns casos, tem-se a junção dos dois tipos básicos descritos acima, podendo haver predominância de um deles.

## 2.2.1 Fresamento tangencial

Operação na qual os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta e o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada. O fresamento tangencial pode ser classificado em discordante quando o sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido de rotação da fresa, apresentado pela Figura 2.2 a. É classificado como concordante quando o sentido do movimento de avanço é o mesmo do sentido do movimento de rotação da fresa, conforme observado na Figura 2.2 b. As fresas são chamadas de cilíndricas ou tangenciais.

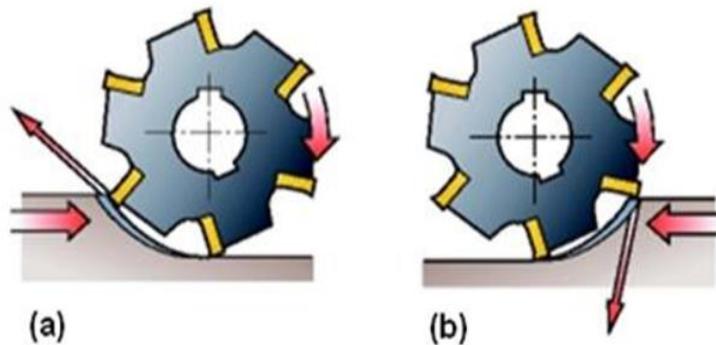


Figura 2.2 - (a) Fresamento tangencial discordante e (b) Fresamento tangencial concordante (Sandvik, 2013).

Em função de movimentos combinados - movimento de corte (rotativo) com movimento de avanço (linear) - o cavaco produzido no fresamento tangencial possui espessura ( $h$ ) variável, apresentando a forma de uma vírgula. A Figura 2.3 mostra a seção do cavaco para esse tipo de fresamento. Do ponto “A” tem-se espessura de cavaco igual a zero, no ponto “B” a espessura de cavaco é máxima, e entre o ponto A e B, região conhecida como ângulo de contato, a espessura de cavaco é variável em cada ponto.

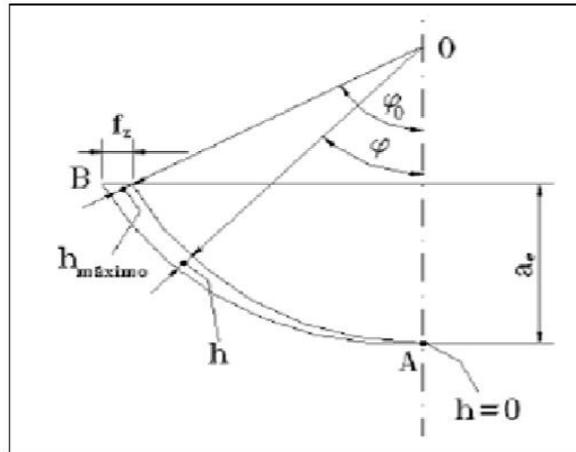


Figura 2.3 - Seção do cavaco no fresamento tangencial (Diniz et al., 2010).

## 2.2.2 Fresamento frontal

Operação na qual os dentes ativos estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada. As fresas são chamadas de fresas frontais ou de topo. Podendo ter formas diferentes de cavaco no caso do fresamento frontal, quando este for simétrico e a fresa se desloca sobre o eixo de simetria da peça. O cavaco tem espessura variável, iniciando o cavaco com espessura igual a zero, e passando por um máximo no eixo de simetria da fresa e voltando a espessura inicial novamente. Já no fresamento frontal assimétrico concordante, quando toda superfície é fresada com fresas de facear, a espessura de corte se inicia em um máximo e termina em zero. A Figura 2.4 mostra os exemplos citados.

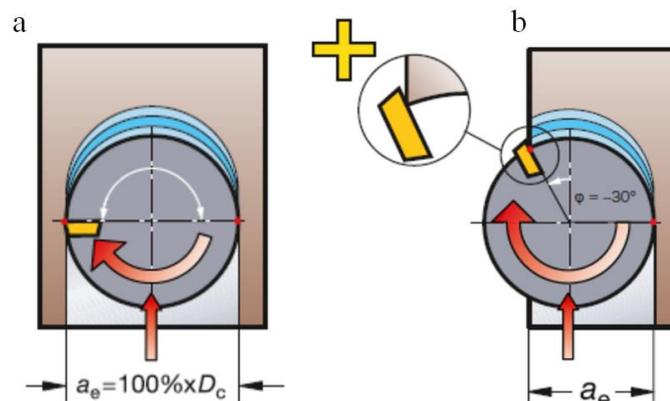


Figura 2.4 - Fresamento frontal: a) simétrico comum; b) assimétrico concordante.

Fresamento de topo: a superfície usinada é gerada pelas arestas de corte localizadas na periferia da fresa, geralmente em um plano normal ao eixo da ferramenta e pelas arestas de corte localizadas no topo da ferramenta, conforme mostra a Figura 2.5. Este tipo de fresa tem

grande aplicação na usinagem de formas complexas, como moldes e matrizes e em alguns equipamentos mecânicos.

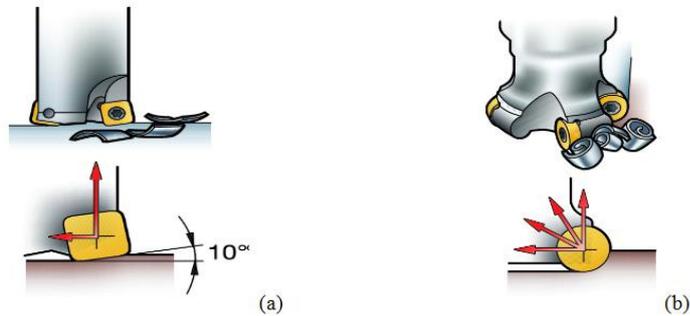


Figura 2.5 - Fresamento de topo (a) Fresamento de topo esférico (b) (Sandvik, 2013).

## 2.3 Fresa de alto avanço por dente

As fresas para altos avanços por dente são utilizadas nas operações de faceamento, são caracterizadas pelo pequeno ângulo de posição ( $10^\circ$  graus), fato pelo qual os cavacos gerados apresentam pequena espessura, com pequena profundidade de corte e, conseqüentemente, para avanços extremos da mesa (Sandvik-Coromant, 2013). Os esforços de corte axiais dominante são direcionada no sentido do fuso que o estabiliza. Isto é favorável para montagens longas e fracas, pois limita as tendências a vibrações. A Figura 2.6 apresenta a fresa coromill 210 da Sandvik-Coromant com ângulo de posição de  $10^\circ$ , onde a maior componente de força de usinagem é direcionada ao fuso da máquina (direção axial z).

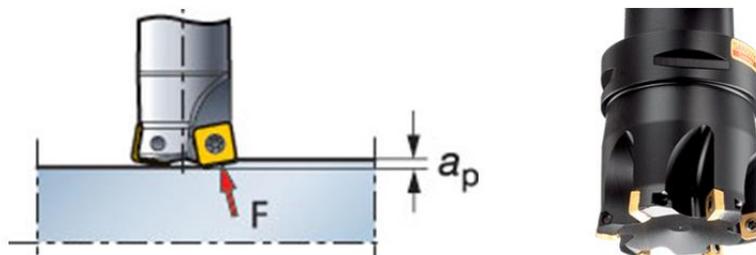


Figura 2.6 - CoroMill 210 fresa de faceamento com alto avanço (Sandvik, 2013).

O uso de fresas com alto avanço por dente permite alta produtividade em operações de desbaste, garantindo redução de tempo e custos no processo. A fresa CoroMill 210<sup>®</sup> é uma

ferramenta de desbaste muito produtiva para ser usado quando a taxa de remoção de material elevada for a principal prioridade (Sandvik, 2013).

## **2.4 Tipos de corte**

### **2.4.1 Fresamento concordante**

Segundo Diniz et al. (2010) fresamento concordante é aquele onde o ângulo entre a linha radial da fresa que passa pelo ponto de contato aresta-peça e uma outra linha radial que passa pelo ponto onde a espessura do cavaco formado é zero, inicia a um valor máximo e decresce até zero.

A literatura apresenta como vantagem do fresamento concordante, quando comparado com o discordante, menor desgaste e, com sequentemente, maior vida da ferramenta e melhor qualidade superficial. Existem algumas desvantagens neste tipo de usinagem. Onde o início do corte se dá arrancando a máxima seção do cavaco, provocando elevados choques quando a peça é dura, o que pode favorecer quebras e redução da vida da ferramenta. Outro problema é gerado pelo fato de que a força de avanço ocorre sempre no mesmo sentido do deslocamento. Portanto, a força resultante sobre a fresa varia em módulo, a força resultante sobre o fuso variará em módulo e direção, gerando vibrações, caso exista folga no fuso da fresadora.

No fresamento concordante, a ferramenta de corte avança na direção da rotação. É sempre preferível quando a máquina-ferramenta, o dispositivo de fixação e a peça o permitem. No fresamento concordante periférico, a espessura dos cavacos diminuirá do início do corte, gradualmente atingindo zero no final do corte. Isto evita que a aresta se esfregue ou queime contra a superfície antes do contato no corte, conforme Figura 2.7. Uma espessura grande de cavacos é vantajosa e as forças de corte tendem a puxar a peça para dentro da fresa, fixando a aresta cortante no corte (Sandvik, 2013) .

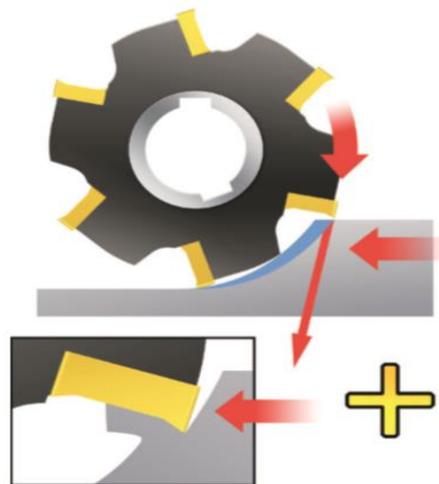


Figura 2.7 - Fresamento concordante (Sandvik, 2013).

### 2.4.2 Fresamento discordante

O fresamento discordante caracteriza-se pelo fato de que o ângulo de direção de avanço ( $\phi$ ) inicia-se com o valor zero e chega ao valor máximo no fim do passe da aresta de corte. No corte discordante, o sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido do movimento de rotação da fresa.

No fresamento discordante (Figura 2.8) a espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo. No início do corte, momento em que ferramenta toca a peça, essa é forçada para dentro da peça, gerando um excessivo atrito, o que faz com que haja deformação plástica nesta região ao invés da formação de cavaco. Estes atritos contribuem bastante para o aumento do desgaste da ferramenta e a geração de elevadas temperaturas. Por ser um corte intermitente, a aresta de corte pode encontrar nessa região uma superfície encruada pelo passe da aresta anterior, o que favorece bastante a redução do tempo de vida da ferramenta. Vencidos esses impasses, o corte começa a retirar material da peça e, no começo desta operação, a componente vertical da força de usinagem tende a afastar a ferramenta da peça e empurra a peça contra a mesa da máquina, enquanto que no final da operação de um dente, a aresta tende a retirar a peça da mesa (Diniz et al., 2010). Esse fenômeno associado com o avanço por dente faz com que ocorram vibrações.

No fresamento discordante as forças de corte tendem a empurrar a fresa e a peça para longe uma da outra. A alta tensão de tração, causada quando a aresta deixa a peça, geralmente resultará em rápida falha da aresta. A aresta de corte precisa ser forçada dentro do corte,

criando um efeito de esfregamento devido ao atrito, gerando altas temperaturas (Sandvik, 2013).

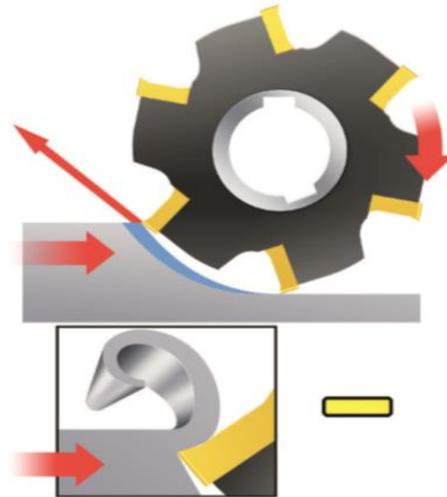


Figura 2.8 - Fresamento discordante (Sandvik, 2013).

## 2.5 Forças e potencias de usinagem

A compreensão e o conhecimento das grandezas físicas como esforços de corte são de fundamental importância na operação de fresamento. Segundo Diniz et al. (2010), essas grandezas físicas afetam a potência necessária para o corte, a capacidade de obtenção de tolerância apertada, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta. Os esforços de usinagem influenciam diretamente sobre os mecanismos de desgaste das ferramentas, influenciando na viabilidade econômica do processo. A componente da força de usinagem num plano ou numa direção qualquer é obtida mediante a projeção destas forças sobre esse plano ou direção, isto é, mediante uma projeção ortogonal (Ferraresi, 1982).

A força de usinagem atua sobre a aresta durante o corte, e são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta. Nos processos de usinagem como também no processo de fresamento as forças de usinagem e suas componentes estão dispostas conforme Figura 2.9.

A força atuante sobre a aresta de corte é chamada força de usinagem ( $F_u$ ), tendo como componentes a força ativa ( $F_t$ ), a força passiva ( $F_p$ ), perpendicular ao plano de trabalho, plano no qual os movimentos de usinagem são realizados. A força de usinagem é dividida em força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ), força de apoio ( $F_{ap}$ ) e força efetiva de corte ( $F_e$ ), (não

representada na figura) que é a projeção de ( $F_u$ ) sobre a direção efetiva de corte. Força de usinagem ( $F_u$ ) é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a 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 complexa (Engin e Altintas, 2001). A Figura 2.9 mostra as forças de usinagem e suas diversas componentes.

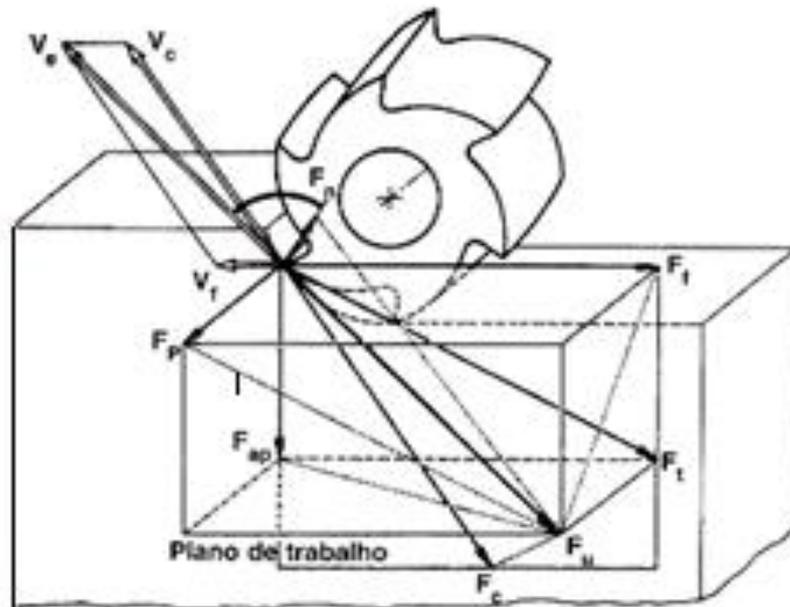


Figura 2.9 - Força de usinagem e suas diversas componentes para o fresamento (Diniz et al., 2010).

A componente de  $F_u$  no plano de trabalho é a força ativa ( $F_t$ ) e a força passiva ou de profundidade ( $F_p$ ) não contribui para a potência de usinagem, pois é perpendicular ao movimento. Porém é necessário estudá-la, pois a componente desta força está relacionada com a deflexão elástica da peça e com a flambagem da ferramenta durante o corte. Quando controlada, podem-se obter tolerâncias, forma, e dimensões mais justas. Costa (2003) afirma que a força passiva tem maior influência no desgaste do que a força de corte, tornando essa componente importante na determinação da vida da ferramenta e nos processos de monitoramento de desgaste.

Os efeitos indesejados (desgaste) podem ser causados pelas oscilações das forças durante o processo de usinagem. O que tem maior influência no acabamento, na tolerância dimensional, podendo ser causado pela deflexão da ferramenta. Segundo Law et al. (1999), a deflexão da ferramenta de corte no fresamento de topo varia durante todo o processo, tanto na usinagem de segmentos retos quanto na usinagem de cantos, influenciando diretamente na

qualidade superficial e na tolerância dimensional da peça. Este fato ocorre em decorrência das variações da força de corte, pelo diâmetro e pelo comprimento da fresa. A Figura 2.10 apresenta a direção das forças passivas ( $F_p$ ) para diferentes geometrias de fresas.

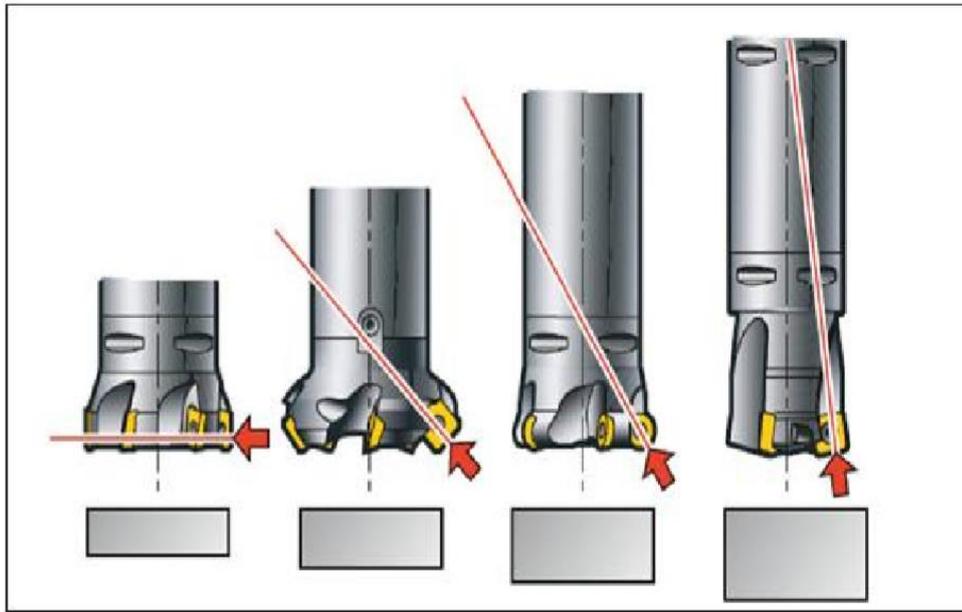


Figura 2.10 - Direção das forças passivas para diferentes geometrias de fresas (Sandvik, 2013).

Na prática para medir as forças de usinagem é necessário medir as suas componentes isoladamente em direções já conhecidas. Dessa forma as forças de corte podem ser escritas como relação entre a pressão específica de corte ( $k_s$ ) e a área da seção de corte ( $A$ ), conforme a Equação 2.1:

$$F_c = k_s \cdot A \quad (2.1)$$

Encontrar a área da seção de corte é relativamente simples, com o inconveniente de 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 (Zanuto, 2012).

Neves (2002) citado por Zanuto (2012), realizou experimentos onde confirmou que o parâmetro de usinagem que mais influencia a força de corte é a profundidade radial de corte ( $a_e$ ). No entanto, parâmetros como profundidade axial de corte, avanço por dente e até mesmo o sentido de corte influencia nos valores dos esforços de corte.

## 2.5.1 Forças de usinagem no corte ortogonal

Para melhor compreensão das forças atuantes na cunha cortante da ferramenta (corte ortogonal) são de fundamental importância as componentes de força que atuam em um único plano, ou seja, no plano de trabalho. A movimentação da ferramenta em relação à peça, gerando a atuação de duas forças distintas. Segundo Machado et al. (2011), o modelo bidimensional da formação de cavacos permite uma análise vetorial das forças que agem nas partes envolvidas: ferramenta, cavaco e peça.

Pode-se decompor a força de usinagem ( $F_u$ ) em várias direções de acordo com um teorema geométrico no qual todas as componentes, por exemplo, nas forças tangente e normal à superfície de saída da ferramenta,  $F_t$  e  $F_n$ . Quando se estuda a interface do cavaco-ferramenta a força normal é de grande importância. Estas forças podem ser decompostas usando um círculo onde  $F_u$  é o seu diâmetro. Essa representação gráfica é chamada de círculo de Merchant. A Figura 2.11, ilustra melhor as relações geométricas utilizadas com base nesse círculo (Merchant, 1954).

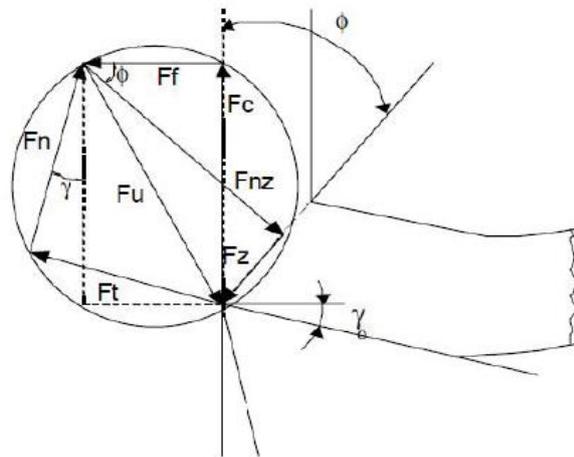


Figura 2.11 - Círculo de Merchant (Merchant, 1954).

## 2.5.2 Potência de usinagem

São necessários, no processo de fresamento, alguns requisitos básicos, para analisar a potência de usinagem tais como:

- ✓ Quantidade de metal a ser removido;
- ✓ Espessura média de cavacos;

- ✓ Geometria da fresa;
- ✓ Velocidade de corte;

Quanto maior o volume de material removido  $Q$  ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ), maior a potência de corte requerida. As baixas velocidades de avanço do fuso para operações de desbaste de materiais são significativas na disponibilidade de potência e torque suficientes. Uma máquina com torque e potência insuficientes produzirá espessura de cavacos flutuante, que por sua vez causa desempenho instável (Sandvik, 2013).

A grande parte dos centros de usinagem possui fusos de acionamento direto com torque mais baixo com rotação mais alta e potencia baixa com rotação mais baixa. Com capacidade cada vez maior da velocidade do fuso resultando em maiores avanços.

As máquinas-ferramenta com capacidade de altas rotações são limitadas nas operações de desbaste com fresas de diâmetro grande, pois estas requerem baixas rotações e alta potência. Portanto, é importante adaptar novas estratégias de usinagem: adotando novos processos de usinagem leves e rápidos, usando menores diâmetros de fresa, menor profundidade axial de corte ( $a_p$ ) e altos avanços por dente ( $f_z$ ).

Durante a usinagem de um determinado material, usando os parâmetros de corte bem definidos, com a ferramenta adequada ao processo, são gerados esforços durante a usinagem, exigindo uma potência necessária para remoção do material. A potência de corte ( $P_c$ ) é a potência disponível é consumida na operação de remoção de cavacos. É esta que interessa no cálculo de forças e pressões específicas de corte. A potência de acionamento ( $P_a$ ) é a potência fornecida pelo motor à máquina-ferramenta. Ela difere da potência de corte pelas perdas que ocorrem por atrito nos mancais, engrenagens, sistemas de lubrificação e refrigeração, sistema de avanço etc.

- ✓ Potência de corte pode ser obtida pela Equação 2.2 (Sandvik, 2013)..

$$P_c = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6 \cdot n} \quad (2.2)$$

Onde:

$P_c$  = potência de corte (kW)

$a_p$  = profundidade axial de corte (mm)

$a_e$  = profundidade radial de corte (mm)

$v_f$  = velocidade de avanço (mm/min)

$k_c$  = força específica de corte (N/mm<sup>2</sup>)

$\eta$  = rendimento da máquina (%)

### 2.5.3 Pressão específica de corte

No fresamento, a força de usinagem pode ser determinada da mesma forma que no torneamento, exceto pelo fato de que a espessura do cavaco não é constante. Para contornar esse fato, utiliza-se a espessura média do cavaco. Em várias aplicações desde dimensionamento pode ser feito através da potência média, com boa aproximação se o número de dentes cortando simultaneamente é alto.

Da mesma forma que no torneamento, utiliza-se a equação de Kienzle, agora com constantes especialmente determinadas para o caso do fresamento, para a determinação da pressão específica de corte ( $k_s$ ) dada em (N/mm<sup>2</sup>) (Machado et al., 2011):

$$K_s = k_{s1} \cdot h_m^{-z} \quad (2.3)$$

Onde:

$K_s$  = pressão específica de corte (N/mm<sup>2</sup>)

$k_{s1}$  = força específica de corte

$h_m$  = espessura média do cavaco (mm)

$-z$  = constante do material

Para cálculos de potência, torque e força de corte, a força específica de corte ou ( $k_{s1}$ ), é usada. O valor ( $k_{s1}$ ) é diferente para os seis grupos de materiais da norma ISO e também varia para cada grupo. Os valores de força de corte e potência calculada para as operações de fresamento, representam o valor médio, pois o processo de formação do cavaco é intermitente e a força de corte varia com a espessura do cavaco. Portanto os resultados podem servir de valores indicadores próximos da realidade.

## 2.6 Desgastes e avarias de ferramentas

Independentemente da dureza ou resistência ao desgaste dos materiais para ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica do material da peça de trabalho, as ferramentas de corte usadas nas operações de usinagem sofrem um processo de desgaste. Três fenômenos levam as ferramentas de corte a perder sua eficiência. São eles: avarias, desgastes e deformação plástica. Tais fenômenos levam a mudanças da geometria, perda de material, lascamento, trincamento ou fratura da aresta de corte das ferramentas. Isto causa paradas não-programadas das máquinas-ferramenta, para substituição das ferramentas de corte, gerando custos adicionais e perdas na produtividade.

Desgaste: a norma ISO 3685 (1993) define desgaste de ferramenta como sendo “a mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”, ou ainda segundo (Diniz et al., 2010) desgaste é a perda contínua microscópica de partículas da ferramenta devido ação do corte. Ocorre uma mudança da geometria da ferramenta de corte por perdas de massa. Oposto às avarias, o desgaste ocorre com perdas contínuas e progressivas em pequenas proporções, às vezes em níveis atômicos, ou ainda em nível dos grãos do material. A temperatura gerada durante a usinagem exerce um fator fundamental na ocorrência do desgaste na ferramenta de corte em qualquer material. Segundo Machado et al. (2011) o desgaste e a deformação acontecem tanto na superfície de folga como na superfície de saída das ferramentas, em cortes contínuos e interrompidos. Segundo Kalpakjian (1995), a vida de uma ferramenta pode ser definida como o tempo em que ela trabalha efetivamente, sem perder a capacidade de corte, dentro de um critério de tempo previamente estabelecido. Ainda de acordo com Machado et al. (2011) afirma-se que estudar e compreender os processos de danos e avarias das ferramentas de corte é importante porque ações consistentes e eficazes podem ser tomadas para evitar danos ou reduzir a taxa de desgaste, aumentando a vida útil das arestas da ferramenta de corte. De acordo com a Norma 3685 (1993) os parâmetros utilizados para quantificar os desgastes são:

$KT$ = profundidade da cratera;

$VB_B$ = desgaste de flanco médio;

$VB_{Bmax}$ = desgaste de flanco máximo;

$VB_N$ = desgaste de entalhe;

Desgaste de flanco: Esse tipo de desgaste é o mais comum e está presente em toda operação de usinagem e atinge a superfície de folga da ferramenta. Oferece uma vida útil da ferramenta previsível e estável. Ocorre principalmente pela abrasão e é potencializado em operações onde o material usinado apresenta alta dureza ou incrustações, causada por constituintes duros no material da peça, ou quando a temperatura de corte alcança valores tais que o material da ferramenta começa a perder sua dureza. Este tipo de desgaste pode acontecer simultaneamente ao desgaste de entalhe. Pode-se reduzir a ocorrência do desgaste de flanco através do uso de ferramentas com maior resistência ao desgaste e com dureza a quente mais elevada. A utilização de ferramentas de corte com coberturas feitas com materiais de maior dureza, também pode inibir ou retardar o aparecimento deste tipo de desgaste. A Figura 2.12 apresenta o desgaste de flanco.

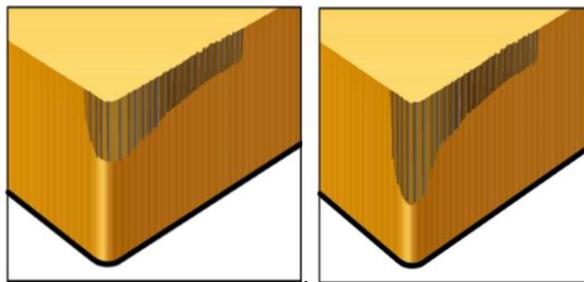


Figura 2.12 - Desgaste de flanco (Sandvik, 2013).

Desgaste de entalhe: Ocorre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, conforme Figura 2.13. Este tipo de desgaste ocasiona a deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original é incentivado pelo aumento da velocidade de corte (Diniz et al., 2010).

Quanto ao desgaste de entalhe, deve ser prevenido com o uso de ferramentas, que possam oferecer maior resistência à oxidação ou com a utilização de fluidos de corte, que contenham aditivos antioxidantes. Tais medidas são mais difíceis de ser tomadas no caso de operações de fresamento em desbaste, normalmente, feitas a seco para evitar que a ferramenta sofra choques térmicos.

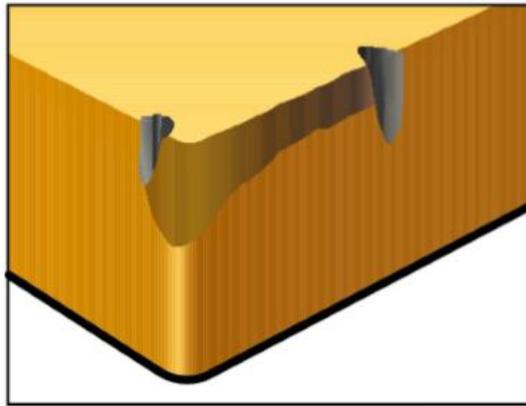


Figura 2.13 - Desgaste de entalhe (Sandvik, 2013).

Desgaste de cratera: Tem sua ocorrência, na superfície de saída da ferramenta e é causado principalmente pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. Ocasionalmente por difusão devido a altas temperaturas de corte na saída da ferramenta. Este desgaste ocorre principalmente em ferramentas de metal duro sem cobertura, nas operações de usinagem onde o material da peça é o aço, ou materiais ferrosos, em função da afinidade química que existe entre o metal duro e o aço. Este desgaste pode não ocorrer em alguns processos de usinagem, principalmente quando se utiliza ferramentas de metal duro com cobertura de cerâmica à base de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), sendo este mais eficiente contra a caracterização (Diniz, 2010). Algumas medidas podem ser adotadas, a fim de se evitar o desgaste por cratera, primeiro, reduzir a velocidade para obter uma temperatura mais baixa, depois reduzir o avanço, e selecionar uma geometria de pastilha positiva. Pois uma redução da temperatura de corte contribui, para o não surgimento deste desgaste, pois a difusão necessita de temperaturas elevadas para ocorrer.

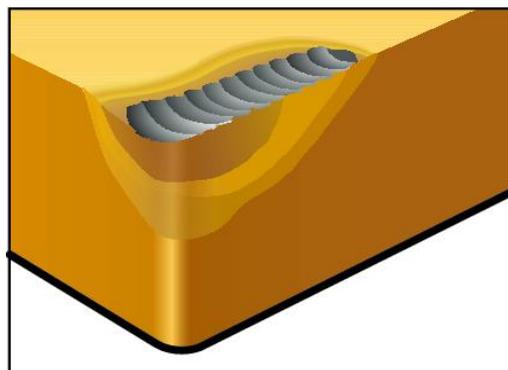


Figura 2.14 - Desgaste de cratera (Sandvik, 2013).

Deformação plástica da aresta de corte: Este fenômeno provoca a mudança da geometria da aresta de corte através do deslocamento do material. Devido as altas temperaturas atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Tais deformações provocam deficiências do controle

de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça (Diniz et al., 2010). Este tipo de deformação pode ser prevenido com o uso de ferramentas de maior dureza a quente, melhor resistência à deformação plástica, ou através da adequação dos parâmetros de usinagem, ou geometria da ferramenta visando reduzir os esforços e a temperatura de corte. Normalmente estas deformações ocorrem em aços rápidos e metais duros quando ocorre combinação de altas tensões de compressão, aliadas a elevadas temperaturas na superfície de saída (Trent, 2000).

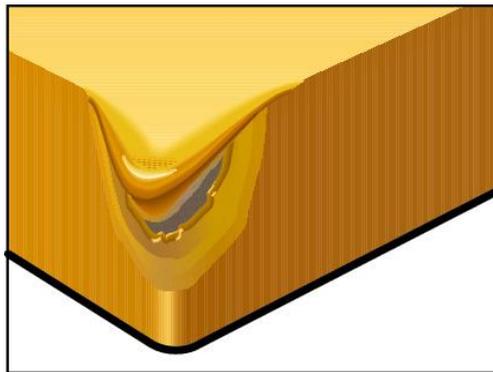


Figura 2.15 - Deformação plástica (Sandvik, 2013).

**Avaria:** Fenômeno que ocorre de forma inesperada e catastrófica, causada pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte. O lascamento e a quebra levam à destruição total ou perda de uma quantidade de material da aresta de forma repentina e imprescindível (Machado, et al., 2011). O mais comum em ferramentas de baixa tenacidade, como os materiais cerâmicos e os ultraduros, é a quebra. O lascamento depende da tenacidade das ferramentas. Na ocorrência de trinca, não há perda imediata de material; ela gera abertura de uma fenda na ferramenta de corte, porém com a sua presença, o processo de usinagem pode estar comprometido, pois ela poderá promover um lascamento ou quebra da mesma. Este fenômeno raramente ocorre em cortes contínuos (torneamento). As avarias são mais comuns em cortes interrompidos como no fresamento, devidos aos choques mecânicos e térmicos inerentes de tais processos.

**Trincas:** Este tipo de avaria pode ser causado pelas variações de temperatura ou pela variação dos esforços mecânicos (Diniz et al., 2010). As trincas que surgem perpendicularmente à aresta de corte são em função da variação da temperatura, denominadas como trincas de origem térmica. Portanto as trincas paralelas à aresta de corte originam-se em decorrência dos esforços que são denominadas de trincas de origem mecânica. São muito comuns nas operações de fresamento, devido às condições mais severas de corte, em função

da grande variação da força e da temperatura na aresta de corte. O principal fator causador de tal avaria é a variação de cargas térmicas e mecânicas. Tais variações estão sempre presentes no corte interrompido do fresamento. Trincas de origem térmica ocorrem quando a temperatura na aresta de corte muda rapidamente de quente para frio. Várias trincas podem surgir perpendiculares à aresta de corte (Sandvik, 2013). A Figura 2.16 mostra um exemplo de trincas térmicas.

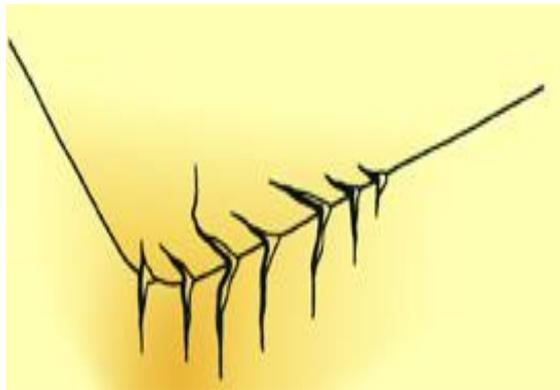


Figura 2.16 - Trincas de origem térmicas (Sandvik , 2013).

Lascamento: é considerado também um tipo de avaria da ferramenta, tendo como característica a retirada de partículas maiores em uma só vez. Oposto ao desgaste frontal e de cratera ocorre à retirada contínua de partículas muito pequenas da ferramenta. A parte da aresta de corte que não esta em uso pode ser danificada pelo martelamento de cavacos, a face de topo e o apoio da pastilha podem ser danificados, resultando em textura superficial ruim e desgaste excessivo de flanco (Sandvik, 2013). O lascamento ocorre principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada, dessa forma prejudica o acabamento superficial da peça e apresenta um desgaste de flanco excessivo. Se continuar crescendo, provoca a quebra da ferramenta (Diniz et al., 2010).

Algumas soluções podem ser tomadas para se evitar a ocorrência do lascamento tais como:

- ✓ Selecionar uma classe de material mais tenaz;
- ✓ Selecionar uma pastilha com uma aresta de corte mais robusta;
- ✓ Aumentar a velocidade de corte;
- ✓ Selecionar uma geometria negativa;
- ✓ Reduzir o avanço no início do corte;
- ✓ Melhorar a estabilidade do processo;

A Figura 2.17 mostra um exemplo de lascamento na aresta de corte da ferramenta.

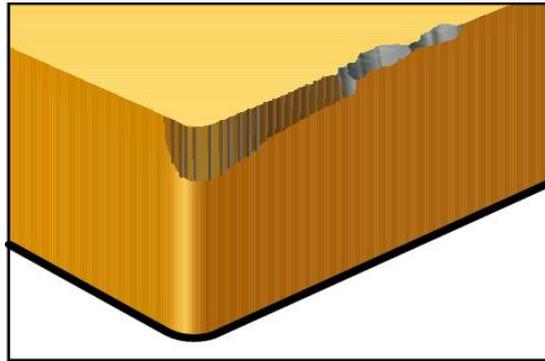


Figura 2.17 - Lascamento da aresta de corte (Sandvik, 2013).

Quebra: Como visto acima todos os desgastes e avarias da ferramenta ao crescerem podem gerar a quebra da mesma. A quebra pode ocasionar dano na ferramenta podendo danificar não só a aresta de corte, mas também toda a pastilha como também o porta-ferramenta. Caso o processo de usinagem não seja parado imediatamente após a quebra, gerando danos a superfície da própria peça e danificar a máquina ferramenta (Diniz et al., 2010). A Figura 2.18 mostra a quebra da aresta de corte.

Algumas causas podem provocar a quebra da ferramenta tais como.

- ✓ Ferramenta muito dura em geral, quão mais resistente ao desgaste é a ferramenta, menos tenaz e menos resistente ao choque ela é;
- ✓ Carga excessiva sobre a ferramenta;
- ✓ Raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequeno;
- ✓ Corte interrompido;
- ✓ Parada instantânea do movimento de corte sem a retirada prévia da ferramenta da peça;
- ✓ Entupimento dos canais de expulsão de cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos.



Figura 2.18 - Quebra da aresta de corte (Sandvik, 2013 ).

### 2.6.1 Mecanismos de desgaste

Difusão: É um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomo de um metal para outro metal. Depende da afinidade físico-química dos materiais envolvidos na zona de fluxo.

Oxidação: Ocorre em altas temperaturas e a presença de ar e água nos fluidos de corte promovem a oxidação para a maioria dos metais. Materiais como tungstênio e o cobalto, durante o corte, formam filmes óxidos porosos sobre a ferramenta, portanto estes filmes são removidos com facilidade pelo atrito gerando o desgaste. O desgaste provocado pela oxidação ocorre especificamente na interface cavaco-ferramenta em função do fluxo de ar naquela região.

Abrasão mecânica: É uma das principais causas dos desgastes da ferramenta. Porém ela atua mais no desgaste de flanco, gerada pelo atrito entre as partículas duras presentes no material da peça contra a ferramenta, aumentando a temperatura de corte, reduzindo a dureza da ferramenta.

### 2.6.2 Medição do desgaste

A norma ISO (*International Organization for Standardization*) normatiza estes eventos em três classes: desgaste, avarias e deformação plástica. As ferramentas utilizadas em torneamento seguem a norma ISO 3685 (1993), as ferramentas com insertos, utilizadas em fresamento frontal (ou faceamento), seguem a norma ISO 8688-1 (1989) e as ferramentas utilizadas em fresamento de topo com ferramentas inteiriças são regidas pela norma ISO 8688-2 (1989).

As normas citadas anteriormente adotam vários critérios para mensurar e avaliar a vida das ferramentas, tais como: desgaste de flanco, desgaste de cratera, desgaste em forma de degrau lascamento, trincas, deformação plástica e falha catastrófica.

A escolha do desgaste de flanco uniforme como critério de fim de vida para os ensaios realizados foi adotada pela facilidade de medição e por se tratar de um parâmetro bastante utilizado no estudo de vida de ferramentas na literatura.

Segundo Machado et al. (2011), em um processo de usinagem todos os mecanismos de desgastes podem ser observados, porém um deles irá sobressair aos demais. A análise do desgaste de ferramenta é uma atividade complexa, na qual se deve observar o material da peça, o material da ferramenta e as condições de corte, analisando o plano ortogonal da ferramenta para sua medição, conforme ilustrado na Figura 2.19.

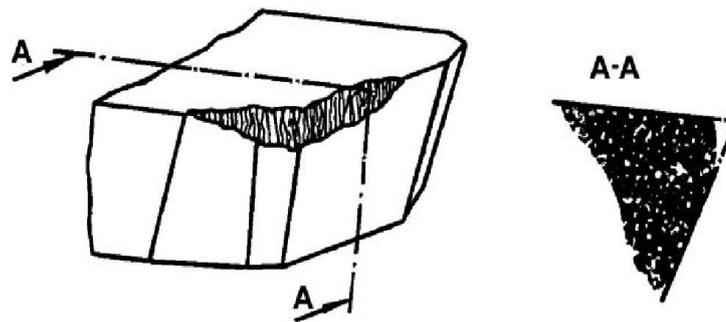


Figura 2.19 - Desgaste uniforme de flanco, conforme ISO 8688-1 (1989).

## 2.7 Formação do cavaco

São inúmeros os fatores que influenciam a formação do cavaco, na usinagem tais como desgaste da ferramenta, esforços de corte, elevada temperatura de corte, a penetração do fluido de corte, etc. Dessa forma, estão envolvidos no processo de formação do cavaco a qualidade superficial da peça, os custos operacionais, a segurança do operador, etc.

O cavaco começa a ser formado quando a ferramenta comprime uma porção do material da peça, que por sua vez se deforma (recalca) até que seja atingido o seu limite de ruptura. A Figura 2.20 apresenta de uma maneira bem simples as deformações durante o processo de formação do cavaco em uma operação de usinagem. A cunha cortante da ferramenta recalca a porção de material que sofre cisalhamento e se desloca segundo um plano, chamado plano de cisalhamento do cavaco. Assim, esta porção recalçada (cavaco) apresenta ( $h'$ ) de corte maior que a espessura original antes do recalque.

- ✓  $\alpha$  = ângulo de incidência.
- ✓  $\beta$  = ângulo de cunha.
- ✓  $\gamma$  = ângulo de saída.

- ✓  $h$  = espessura de usinagem (antes da retirada do cavaco).
- ✓  $h_{ch}$  = espessura de corte (depois da retirada do cavaco).

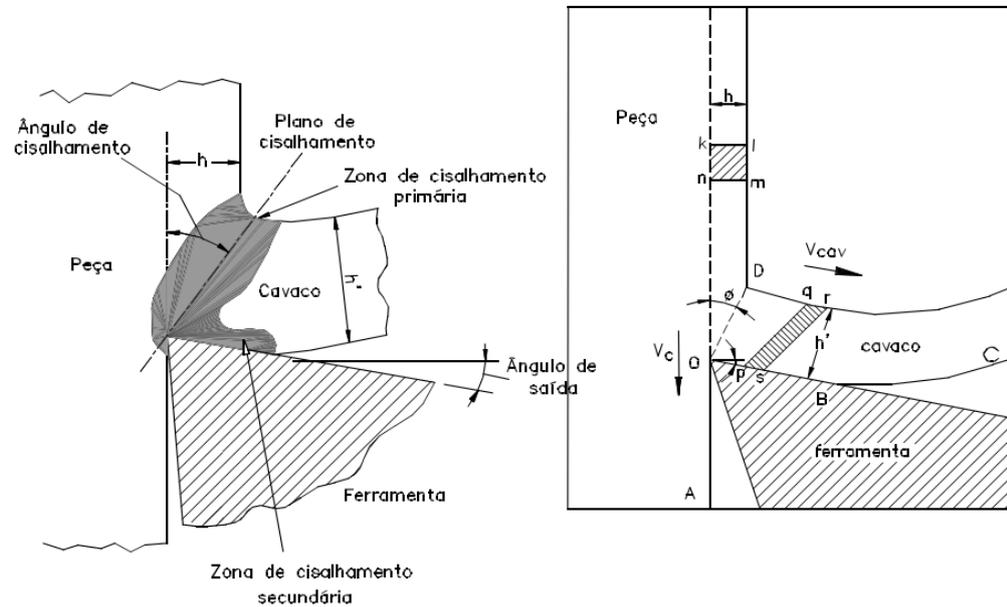


Figura 2.20 - Modelo para o mecanismo de formação do cavaco em corte ortogonal.

### 2.7.1 Corte Ortogonal

Para iniciar o estudo sobre o processo de usinagem pode-se compreender como corte ortogonal um modelo simplificado para a usinagem que descreve de forma satisfatória o mecanismo de formação do cavaco. Este processo pode ser caracterizado por meio de uma geometria bidimensional, havendo contato entre a ferramenta e a peça somente através da superfície de saída. A principal zona de deformação ocorre adjacente ao plano de cisalhamento, ou seja, a aresta de corte é perpendicular ao corte, não tendo escoamento lateral do cavaco. No corte ortogonal a aresta de cortante é reta, de maneira que a formação do cavaco é considerada como um fenômeno bidimensional, que é realizado num plano normal à aresta cortante, ou seja, no plano de trabalho (Norma ABNT NBR 6162/1989). A Figura 2.21 ilustra dois exemplos de usinagem do corte ortogonal nos processos de torneamento e fresamento.

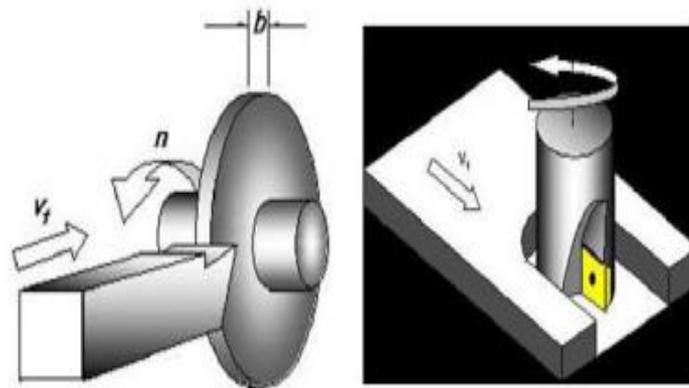


Figura 2.21 - Exemplo de corte ortogonal (Machado et al., 2011).

Segundo Machado et al. (2011), são admitidas algumas simplificações que permitem que um tratamento matemático do corte ortogonal seja estendido a outras operações de usinagem. Utiliza-se este modelo para estudar o mecanismo de formação do cavaco, os fenômenos envolvidos e as forças atuantes no processo, movendo-se em direção à cunha cortante.

A importância de se analisar a forma, o tamanho e a maneira como os cavacos se formam tem um impacto fundamental em processos de usinagem com grande volume de cavaco removido da peça. As principais variáveis que influenciam na formação do cavaco são a geometria da ferramenta e as condições de corte. O cavaco pode ser muito importante para os profissionais que lidam com processos de usinagem, apesar de que muitas vezes este passa despercebido. De maneira geral, o cavaco na indústria só é levado em consideração quando gera interferência negativa no processo ou no produto final. Portanto o estudo do cavaco pode trazer informações importantes ao processo de fabricação, e, conseqüentemente, na sua otimização.

Quanto maior a deformação do cavaco sendo formado, menor o ângulo de cisalhamento e maiores são os esforços de corte. Essa influência é marcante na usinagem de materiais ducteis, muito suscetíveis à deformação.

## 2.8 Estratégias de usinagem

A adequação e seleção de estratégias de usinagem em um processo de fresamento são todas especialmente críticas na indústria automobilística, aeroespacial e de ferramentas. Uma escolha adequada 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 significativos na produção (Toh, 2004; Sandvik, 2013).

Discutiu-se anteriormente, algumas estratégias de corte, como corte concordante ou discordante, simétrico ou assimétrico no posicionamento da fresa em relação à peça.

Toh (2004), citado por Zanuto (2012), 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 da fresa da peça de trabalho, fator que contribuiu para geração de altos valores de força de corte ocorridas nos primeiros impactos da ferramenta na peça. Algumas estratégias de usinagem normalmente utilizadas na indústria estão representadas na Figura 2.22.

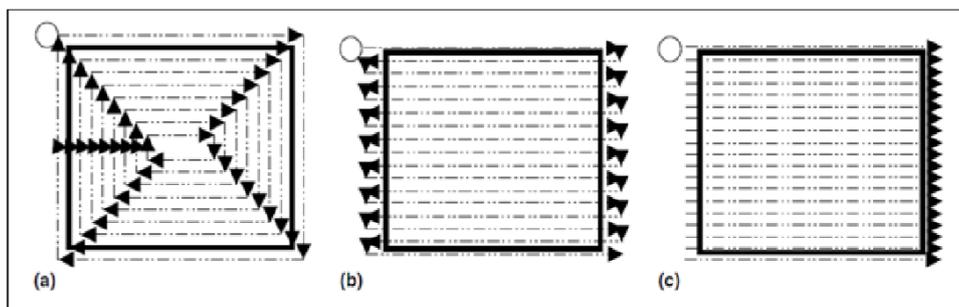


Figura 2.22 - Estratégias de: a) compensação; b) zig-zag; c) direção única (Toh, 2004).

### 2.8.1 Estratégias de entrada direta

Pode-se observar que todas as estratégias mostradas na Figura 2.22 são programadas para entrar na peça em sentido linear (entrada direta). Isto pode reduzir dramaticamente a vida da ferramenta, pois a espessura do cavaco na entrada e na saída do corte será grande nos

primeiros passes, até que a fresa entre pelo menos até metade de seu diâmetro (Sandvik, 2013), como mostrado pela Figura 2.23.

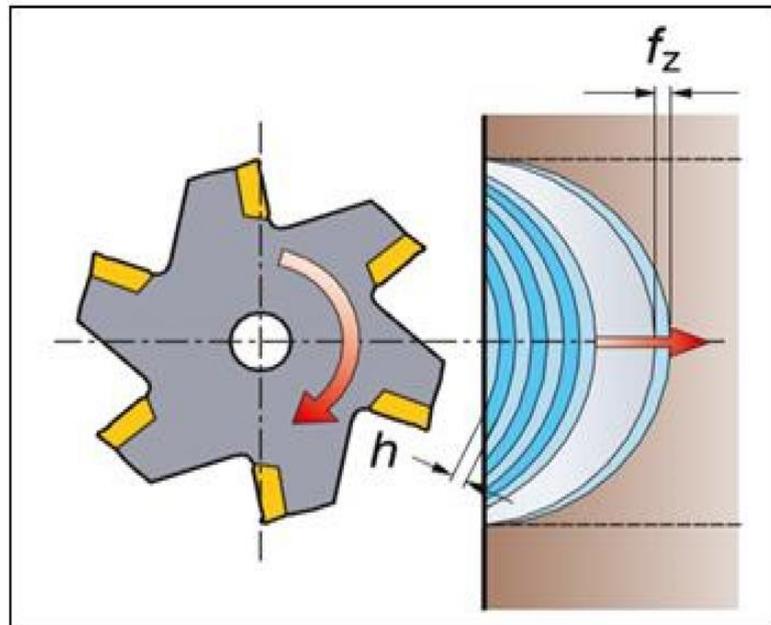


Figura 2.23 - Entrada direta com grande espessura de cavaco na entrada e saída do dente da peça (Sandvik, 2013).

## 2.8.2 Estratégias de entrada por rolagem

A entrada por rolagem consiste em uma entrada da ferramenta 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). Ao fazer a rolagem, a espessura do cavaco na saída do inserto da peça é sempre zero, reduzindo vibrações causadas pela redução brusca de esforços de corte, permitindo altos avanços e vida útil mais longa da ferramenta, conforme ilustrado pela Figura 2.24.

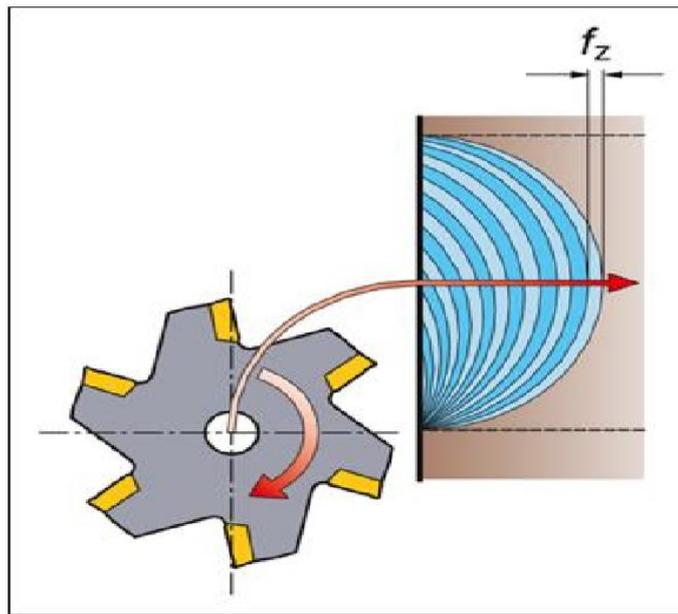


Figura 2.24 - Entrada por rolagem, espessura de cavaco na saída bem pequena (Sandvik, 2013).

De acordo com os estudos relacionados por Zanuto (2012) com relação às estratégias de entradas na peça, pode-se constatar que um fator relevante seria a espessura do cavaco na saída do inserto da peça. O ideal seria a estratégia onde a ferramenta tangencia a peça. Isto se consegue por meio da entrada por rolagem, aproximando a ferramenta da peça, com o maior raio ( $R$ ) possível, conforme mostra a Figura 2.25.

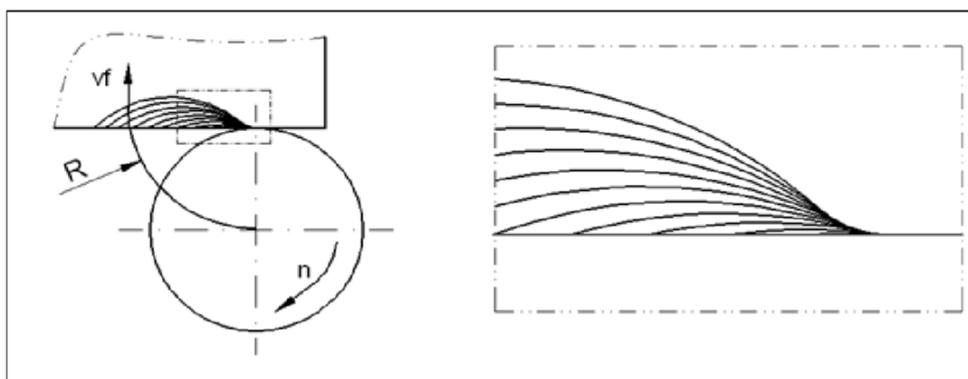


Figura 2.25 - Entrada hipotética ideal isolando-se o fenômeno da espessura do cavaco (adaptado de Zanuto, 2012).

Vale ressaltar que para determinar a entrada ideal, apenas a espessura do cavaco na saída da ferramenta, pode ser considerado como fenômeno isolado. Na prática, a entrada na peça por rolagem, por sua vez, demanda o ajuste de alguns parâmetros não necessários em

outras estratégias, tais como posicionamento da fresa um pouco afastada da peça para evitar o atrito da ferramenta no início do corte, além de definição do raio de entrada.

### 2.8.3 Estratégias de entrada por rampa

Na estratégia de entrada em rampa radial, pode ser observado que o contato da ferramenta ocorre de forma inclinada com relação à lateral da peça, iniciando gradualmente o contato das arestas de corte com a peça (ângulo  $\alpha$ ), fazendo com que os cavacos sejam mantidos em uma espessura aproximadamente constante representado pela Figura 2.26. Portanto os impactos não são reduzidos. Em função da baixa variação da espessura do cavaco, que mantém os esforços de corte praticamente constantes, levando a uma redução na vibração, que está diretamente relacionada à rugosidade da peça (Ventura et al., 2011).

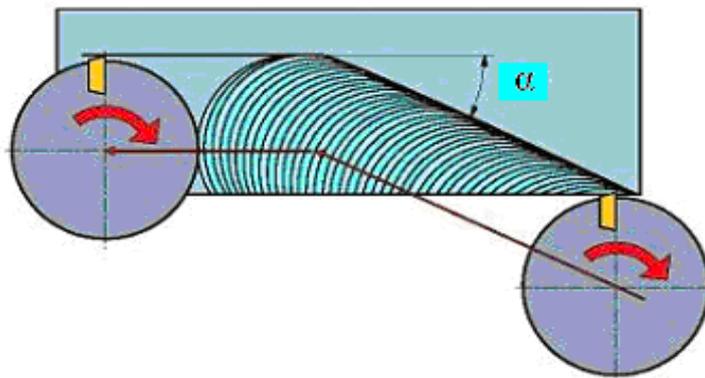


Figura 2.26 - Estratégia de entrada por rampa radial (Sandvik, 2013).

Ventura et al. (2011) realizaram ensaios utilizando-se das estratégias de entrada direta e por rolagem, 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 os resultados mostrados na Figura 2.27. Na estratégia por rolagem houve menor desgaste de flanco máximo da fresa. Porque o dente penetra a peça de maneira semelhante ao que ocorre no corte concordante, ou seja, iniciando a formação do cavaco com uma maior espessura e diminuindo até um valor mínimo, na saída do dente. Assim, tem-se uma menor geração de atrito na interface ferramenta-peça, reduzindo a contribuição para o aumento da temperatura média do corte, portanto, maior vida da ferramenta.

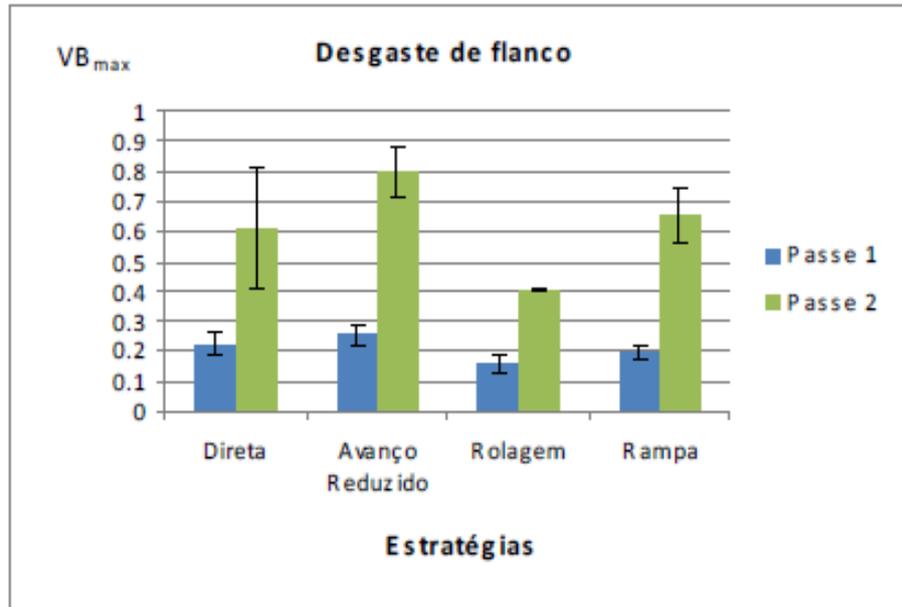


Figura 2.27 - Desgaste de flanco para diferentes estratégias de entrada (Ventura, et al., 2011).

## 2.9 Aço ABNT 1045

O aço ABNT 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono com 0,45% de carbono em sua composição. Possui boas propriedades mecânicas, como boa usinabilidade quando laminado a quente ou normalizado. É utilizado em aplicações mecânicas onde há exigência de resistência a tração até  $200 \text{ Kg/mm}^2$ , possui baixa temperabilidade, ou seja, pequena penetração de dureza na seção transversal, o ideal para se trabalhar é entre 180 a 300 HB. Possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. É utilizado na fabricação de diversos componentes onde seja necessária uma resistência mecânica superior a dos aços de baixo carbono convencionais. Com grande emprego na confecção de eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, grampos, braçadeiras, pinças, cilindros, pregos, colunas, peças automotivas e bases para matrizes (Ggdmets, 2014).

## 2.10 Modelagem das forças de usinagem

As forças de usinagem exercidas pela ferramenta de corte sobre a peça de trabalho durante uma ação de usinagem podem ser identificadas, a fim de controlar o desgaste da ferramenta e a ocorrência de vibrações, assim como, para melhorar a vida da ferramenta. O modelamento da força de usinagem no fresamento de faceamento é de grande importância para o controle, planejamento, seleção do processo de usinagem no que torna à escolha dos parâmetros como velocidade de corte, avanço por dente, profundidade radial e profundidade axial de corte.

A necessidade de se modelar a força de usinagem se deve pelo fato de que estes podem ser úteis para muitas aplicações, principalmente estimativa da potência consumida da máquina na operação de usinagem. Todavia, apesar da crescente sofisticação e utilização dos modelos mecanicistas desenvolvidos nos últimos anos, a capacidade de previsão das forças na superfície da fresa e suas componentes ainda são limitadas. Ozcelika e Bayramoglu (2006) realizou em seu trabalho modelagem da rugosidade superficial do fresamento plano de acabamento a altas velocidades de corte utilizando MRS. Lui et al. (2012) estabeleceu um modelo matemático, a fim de prever as forças de corte e torque durante nas operações de fresamento helicoidal em função do avanço, velocidade de corte, profundidade axial de corte, profundidade radial de corte e geometria da ferramenta. Kadirgama *et al.* (2009) utilizou MRS para investigar as variáveis mais influentes, modelar e otimizar a rugosidade superficial no processo de fresamento da liga de alumínio 6061-T6.

Jeyakumar et al. (2013) utilizou a metodologia de superfície de resposta como modelo para determinar os efeitos combinados dos parâmetros de corte, os resultados do modelo foram comparados com os resultados experimentais, apresentando boa confiabilidade ajudando na seleção de parâmetros de processo para reduzir a força de usinagem, o desgaste da ferramenta. Souza *et al.* (2011), utilizou MRS com múltiplas respostas e o algoritmo de evolução diferencial para avaliar a usinabilidade do aço ABNT 420.

## 2.11 Projeto e Análise de Experimentos

A flexibilidade e a adaptabilidade são atributos cada vez mais essenciais à prática da engenharia. Com as rápidas mudanças de tecnologias e a crescente demanda por produtos inovadores e menores custos, os engenheiros e responsáveis por projetos devem estar atentos à utilização e adequação de ferramentas para a otimização de produtos, sejam eles de baixa, média ou alta complexidade tecnológica. Uma técnica a ser empregada pode ser o Projeto e Análise de Experimentos (DOE).

Segundo Gomes (2010), um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes em que mudanças propositais são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema com o objetivo de observar e identificar a forma como as respostas desse sistema são afetadas em função das mudanças provocadas nas variáveis de entrada. Assim, a experimentação, segundo Montgomery (2005), se caracteriza como uma parte fundamental para o método científico na análise das diversas aplicações de engenharia.

O Projeto e Análise de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*), ainda conforme o autor citado, é então definido como o processo de planejamento dos experimentos para que dados apropriados sejam coletados e posteriormente avaliados e analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas. Assim, qualquer problema experimental deve ser confirmado por dois elementos: o projeto dos experimentos e a análise estatística dos dados.

Grine et al. (2010) e Haridy et al. (2011), citados por Brito (2012), afirmam que o Projeto e Análise de Experimentos (DOE) é um método estruturado e organizado, utilizado na determinação do relacionamento entre os diferentes fatores de entrada e saídas do processo, envolvendo a definição do conjunto de experimentos, nos quais todos os fatores relevantes são variados sistematicamente. Com a análise dos resultados experimentais, pode-se identificar os fatores que mais influenciam a resposta, as interações e as sinergias entre eles e as condições ótimas

As técnicas do Projeto e Análise de Experimentos podem ser aplicadas em diversas áreas de conhecimento, podendo ser um conjunto de técnicas ou ferramentas na implantação de novos processos e desenvolvimento de produtos. Grandes benefícios podem ser alcançados com o emprego das técnicas do DOE tais como:

- ✓ Melhoria do rendimento dos processos;
- ✓ Redução de variabilidade e maior conformidade com especificações nominais;
- ✓ Redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos;
- ✓ Redução de custos.

Podem ser citados três princípios básicos do Projeto de Experimentos, segundo Montgomery (2005), sendo eles aleatorização, a replicação e a blocagem. A aleatorização consiste na execução dos experimentos em ordem aleatória para que os efeitos desconhecidos dos fenômenos sejam distribuídos entre os fatores, aumentando a validade da investigação. A replicação é a repetição de um mesmo teste várias vezes, criando uma variação para a variável de resposta utilizada para avaliação do erro experimental. A blocagem deve ser utilizada quando não for possível manter a homogeneidade das condições experimentais. Esta técnica permite avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados.

Ainda de acordo com Gomes (2010) o emprego da abordagem estatística no Projeto e Análise de Experimentos necessita que as pessoas envolvidas nos experimentos tenham uma ideia clara a respeito do fenômeno que se pretende estudar, de como os dados serão coletados e de um entendimento básico das ferramentas de análise utilizadas. Assim, Montgomery (2005) propõe que o emprego do Projeto e Análise de Experimentos deve considerar as seguintes etapas:

1. Definição do problema;
2. Escolha dos fatores e definição dos níveis de trabalho;
3. Seleção das variáveis de resposta;
4. Escolha do projeto experimental;
5. Execução dos experimentos;
6. Análise estatística dos dados;
7. Conclusões e recomendações.

Em relação aos projetos experimentais, tem-se que técnicas mais utilizadas compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta. Dessa forma, a Tabela 2.1,

apresentada por Gomes (2010)), reúne as principais características relacionadas a cada uma dessas técnicas experimentais.

Entre os projetos experimentais apresentados na tabela a seguir, o presente trabalho utilizou a Metodologia de Superfície de Resposta, já que este estudo se propõe ao ajuste das estratégias de fresamento na operação de desbaste com alta velocidade de avanço para o aço ABNT 1045. Sendo assim, os principais conceitos que fundamentam a Metodologia de Superfície de Resposta são discutidos com maiores detalhes no item seguinte.

Tabela 2.1 - Características fundamentais das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos (Adaptado de Gomes, 2010).

Projeto experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
<b>Fatorial Completo</b> $2^k$	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis	Processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demanda maior tempo ou custo
<b>Fatorial Fracionado</b> $2^{(k-1)}$	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas	Não promove a varredura completa da região experimental	Processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada Corridas que demandam maior tempo ou custo
<b>Taguchi</b>	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos	Fornecer uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento Processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo
<b>Metodologia de Superfície de Resposta</b>	Permite a verificação de variações intermediárias do processo	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão

### 2.11.1 Metodologia de Superfície de Resposta

A metodologia de superfície de resposta (MSR) consiste em uma coleção de técnicas estatísticas e matemáticas úteis para desenvolvimento, melhora e otimização de processos. Segundo Montgomery (2005), a MSR é uma coleção de ferramentas matemáticas e estatísticas utilizada para a modelagem e análise de problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e o objetivo é a otimização desta resposta. Uma ampla aplicação da MSR é no cenário industrial, em situações em que uma grande quantidade de variáveis possam influenciar na qualidade ou medida de desempenho de um produto ou processo. E essa medida de desempenho ou qualidade característica é chamada de resposta (Myers e Montgomery, 1995).

Na maioria dos problemas, observa-se que as relações entre a resposta e as variáveis independentes são desconhecidas. Portanto, o passo inicial consiste em encontrar uma aproximação adequada que possa representar a resposta de interesse em função das variáveis do processo.

Normalmente, funções polinomiais são empregadas para a descrição de tais relações. Dessa forma, se a resposta for bem modelada por uma função linear, a relação aproximada pode ser representada pelo seguinte modelo de primeira ordem, descrito pela Equação 2.4.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.4)$$

onde:

$y$  – Resposta de interesse

$x_i$  – Variáveis independentes

$\beta_i$  – Coeficientes a serem estimados

$k$  – Número de variáveis independentes

$\varepsilon$  – Erro experimental

Se o sistema apresentar curvatura, então um polinômio de maior grau deve ser usado, como o modelo de segunda ordem descrito pela Equação 2.5.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.5)$$

Quase todos os problemas de superfície de resposta utilizam um ou ambos os modelos acima. Além disso, é improvável que o modelo polinomial se comporte como uma aproximação adequada para todo o espaço experimental coberto pelas variáveis independentes. Entretanto, para uma região específica, tais modelos têm se mostrado eficientes.

Para a estimação dos coeficientes definidos pelos modelos das Equações 2.4 e 2.5, o algoritmo tipicamente usado é o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares – OLS*). Assim, fica estabelecido que a função aproximada que relaciona a resposta de interesse com as variáveis do processo. Após a elaboração do modelo, a significância do mesmo é analisada através de um procedimento de ANOVA (Análise de Variância). O objetivo deste teste é verificar se o modelo é estatisticamente significativo. Através do ANOVA também pode ser verificado quais termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos. Dessa forma o ajuste dos modelos é representado através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), representando o percentual de variação na resposta que é expressa através do modelo construído. Associado a este coeficiente, encontra-se o  $R^2$  ajustado ( $R^2$  (adj.)), que considera o fato de que  $R^2$  tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Uma visão mais detalhada envolvendo o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, Análise de Variância e ajuste dos modelos pode ser observada em Paiva (2006), juntamente com outras análises importantes como a análise de resíduos e o teste de falta de ajuste (*Lack-of-fit*).

### 2.11.2 Arranjo Composto Central

Montgomery (2005) cita alguns arranjos utilizados para a aplicação da superfície de resposta, tais como o arranjo composto central, o arranjo de Box-Behnken, o equirradial, o pequeno arranjo composto e o híbrido. O arranjo composto central (*Box-Wilson Central Composite Design*, ou simplesmente, *Central Composite Design - CCD*), é arranjo experimental mais utilizado para a coleta de dados na Metodologia de Superfícies de Resposta na prática para ajustar um modelo de segunda ordem devido à sua relativa eficiência com respeito a quantidade de corridas requeridas.

O *Central Composite Design* (CCD) é uma matriz formada por três conjuntos distintos de elementos experimentais: primeiro conjunto de pontos fatoriais seguindo um arranjo

fatorial completo ou fracionado; um conjunto de pontos centrais e um conjunto de níveis extras denominados pontos axiais formados acidentalmente.

O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos. A distância entre o centro do arranjo (pontos centrais) e um ponto fatorial axial, comumente representada por  $\alpha$ , depende de certas propriedades desejadas para o experimento e do número de fatores envolvidos (Montgomery, 2005).

Em função da localização dos pontos axiais, os arranjos podem ser classificados como circunscritos (CCC), inscritos (CCI) ou de face centrada (CCF). A Figura 2.28 representa os diferentes tipos de um CCD.

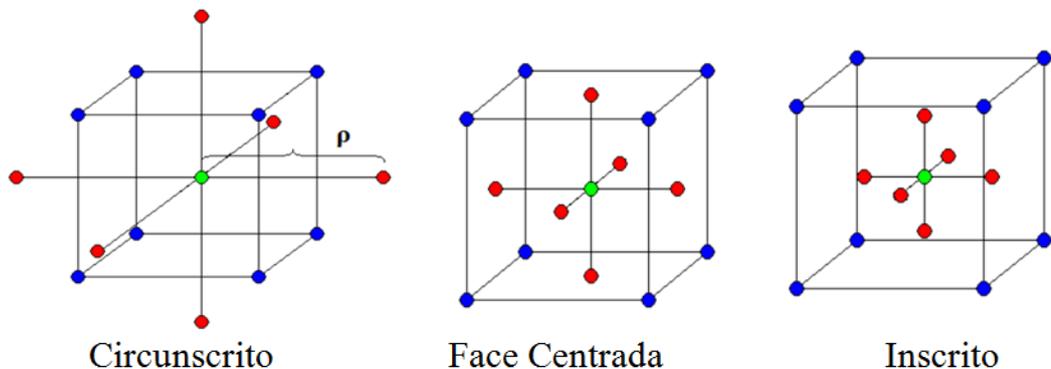


Figura 2.28 - Tipos de CCD.

O arranjo composto circunscrito (CCC) corresponde ao CCD original. Nele, os pontos axiais estão a uma distância  $\alpha$  dos pontos centrais, baseados nas propriedades desejadas do projeto. Este arranjo requer cinco níveis para cada fator. O arranjo de face centrada (CCF) caracteriza-se por dispor os pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja,  $\alpha = +1$  ou  $-1$ . Requer três níveis para cada fator. O Arranjo Inscrito (CCI) é adequado às situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados, quer por medida de segurança, quer por incapacidade física de realização. Neste caso, o CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites. Um CCI requer cinco níveis.

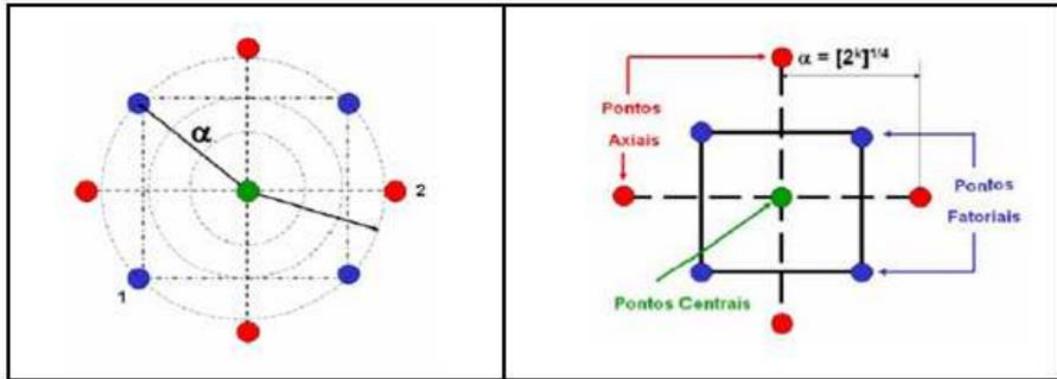


Figura 2.29 - Arranjo Composto Central para Três Fatores adaptado de Paiva, (2006).

Um arranjo CCC explora o maior espaço experimental possível, enquanto um CCI explora o menor. O valor de  $\alpha$  depende do número de experimentos da porção fatorial do CCD. Assim, segundo Box e Drapper (1987),  $\alpha = (2^k)^{1/4}$ , sendo  $k$  o número de fatores analisados, podem ser estimados pela Equação 2.6.

$$\alpha = (\text{número de experimentos})^{1/4} = (2^k)^{1/4} \quad (2.6)$$

O CCD ajusta-se, quando necessário, em um modelo polinomial de segunda ordem (Montgomery, 2005). Normalmente, um CCD com  $k$  fatores requer  $2^k$  corridas fatoriais,  $2k$  corridas axiais e, no mínimo, um ponto central, utilizando de três a cinco pontos centrais. Este modelo é adequado, uma vez que muitos processos podem ser aproximados por uma expansão em série de Taylor, truncada em um termo quadrático.

## Capítulo 3

# PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 Considerações iniciais

Os procedimentos e métodos experimentais realizados para o cumprimento do atual trabalho foram executados no Laboratório de Automação Manufatura (LAM) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Com a realização dos experimentos, obteve-se um conjunto de dados que permitiram fazer uma análise dos efeitos principais dos parâmetros e estratégias de corte, nas forças de usinagem, na vida da ferramenta e no volume de cavaco removido na operação de desbaste no fresamento de faceamento de alto avanço do aço ABNT 1045.

Portanto o presente capítulo apresenta o planejamento experimental e a metodologia utilizada nos ensaios, descrevendo características do material usinado, as especificações técnicas da ferramenta de corte, da máquina-ferramenta e dos equipamentos de monitoramento da força de usinagem e do desgaste da ferramenta.

## 3.2 Materiais

Durante os ensaios utilizou-se o aço carbono ABNT 1045 em estado normalizado, com dureza aproximada de 180 HV com composição química descrita na tabela 3.1. As dimensões do corpo de prova são 260 x 100 x 100 mm, mostradas na Figura 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química do aço ABNT 1045.

Material	C %	Mn %	P máx. %	S máx. %
Aço ABNT 1045	0,430-0,500	0,00-0,900	0,040	0,050

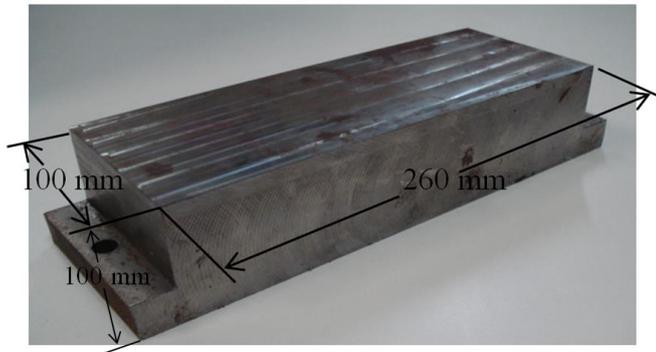


Figura 3.1 - Dimensões do corpo de prova do aço ABNT 1045.

A peça foi fixada de duas maneiras. Primeiramente fixou-se o corpo de prova pelas extremidades com parafusos sobre um dispositivo adaptado à base superior do dinamômetro, e este foi preso sobre a mesa do centro de usinagem, como pode ser visto na Figura 3.2. Este sistema de fixação foi usado apenas para a aquisição das forças de usinagem. Para os ensaios de vida, (segunda maneira) o corpo de prova foi preso direto na mesa do centro de usinagem conforme apresentado pela Figura 3.3.

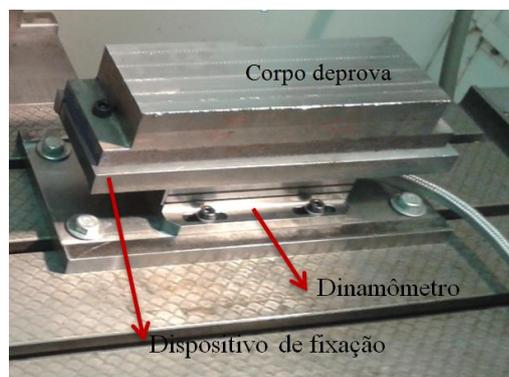


Figura 3.2 - Sistema de fixação do corpo de prova para aquisição das forças de usinagem.

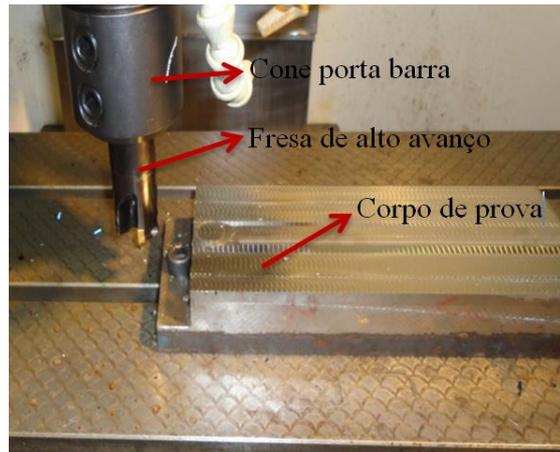


Figura 3.3 - Sistema de fixação do corpo de prova para os ensaios de vida.

### 3.3 Máquina

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem CNC marca Fadal com potência de 15kW e máxima rotação de 7500 rpm, comando Fadal conforme a Figura 3.4.



Figura 3.4 - Centro de usinagem Fadal (LAM).

### 3.4 Ferramenta

A ferramenta utilizada nos ensaios foi a fresa Coromill 210 (Sandvik-Coromant), fresa de topo diâmetro de 35 mm, com 3 insertos de cortes, ângulo de posição de 10°, ferramenta

empregada nos processos de fresamento com alto avanço em operações de desbaste. Ela é indicada para operações de faceamento com avanço por dente (até 2 mm/dente). Isto é possível em função do pequeno ângulo de posição, que possui o efeito de afinamento dos cavacos. Embora a profundidade de corte seja limitada a um  $a_p$  máximo de 1,2 mm, a elevada velocidade de avanço do fresamento torna esta operação altamente produtiva.

O código do suporte R210-035A32-09H apresenta fixação por haste cilíndrica, Inserto R210-090412M-PM GC 4230. A ferramenta foi fixada por meio de um suporte “cone porta barra” BT 40 diâmetro de 32 mm, rotação máxima 10000 rpm. A Figura 3.5 mostra a fresa Coromill 210. Depois de fixada no eixo arvore a fresa ficou com 70 mm balanço.

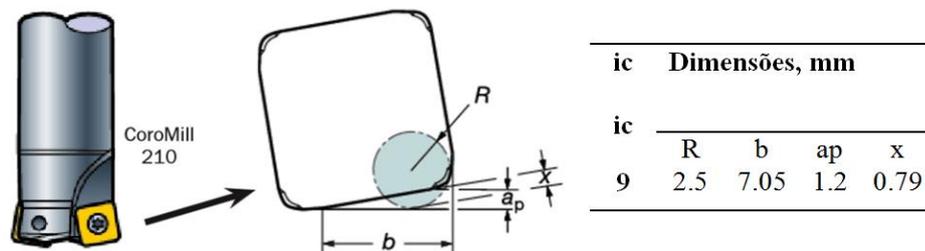


Figura 3.5 - Fresa Coromill 210 (Sandvik, 2013).

### 3.5 Instrumentos de medição

As visualizações e medições dos desgastes de flanco na superfície de folga das pastilhas ( $V_B$ ) foram obtidas em um analisador de imagem (*Global Image Analyser*) acompanhado do software (*Global Lab Image*). Este equipamento é constituído de um microscópio estereoscópico Olympus modelo SZ 61 com capacidade de ampliação de 45 vezes, acoplado a uma câmara de vídeo em um computador compatível, conforme Figura 3.6.



Figura 3.6 - Instrumentos de medição de desgaste, microscópio Olympus.

Um dinamômetro KISTLER modelo 9443B, um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de dados e programa para leitura e conversão dos dados de pico de Coulomb (pC) para Newton (N) foram utilizados nos ensaios para medição das forças de usinagem.

### 3.6 Planejamento experimental

A seguir são estabelecidos os procedimentos para o fresamento de topo do aço ABNT 1045 no centro de usinagem vertical CNC (Fadal). Os parâmetros de corte adotados como variáveis de entrada foram velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço por dente ( $f_z$ ) e profundidade axial de usinagem ( $a_p$ ). Todos os testes foram realizados a seco, na condição de corte concordante, com profundidade radial de corte ( $a_e$ ) constante igual a 20 mm. A faixa de exploração das variáveis de entrada foi determinada conforme dados do catálogo do fabricante da ferramenta de corte (Sandvik-Coromant). Dessa forma, a Tabela 3.2 apresenta as variáveis de entrada (fatores de controle) e seus respectivos níveis adotados de acordo com recomendações do fabricante de ferramentas. Torna-se importante ressaltar que os parâmetros de corte foram adotados segundo um arranjo CCD de superfície de resposta com vinte experimentos, pois um dos objetivos da pesquisa foi estudar o efeito isolado dos parâmetros, e a interação entre eles, tendo como meta, adequar e ajustá-los para a operação de desbaste no fresamento de topo de alto avanço do aço ABNT 1045.

Tabela 3.2 - Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios.

Parâmetros	Símbolos	Unidades	Nível Inferior	Nível Superior
Velocidade de Corte	vc	m/min	160	200
Avanço por dente	$f_z$	mm/dente	1,0	1,5
Profundidade de Corte	ap	mm	0,8	1,2

### 3.7 Aplicação da metodologia de superfície de resposta

A matriz experimental adotada foi o arranjo CCD de face centrada, contendo três fatores em dois níveis, oito pontos fatoriais, seis pontos axiais e seis pontos centrais, totalizando 20 experimentos. O valor adotado para  $\alpha$  foi 1,0. A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros de corte com seus níveis de trabalho, mantendo fixa a profundidade radial de corte ( $a_e$ ) de 20 mm.

Na primeira fase dos ensaios as respostas analisadas compreendem as forças de usinagem registradas pelo dinamômetro, durante a operação de fresamento com entrada direta da ferramenta na peça de trabalho, modelamento matemático das forças de usinagem máximas e forças e média (RMS), avaliando a influencia de cada parâmetro de corte na variação das forças.

Na segunda fase do trabalho o estudo foi dirigido para análise de vida da ferramenta, levando em consideração duas estratégias de entrada da ferramenta na peça, sendo elas por rolagem e entrada direta, onde o critério de fim de vida da ferramenta foi o desgaste de flanco. Também foi avaliado o volume de cavaco removido por unidade de tempo para as estratégias citadas acima.

Tabela 3.3 - Matriz experimental

Testes	Blocos	vc (m/min)	fz(mm)	ap (mm)
1	1	160	1	0,8
2	1	200	1	0,8
3	1	160	1,5	0,8
4	1	200	1,5	0,8
5	1	160	1	1,2
6	1	200	1	1,2
7	1	160	1,5	1,2
8	1	200	1,5	1,2
9	1	160	1,25	1
10	1	200	1,25	1
11	1	180	1	1
12	1	180	1,5	1
13	1	180	1,25	0,8
14	1	180	1,25	1,2
15	1	180	1,25	1
16	1	180	1,25	1
17	1	180	1,25	1
18	1	180	1,25	1
19	1	180	1,25	1
20	1	180	1,25	1

### 3.8 Medição de esforços

Durante a realização dos ensaios de usinagem, o movimento de corte seguiu uma trajetória linear no plano (x y) da peça com relação à ferramenta. Os ensaios de fresamento foram realizados no sentido de corte concordante, pois favorece a preservação da ferramenta,

na medida em que as direções dos vetores velocidade de corte e de avanço estão no mesmo plano da profundidade radial de corte ( $a_e$ ). Assim, foi programada uma rotina no CNC na qual a ferramenta usinasse cinco passes de 20 mm de largura cada um no eixo y e um comprimento de 260 mm no eixo x, tendo a dimensão do corpo de prova 260 x 100mm, o posicionamento da ferramenta foi de 70 mm antes do início do corte, e também 70 mm na saída da peça. Este procedimento foi utilizado para aquisição dos esforços de corte. Após cada passe os dados registrados pelo dinamômetro eram salvos em um microcomputador, anexo à máquina-ferramenta.

De acordo com Gorczyca (1987), as forças de usinagem podem ser representadas num sistema cartesiano, como mostra a Figura 3.7. A componente da força de usinagem na direção x é chamada  $F_x$ ; a componente de força de usinagem na direção y é chamada de  $F_y$ ; e consequentemente  $F_z$  é a componente de força de usinagem na direção z.

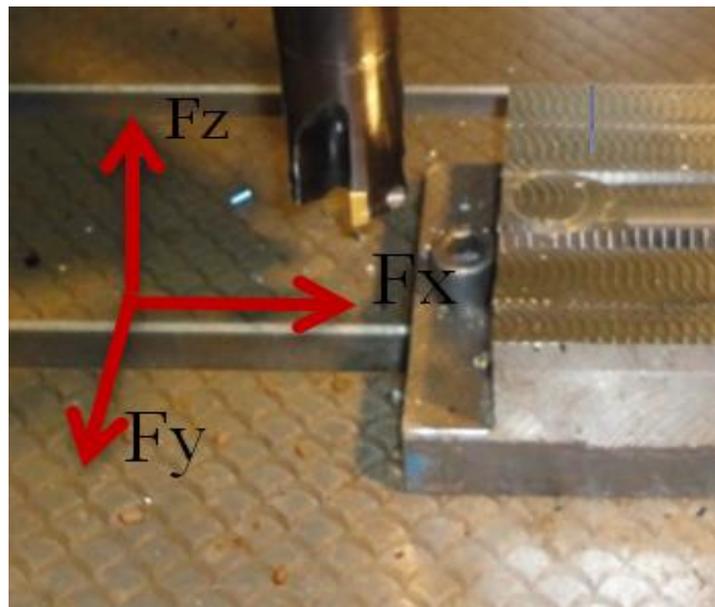


Figura 3.7 - Força de usinagem e suas componentes.

As componentes das forças de usinagem são representadas graficamente pela Figura 3.8.

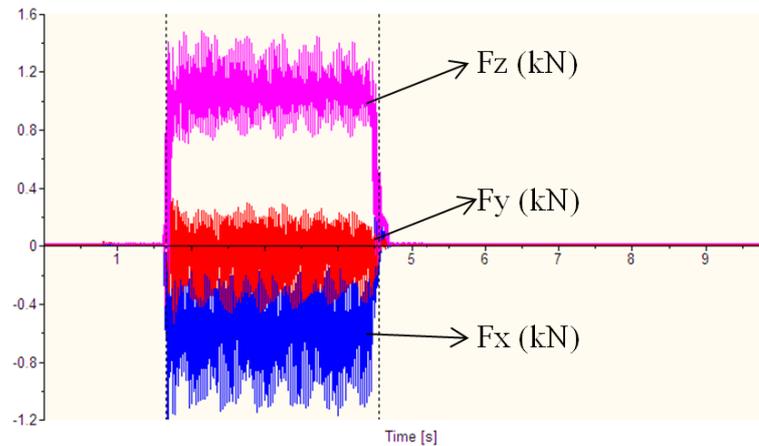


Figura 3.8 - Componentes das forças de usinagem adquiridas pelo dinamômetro.

Estas componentes também geraram dados que formaram uma matriz de três colunas, correspondendo às componentes de forças  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ . A medição das forças foi feita em função do intervalo do tempo de corte, ou seja, o tempo em que a ferramenta se desloca ao longo do corpo de prova, para cada experimento. Feita a coleta dos sinais de força referentes à usinagem dos corpos de prova, a força de usinagem máxima e o valor da força de usinagem média (RMS) foram obtidos conforme as Equações 3.1 e 3.2, respectivamente, onde (N) é o número de elementos dos vetores força de usinagem. O valor médio quadrático ou RMS (*Root Mean Square*). Também foi obtido a força a força ativa ( $F_t$ ) dada pela Equação 3.3

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.1)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N F_i^2} \quad (3.2)$$

$$F_t = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3.3)$$

### 3.9 Ensaios de vida da ferramenta

Para os ensaios de vida da ferramenta, foram utilizadas duas estratégias de entrada na peça, entrada direta e entrada por rolagem. Na estratégia de entrada por rolagem programou-se uma rotina de usinagem, na qual o posicionamento da ferramenta em relação à peça foi de uma folga 1 milímetro fazendo a entrada em raio no sentido horário. Os parâmetros de corte para os ensaios de vida nas duas estratégias de entrada foram valores intermediários, velocidade de corte de 180 m/min e avanço de 1,25 m/dente e o menor valor de profundidade axial de corte 0,8 mm em função dos bons resultados obtidos nos ensaios de força de usinagem.

Durante a execução do ensaio de vida, foram monitorados o desgaste de flanco da ferramenta e a remoção de cavaco. A ferramenta era levada ao microscópio para avaliação de possíveis desgastes, e a imagem do desgaste de flanco armazenadas em arquivo para o monitoramento dos insertos, quando o mesmo atingia um valor pré-estabelecido do desgaste era substituído para assegurar as mesmas condições iniciais de ensaio e os cavacos eram coletados, devidamente armazenados e catalogados. O procedimento se repetiu para todas os ensaios.

## Capítulo 4

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Considerações iniciais

O presente capítulo apresenta os resultados e a discussão dos ensaios experimentais apresentados no capítulo 3. Com a realização dos experimentos obteve-se os resultados que permitiram fazer o modelamento das forças de usinagem atuantes no processo de fresamento de faceamento de alto avanço do aço ABNT 1045.

### 4.2 Aquisição das forças de usinagem

A fim de avaliar os resultados obtidos para as forças de usinagem foram coletados os picos máximos do sinal para cada experimento, sendo estes representados graficamente na Figura 4.1. Pôde-se observar que os dois pontos de maior amplitude da força máxima de usinagem são quando há um alto avanço por dente ( $f_z=1,5$  mm/dente) e uma velocidade de corte baixa ( $v_c=160$ mm/min). A variação da profundidade axial de corte praticamente não influenciou na variação das forças de usinagem máximas.

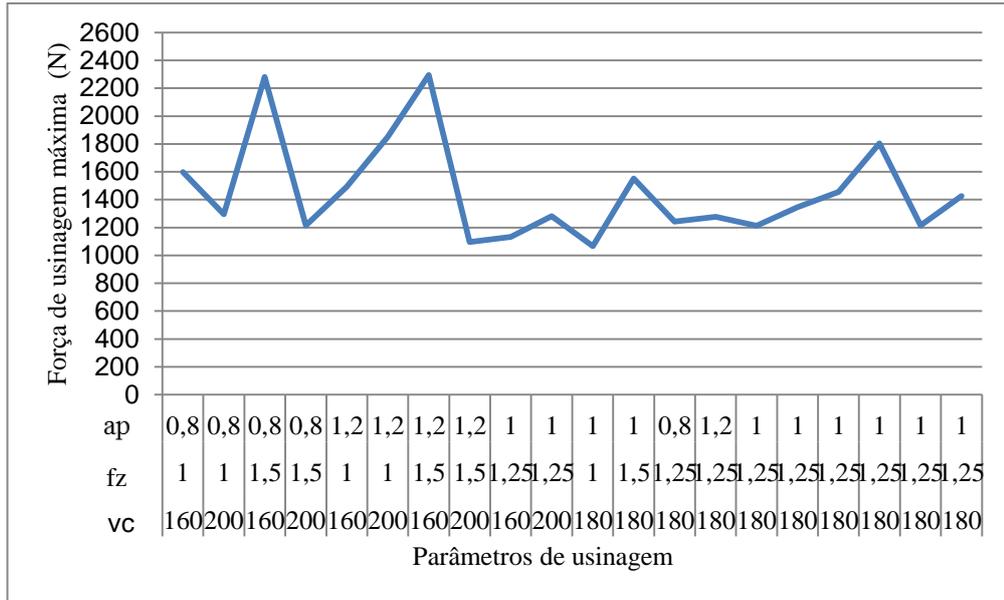


Figura 4.1 - Valores para as forças de usinagem máximas.

Para avaliação das forças de usinagem médias (RMS), utilizou-se o valor médio quadrático das componentes de força (Fx, Fy e Fz) para efetuar os cálculos e adequação dos dados, conforme apresentado pela Figura 4.2. Também pode-se observar que os pontos de maior amplitude das forças médias ocorrem com o aumento do avanço por dente em menores velocidades de cortes. A variação da profundidade axial de corte também não influencia na elevação das forças de usinagem médias (RMS). Observa-se que o comportamento das forças de usinagem máximas e médias (RMS) foram bastante similares comparando a qualidade dos dados obtidos nos ensaios experimentais.

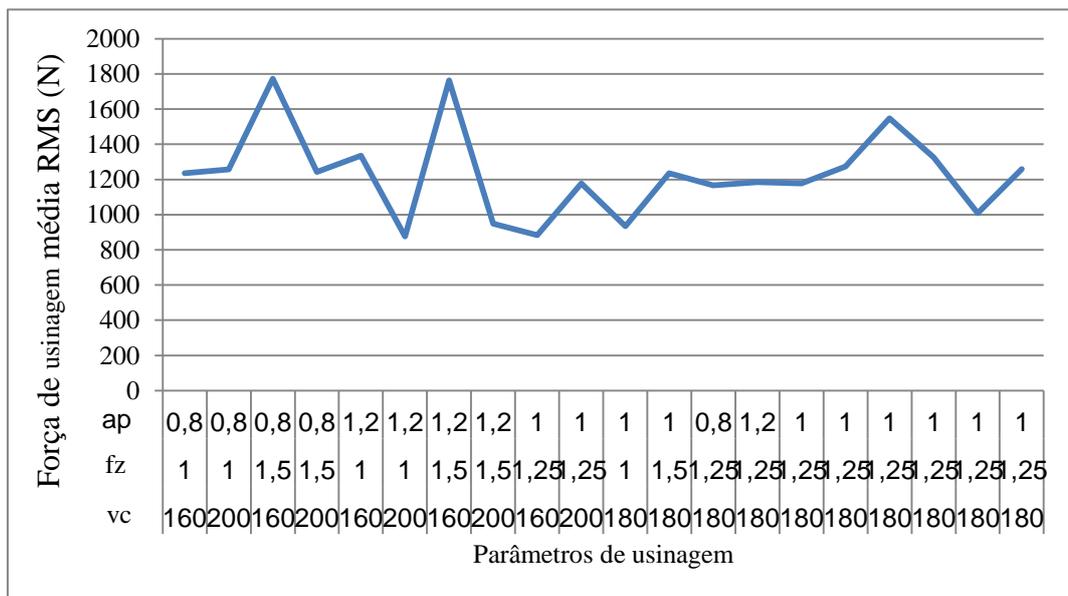


Figura 4.2 - Valores para as forças de usinagem médias.

Há uma elevação das forças de usinagem quando aumenta o avanço por dente, pois o aumento das forças tem relação direta com o aumento da seção de cavaco removida e também com a maior taxa de deformação, que possivelmente implica em maior encruamento. Com o aumento da velocidade de corte haverá também uma elevação da temperatura na interface cavaco ferramenta, sendo necessária uma menor tensão de cisalhamento do cavaco e, conseqüentemente, menor forças de usinagem.

## **4.3 Modelagem das forças de usinagem**

### **4.3.1 Análise de variância**

A partir dos resultados obtidos para as forças de usinagem máximas e médias nos experimentais a (Tabela 4.1) é possível estabelecer relações matemáticas entre estas respostas analisadas e os parâmetros de corte. O modelamento adotado foi através da metodologia de superfície de resposta de segunda ordem utilizado para representar a relação entre as forças de usinagem máximas e médias e as variáveis de entrada, foram a velocidade de corte, avanço por dente e profundidade axial de corte.

Com o intuito de avaliar os efeitos de cada parâmetro no processo e suas interações utilizou-se a técnica de análise de variância, e com isto fazer os ajustes necessários para adequação do modelo adotado.

Tabela 4.1 - Matriz das respostas experimentais.

Run Order	Pt Type	Blocos	vc (m/min)	fz(mm)	ap (mm)	Fu RMS (N)	Fu max (N)
1	1	1	-1	-1	-1	1236	1597
2	1	1	+1	-1	-1	1256	1295
3	1	1	-1	+1	-1	1773	2279
4	1	1	+1	+1	-1	1243	1214
5	1	1	-1	-1	+1	1334	1493
6	1	1	+1	-1	+1	875	1853
7	1	1	-1	+1	+1	1763	2293
8	1	1	+1	+1	+1	949	1095
9	-1	1	-1	0	0	883	1131
10	-1	1	+1	0	0	1176	1282
11	-1	1	0	-1	0	662	1065
12	-1	1	0	+1	0	1236	1551
13	-1	1	0	0	-1	1166	1241
14	-1	1	0	0	+1	1185	1278
15	0	1	0	0	0	1177	1212
16	0	1	0	0	0	1274	1345
17	0	1	0	0	0	1547	1455
18	0	1	0	0	0	1326	1805
19	0	1	0	0	0	1009	1215
20	0	1	0	0	0	1258	1425

A adequação dos modelos foi verificada através da Análise de Variância (ANOVA), feita também pelo software *MINITAB16*. São apresentados os resultados desta análise nas Tabela 4.2 e 4.3, mostrando que nem todos os fatores envolvidos são adequados, pois apenas a vc e a interação vc\*fz apresentam *p-values* inferiores a 5% de significância, para as forças de usinagem máximas e para as forças de usinagem médias todos os termos apresentam *p-values* superiores a 5% de significância. Os resultados da ANOVA também demonstram que, os modelos desenvolvidos apresentam falta de ajuste, pois os valores de ( $R^2(\text{adj})$ ) foram baixos mesmo com *p-values* maior que 5% para o item (*Lack-of-fit*). Todavia, estes dados podem ser corrigidos através do procedimento de redução dos modelos.

Tabela 4.2 - Análise de Variância para força de usinagem máximas.

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj ms	F	P
<b>Regressão</b>	<b>9</b>	<b>1637136</b>	<b>1637136</b>	<b>181904</b>	<b>2,38</b>	<b>0,096</b>
Linear	3	564838	564838	188279	2,47	0,122
<b>vc</b>	<b>1</b>	<b>421975</b>	<b>421975</b>	<b>421975</b>	<b>5,53</b>	<b>0,041</b>
fz	1	127994	127994	127994	1,68	0,225
ap	1	14869	14869	14869	0,19	0,668
Quadrática	3	324308	324308	108103	1,42	0,295
vc*vc	1	188324	5869	5869	0,08	0,787
fz*fz	1	109036	59805	59805	0,78	0,397
ap*ap	1	26948	26948	26948	0,35	0,566
<b>Interação</b>	<b>3</b>	<b>747990</b>	<b>747990</b>	<b>249330</b>	<b>3,27</b>	<b>0,068</b>
<b>vc*fz</b>	<b>1</b>	<b>673954</b>	<b>673954</b>	<b>673954</b>	<b>8,83</b>	<b>0,014</b>
vc*ap	1	35030	35030	35030	0,46	0,514
fz*ap	1	39005	39005	39005	0,51	0,491
Erro Residual	10	763537	763537	76354		
Falta de ajuste	5	524205	524205	104841	2,19	0,205
Erro puro	5	239332	239332	47866		
Total	19	2400674				

S = 276,3 R-Sq = 68,2% R-Sq(adj) = 39,6%

Tabela 4.3 - Análise de Variância para força de usinagem médias.

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regressão	9	655486	655486	72832	1,4	0,304
<b>Linear</b>	<b>3</b>	<b>430212</b>	<b>430212</b>	<b>143404</b>	<b>2,75</b>	<b>0,098</b>
<b>vc</b>	<b>1</b>	<b>221828</b>	<b>221828</b>	<b>221828</b>	<b>4,26</b>	<b>0,066</b>
<b>fz</b>	<b>1</b>	<b>176213</b>	<b>176213</b>	<b>176213</b>	<b>3,38</b>	<b>0,096</b>
ap	1	32171	32171	32171	0,62	0,45
Quadrática	3	49818	49818	16606	0,32	0,812
vc*vc	1	7069	3896	3896	0,07	0,79
fz*fz	1	10762	847	847	0,02	0,901
ap*ap	1	31987	31987	31987	0,61	0,451
Interação	3	175455	175455	58485	1,12	0,386
vc*fz	1	102497	102497	102497	1,97	0,191
vc*ap	1	72904	72904	72904	1,4	0,264
fz*ap	1	54	54	54	0	0,975
Erro Residual	10	520989	520989	52099		
Falta de ajuste	5	364279	364279	72856	2,32	0,188
Erro puro	5	156709	156709	31342		
Total	19	1176474				

S = 228,3 R-Sq = 55,7% R-Sq(adj) = 15,9%

Posteriormente realizou-se o ajuste do modelo com técnica de remoção de termos não significantes. A estratégia adotada para a remoção dos termos não significativos foi o aumento do  $R^2(\text{adj.})$ , a fim de aumentar a capacidade representativa dos termos envolvidos no processo. Para a adequação do modelo foi necessário a remoção de um *outlier* e um ponto central obtendo uma nova matriz experimental com 19 experimentos.

Tabela 4.4 - Matriz das respostas experimentais ajustada.

Run Order	PtType	Blocos	vc (m/min)	fz(mm)	ap (mm)	Fu RMS (N)	Fu max (N)
1	1	1	-1	-1	-1	1236	1597
2	1	1	+1	-1	-1	1256	1295
3	1	1	-1	+1	-1	1773	2279
4	1	1	+1	+1	-1	1243	1214
5	1	1	-1	-1	+1	1334	1493
6	1	1	+1	-1	+1	875	1853
7	1	1	-1	+1	+1	1763	2293
8	1	1	+1	+1	+1	949	1095
9	-1	1	-1	0	0	<i>outlier</i>	<i>outlier</i>
10	-1	1	+1	0	0	1176	1282
11	-1	1	0	-1	0	662	1065
12	-1	1	0	+1	0	1236	1551
13	-1	1	0	0	-1	1166	1241
14	-1	1	0	0	+1	1185	1278
15	0	1	0	0	0	1177	1212
16	0	1	0	0	0	1274	1345
17	0	1	0	0	0	1326	1455
18	0	1	0	0	0	1009	1215
19	0	1	0	0	0	1258	1425

Após a adequação dos modelos, foram obtidos novos valores apresentados através da Análise de Variância (ANOVA), obtendo um modelo ajustado com  $R^2(\text{adj})$  igual a 85,40% para força de usinagem máxima e 82,64% para força de usinagem média. As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam novos valores para Análise de Variância do modelo reduzido.

Tabela 4.5 - Análise de Variância ajustado para força de usinagem máxima.

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj ms	F	P
<b>Regressão</b>	<b>8</b>	<b>1988328</b>	<b>1988328</b>	<b>248541</b>	<b>12,07</b>	<b>0,001</b>
<b>Linear</b>	<b>3</b>	<b>775016</b>	<b>820205</b>	<b>273402</b>	<b>13,28</b>	<b>0,001</b>
vc	1	632153	677342	677342	32,9	0
fz	1	127994	127994	127994	6,22	0,034
ap	1	14869	14869	14869	0,72	0,417
<b>Quadrática</b>	<b>2</b>	<b>465322</b>	<b>465322</b>	<b>232661</b>	<b>11,3</b>	<b>0,004</b>
vc*vc	1	463677	220880	220880	10,73	0,01
fz*fz	1	1646	1646	1646	0,08	0,784
<b>Interação</b>	<b>3</b>	<b>747990</b>	<b>747990</b>	<b>249330</b>	<b>12,11</b>	<b>0,002</b>
vc*fz	1	673954	673954	673954	32,73	0
vc*ap	1	35030	35030	35030	1,7	0,224
fz*ap	1	39005	39005	39005	1,89	0,202
Erro residual	9	185307	185307	20590		
Falta de ajuste	5	133306	133306	26661	2,05	0,253
Erro puro	4	52001	52001	13000		
Total	17	2173635				

Tabela 4.6 - Análise de Variância ajustado para força de usinagem média.

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<b>Regressão</b>	<b>7</b>	<b>1055496</b>	<b>1055496</b>	<b>150785</b>	<b>11,45</b>	<b>0</b>
<b>Linear</b>	<b>3</b>	<b>659476</b>	<b>753213</b>	<b>251071</b>	<b>19,06</b>	<b>0</b>
vc	1	371481	465218	465218	35,32	0
fz	1	255823	255823	255823	19,43	0,001
ap	1	32171	32171	32171	2,44	0,149
<b>Quadrática</b>	<b>2</b>	<b>220619</b>	<b>220619</b>	<b>110309</b>	<b>8,38</b>	<b>0,007</b>
vc*vc	1	128442	220102	220102	16,71	0,002
fz*fz	1	92176	92176	92176	7	0,024
<b>Interação</b>	<b>2</b>	<b>175401</b>	<b>175401</b>	<b>87701</b>	<b>6,66</b>	<b>0,015</b>
vc*fz	1	102497	102497	102497	7,78	0,019
vc*ap	1	72904	72904	72904	5,54	0,04
Erro Residual	10	131697	131697	13170		
Falta de ajuste	6	70287	70287	11715	0,76	0,635
Erro Puro	4	61410	61410	15353		
Total	17	1187193				

A interpretação da tabela ANOVA é feita por meio do valor da probabilidade P; níveis abaixo do nível de significância ( $\alpha=0,05$  ou 5%) afirmam que hipótese inicial adotada para estes casos foi rejeitada. Portanto, tais fatores influenciam na variação da força máxima de usinagem. Fazendo a análise, os resultados mostram que os parâmetros que influenciam

estatisticamente nas forças de usinagem máximas são a velocidade de corte ( $vc$ ) e o avanço por dente ( $fz$ ) como também a interação  $vc*fz$ , e a profundidade de corte axial não influencia a resposta.

A Figura 4.3 mostra a influência dos efeitos principais na força máxima de usinagem. A velocidade de corte apresenta maior influência, seguida pelo avanço por dente, e a influência não significativa da profundidade axial de corte.

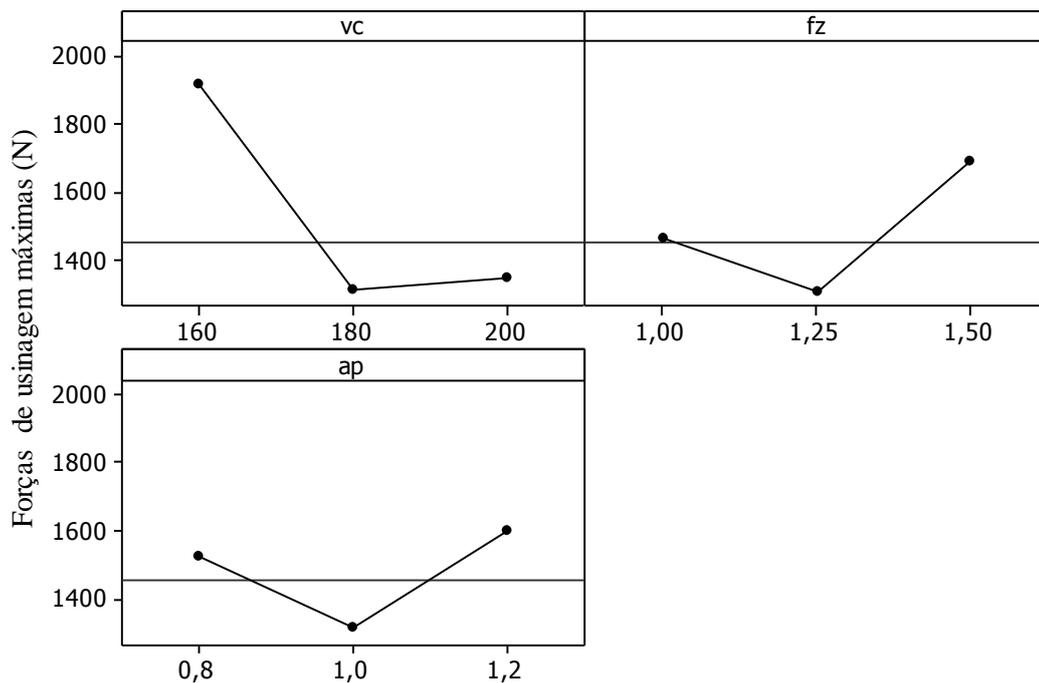


Figura 4.3 - Análise dos efeitos principais da ANOVA para as força de usinagem máxima.

Analisando os resultados obtidos para as força de usinagem média apresentada pela Figura 4.4 verificar-se a influencia dos efeitos principais na força média de usinagem. A velocidade de corte apresenta maior influência, seguida pelo avanço por dente, e a influência não significativa da profundidade axial de corte, assim como através das interações  $vc*fz$  e  $vc*ap$ .

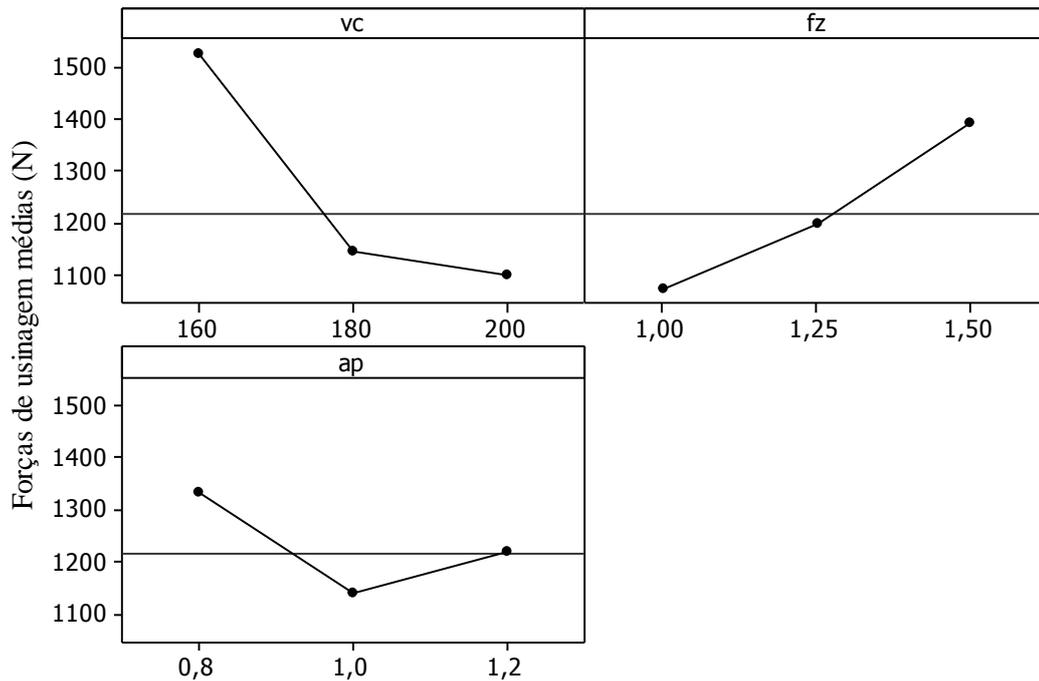


Figura 4.4 - Análise dos efeitos principais da ANOVA para as força de usinagem média.

Pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.4, que com menores valores da velocidade de corte as forças de usinagem aumentam, pois a pressão específica de corte é maior. Com o crescimento dos valores da velocidade de corte há elevação da temperatura tendendo a diminuir a pressão específica de corte, devido à maior deformação e menor dureza na região do cisalhamento do cavaco e também dos coeficientes de atrito entre a ferramenta-peça e ferramenta-cavaco, reduzindo as forças. Com maior velocidade de avanço tem se uma maior seção transversal do cavaco, gerando maiores deformações, menor ângulo de cisalhamento, e conseqüentemente maiores forças de usinagem. A profundidade axial de corte foi o parâmetro que menos influenciou nas forças de usinagem. Este fato pode ser explicado pela pequena faixa de variação da profundidade axial de corte ( $ap= 0,8-1,2$ ).

Após a verificação e adequação dos modelos, os mesmos foram reduzidos e ajustados através da remoção dos termos não significativos, tendo-se como critério para a remoção dos termos não significativos o aumento do valor de  $R^2(adj.)$  e a redução da variância  $S$  dos modelos. A Tabela 4.7 indica os novos termos ajustados para as forças de usinagem máximas e a Tabela 4.8 apresenta os termos ajustados para as forças de usinagem médias. As equações 4.1 e 4.2 apresentam os valores finais para força de usinagem máxima e média (RMS) respectivamente.

Tabela 4.7 - Termos ajustados para força de usinagem máxima.

Termos	Coeficientes	SE Coef_1	T	P
<b>Constante</b>	<b>1310,08</b>	<b>45,58</b>	<b>28,744</b>	<b>0</b>
<b>vc</b>	<b>-283,85</b>	<b>45,86</b>	<b>-6,189</b>	<b>0</b>
<b>fz</b>	<b>113,13</b>	<b>43,24</b>	<b>2,617</b>	<b>0,026</b>
ap	38,56	43,24	0,892	0,393
<b>vc*vc</b>	<b>322</b>	<b>64,66</b>	<b>4,98</b>	<b>0,001</b>
<b>vc*fz</b>	<b>-290,25</b>	<b>48,34</b>	<b>-6,004</b>	<b>0</b>
vc*ap	66,17	48,34	1,369	0,201
fz*ap	-69,83	48,34	-1,444	0,179

$$Fu (\text{Máxima}) = 1310.08 - 283.83*vc + 113.13*fz + 38.56*ap + 322.00*vc^2 - 290.25*vc*fz + 66.17*vc*ap - 69.83*fz*ap \quad (4.1)$$

Coeficientes para força de usinagem média.

Tabela 4.8 - Termos ajustados para força de usinagem média.

Termos	Coef	SE Coef_1	T	P
<b>Constante</b>	<b>1174,43</b>	<b>32,93</b>	<b>35,66</b>	<b>0</b>
<b>vc</b>	<b>-213,27</b>	<b>33,14</b>	<b>-6,436</b>	<b>0</b>
<b>fz</b>	<b>132,75</b>	<b>31,24</b>	<b>4,249</b>	<b>0,001</b>
ap	-56,72	31,24	-1,815	0,097
<b>vc*vc</b>	<b>139,25</b>	<b>46,72</b>	<b>2,981</b>	<b>0,013</b>
<b>vc*fz</b>	<b>-113,19</b>	<b>34,93</b>	<b>-3,24</b>	<b>0,008</b>
<b>vc*ap</b>	<b>-95,46</b>	<b>34,93</b>	<b>-2,733</b>	<b>0,019</b>

$$Fu (\text{RMS}) = 1174.43 - 213.27*vc + 132.75*fz - 56.72*ap + 139.25*vc^2 - 113.19*vc*fz - 95.46*vc*ap \quad (4.2)$$

Tabela 4.9 - Ajuste e variação dos modelos reduzidos finais.

Resposta	Modelo completo		Modelo reduzido	
	R <sup>2</sup> (adj.) (%)	S	R <sup>2</sup> (adj.) (%)	S
Fu (Max.)	39,60	228,3	85,40	136,7
Fu (RMS)	15,96	276,3	82,64	98,80

Os resultados mostrados na Tabela 4.9 indicam que os modelos reduzidos se caracterizam como expressões de boa confiabilidade, já que estes modelos apresentaram ajustes superiores a 80%. Portanto, o procedimento de redução melhorou o ajuste do modelo de força de usinagem média elevando-se para 82,64% e a força de usinagem máxima atingiu um valor de ajuste de 85,40%. Além dos bons ajustes obtidos, o termo (*Lack-of-Fit*) falta de ajuste não foi significativo.

### 4.3.2 Análise dos resíduos

É de grande importância a análise dos resíduos por se caracterizar como um importante procedimento para a obtenção de modelos matemáticos que possam representar bem as respostas de interesse. Os resíduos são definidos como a diferença entre o valor previsto pelo modelo e o valor observado experimentalmente para uma determinada condição. Ainda, segundo Montgomery (2005), afirma-se que eles devem ser normais, aleatórios e não correlacionados. Assim, os resíduos obtidos nos modelos reduzidos foram analisados utilizando o software *MINITAB*.

É sempre prudente checar se o modelo de previsão obtido representa bem a relação entre as variáveis de entrada. Para isso, uma análise sobre os resíduos encontrados podem fornecer muitas informações. Os resíduos são normais para todas as respostas, pois apresentaram *p-values* maiores que 5% de significância para força de usinagem máxima (*P-value* = 0,084) e para força de usinagem média (*P-value* 0,347). Nas Figuras 4.5 e 4.6 observa-se que os resíduos são normais, apresentam-se de forma aleatória e não são correlacionados. Assim pode-se constatar a boa confiabilidade dos modelos de forças obtidas neste trabalho.

Resíduo para força de usinagem máxima

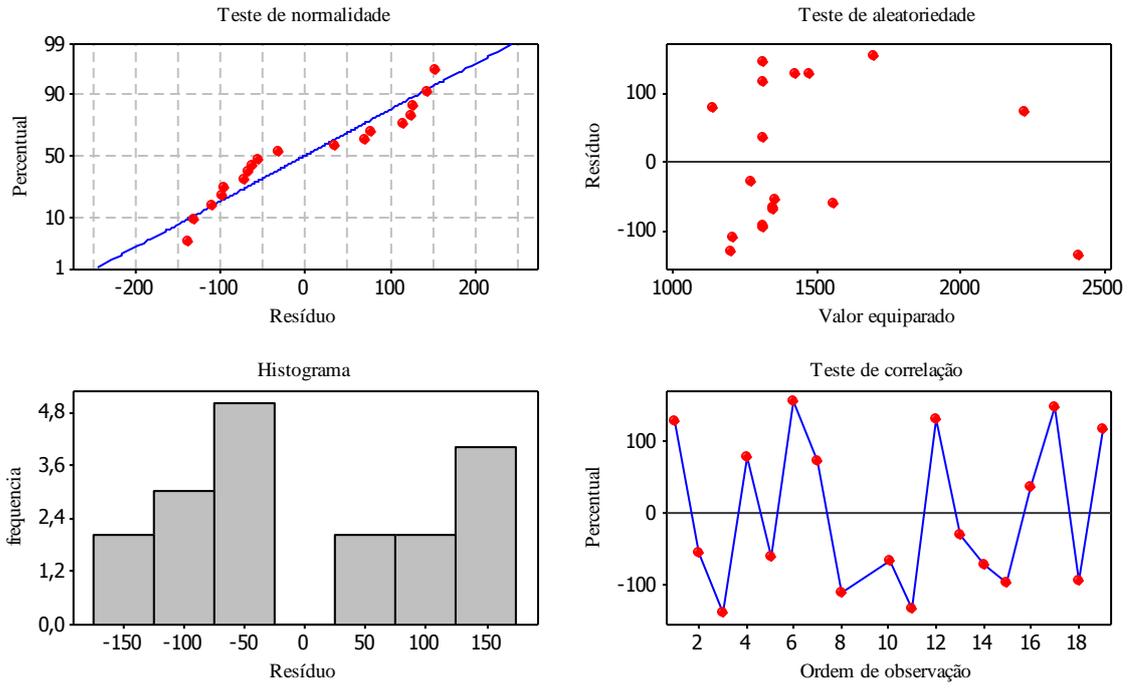


Figura 4.5 - Análise de resíduos para força de usinagem máxima.

Resíduo para força de usinagem média

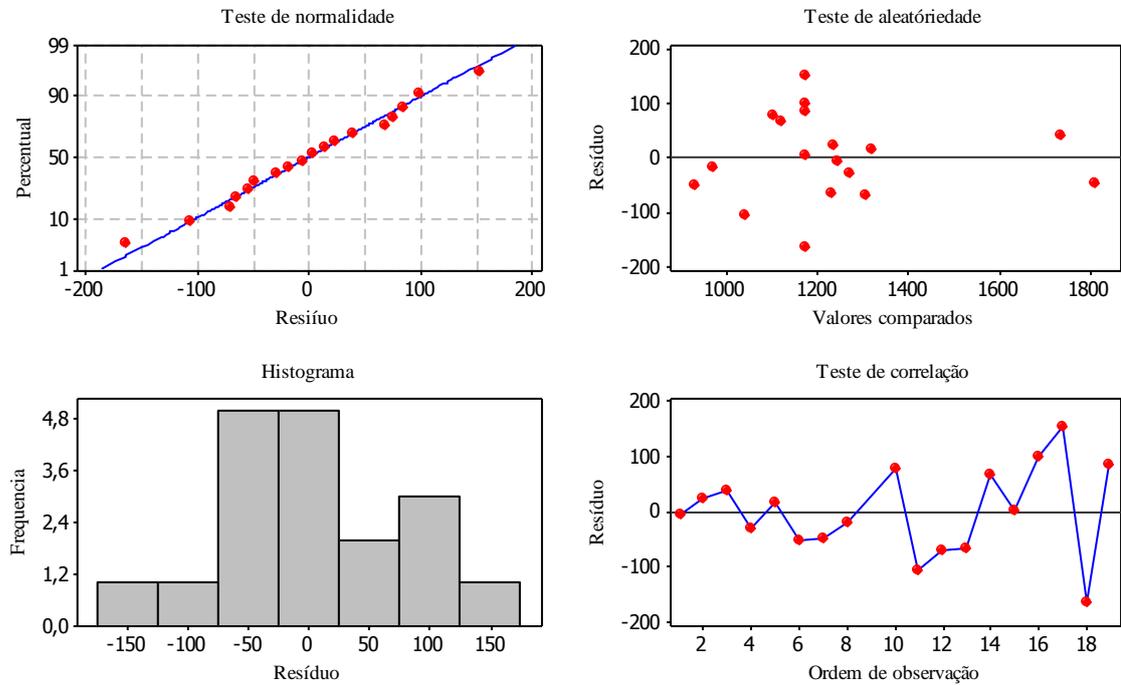


Figura 4.6 - Análise de resíduos para força de usinagem média.

### 4.3.3 Superfícies de resposta

Para obtenção das superfícies de resposta estabeleceu-se uma relação entre os parâmetros de corte estudados com as respostas de forças de usinagem máximas e médias. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam a influencia da velocidade de corte, avanço por dente e profundidade axial de corte na força de usinagem máxima. Observa-se nestas figuras que a força de usinagem decresce com o aumento da velocidade de corte. Ao contrario, as forças de usinagem aumentam com o aumento do avanço por dente da fresa. No entanto, a profundidade axial de corte não teve influencia significativa nas variações da força de usinagem máxima.

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam as superfícies de resposta para forças de usinagem médias em função das condições de corte velocidade de corte, avanço por dente e profundidade axial de corte. Observa-se um comportamento análogo ao analisado anteriormente.

Conforme citado anteriormente para menores valores de velocidade de corte, a pressão especifica é maior o que gera maiores forças de usinagem; ao contrário se aumenta a velocidade de corte decrescem as forças de usinagem porque há uma elevação da temperatura na interface cavaco-ferramenta. Este calor gerado no plano de cisalhamento pode até trazer benefícios para a usinagem, porque o aumento da temperatura na zona primária e secundária, provoca uma redução na resistência mecânica do material da peça para dar continuidade à deformação plástica, facilitando o escoamento do cavaco durante o processo e provocando a diminuição das forças de usinagem. Com o aumento do avanço por dente tem-se uma maior seção transversal do cavaco aumentando o volume de material removido por unidade de tempo, resultando em maiores esforços gerada no processo. A profundidade axial de corte isoladamente não influenciou o aumento das forças de usinagem, pois com seu aumento de 0,8 a 1,2 mm não foi significativo para o aumento das forças de usinagem.

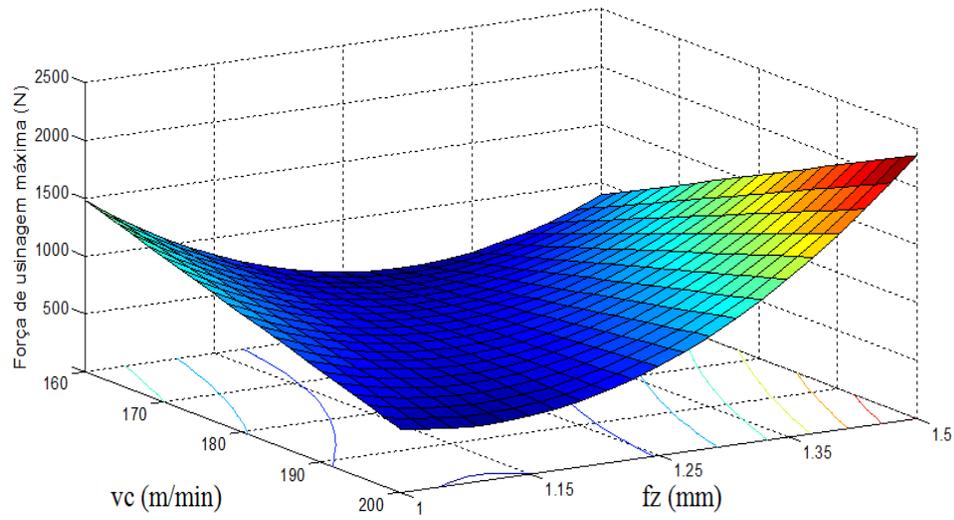


Figura 4.7 - Força de usinagem máxima em função de vc x fz;  $ap=1$  mm.

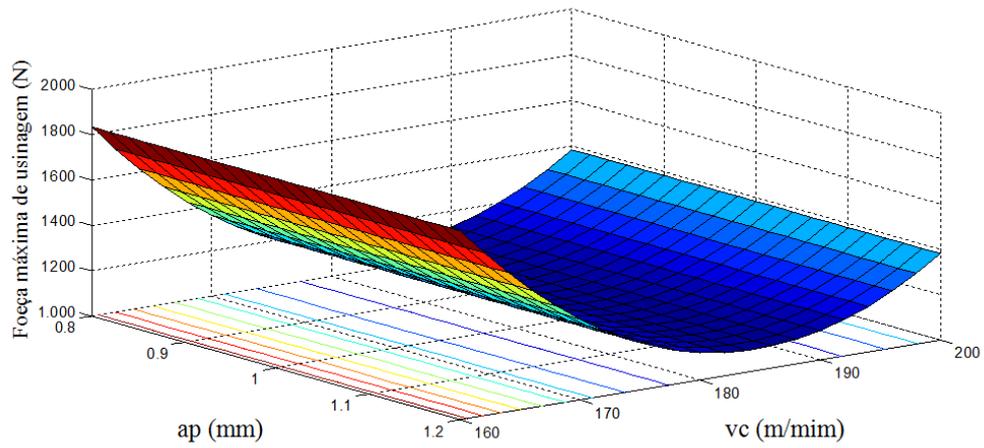


Figura 4.8 - Força de usinagem máxima em função de vc x ap;  $fz=1,25$  mm.

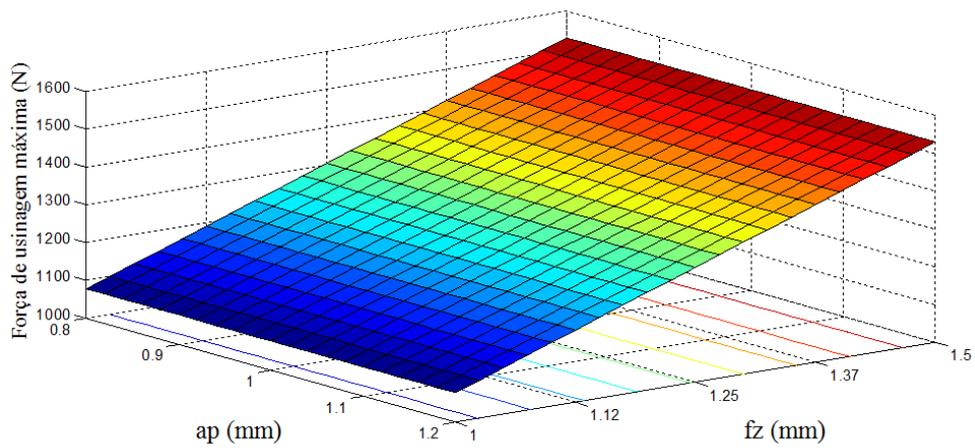


Figura 4.9 - Força de usinagem máxima em função de ap x fz;  $vc=180$  m/mm.

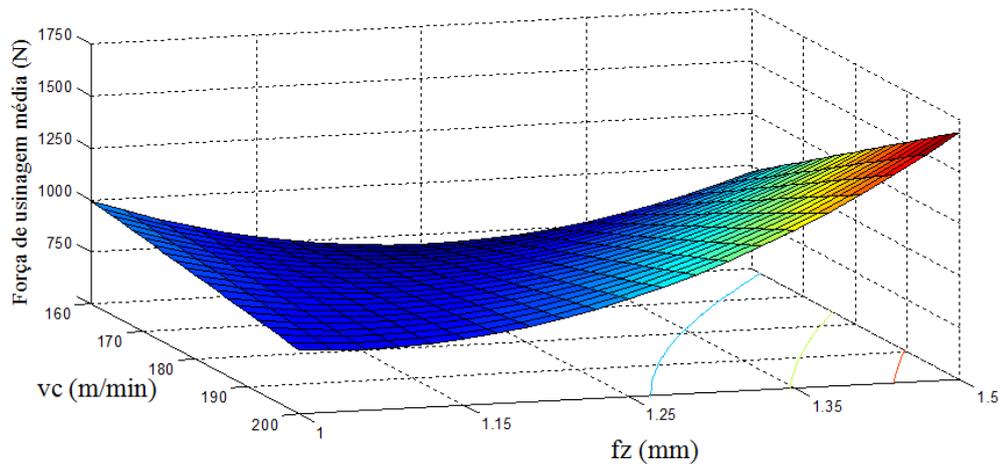


Figura 4.10 - Força de usinagem média em função de vc x fz;  $a_p=1$  mm.

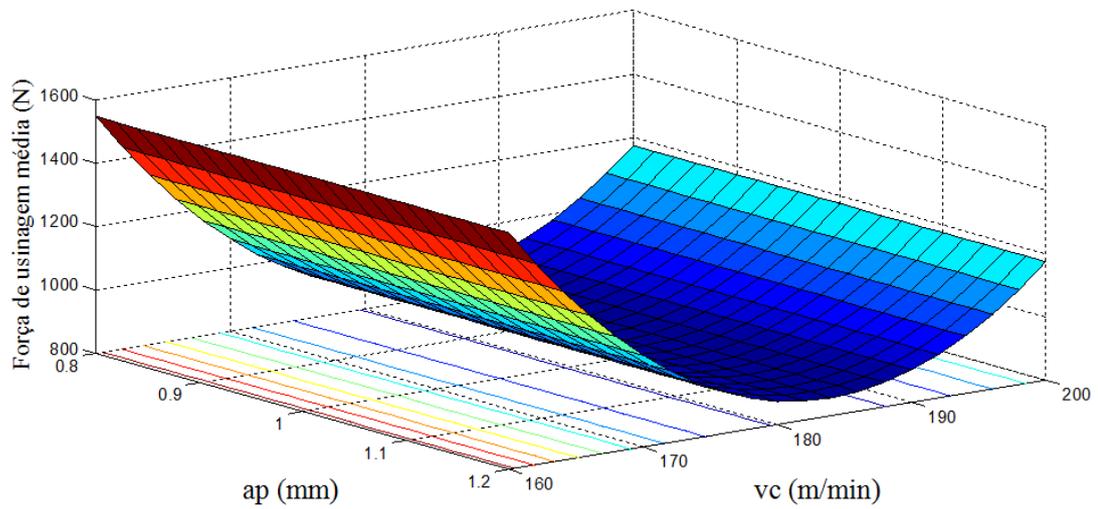


Figura 4.11 - Força de usinagem média em função de ap x vc;  $f_z=1,25$  mm.

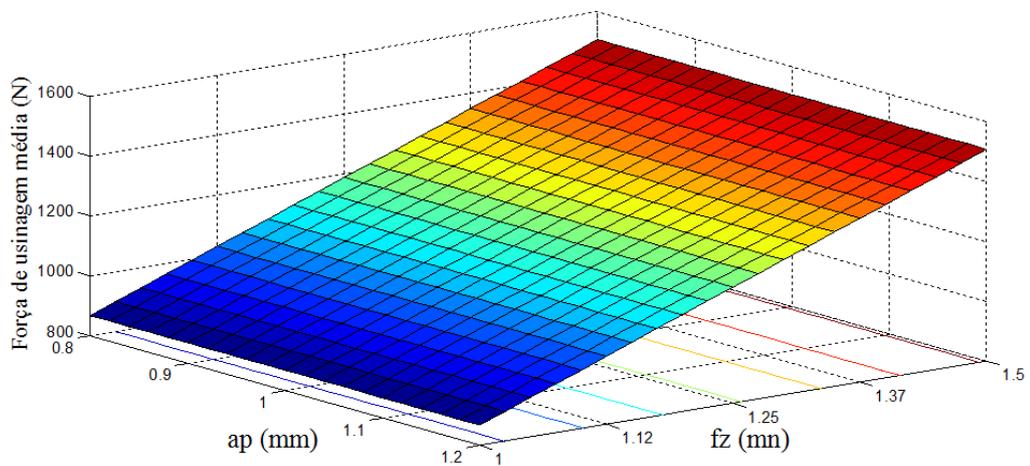


Figura 4.12 - Força de usinagem média em função de ap x fz;  $vc=180$  m/min.

## 4.4 Força ativa e potência de corte

Vimos anteriormente às forças de usinagem máximas e forças de usinagem médias. Para determinar adequadamente estas forças, foram primeiramente avaliadas as suas componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  conhecidas pela aquisição do dinamômetro, assim calculados as forças de usinagem máximas e médias através da soma vetorial.

Interpretar e analisar as forças de usinagem que agem sobre a cunha de corte da ferramenta e o estudo de suas componentes, é de fundamental importância, pois possibilita a compreensão e determinação das condições de corte e potência necessária para o corte.

Força ativa ( $F_t$ ) é a principal componente da força de usinagem  $F(u)$  usada para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta, que pode ser descrita como sendo a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção do corte. Assim, através da resultante de força ativa ( $F_t$ ) é possível calcular a potência ativa.

A Força passiva é a componente que não contribui para a potência ativa, pelo fato de ser perpendicular aos movimentos de corte e avanço, ou seja, ao plano de trabalho. Porém é de suma importância estudá-la mesmo não tendo influência na potência de usinagem, pois ela é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o processo de corte, por isso é responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e dimensão.

A força ativa contribui para o cálculo da potência de usinagem pelo fato de se posicionar no plano de trabalho onde os movimentos de usinagem são realizados. Ela se decompõe, por sua vez, em força de corte ( $F_c$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte, e em força de avanço ( $F_f$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço. Chamada de força ativa ( $F_t$ ) pode ser representada pela Figura 4.13, contudo a sua resultante pode ser obtida pela soma vetorial das forças  $F_x$  e  $F_y$  dada pela Equação 3.3.

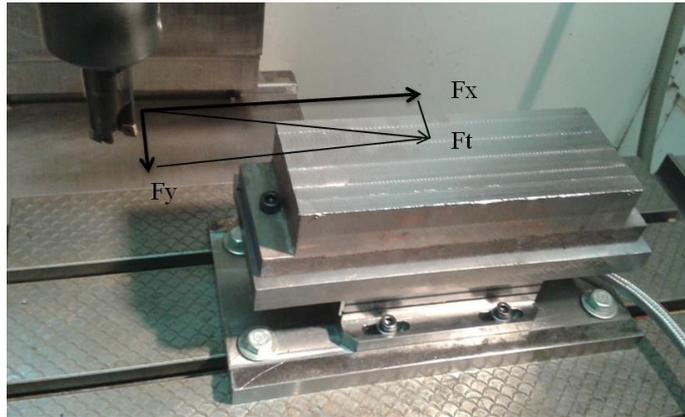


Figura 4.13 - Composição da força ativa (Ft).

A potência ativa é obtida através do produto da força ativa pela velocidade de corte efetiva. Por se tratar de um processo de fresamento, os esforços são variáveis ao longo do ciclo, pois a espessura do cavaco varia constantemente fazendo com se tenha a necessidade de calcular a força ativa através da resultante entre as componentes de  $F_x$  e  $F_y$ . O método empregado no processo é o fresamento com alta velocidade de avanço que permite uma usinagem mais rápida que os métodos convencionais de usinagem. Este processo combina uma pequena profundidade axial de corte com alto avanço por dente, proporcionando maiores taxas de remoção de material, resultando em maior produtividade e reduzindo o tempo de usinagem por peça. A força passiva ( $F_p$ ) é direcionada para o eixo da máquina na direção axial, o que significa uma maior estabilidade do processo, isto permite maiores balanços, redução das vibrações, aumentando a vida útil da ferramenta. Com a diminuição da espessura do cavaco em função do menor ângulo de posição da fresa, todavia a velocidade de avanço deve ser aumentada para proporcionar uma espessura mínima de cavaco e otimizar o desempenho de corte. A potência ativa é dada pela Equação 4.4, pelo produto entre a força ativa ( $F_t$ ) e a velocidade de corte, pois o efeito da velocidade de avanço ( $v_f$ ) na velocidade efetiva é desprezível.

$$P = \frac{F_t(N) \cdot v_c(m/min)}{60000} \text{ (kW)} \quad (4.4)$$

Com os resultados experimentais pode-se comprovar a eficiência do processo de fresamento com alta velocidade de avanço, devido a grande taxa de remoção de cavaco chegando a um volume máximo removido de  $213,63 \text{ cm}^3/\text{min}$  e uma velocidade de avanço máxima de  $8.901,37 \text{ mm/min}$  nos ensaios. Ocorreu um ganho de produtividade no processo, mas também com baixos esforços de usinagem e consequentemente baixa potencia de

usinagem conforme apresentado pela Tabela 4.9. Em função do pequeno ângulo de posição da fresa, o contato é mínimo com a seção da parede da peça ( $a_p < 1,2$  mm), garantindo uma usinagem mais estável do que com fresas convencionais que possuem ângulo de  $90^\circ$ . Em contra partida observa-se durante os ensaios uma significativa força passiva ( $F_z$ ) em função do pequeno ângulo de posição da fresa ela é direcionada ao fuso da máquina.

Tabela 4.10 - Força ativa e potência de usinagem.

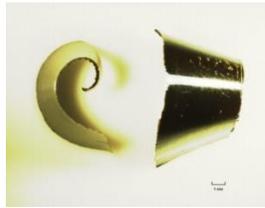
vc (m/min)	fz (mm)	ap (mm)	vf (mm/min)	Q (cm <sup>3</sup> /min)	Ft (N) RMS	Fz (N) RMS	Pt(kW) RMS	Pu (kW) Máxima
160	1	0,8	4.747	75,96	659	1045	1,75	4,25
200	1	0,8	5.934	94,95	1007	751	3,35	4,31
160	1,5	0,8	7.121	113,94	999	1464	2,66	6,07
200	1,5	0,8	8.901	142,42	974	771	3,24	4,04
160	1	1,2	4.747	113,94	1049	824	2,79	3,98
200	1	1,2	5.934	142,42	664	570	2,21	6,17
160	1,5	1,2	7.121	170,91	974	1469	2,60	6,11
200	1,5	1,2	8.901	213,63	770	554	2,57	3,65
160	1,25	1	5.934	118,68	679	564	1,81	3,01
200	1,25	1	7.417	148,36	928	723	3,09	4,27
180	1	1	5.340	106,82	748	560	2,24	3,19
180	1,5	1	8.011	160,22	687	1027	2,06	4,65
180	1,25	0,8	6.676	106,82	975	639	2,92	3,72
180	1,25	1,2	6.676	160,22	927	738	2,78	3,83
180	1,25	1	6.676	133,52	958	685	2,87	3,63
180	1,25	1	6.676	133,52	998	791	2,99	4,03
180	1,25	1	6.676	133,52	1254	906	3,76	4,36
180	1,25	1	6.676	133,52	1151	659	3,45	5,41
180	1,25	1	6.676	133,52	771	650	2,31	3,64
180	1,25	1	6.676	133,52	962	811	2,88	4,27

## 4.5 Forma macroscópica do cavaco

Para compreendermos melhor os mecanismos de formação do cavaco, primeiramente foram coletadas 6 amostras de uma matriz experimental com vinte experimentos, registrando-se as imagens de sua forma macroscópica com uma câmera, em diferentes parâmetros de corte. Utilizando o avanço por dente ( $f_z$ ) variou entre 1, 1,25 e 1,5 mm, a profundidade axial de corte ( $a_p$ ) foi de 0,8, 1 e 1,2 mm e a velocidade de corte ( $v_c$ ) adotada nos procedimentos experimentais foi de 160, 180 e 200 m/min.

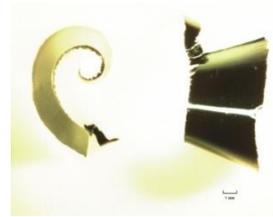
A Figura 4.14 mostra a forma macroscópica dos cavacos para as seis diferentes condições de corte; as imagens mostram a forma similar a um cone curvado para todos os cavacos observados.

Experimento 1



$v_c = 160\text{m/min}$   $f_z = 1\text{mm/v}$   $a_p = 0,80\text{mm}$

Experimento 3



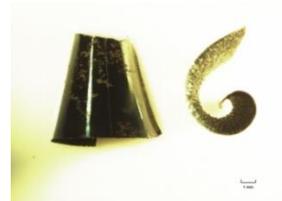
$v_c = 160\text{m/min}$   $f_z = 1,5\text{mm/v}$   $a_p = 0,80\text{mm}$

Experimento 13



$v_c = 180\text{m/min}$   $f_z = 1,25\text{mm/v}$   $a_p = 0,8$

Experimento 14



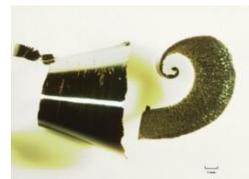
$v_c = 180\text{m/min}$   $f_z = 1,25\text{mm/v}$   $a_p = 1,20\text{mm}$

Experimento 4



$v_c = 200\text{m/min}$   $f_z = 1,5\text{mm/v}$   $a_p = 0,80\text{mm}$

Experimento 8



$v_c = 200\text{m/min}$   $f_z = 1,5\text{mm/v}$   $a_p = 1,20\text{mm}$

Figura 4.14 - Forma macroscópica dos cavacos.

A forma macroscópica dos cavacos para os diferentes parâmetros de corte, pode ser observada com o aumento do avanço por dente ( $f_z$ ). Ocorreu uma ligeira mudança no formato de cone. Já nos experimentos onde houve um acréscimo da profundidade axial de corte e aumento da velocidade de corte, além da mudança no formato, houve também mudança na coloração do cavaco devido ao aumento da temperatura na interface de corte ferramenta cavaco. Nestas condições de corte mais severas ocorreu também um aumento da vibração da máquina-ferramenta. Tal situação pode levar a desgastes prematuros da ferramenta de corte e provocar fraturas da aresta de corte reduzindo seu tempo de vida, marcando a substituição prematura do inserto da fresa.

É de fundamental importância estudar e analisar a forma, o tamanho e a maneira com que os cavacos são formados durante o processo de fresamento, pois estes têm um impacto considerável no processo de usinagem. A principal influência sobre a formação do cavaco é a geometria da ferramenta e as condições de corte. O cavaco pode ser muito importante para os profissionais que lidam com processos de usinagem. Nos experimentos deste trabalho observa-se que os cavacos obtidos comportaram de forma satisfatória.

## 4.6 Ensaios de vida e estratégias de corte

Este item apresenta os ensaios de vida da ferramenta, com duas estratégias de entrada da ferramenta na peça. São elas entrada direta e entrada por rolagem. Assim, adotou-se uma condição da matriz experimental, com os valores máximos para velocidade de corte (200 m/min), avanço por dente (1,5 mm) e profundidade axial de corte (1,2 mm), portanto durante a realização do experimento houve uma sobrecarga do dinamômetro no ensaio de vida, sendo necessário adotar novos valores, velocidade de corte de 180 m/min, avanço por dente de 1,25 mm/dente e profundidade axial de corte de 0,8 mm. Realizando apenas a medição do desgaste de flanco para avaliar a vida da ferramenta sem medir esforços durante os ensaios de vida. Na Figura 4.15 é mostrado o volume de cavaco removido ( $\text{cm}^3$ ), comparando-se as duas estratégias de entrada da ferramenta na peça. Observa-se que os melhores resultados foram obtidos para a entrada por rolagem, quando comparada com a entrada direta, que proporcionou um aumento de vida da ferramenta em torno de 150%.

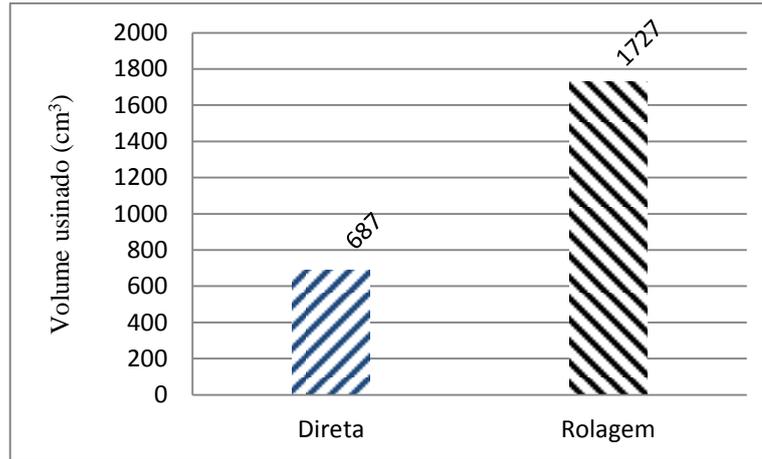


Figura 4.15 - Volume de cavaco removido entre as duas estratégias de entrada de corte.

Para avaliar a vida da ferramenta decidiu-se por utilizar como critério, o desgaste de flanco  $V_{Bmáx.}$  de 0,3mm ou a quebra da ferramenta durante a usinagem. Pode ser observado que os melhores resultados foram obtidos para a estratégia de entrada por rolagem, quando comparadas às duas estratégias com os mesmos parâmetros de corte, para os ensaios realizados, a vida utilizando-se a entrada por rolagem foi sempre maior do que o ensaio utilizando-se a estratégias de entrada direta, isto pode ser justificado pela pequena espessura do cavaco na saída do inserto da peça, reduzindo as vibrações ocorridas pela redução brusca da força de usinagem.

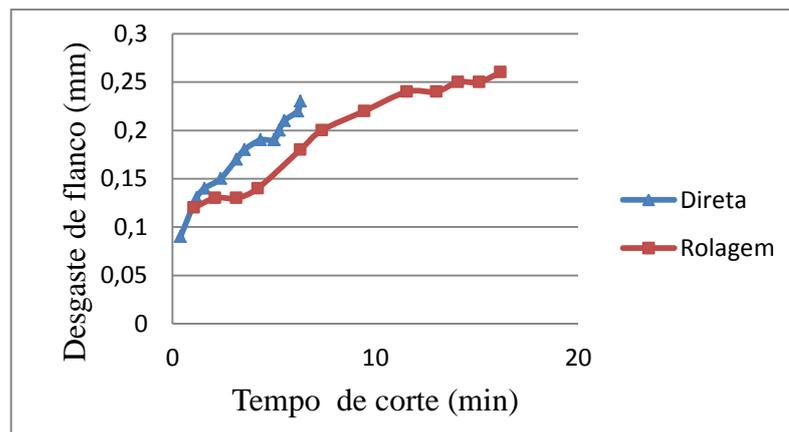


Figura 4.16 - Desgaste de flanco em função tempo corte.

Na Figura 4.16 é mostrado o comportamento do desgaste da fresa nas estratégias de entradas diretas e por rolagem. Na entrada por rolagem o aumento da taxa de desgaste da ferramenta ocorreu em menores proporções comparadas à entrada direta, tendo um maior tempo de corte. Na estratégia entrada direta houve a quebra de um dos insertos da fresa

prematuramente, chegando a um desgaste de flanco  $v_{Bmax}$  de 0,23mm e um tempo de usinagem 6,3 minutos até a quebra. Por se tratar de um fresamento com alta velocidade de avanço a entrada direta gera altos impactos no início do corte, gerando elevada fadiga mecânica na ferramenta.

É importante ressaltar que a estratégia de entrada por rolagem tem como objetivo diminuir a espessura do cavaco e conseqüentemente reduzir os esforços cíclicos sobre o inserto, no instante da saída da fresa da região de corte. Como pode se observar, a estratégia por rolagem aumentou significativamente o tempo de vida da fresa chegando a 16,17 minutos e um desgaste de flanco de 0,26 mm com 375 passes no corpo de prova. Portanto constatou-se que com a estratégia de entrada por rolagem houve um crescimento de vida da fresa em aproximadamente 2,5 vezes em relação a entrada direta. A Figura 4.17 mostra os desgastes de flanco dos insertos da fresa para as estratégias de entradas direta e por rolagem respectivamente.

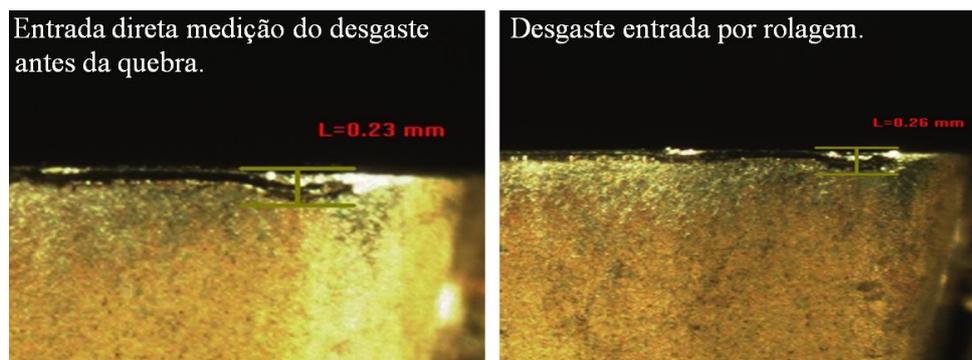


Figura 4.17 - Degaste de flanco para as duas estratégia de entrada, direta e por rolagem.

## Capítulo 5

# CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos nos ensaios do fresamento de alto avanço do aço ABNT 1045, pode-se concluir que:

- As forças de usinagem médias e forças de usinagem máximas aumentaram com o avanço da fresa (1-1,5mm/dente) e diminuíram com o aumento da velocidade de corte (160-200 m/min);

- Os modelos de força de usinagem obtidos pela metodologia de superfície de resposta foram bastante satisfatórios apresentando ajustes acima de 80% e resíduos normais, aleatórios não correlacionados;

- A estratégia de entrada por rolagem apresentou uma vida da ferramenta 150% superior a entrada direta, aumentando significativamente a produtividade do processo mantendo constante as condições de corte;

- Este ganho foi devido ao efeito do afinamento do cavaco na saída do dente da peça, principalmente no contato do corte, garantindo um aumento significativo da vida da ferramenta.

- Durante os experimentos observaram-se elevadas forças de usinagem, chegando 2300N sendo a componente passiva a mais significativa;

- As componentes das forças  $F_x$  e  $F_y$  medidas apresentam valores (RMS) relativamente menores comparadas ao (RMS) da força de usinagem;

- As amostras dos cavacos coletados nas diversas condições experimentadas não apresentaram deformações significativas de forma, mas sim de coloração em função da variação da temperatura de corte;

- O fresamento de alto avanço por dente ( $fz=1,5$  mm) alcançou  $vf=8900$  mm/min, muito superior aos convencionais permitindo elevada taxa de remoção de material em condições de desbaste;

- Apesar das condições de alto avanço experimentadas as potências obtidas foram relativamente baixas viabilizando a aplicação do fresamento, em condições de desbaste.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir sugestões para futuros trabalhos, relacionados ao presente tema descrito neste trabalho.

Fazer comparações entre o fresamento discordante e o concordante no aço ABNT 1045, usando as mesmas condições dos parâmetros de corte apresentadas nesta pesquisa.

Manter fixa a profundidade axial de corte, variando a velocidade de corte, o avanço por dente e largura de penetração ( $ae$ ).

Usar as mesmas condições de corte deste trabalho, porém comparar o corte a seco com a refrigeração em diversas vazões do fluido no fresamento aço ABNT 1045.

Usar as mesmas estratégias deste trabalho, para o fresamento do aço ABNT H13.

## Capítulo 6

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABNT NBR 6175 (1971).**

**ABNT NBR 6162/1989**, Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais.

**BANIN Jr, J. R.** (2009). Análise de Tensões Residuais, Integridade Superficial e Forças de Usinagem no Fresamento de Topo do Aço SAE 4340 Endurecido, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 111 p.

**BONETTI, I., BODZIAK, S., SOUZA, A. F.** (2010), Contribuições para Desenvolver o Conhecimento das Operações de Desbaste de Moldes e Matrizes com Ênfase em Fresamento no Sentido Axial, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), Campina Grande – Paraíba – Brasil, 10 p.

**BOX, G. E. P. e DRAPER, N. R.** (1987). Empirical Model-Building and Response Surfaces. John Wiley & Sons, 650 p.

**BRAGA, D. U., PARREIRA, L. G. S., NEVES, F. O., SILVA, A. S. C.** (2011). Fresamento Frontal do Aço ABNT 1045 Quando Utilizada Fresa com Diferentes Números de Arestas. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul – RS – Brasil, 6 p.

**BRITO.,T. G.** (2012). Otimização do Fresamento de Topo do Aço ABNT 1045 Utilizando Projeto de Parâmetro Robusto. Dissertação de Mestrado em Engenharia mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 125 p.

**COSTA, A. R.** (2003). Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Insertos Intercambiáveis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas-Unicamp, Campinas, 123 p.

**DINIZ, A. E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L.** (2010). Tecnologia da usinagem dos materiais. 7st Ed. São Paulo: Artliber, 268 p.

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

**FERRARESI, D.** (1982). Fundamentos da usinagem dos materiais. 9ª Ed. São Paulo: Editora Edigard Blucher LTDA, 800 p.

GGDMETALS.

Disponível em < <http://www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica/sae-1045/>>

Acesso em 25 de Julho 2014.

**GOMES, J. H. F.,** (2010). Otimização do processo de soldagem com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, – Itajubá: UNIFEI, 136 p.

**GORCZYCA, F.E.** (1987). Application of metal cutting theory, 2º Ed. New York. Industrial Press, 612 p.

**GRINE, K., ATTAR, A., AOUBED, A., BREYSSE, D.** (2010). Using the design of experiment to model the effect of silica sand and cement on crushing properties of carbonate sand. Materials and Structures, v. 44, pp. 195-203.

**HARIDY, S., GOUDA, S. A., WU, Z.** (2011). An integrated framework of statistical process control and design of experiments for optimizing wire electrochemical turning process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.53(1), pp.191-207.

**ISO 8688-1 (1989)**– Tool Life Testing in Milling – Part 1. Face Milling. 1st ed. Genève, Switzerland, 32 p.

**ISO 8688-2 (1989)** – Tool Life Testing in Milling – Part 2. End Milling. 1st ed. Genève, Switzerland, 31 p.

**ISO 3685 (1993)** – Tool-life Testing With Single-point. Turning Tools. 2nd ed. Genève, Switzerland, 54 p.

**JEYAKUMAR, S. ; MARIMUTHU, K. ; RAMACHANDRAN, T.** (2013). Prediction of cutting force tool wear and surface roughness of Al6061/SiC composite for end milling operations using RSM. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.27(9), pp.2813-2822 .

**KALPAKJIAN, S.** (1995). *Manufacturing Engineering and Technology*, 3<sup>a</sup> Ed., 1271 p.

**KADIRGAMA, K.; NOOR, M. M.; RAHMAN, M. M.; REJAB, M. R. M.; HARON, C. H. C.; ABOU-EL-HOSSEIN, K. A.,** (2009). “Surface Roughness Prediction Model of 6061-T6 Aluminium Alloy Machining Using Statistical Method”, *European Journal of Scientific Research*, vol. 25, n.2, p. 250-256.

**LAW, K. M. Y.; GEDDAM, A.; OSTAFIEV, V. A.** (1999). A Process-design approach to error compensation in the end milling of pockets. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v. 89-90, n.1., p. 238-244.

**LUI, C., WANG, G., DARGUSH, M. S.** (2012). Modelling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations. *Int J Adv Manuf Technol*, Vol.63(9), pp.839-850.

**MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.** (2001). *Usinagem dos metais: Apostila*. Uberlandia, 2005. 174 p. (Stenner, 1989)- **STENNER, C. E.**- *Ferramentas de corte*, Editora da UFSC, Florianópolis, Brasil.

**MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M., COELHO, A. M., SILVA, M. B.** (2011). *Teoria da usinagem dos metais: Editora Blucher 2<sup>a</sup> Edição revisada*, 397 p.

**MARCELINO, A. P.; DOMINGOS, D. C.; CAMPOS D. V.; SCHROETER R. B.** (2004). Medição e simulação dos esforços de usinagem no fresamento de topo reto de ligas de alumínio tratável termicamente 6061. In: *Congresso estudantil de engenharia mecânica-*

CREEM, 11., 2004, Nova Friburgo. Anais. Nova Friburgo: Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Não paginado, Paper CRE04-PF25.

**MERCHANT, M. E.** (1954). “Mechanics of the metal Cutting Process. I Orthogonal Cutting and Type 2 Chip”, J. Applied Physics, vol. 16, nº 5, may, pp. 267-275.

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

**MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C.** (1995). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design of Experiments, 2ª ed, Wiley – Interscience, New York, USA, 700 p.

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

**OZCELIKA, B., BAYRAMOGLUB, M.,**( 2006). “The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling”, International Journal of Machine Tools and Manufature, vol. 46, p. 1395-1402.

**PAIVA, A. P.** (2006). Metodologia de Superfície de Resposta Multivariada – Uma proposta de otimização para processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas, 279 p. Tese de Doutorado – UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.

**RIBEIRO, J. L. S., ABRÃO, A. M., SALES, W. F.,** (2006). Forças de Usinagem no Fresamento de Aços Para Matrizes, 16º POSMEC. FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 10 p.

**RIGATTI, A. M. Y.** (2010). Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista - Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 88 p.

**SANDVIK COROMANT.** ( 2013). Manual Técnico de usinagem, Sandvikens, Suécia.

SANDVIK COROMANT.

Disponível em < <http://www.sandvik.coromant.com/br>> Acesso em 12 de fevereiro de 2014.

**SHAW, M. C.** (1984). Metal cutting principles. New York: Oxford Science Publications, 594 p.

**SMITH., G. T.** (1989). Advanced Machining-The Handbook of Cutting Technology, IFS Publications, ISBN 1-85423-022-6.

**SOUZA, M. N., SILVA, M. A., MACHADO, A. R., LOBATO, F. S.** (2011). “Treatment of multi-response surface applied to machinability of stainless steel using multi-objective optimization differential evolution”, 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Natal, 10 p.

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

**TRENT, E. M.** (2000). Metal Cutting. .2.ed. London: Butterworths, 242 p.

**VENTURA, C. E., HASSUI, A., MARQUES, M. D.** (2011). Avaliação de Diferentes Estratégias De Entrada Da Ferramenta No Fresamento Da Liga Ti-6Al-4V, 6º congresso brasileiro de engenharia de fabricação, Caxias do sul, 11 p.

**ZANUTO, R. S.** (2012). Avaliação de diferentes estratégias de entrada no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 110 p.