

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

RICARDO TREVÉLIN

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE
FRESAMENTO SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL E
FORÇAS DE CORTE DO AÇO AISI H13 ENDURECIDO**

São Bernardo do Campo
2011

RICARDO TREVELIN

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE
FRESAMENTO SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL E
FORÇAS DE CORTE DO AÇO AISI H13 ENDURECIDO**

Dissertação de Mestrado em Materiais e Processos apresentada ao Centro Universitário da FEI como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Dr. Sergio Delijaicov.

São Bernardo do Campo
2011



Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGE- 10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Ricardo Trevelin

Matrícula: 208121-4

Título do Trabalho: **Influência dos Parâmetros do Processo de Fresamento sobre a Integridade Superficial e Forças de Corte do Aço AISI H13 Endurecido.**

Área de Concentração: Materiais e Processos

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Delijaicov

Data da realização da defesa: 21 / Junho / 2011

ORIGINAL ASSINADA

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

São Bernardo do Campo, 21 / junho / 2011.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Sérgio Delijaicov

Ass.: _____

Prof. Dr. Éd Cláudio Bordinassi

Ass.: _____

Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

Dedico este trabalho ao meu orientador, meus irmãos, meus amigos, meus pais, José e Marina, pela educação a mim atribuída e por me apoiarem nesta longa e difícil trajetória, compreendendo todo o tempo que foi dedicado para a realização deste trabalho e a Deus, por todos os momentos de superação durante esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Sergio Delijaicov, meu orientador, que colocou desafios crescentes e enriquecedores, compartilhando seu conhecimento, seu apoio e sua dedicação na orientação que permitiram a conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos os meus Professores, Mestres e Doutores, que de uma forma ou de outra me orientaram e assessoraram nas pesquisas, análises, enfim em todo o desenvolvimento para que este trabalho fosse conduzido e concluído de maneira clara e objetiva.

Agradeço também à empresa Mercedes Benz do Brasil, em especial à todos os colegas do Planejamento de Processos e Preparação da Produção de Caminhões, que me incentivaram e me orientaram em meu desenvolvimento profissional.

Finalmente, um agradecimento especial para minha família pela confiança e atenção em mim depositada.

A Deus pela graça do poder realizar.

*"A mente que se abre a uma nova idéia jamais
voltará ao seu tamanho original".*

Albert Einstein

Resumo

As recentes melhorias na tecnologia construtiva das máquinas ferramenta, especialmente no que diz respeito à rigidez e precisão de posicionamento, aliadas ao advento de ferramentas de corte de cerâmicas e Nitreto Cúbico de Boro (CBN) tornaram possíveis a usinagem de aços endurecidos, utilizando ferramentas com aresta de corte definidas. O presente trabalho apresenta o estudo das influências dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço por faca e profundidade de corte) sobre a integridade superficial e esforços de corte no aço AISI H13 endurecido a 54 HRC durante o fresamento, com a utilização de ferramentas de Nitreto Cúbico de Boro (CBN). As características da integridade superficial analisadas foram rugosidade e camada branca. Os esforços de corte foram medidos através de um dinamômetro tri-direcional acoplado à mesa da máquina e a aquisição de dados feita pelo sistema Spider – Catman da HBM. Os experimentos foram realizados e planejados através de um delineamento central composto e analisados pelo software “Statistica”. Os resultados indicam que a força de penetração foi o parâmetro que mais teve influência nas forças de corte e na rugosidade. Os valores de rugosidade “Ra” encontrados são semelhantes aos ocorridos em processos de usinagem de super-acabamento, possibilitando a substituição do processo de retífica por fresamento de aço endurecido. Não foi verificada a presença de camada branca em nenhum corpo-de-prova.

Palavras-chave: Fresamento, Usinagem, Aço endurecido, Integridade Superficial.

Abstract

The recent improvement on constructive technology of tool machines, especially concerning about rigidity and positioning accuracy, associated to the approach of pottery cutting tools and Cubic Boron Nitride (CBN) rendered possible the hardened steel manufacturing, using tools with defined cutting edges. The present work introduces the influence of cutting parameters (cutting speed, cutter feed and cutting depth) about surface integrity and cutting efforts of AISI H13 hardened steel at 54 HRC during the milling, using Cubic Boron Nitride (CBN) tools. The characteristics of surface integrity analyzed were roughness and white layer. The cutting efforts were measured through a tridirectional dynamometer connected to the worktable and the acquisition of data made by Spider system – HBM Catman. The experiments were planned and realized through a central composite design and analyzed by Statistica software. The results reveal that penetration force was the most influence parameter at cutting efforts and roughness. The roughness values founded are similar to the ones occurred in cutting finishing process, enabling the substitution from grinder process to hardened steel milling process. It was found no white layer presence in any of the test specimen.

Key-words: Milling, Machining, Hardened Steel, Surface Integrity.

Lista de Abreviaturas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI: American Iron and Steel Institute - Instituto Americano do Ferro e do Aço

Al: alumínio

Al₂O₃: Óxido de Alumínio

ANOVA: Analysis of Variance

C: Carbono

°C: Graus Celsius

CBN: Nitreto Cúbico de Boro

Co: Cobalto

Cr: Cromo

Cu: Cobre

DCC: Delineamento Composto Central

DIN: Deutsches Institut für Normung – Instituto Alemão para Normalização

FEI: Faculdade de Engenharia Industrial

HRC: Dureza Rockwell na escala C

IS: Integridade da Superfície

ISO: Organização Internacional para Normalização - International Organization for Standardization

Mn: Manganês

Mo: Molibdênio

NbC: Carboneto de Nióbio

NBR: Norma brasileira

Nb: Nióbio

Ni: Níquel

P: Fósforo

PCBN: Nitreto Cúbico de Boro Policristalino

PCD: diamante Policristalino

RPM: Rotações Por Minuto

S: Enxofre

SAE: Sociedade de Engenheiros da Mobilidade

Si: Silício

SiC: Carbetto de Silício

Si₃N₄: Nitreto de Silício

Ta: Tântalo

TaC: Carboneto de Tântalo

Ti: Titânio

TiAlN: Carbonitreto de Titânio Alumínio

TiC: Carboneto de Titânio

TiCN: Carbonitreto de Titânio

TiN: Nitreto de Titânio

TiAl: Nitreto de Titânio Alumínio

V: Vanádio

W: Tungstênio

WC: Carboneto de Tungstênio

ZrO₂: Óxido e Zircônio

Lista de Figuras

Figura 2.1: Sentido de fresamento	26
Figura 2.2: Grandezas do fresamento	30
Figura 2.3: Localização das três zonas de geração de calor	33
Figura 2.4: A) Distribuição da dissipação de energia de corte com a velocidade de corte B) Distribuição típica da temperatura na ferramenta de metal duro	33
Figura 2.5: Perfil real (A) e teórico (B) do cavaco não-deformado	34
Figura 2.6: Forças de usinagem em fresamento tangencial e suas componentes na operação de fresamento.....	35
Figura 2.7: Forças X, Y e Z atuando na ponta da ferramenta	36
Figura 2.8: Classificação de materiais para ferramentas com geometria definida	38
Figura 2.9: Tenacidade X Dureza	41
Figura 2.10: Desgaste da superfície de folga (VB) em função do tempo.....	43
Figura 2.11: Efeitos da usinagem na integridade da superfície	46
Figura 2.12: Camadas superficiais de corpos sólidos	47
Figura 2.13: Elementos de uma superfície usinada	49
Figura 2.14: Diversos perfis com a mesma rugosidade	50
Figura 2.15: Camada branca na superfície usinada	52
Figura 2.16: Camada branca na superfície fresada	53
Figura 3.1: Corpos-de-prova utilizados nos ensaios de fresamento	60
Figura 3.2: Delineamento composto central	62
Figura 3.3: Esquema de fixação dos corpos-de-prova	63
Figura 3.4: Ferramenta utilizada para a operação de desbaste	65
Figura 3.5: Ferramenta utilizada para a operação de acabamento	66

Figura 3.6: Fresadora Sanches Blanes	67
Figura 3.7: Dinamômetro	68
Figura 3.8: Esquema da célula de carga em anel	68
Figura 3.9: Rugosímetro Mitutoyo	69
Figura 3.10: Microscópio ótico Olympus BH2-UMA	70
Figura 3.11: Equipamento automático de lixamento e polimento das amostras	70
Figura 4.1: Planilha de dados utilizada pelo “Statistica”	71
Figura 4.2: Pareto para efeito das variáveis independentes na Ft	74
Figura 4.3: Gráfico: “ $a_p \times f_z$ ” para força tangencial	75
Figura 4.4: Pareto para efeito das variáveis independentes no Mt	77
Figura 4.5: Gráfico: “ $a_p \times f_z$ ” para momento torçor	78
Figura 4.6: Pareto para efeito das variáveis independentes na Fr	79
Figura 4.7: Gráfico: “ $f_z \times a_p$ ” para força radial	80
Figura 4.8: Pareto para efeito das variáveis independentes na Fp	82
Figura 4.9: Gráfico: “ $f_z \times V_c$ ” para força passiva	83
Figura 4.10: Pareto para efeito das variáveis independentes na R	85
Figura 4.11: Gráfico: “ $V_c \times f_z$ ” para força resultante	85
Figura 4.12: Pareto para efeito das variáveis independentes na Rugosidade	88
Figura 4.13: Gráfico: “ $a_p \times f_z$ ” para rugosidade	89
Figura 4.14: Corpo-de-prova 1	90

Lista de Fórmulas

Fórmula 2.1: Velocidade de corte (V_c)

Fórmula 2.2: Velocidade de avanço (V_f)

Fórmula 2.3: Avanço por dente (f_z)

Fórmula 2.4: Avanço de corte (f_c)

Fórmula 2.5: Espessura instantânea do cavaco (h)

Fórmula 2.6: Força de corte (F_c)

Fórmula 2.7: Rugosidade teórica “Ra” (R_a)

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Dados básicos das principais coberturas de ferramentas	40
Tabela 2.2: Conjuntos de características da integridade da superfície	48
Tabela 3.1: Composição química do aço AISI H13	60
Tabela 3.2: Resultados da dureza obtida nos corpos-de-prova após tratamento térmico	61
Tabela 3.3: Parâmetros de corte utilizados na operação de acabamento	64
Tabela 4.1: Resultados da força tangencial	73
Tabela 4.2: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Ft	73
Tabela 4.3: Resultados do momento torçor	76
Tabela 4.4: ANOVA para efeito das variáveis independentes no Mt	76
Tabela 4.5: Resultados da força radial	78
Tabela 4.6: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Fr	79
Tabela 4.7: Resultados da força passiva	81
Tabela 4.8: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Fp	82
Tabela 4.9: Resultados da força resultante	84
Tabela 4.10: ANOVA para efeito das variáveis independentes na R	84
Tabela 4.11: Resultados da rugosidade	86
Tabela 4.12: Tabela de Rugosidades	87
Tabela 4.13: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Rugosidade	88

Lista de Símbolos

Letras romanas maiúsculas

A	Área de seção do cavaco [mm^2]
F_{ap}	Força de apoio [N]
F_c	Força de corte [N]
F_f	Força de avanço [N]
F_p	Força de profundidade [N]
F_y	Componente de força no eixo Y [N]
F_x	Componente de força no eixo X [N]
F_z	Componente de força no eixo Z [N]
F_u	Força total de usinagem [N]
F_t	Força tangencial [N]
F_p	Força passiva [N]
F_r	Força radial [N]
M_t	Momento torçor [N]
K_s	Pressão específica de corte [N / mm^2]
R	Força resultante [N]
R_a	Média aritmética das alturas da rugosidade [μm]
R_{máx}	Maior altura crista/vale entre cinco valores medidos dentro do comprimento de medição [μm]
R_t	Maior distância entre o ponto mais elevado e o mais profundo [μm]
R_g	Rugosidade [μm]
R_z	Distância entre o ponto mais alto ao mais baixo das cinco maiores irregularidades em uma determinada distância da linha de base [μm]

V_c	Velocidade de corte [m / min]
V_f	Velocidade de avanço [mm / min]
X	Orientação no eixo longitudinal, coordenada no eixo X [mm]
Y	Orientação no eixo transversal, coordenada no eixo Y [mm]
Z	Orientação no eixo das elevações no plano XY [mm]

Letras romanas minúsculas

a_e	Penetração de trabalho [mm]
a_p	Profundidade de corte ou largura de usinagem [mm]
d	Diâmetro da ferramenta [mm]
f	Avanço [mm / volta]
f_c	Avanço de corte [mm]
f_z	Avanço por dente [mm / faca]
h	Espessura instantânea do cavaco [mm]
l_m	Altura do perfil no comprimento de medição (Ra) [μm]
n	Rotação da ferramenta [RPM]
z	Número de dentes da ferramenta

Letras gregas

π	Perímetro da circunferência dividido pelo diâmetro da mesma
φ	Ângulo de contato do dente da ferramenta com a peça [graus]
r_ε	Raio de ponta da ferramenta [mm]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Fresamento de aços endurecidos	22
1.2 Integridade superficial no fresamento de aços endurecidos	22
1.3 Objetivos	23
1.4 Organização da dissertação	24
2. REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1 Fresamento	25
2.1.1 Movimentos no fresamento	28
2.1.2 Grandezas no fresamento	29
2.1.3 Mecanismo de formação do cavaco	31
2.1.4 Forças de usinagem	35
2.2 Ferramentas de corte	37
2.2.1 Ferramentas de corte utilizadas no fresamento de aços endurecidos	39
2.2.2 CBN utilizado no fresamento de aço endurecido	41
2.2.3 Vida da ferramenta de corte	43
2.3 Integridade da superfície	45
2.3.1 Rugosidade	49
2.3.2 Camada branca	51
2.4 Planejamento experimental	54
2.4.1 Delineamento composto central (DCC)	57
3. MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 Introdução	59
3.2 Materiais	59

3.2.1 Aço AISI H13	59
3.2.2 Corpos-de-prova	60
3.3 Desenvolvimento dos ensaios	61
3.3.1 Descrição das operações	62
3.3.1.1 Desbaste	63
3.3.1.2 Acabamento	64
3.4 Ferramentas utilizadas nos ensaios	65
3.5 Máquina operatriz	66
3.6 Medições e instrumentos de medição	67
3.6.1 Medições de força de corte através da dinamometira tri-dimensional	67
3.6.2 Medição da rudosidade	69
3.6.3 Medição da camada branca	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1 Análise dos resultados	72
4.1.1 Forças de usinagem	72
4.1.1.1 Força tangencial	72
4.1.1.2 Momento torçor	75
4.1.1.3 Força radial	78
4.1.1.4 Força passiva	81
4.1.1.5 Força resultante	84
4.2 Integridade superficial	86
4.2.1 Rugosidade	86
4.2.2 Camada branca	90
4.3 Resultados de outros pesquisadores	91

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	92
5.1 Conclusões sobre forças de usinagem	92
5.1.1 Força tangencial.....	92
5.1.2 Momento torçor	92
5.1.3 Força radial	92
5.1.4 Força passiva	93
5.1.5 Força resultante	93
5.1.6 Resumo para forças de usinagem	93
5.2 Conclusões sobre integridade superficial	93
5.2.1 Rugosidade	93
5.2.2 Resumo para rugosidade.....	94
5.2.3 Camada branca	94
5.2.4 Resumo para camada branca	95
5.3 Sugestões de trabalhos futuros	95
REFERÊNCIAS	96

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação que tem por objetivo conferir forma, dimensões e acabamento em um material bruto através da ação da ferramenta pela remoção controlada do cavaco, sendo um dos mais importantes processos de fabricação.

Peças fabricadas por outros processos muitas vezes exigem mais operações antes que o produto esteja pronto para aplicação. As operações de usinagem podem ser aplicadas tanto em materiais metálicos como em não metálicos, tais como polímeros, madeira, cerâmico e compósito. Nos países industrializados o custo com usinagem soma mais de 15% de todos os processos de fabricação. Por este motivo, a usinagem, como parte da ciência da fabricação e tecnologia, é muito importante para as indústrias de manufatura moderna (DAVIM, 2008).

O processo de fresamento é um dos mais universais e conhecidos, possuindo grande variação quanto ao tipo de máquina e ferramentas utilizadas. As aplicações frequentes do processo são a obtenção de superfícies planas, rasgos, ranhuras, perfis, contornos, cavidades e roscas, entre outros. Como vantagens gerais do processo de fresamento pode-se citar as altas taxas obtidas de remoção de cavaco e a possibilidade de obtenção de superfícies de elevada qualidade e complexidade (KRATOCHVIL, 2004).

Na usinagem do aço endurecido, os conhecimentos e conceitos desenvolvidos são aplicados para obter superfícies desejadas no menor tempo possível, podendo eliminar operações futuras, como por exemplo, a retificação. A correta escolha da ferramenta e a aplicação adequada dos parâmetros de corte contribuem para a obtenção de superfícies especificadas e operações com menores custos (KOSHY; DEWES; ASPINWALL, 2002).

Um dos aspectos abordado nesta pesquisa é o estudo da influência dos parâmetros de usinagem na integridade superficial, que tem influências significativas na vida dos produtos (POULACHON; BANDYOPADHYAY, 2003). Assim, a composição química do material usinado, sua microestrutura, a geometria da ferramenta de corte (ângulos de saída axial e radial, de folga, de posição e a condição da aresta), os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, profundidade de corte, avanço por faca ou dente, etc) e a estratégia de usinagem (movimento ascendente ou descendente e corte concordante ou discordante), influenciam a integridade superficial, e, por conseguinte, a vida dos produtos.

No entanto, além da integridade superficial, o comportamento das forças é de fundamental importância para a otimização, o monitoramento e o controle dos processos de usinagem. Em virtude de sua relativa facilidade de medição e da sua relevância na usinagem,

muitos pesquisadores têm utilizado medições de forças durante a usinagem, para a avaliação e entendimento do processo e análise da cinemática e dinâmica da máquina-ferramenta. Com esse conhecimento, a estabilidade dinâmica, precisão de posicionamento ferramenta-peça, condições da ferramenta, superfície usinada e erros na peça, são algumas vezes explicados com base na análise das forças atuantes (SCHOROETER, 2001).

O monitoramento das componentes da força de usinagem é a base para o projeto de uma máquina-ferramenta, para a determinação das condições de corte, para a avaliação da precisão de uma máquina-ferramenta em certas condições de trabalho (deformação da ferramenta, máquina e peça), para a explicação de mecanismos de desgaste e também como um critério para a determinação de usinabilidade de um dado material de peça (FERRARESI, 1970).

Contudo, para usinar com alto desempenho e conseqüentemente reduzir os custos e tempo de processo, bem como aumentar a qualidade do produto usinado, é essencial que todo o processo seja analisado como uma cadeia de requisitos, tais como, a escolha da ferramenta de corte, os parâmetros de usinagem, a seleção de estratégias de corte, etc (WU; KITA; IKOKU, 2007).

1.1 Fresamento de aços endurecidos

O fresamento de aço endurecido pode ser caracterizado como processo de usinagem em materiais com dureza superior a 45 HRC, sendo comum encontrar trabalhos e pesquisas com materiais de dureza variando entre 52 a 68 HRC.

Algumas características do fresamento duro diferem dos parâmetros conhecidos na usinagem de materiais não endurecidos, ou seja, fresamento com material convencional. Segundo Koepfer (2007), os fatores críticos são:

- a) rigidez da máquina-ferramenta;
- b) ferramenta de usinagem;
- c) elemento fixador da ferramenta de usinagem;
- d) sistema de refrigeração (quando necessário);
- e) parâmetros de corte;

Lima; Corrêa (2002) afirmam que o principal motivo para a adoção desse tipo de usinagem é a possibilidade de eliminar a etapa de retificação na operação de semi acabamento ou acabamento, sendo possível obter peças com boa qualidade dimensional, geométrica e superficial. Desta forma, pode-se reduzir de forma significativa o tempo e os custos agregados à fabricação de peças e componentes, possibilitando executar diversas operações com um único setup, além de permitir a flexibilização do processo produtivo e maior produtividade.

Do ponto de vista de tempo de usinagem, a remoção do material no estado endurecido necessita de um maior tempo quando comparada à realização da usinagem antes do tratamento térmico. Este fato está relacionado à utilização de parâmetros de usinagem menos agressivos diante da usinagem do material antes do tratamento térmico. Entretanto, ao se realizar usinagem no estado endurecido, pode-se eliminar a retificação (ALTAN; LILLY; YEN, 2001). Esta opção, além de minimizar o tempo de preparação de máquina, reduz também a cadeia do processo e facilita a obtenção de reduzidas tolerâncias de forma e de posição.

1.2 Integridade superficial no fresamento de aços endurecidos

Segundo Griffiths (2001) o termo Integridade da Superfície (IS) é o conjunto das características topográficas, mecânicas, químicas, e metalúrgicas de uma superfície manufaturada e suas relações com o desempenho funcional.

A superfície de uma peça usinada apresenta dois aspectos importantes que precisam ser controlados. O primeiro refere-se às irregularidades geométricas da superfície e o segundo as alterações metalúrgicas da superfície e da camada superficial, denominado Integridade da Superfície. O acabamento e a integridade da superfície devem ser definidos, medidos, e mantidos dentro de limites especificados no processamento de quaisquer produtos (DAMASCENO, 1993).

Ekmekci, Elkoca; Erden (2005) realizaram estudos de integridade da superfície no aço ferramenta DIN 12738, após fresamento no estado endurecido, identificando a formação de microtrincas e a presença da camada branca na superfície do aço-ferramenta a qual é, neste caso, composta de cementita e martensita retidas em uma matriz austenítica. A camada branca caracterizava-se por uma microdureza superior à de regiões não afetadas pelo processo e pela presença das microtrincas que se propagam até encontrar uma região não afetada pelos efeitos

térmicos. A combinação destas características, com tensões de tração na superfície do material prejudica o desempenho da peça usinada em relação à fadiga devido à fragilização da superfície e ao surgimento de microtrincas (BOSHEH; MATIVENGA, 2005)

O estudo da influência dos parâmetros de usinagem na integridade superficial de peças e componentes mecânicos têm influências significativas na vida dos produtos e conseqüentemente na qualidade e credibilidade de uma empresa.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral caracterizar a influência dos parâmetros de corte na integridade superficial durante o processo de fresamento em operações de acabamento do aço AISI H13 endurecido a 54 HRC. As forças de corte foram medidas durante a usinagem através de um dinamômetro acoplado à mesa da máquina-ferramenta utilizada nos ensaios. Através desta caracterização, pretende-se fornecer informações qualitativas que orientem a melhor escolha dos parâmetros de corte utilizados, tendo em vista a qualidade e produtividade dos produtos usinados em uma empresa.

Numa visão mais específica do objetivo, pretende-se obter informações detalhadas da influência dos parâmetros de corte sobre a integridade superficial e o estudo das forças de corte presentes na usinagem, da seguinte maneira:

- a) avaliar o efeito dos parâmetros de corte (profundidade de corte, velocidade de corte e avanço por faca ou dente) sobre os esforços de usinagem;
- b) analisar os efeitos dos parâmetros de corte (profundidade de corte, velocidade de corte e avanço por faca ou dente) sobre as características da integridade superficial (rugosidade e camada branca).

1.4 Organização da dissertação

Esta pesquisa está dividida e organizada em cinco capítulos, na seguinte ordem:

Seção 1 – INTRODUÇÃO: Apresenta a contextualização do trabalho de pesquisa, a motivação e os objetivos que fundamentaram sua execução, bem como a estrutura da dissertação.

Seção 2 – REVISÃO DA LITERATURA: Trata da revisão da literatura e das fundamentações teóricas que explicam e se relacionam ao tema da pesquisa.

Seção 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS: Apresenta a descrição sobre os materiais e métodos empregados na execução dos ensaios.

Seção 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES: Mostra os resultados obtidos e sua respectiva discussão.

Seção 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS: Apresenta as conclusões do trabalho, sintetizando o conteúdo deste documento, bem como sugestões para trabalhos de continuidade, com a exploração de outros aspectos do tema abordado.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as referências utilizadas para compor a revisão da literatura e confrontar os resultados medidos com os obtidos por outros pesquisadores.

2. REVISÃO DE LITERATURA.

2.1 Fresamento

Segundo Ferraresi (1970), a operação de fresamento é definida como operação de usinagem na qual a ferramenta (fresa) possui arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo, e que executa a retirada do material através do movimento de corte provido pela rotação da mesma sobre seu eixo, ao mesmo tempo em que o movimento de avanço é feito geralmente pela peça presa à mesa da máquina.

O fresamento, dentre as operações de usinagem existentes, é a mais versátil na geração de superfícies planas. Sua versatilidade é possível devido à grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, tornando possível a geração de um número igualmente vasto de superfícies (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006). Outra vantagem apresentada pela operação de fresamento em relação aos demais processos de usinagem é o fato de utilizar ferramentas que podem apresentar um número elevado de arestas de corte, permitindo aliar a alta produtividade do processo à capacidade de gerar superfícies com um ótimo acabamento superficial, pois é possível utilizar alta velocidade de corte com um avanço por dente pequeno (f_z), resultando em alta produtividade com um bom acabamento.

O fresamento pode ser classificado de acordo com a posição do eixo árvore em relação a superfície gerada (peça usinada) ou de acordo com a posição dos dentes da ferramenta que executará a remoção do material. Segundo a posição do eixo árvore, o fresamento pode ser classificado como fresamento horizontal, fresamento vertical ou fresamento inclinado. Considerando-se a disposição dos dentes, a classificação pode ser feita em fresamento tangencial, que ocorre quando os dentes estão na parte cilíndrica da fresa e fresamento frontal, ocorrendo quando os dentes estão na superfície plana do topo de ferramenta (FERRARESI, 1981).

Outra classificação que pode ser feita no processo de fresamento diz respeito ao sentido dos movimentos executados. Desta forma, quando os movimentos de corte e de avanço possuem a mesma direção e sentido, tem-se o fresamento concordante e quando os movimentos de corte possuem a mesma direção com sentidos opostos, tem-se o fresamento discordante.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini, (2006), o fresamento concordante é a operação onde o valor do ângulo de contato do dente com a peça (φ) diminui à medida que o corte progride e o fresamento discordante é a operação onde o valor do ângulo de contato do dente da ferramenta com a peça (φ) aumenta progressivamente à medida que o cavaco se forma. Também definem como fresamento tangencial aquele em que a superfície gerada é paralela ao eixo da fresa e fresamento frontal como sendo aquele em que a superfície gerada é perpendicular ao eixo da fresa.

Os fresamentos concordantes ou discordantes são realizados somente quando o centro da ferramenta está fora da superfície gerada, situação não encontrada na maioria das operações realizadas, pois nestas o centro da ferramenta está sobre a superfície usinada, e o fresamento realizado é concordante e discordante ao mesmo tempo.

A figura 2.1 mostra os fresamentos concordante e discordante.

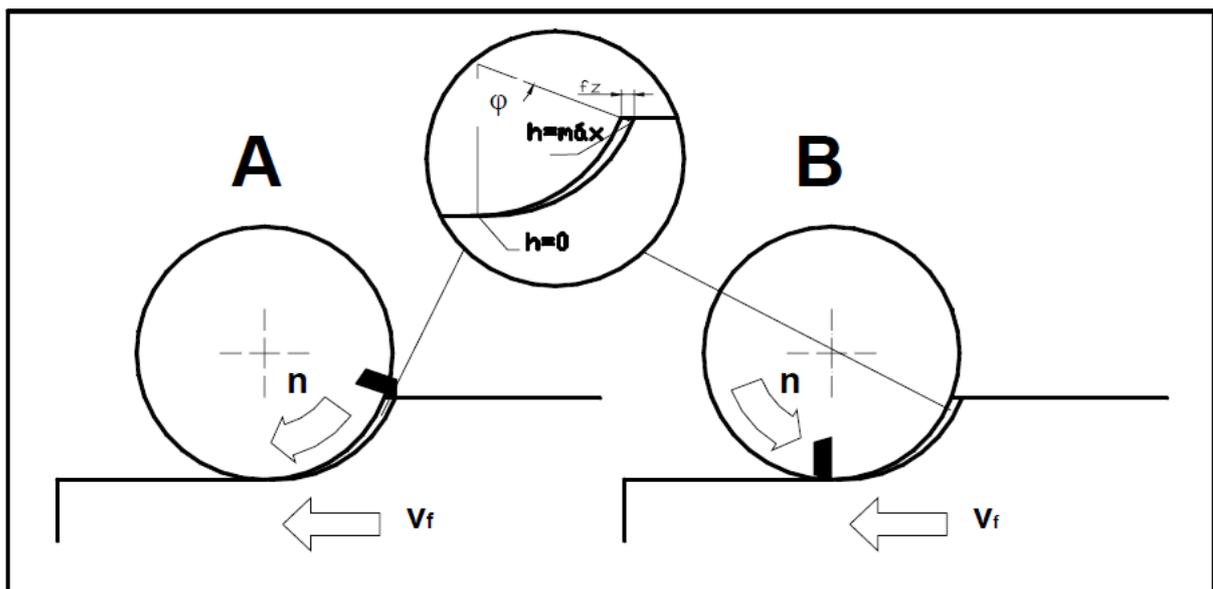


Figura. 2.1: Sentido de fresamento: A) fresamento concordante; B) fresamento discordante
Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2006).

Existem algumas diferenças entre estes dois tipos de fresamento, sendo que uma das principais é a forma como a ferramenta penetra na peça. No fresamento discordante a espessura do cavaco no início do corte é zero, o que provoca, de forma gradativa, um aumento da pressão e da força de corte além do aumento do atrito entre a ferramenta e a superfície usinada. Este fato faz com que a temperatura na interface ferramenta / peça aumente e a vida

útil da ferramenta diminua, além do encruamento que a superfície usinada acaba sofrendo no momento da usinagem devido ao esforço contínuo realizado pela ferramenta durante sua penetração na peça. No fresamento concordante a espessura do cavaco no início do corte é máxima, fazendo com que o choque de entrada da ferramenta seja maior que no fresamento discordante, porém, o fato de a espessura do cavaco no final do corte ser mínima faz com que a saída da ferramenta da peça seja mais suave.

Pode-se citar outra diferença entre os dois processos de fresamento que consiste na maneira como o vetor força da usinagem irá variar. Como a espessura do cavaco formado no início do corte no fresamento discordante é mínima, os valores da força de corte são altos devido ao aumento da pressão específica de corte (K_s). Quando a ferramenta penetra na peça, o valor de K_s e da força de corte caem. No momento da entrada da aresta no corte, a componente da força na direção perpendicular à superfície da peça atua no sentido de empurrar a peça contra a superfície de apoio. Como o aumento da espessura do cavaco durante o corte ocorre de maneira progressiva, a força de corte tende a aumentar tornando seu valor elevado quando a ferramenta sai da peça, fazendo com que a componente da força perpendicular à peça atue no sentido de puxar a peça da mesa. Por estes motivos, esta variação no sentido da força pode causar vibrações. No fresamento concordante a espessura do cavaco no início do corte é máxima, provocando um grande choque na aresta de corte com um valor de força alto. À medida que a usinagem prossegue, a diminuição da espessura do corte faz o valor da força de corte diminuir progressivamente até se tornar mínima no momento em que a ferramenta sai da peça. Apesar de haver variação na intensidade da força, ela atua sempre no sentido de empurrar a peça contra a mesa, fazendo com que o acabamento superficial seja melhor do que no fresamento discordante, pois a possibilidade de ocorrerem vibrações é menor.

Segundo Rosa e Siqueira (2001), as principais características do fresamento são:

- a) utilizar fresa multi-cortante provida de arestas de corte dispostas simetricamente ao redor de um eixo;
- b) o movimento de rotação da ferramenta é ao redor de seu eixo permitindo que cada uma das arestas cortantes retire parte do material separadamente;
- c) o movimento de avanço geralmente é feito na peça fixada na mesa da máquina, obrigando a mesma a passar sob a ferramenta o que lhe dá a forma e dimensão desejada;

d) a grande variedade das fresas (ferramentas multi-cortantes) proporciona a esta operação uma característica de versatilidade na geração de superfícies planas de não revolução.

Diniz, Marcondes e Coppini (2006), afirmam que, dentre as operações de usinagem existentes, o fresamento é a mais versátil na geração de superfícies planas não de revolução. Tal versatilidade é possível devido à grande variedade de geometrias de ferramentas existentes no mercado, o que torna possível a geração de um vasto número de superfícies.

Em relação aos demais processos de usinagem, a operação de fresamento apresenta alta produtividade aliada a um bom acabamento superficial. Isto acontece devido ao fato de utilizar ferramentas que podem ter um elevado número de arestas de corte que, aliado com um avanço de mesa proporcionam alta produtividade. Como há uma grande quantidade de arestas de corte, mesmo utilizando-se um avanço por dente (f_z) pequeno a produtividade ainda será elevada, com um ótimo acabamento superficial.

2.1.1 Movimentos no fresamento

Os parâmetros de corte na geração de superfícies usinadas são de extrema importância e para facilitar sua compreensão serão expostos alguns conceitos básicos sobre os movimentos do processo e geometria de cunha de corte da ferramenta. Para tanto, a terminologia adotada segue a norma NBR 6162 – Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais e NBR 6163 – Geometria da cunha de corte. A simbologia adotada pela NBR 6162 segue a norma ISO 3002.

Movimento de corte: ocorre pela rotação da ferramenta em torno do seu eixo permitindo a remoção de material por volta. As grandezas relacionadas ao corte levam o índice “c” de “*cutting*”.

Movimento de avanço: este movimento é realizado pela máquina onde a peça está fixada que em conjunto com o movimento de corte permite a remoção contínua de material. As grandezas relacionadas ao avanço levam o índice “f” de “*feed*”.

Movimento efetivo: é a combinação dos movimentos de corte e avanço realizados simultaneamente.

2.1.2 Grandezas do fresamento

A eficiência de uma operação de fresamento depende diretamente da correta seleção da ferramenta e do conjunto de grandezas utilizadas no processo.

As grandezas e suas relações geométricas, descritas a seguir, apresentam uma terminologia baseada na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Estas grandezas podem ser divididas em:

- a) **Velocidade de corte (V_c):** é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente.

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (2.1)$$

- b) **Velocidade de avanço (V_f):** é a quantidade de movimento em um determinado tempo.

$$V_f = f * n \quad (2.2)$$

- c) **Avanço por dente (f_z):** é o percurso de avanço por dente e por volta ou curso da ferramenta, medido na direção do avanço.

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (2.3)$$

- d) **Avanço de corte (f_c):** é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de corte. No fresamento essa variável muda constantemente durante o processo.

$$f_c = f_z * \text{sen}\varphi \quad (2.4)$$

- e) **Profundidade ou largura de usinagem (a_p):** é profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No fresamento frontal, “ a_p ” é denominada profundidade de usinagem, porém no fresamento tangencial, “ a_p ” é denominada largura de usinagem.

- f) **Penetração de trabalho (a_e):** é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e perpendicularmente à direção de avanço.

As grandezas do fresamento estão ilustradas na figura 2.2.

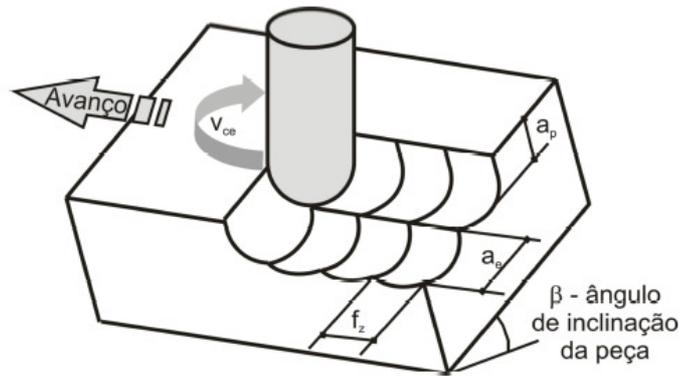


Figura 2.2: Grandezas do fresamento.

À partir deste ponto, o conjunto de grandezas no fresamento será denominado de parâmetros de corte.

O fresamento de aços endurecidos é um processo de usinagem em materiais com dureza superior a 45 HRC, que é o alvo dos estudos desse trabalho. Lima; Corrêa (2002) afirmaram que o principal motivo para a utilização desse tipo de usinagem é a possibilidade de eliminar a etapa de retificação na operação de acabamento, obtendo peças com boa qualidade dimensional e superficial.

Segundo a Sandvik (1999), devido ao fato de o material endurecido apresentar limitações ao ser usinado e levando em consideração a resistência da ferramenta e rigidez do sistema de fixação, recomenda-se a aplicação de pequenos valores de profundidade de corte para as operações de acabamento. Desta forma, os esforços de corte serão mantidos baixos, minimizando a deflexão e assim obtêm-se acabamento superficial com excelente qualidade geométrica e dimensional.

2.1.3 Mecanismo de formação do cavaco

Um material metálico quando submetido à ação de uma ferramenta de corte está, na realidade, sob um estado de sollicitação mecânica intensa, que se traduz por elevadas concentrações de tensão, altíssimas taxas de deformação e significativos valores de temperatura. O cisalhamento localizado a frente da aresta de corte é o principal esforço representativo do processo de formação de cavaco (BLACK, 1989).

O estudo da formação de cavaco nos mais variados processos de usinagem é de suma importância, pois a formação do cavaco influi em inúmeros fatores ligados a usinagem, como desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado e penetração do fluido de corte (DINIZ ET al., 2000). Portanto aspectos econômicos, de qualidade do produto, da segurança do operador e da utilização da máquina-ferramenta estão envolvidos com o processo de formação de cavacos.

O processo de formação do cavaco determina a magnitude dos vários fenômenos físicos que promovem o desgaste da ferramenta de corte, como as reações químicas, o desgaste abrasivo e a difusão. Ele também determina quantitativamente a potência que deve ser gerada para remover o material da peça (DAVIES, 1954).

O mecanismo da formação do cavaco envolve uma taxa de deformação muito alta, temperatura elevada e fluxo plástico não linear do material. Este fluxo plástico gera tensões locais na ferramenta de corte, uma distribuição de temperatura na interface ferramenta / cavaco e determina as condições do material da peça após o cavaco ter sido removido (DAVIES, 1954).

A formação do cavaco no processo de fresamento difere dos demais processos devido ao fato de que toda operação de fresamento é uma operação de corte interrompido, já que a aresta de corte passa, em geral, menos da metade do tempo gasto em uma revolução realizando o corte propriamente dito. Isto traz conseqüências à vida da ferramenta e a qualidade da superfície gerada.

Na maioria dos processos de fresamento, o cavaco formado tem a forma de vírgula, com variação da espessura, fazendo com que a seção nominal do mesmo varie durante sua formação. A força de corte é diretamente proporcional ao valor da seção nominal de corte e isso faz com que seu valor também varie durante o corte, fazendo com que a potência e a temperatura de corte, que são grandezas ligadas à força de corte também variem.

A profundidade de corte tem um efeito dominante na estabilidade e na energia utilizada no processo, além da determinação da formação do cavaco (NING; RAHMAN; WONG, 2001), influenciando também em outros fatores ligados ao processo de usinagem, como desgaste da ferramenta e alteração da integridade superficial do material trabalhado (ZEILMANN; et al., 2004).

Alguns fatores resultam em uma melhora na geração do cavaco. Uma usinagem estável traz diversos benefícios para o processo, porém, para que isso ocorra, deve-se utilizar a melhor combinação das variáveis rotação e avanço adequados para propiciar uma profundidade de corte até um valor máximo.

Na prática, todo trabalho mecânico na usinagem é convertido em calor. Existem três fontes principais de calor na formação de cavacos, sendo estas:

- 1) **Zona primária de produção de calor:** é a região de cisalhamento, onde a deformação plástica resulta na geração da maior fonte de calor do processo;
- 2) **Zona secundária de produção de calor:** nesta região ocorre uma deformação plástica adicional do cavaco, ocorrendo considerável produção de calor devido ao atrito do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta;
- 3) **Zona terciária de produção de calor:** esta região pode ser desprezada quando se considera uma ferramenta afiada, pois normalmente ocorre na superfície de folga da ferramenta sendo minimizada quando esta ainda não apresenta desgaste. Machado em 2004 afirmou que a zona terciária gera calor devido às deformações da peça e o atrito do cavaco contra a superfície de folga da ferramenta de corte.

Estas zonas geradoras de calor podem ser observadas na figura 2.3, que representa formação de cavaco na região de corte para uma ferramenta de ponta única e as três zonas de geração de calor (BRAGUINI Jr., 2002).

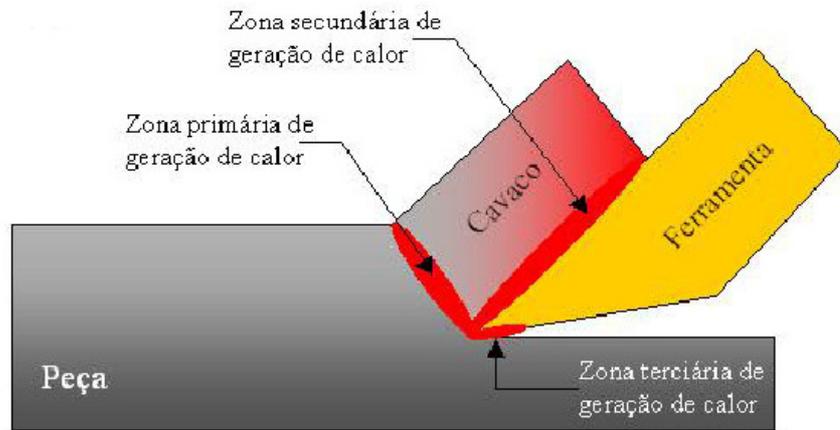


Figura 2.3: Localização das três zonas de geração de calor.

Fonte: Braguini Jr., 2002

As parcelas de calor dissipadas para o cavaco, ferramenta e peça variam de acordo com a velocidade de corte empregada, conforme ilustrado na figura 2.4, o que leva a concluir que as alterações nas características das superfícies usinadas são a somatória dos efeitos mecânicos e térmicos provenientes da usinagem.

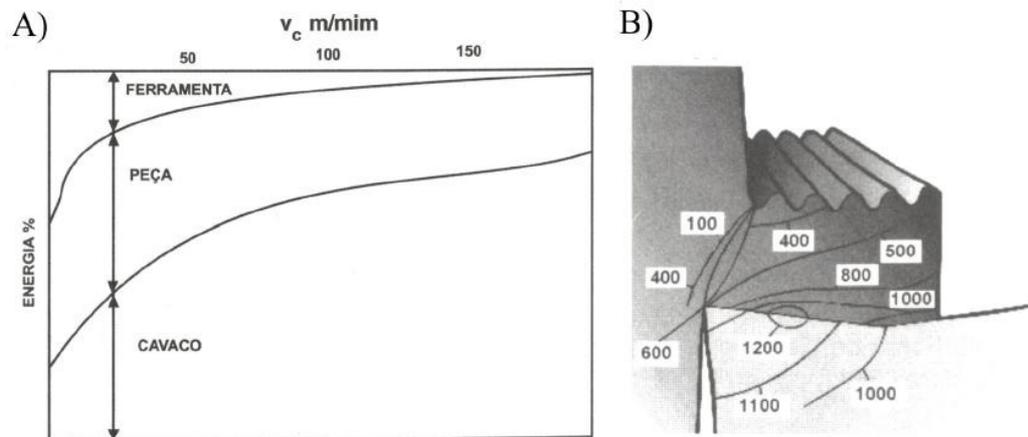


Figura 2.4: A) Distribuição da dissipação de energia de corte com a velocidade de corte
B) Distribuição típica da temperatura na ferramenta de metal duro.

Fonte: Diniz; Marcondes; Coppini, 2001

A velocidade de corte é o parâmetro que apresenta o maior efeito sobre a temperatura da interface cavaco/ferramenta (ABRAO; ASPINWALL; NG, 1996). A baixa velocidade, o desgaste da ferramenta é dominado por deformações plásticas e pela abrasão. Aumentando a velocidade, a porcentagem de energia que tende a ir para a ferramenta diminui (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001). Porém, com o aumento da temperatura, a quantidade de

energia total é cada vez maior, intensificando os mecanismos de desgaste por difusão e oxidação da ferramenta.

A combinação do movimento de rotação do eixo-árvore com o movimento retilíneo da mesa faz com que a trajetória da ferramenta não seja um arco de circunferência perfeito e sim uma cicloide. Essa diferença entre a trajetória real e a teórica faz com que haja uma diferença entre a espessura real do cavaco e a espessura teórica, influenciando a carga do cavaco sobre a ferramenta e também a forma não-deformada do mesmo durante o fresamento (LI; LIU; LI, 2001). A figura 2.5 mostra a diferença fundamental entre as trajetórias, sendo que, na trajetória teórica, consideram-se as duas metades do cavaco, a inicial e a final, como sendo idênticas.

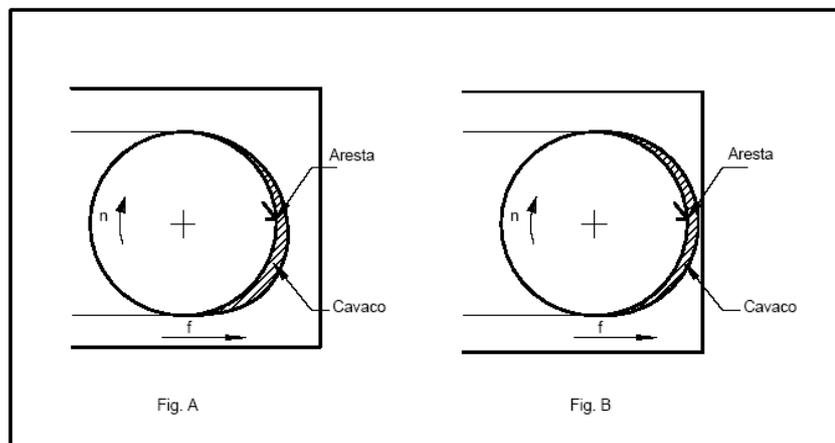


Figura 2.5: Perfil real (A) e teórico (B) do cavaco não-deformado.

Fonte: Li; Liu, 2001

Segundo ALTINTAS (2000), no mecanismo de formação de cavaco durante o fresamento, ao contrário do que ocorre no torneamento, a espessura instantânea do cavaco (h) varia periodicamente em função da imersão da ferramenta de corte e é expressa pela fórmula 2.5.

$$h(\phi) = f_z * \sin \phi \quad (2.5)$$

2.1.4 Forças de usinagem

O comportamento das forças na usinagem é de fundamental importância para a pesquisa e desenvolvimento de modelos, para o monitoramento, otimização e controle dos processos de usinagem. Devido à sua relativa facilidade de medição e relevância física, muitos pesquisadores têm realizado medições de forças durante a usinagem, para a avaliação e entendimento do processo e análise da dinâmica e cinemática de máquinas-ferramenta (SCHROETER, 2001).

O desempenho atribuído ao processo de usinagem, como estabilidade dinâmica, precisão de posicionamento ferramenta / peça, condições gerais da ferramenta, tipo de superfície usinada e erros na peça algumas vezes podem ser explicados com base na análise das forças atuantes.

A força total de usinagem, ou simplesmente força de usinagem (F_u) é a resultante de várias componentes de força: força de corte (F_c), força de avanço (F_f), força de apoio (F_{ap}) e força de profundidade (F_p), consideradas como forças que a peça exerce sobre a ferramenta, ou seja, são forças que agem em direção e sentido sobre a ferramenta, conforme mostrado de forma tridimensional na figura 2.6.

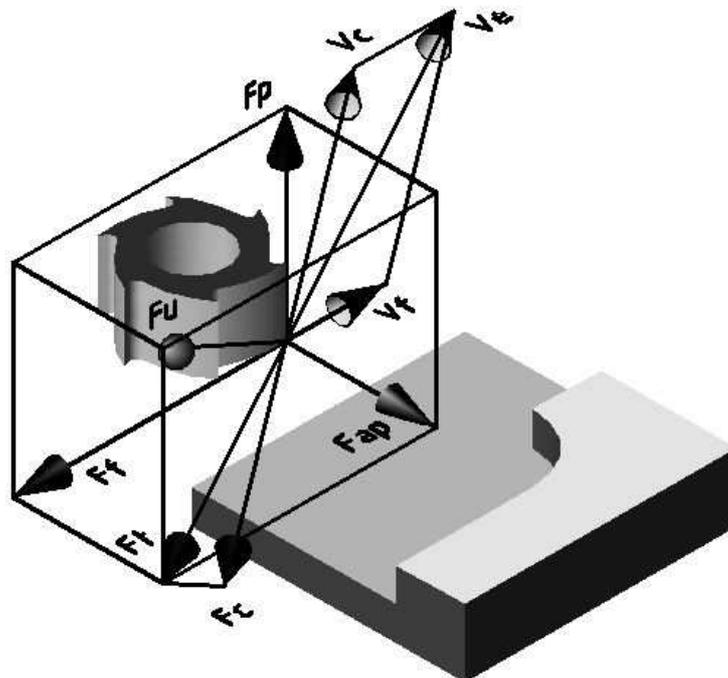


Figura 2.6: Forças de usinagem em fresamento tangencial e suas componentes na operação de fresamento.

Estas forças estão divididas em dois grupos: forças ativas e forças passivas de usinagem. Forças ativas (forças de corte e força de avanço) são aquelas descritas sobre o plano de trabalho e contribuem para a potência de usinagem. A força passiva (força de profundidade) é aquela descrita em um plano perpendicular ao plano de trabalho e afeta a ferramenta na sua deflexão elástica que, dependendo da intensidade, pode provocar vibrações no sistema.

A força de usinagem não pode ser medida, porque não se conhece com precisão seu sentido e direção, por isso é usual trabalhar com suas componentes, projetadas em planos ortogonais e direções conhecidas (DINIZ ET al., 2001).

Representando as forças de usinagem em um sistema cartesiano, a componente X, chamada de F_x é a força de avanço F_f , que é a medida de resistência que a ferramenta encontra na direção de avanço. A componente Y, chamada F_y , é a força de corte F_c que é a medida de resistência que a ferramenta encontra no sentido do corte e a componente Z, chamada F_z , é a força de profundidade F_p , que é a medida da resistência que a ferramenta encontra no sentido da profundidade de corte a_p , conforme mostrado na figura 2.7.

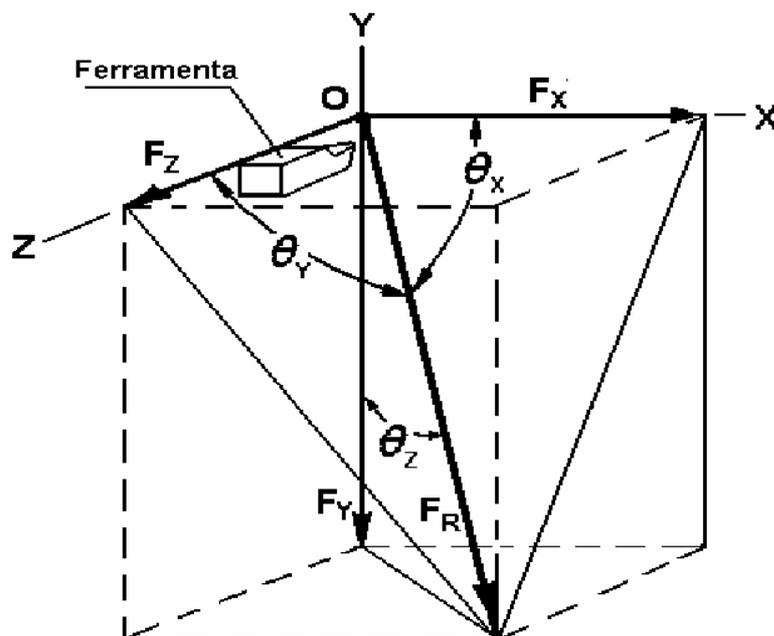


Figura 2.7: Forças X, Y e Z atuando na ponta da ferramenta.

Segundo Ferraresi (1970), a força de corte é dada pelo produto da pressão específica de corte (K_s) e a área de secção do cavaco (A), mostrada na expressão abaixo:

$$F_c = K_s \cdot A \quad (2.6)$$

Vários autores concordam que K_s é dependente do material da peça, entretanto não proporcionalmente, mostrando que além da tensão de ruptura do material, outros parâmetros influenciam a pressão específica de corte, como o tipo de estrutura do material e o grau de recalque. Quanto à secção de corte, que é o produto do avanço (f_z) pela profundidade de corte (a_p), a pressão específica de corte diminui com o aumento da secção. Isto acontece principalmente pelo aumento do avanço, que proporciona um aumento do fluxo de material diminuindo o coeficiente de atrito. A velocidade de corte (V_c) é outro fator que influencia a pressão específica de corte, que tende diminuir com o aumento da velocidade (DINIZ et al., 2001).

2.2 Ferramentas de corte

Cronologicamente, os principais desenvolvimentos em materiais de ferramentas foram (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002):

- a) aço ferramenta (1868);
- b) aço rápido (1900);
- c) stellite (1910)
- d) metal duro (1926);
- e) cerâmicas (1938);
- f) nitreto cúbico de boro (década de 50);
- g) diamante mono e policristalino (últimas décadas).

Os materiais de ferramentas listados anteriormente podem ser classificados de acordo com a Figura 2.8.

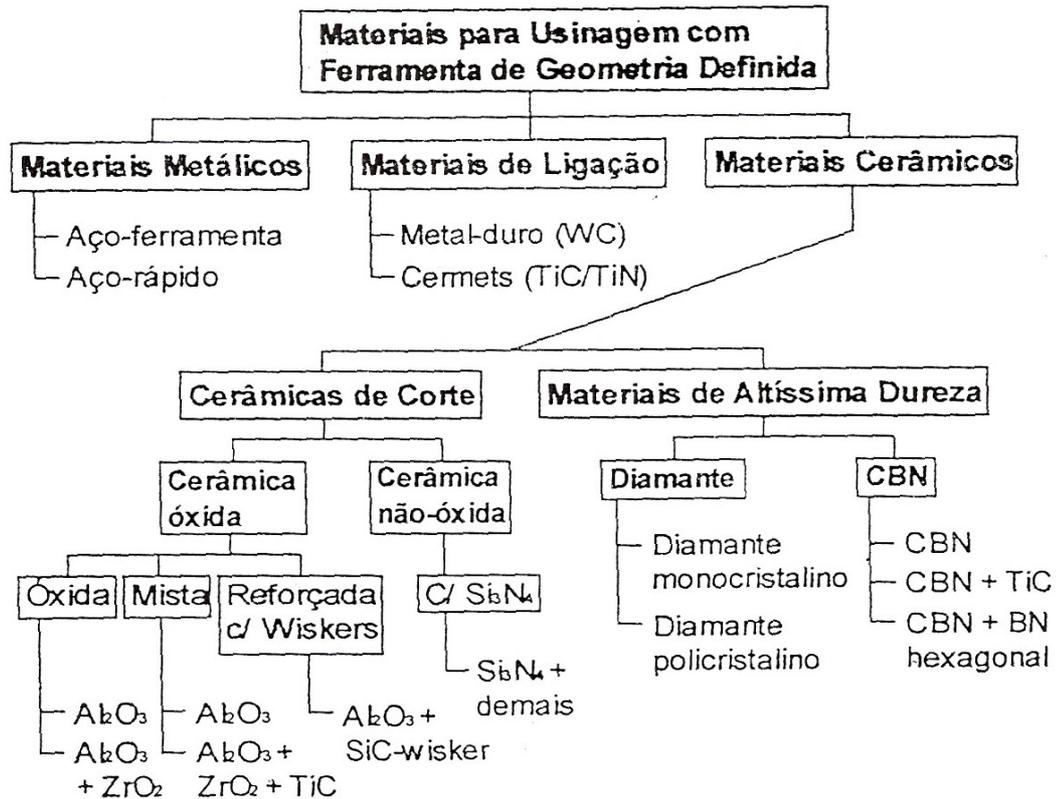


Figura 2.8: Classificação de materiais para ferramentas com geometria definida.

Fonte: Schoeter; Weingaertner, 2002.

Para a seleção criteriosa do material da ferramenta, deve-se levar em consideração uma série de fatores, tais como:

- a) Material a ser usinado;
- b) Processo de usinagem;
- c) Máquina operatriz;
- d) Custo do material da ferramenta;
- e) Forma e dimensões da ferramenta;
- f) Tipo de operação;
- g) Condição de usinagem.

Para qualquer material de ferramenta selecionado, é necessário que apresente algumas características, sendo que as principais são (MACHADO; SILVA, 2004):

- a) Dureza a quente;
- b) Estabilidade química;
- c) Tenacidade;
- d) Resistência ao desgaste e à compressão.

2.2.1 Ferramentas de corte utilizadas no fresamento de aços endurecidos

A ampliação do campo de aplicação da usinagem de aços endurecidos tornou-se possível graças ao desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte, como o metal duro micro grão com revestimentos e o CBN (SENTTUKO, 1989).

O metal duro micro grão contém partículas de tamanho de grão que são menores que 0,1µm. A redução do tamanho de grão melhora a dureza e a resistência à flexão. A dureza a quente pode ser melhorada pela adição de outros carbonetos, mas simultaneamente a resistência à flexão é diminuída.

Metal duro é um material sinterizado composto de Cobalto como aglomerante com partículas duras de Carboneto de Tungstênio (WC) em combinação com outros, tais como Carbonetos de Titânio (TiC), Carbonetos de Tântalo (TaC) ou de Nióbio (NbC). A composição destas partículas forma um corpo de alta dureza e resistência à compressão. O metal duro tem alto grau de dureza mas apresenta-se com valores menores quando comparados com outros materiais avançados como o Nitreto Cúbico de Boro (CBN) e os Cerâmicos (Al_2O_3 e Si_3N_4).

Outros materiais utilizados em ferramentas de corte são os Cermets e o Diamante Policristalino (PCD). Os Cerâmicos são utilizados na usinagem em acabamento de aços endurecidos ou de ferro fundido. Os Cermets são utilizados na usinagem de aços moles e de ferro fundido. O PCD é uma camada sinterizada de aproximadamente 0,5mm de espessura, que geralmente é aplicado diretamente sobre uma pastilha intercambiável ou é ligado ao metal duro por meio de brasagem, empregado somente na usinagem de ligas de alumínio e de materiais não ferrosos em geral, pois seu desempenho é baixo quando usinando aço. Isto se deve ao fato de ocorrer difusão do carbono que compõe o diamante devido as altas temperaturas na interface ferramenta / peça. Ferramentas mais duras e resistentes ao desgaste, tais como a de CBN e os cerâmicos não são comumente utilizadas para o fresamento do aço endurecido devido à excessiva fragilidade, mas os CBNs em determinadas situações quando o

mecanismo predominante de desgaste é a abrasão e corte interrompido tem sido muito eficientes (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

As ferramentas de corte podem ser inteiriças ou com pastilhas intercambiáveis montadas em hastes apropriadas. Para aumentar a dureza da aresta de corte as ferramentas de metal duro são revestidas com camadas dura como TiN (Nitreto de Titânio), TiAlN (Nitreto de Titânio Alumínio), TiCN (Carbonitreto de Titânio) e a cobertura com camada macia dupla tal como o MOVIC (FALLBÖHMER, 2000), o qual é uma camada fina lubrificante com baixo coeficiente de atrito aplicada na ferramenta para usinagem a seco.

As ferramentas podem ter uma, duas ou três camadas. As coberturas constituídas de única camada geralmente são o TiC ou o TiCN, que são a camada mais externa para o caso de ferramentas com multicamadas. As ferramentas com duas camadas geralmente têm a camada de Al₂O₃ (Óxido de Alumínio) ou TiN por cima da camada de TiC. Nas ferramentas com três camadas, normalmente tem camada de TiC sobre o substrato, que por sua vez recebe a camada intermediária de Al₂O₃, e sobre esta última a camada de TiN ou TiC. Os revestimentos podem apresentar espessura total das camadas de 2 a 12 µm que são finas camadas depositadas sobre o núcleo do metal duro que possibilitam aumentar a resistência ao desgaste e oxidação, mantendo o núcleo de metal duro com a tenacidade original. Com a aplicação dos revestimentos consegue-se um aumento da vida útil da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

A tabela 2.1 fornece alguns dados comparativos entre as principais camadas de cobertura.

Tabela 2.1: Dados básicos das principais coberturas de ferramentas.

Cobertura	Cor	Nanodureza [GPa]	Espessura [µm]	Coeficiente de atrito	Máxima temperatura de utilização [C °]
TiN	Amarela-Ouro	24	1 - 7	0,55	600
TiCN	Azul-Escura	37	1 - 4	0,20	400
TiAlN	Violeta	35	1 - 4	0,50	800
MOVIC	Cinza-Prata	-	0,5 - 1,5	0,15	400

Se a ferramenta escolhida apresentar características de tenacidade e dureza a quente, o desgaste ocorrerá de forma lenta e gradativa, sendo então o desgaste dominado pela estabilidade química do material da ferramenta. Na Figura 2.9, é possível verificar estas

características em ordem crescente. Geralmente, quando se aumenta a dureza a quente e a resistência ao desgaste por abrasão, diminui-se a tenacidade do material.

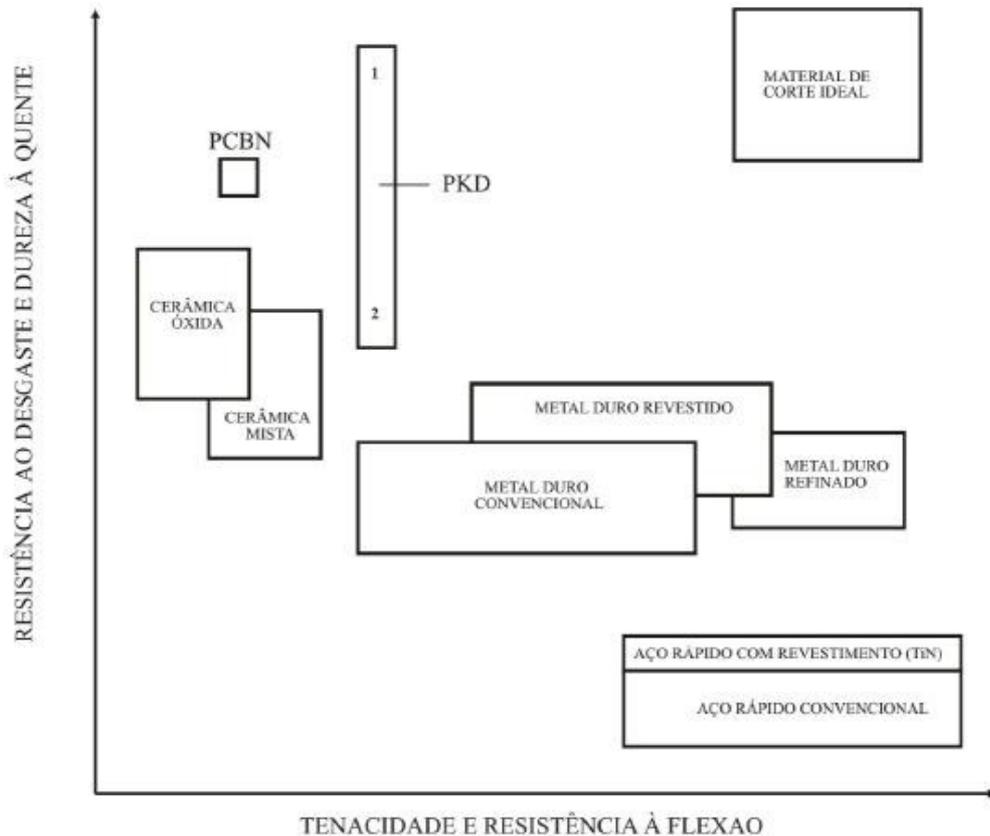


Figura 2.9: Tenacidade X Dureza.

Fonte: Machado; Silva, 2004

2.2.2 CBN utilizado no fresamento de aço endurecido

O Nitreto Cúbico de Boro (CBN) é um material sintético, cujo processamento foi realizado com sucesso pela primeira vez em 1954, pela General Electric Co. EUA. O pó de CBN é fabricado a uma pressão e temperatura extremamente elevadas, a partir do Nitreto de Boro Hexagonal juntamente com um catalisador (ABRÃO, 1996).

O CBN possui propriedades mecânicas excelentes, tais como a resistência às altas temperaturas, a característica de manter o corte em função de sua elevada dureza a quente e possuir baixa solubilidade no ferro. A dureza do CBN, aproximadamente metade da dureza do diamante, na escala Knoop, é de 4800 kgf/mm^2 . Como comparação ao material a ser usinado,

através de uma tabela de equivalências entre diferentes escalas de dureza, observa-se que 55HRC corresponde a 600 kgf/mm^2 (POULACHON G., 2003a).

O CBN é estável termicamente até aproximadamente 1300°C e passa a ser reativo quimicamente a partir de 1050°C , sendo que sua condutividade térmica é 65% da observada para o diamante.

As ferramentas de CBN podem ter suas propriedades influenciadas pela porcentagem de CBN, pelo tamanho de grão e pela composição da fase ligante, que pode ser cerâmica ou metálica. Entre os ligantes mais usuais temos os materiais metálicos (liga Ni-Co) e cerâmicos (TiN, TiC ou WC), cujas proporções podem variar de 5 a 90% (ABRÃO, 1996).

Normalmente, para usinagem de materiais endurecidos, os ligantes cerâmicos são preferidos (POULACHON G., 2003a).

As pastilhas de CBN podem apresentar diferentes formulações, variando de fabricante para fabricante. Desta forma, não há a possibilidade de tratar de forma geral suas propriedades mecânicas, técnicas de fabricação e performance durante a usinagem. Entretanto, duas amplas categorias podem ser definidas, sendo uma para usinagem em desbaste de materiais ferrosos endurecidos, particularmente ferros fundidos com dureza entre 45 a 65 HRC e profundidade de usinagem variando entre 0,5 a 1,0 mm e outra para usinagem de acabamento em componentes endurecidos, como no caso de aço ferramenta, com profundidade de corte abaixo de 0,5 mm, tipicamente entre 0,1 e 0,2 mm.

Nestas ferramentas de corte, é usual a variação da porcentagem de CBN entre 50% a 90%, sendo que com 50% são utilizadas para as operações de acabamento, por ser necessário um compromisso maior entre a dureza, para garantir a resistência a abrasão, e a tenacidade, devido à geometria da aresta, com porcentagens maiores para operações de desbaste. O material da ferramenta com um índice baixo de CBN tem uma tenacidade mais elevada (POULACHON, 2003a).

Para alguns materiais de peça de trabalho, o aumento da velocidade de corte resulta no aumento da vida útil da ferramenta, dentro de uma determinada faixa de velocidades. As ferramentas de CBN podem estar disponíveis na forma de “blanks” com uma camada de CBN sobre outra de carboneto, ou então, na forma de insertos prontos para o uso em suportes padronizados. O CBN no formato de camadas é cortado em peças pequenas e brasados substituindo a aresta de corte de insertos de metal duro.

2.2.3 Vida da ferramenta de corte

A vida das ferramentas de metal duro diminui quando a dureza da peça aumenta, enquanto que para as ferramentas de CBN e outros materiais cerâmicos observam-se resultados opostos (para durezas abaixo de 50 HRC) (POULACHON, 2003a).

Poulachon (2003) realizou estudos para investigar o desempenho e o comportamento do desgaste de ferramentas de CBN em operações de acabamento. Foi realizado o torneamento a seco dos seguintes aços: para trabalho a frio ABNT D2, para trabalho a quente ABNT H11 e DIN 35NiCrMo16, DIN 35NiCrMo16 e AISI 52100. Embora tivessem a mesma dureza, de 54 HRC, uma grande variação na taxa de desgaste foi observada na usinagem destes aços, como mostra a figura 2.10.

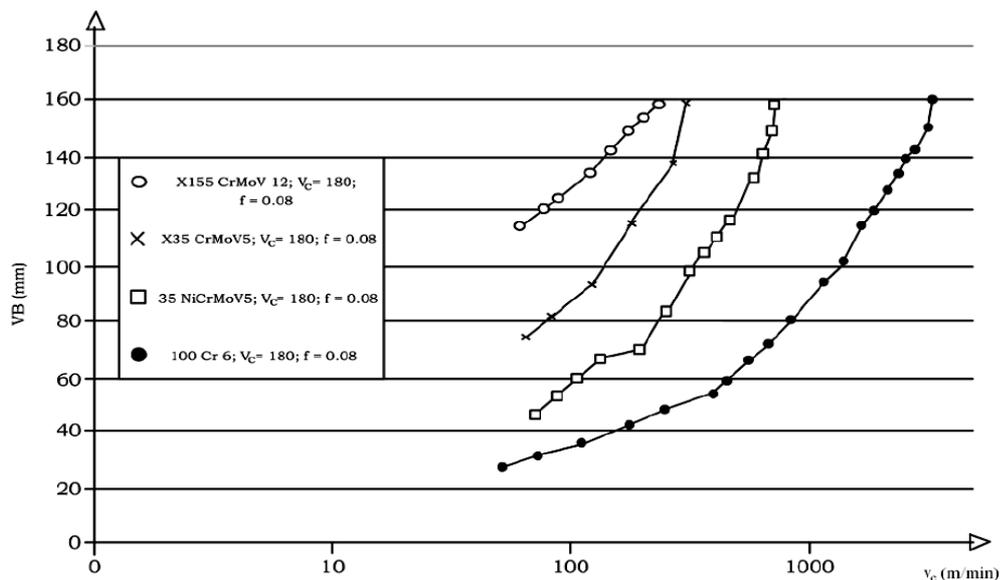


Figura 2.10: Desgaste da superfície de folga (VB) em função do tempo, para os quatro materiais, com a mesma velocidade de corte e de avanço em escala logarítmica.

Fonte: Poulachon, 2003

O trabalho de Poulachon sugere que a microestrutura do aço endurecido tem influência no desgaste das ferramentas de CBN. O principal fator de influência é a presença de vários carbonetos, com diferentes durezas, na microestrutura dos aços.

Os tipos de deterioração mais comuns encontrados nas ferramentas de corte, segundo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI (2001), são:

- a) **Desgaste frontal ou de flanco:** ocorre na superfície de folga, é causado pelo contato com a peça e é o desgaste mais comum encontrado nas ferramentas.
- b) **Desgaste de cratera:** ocorre na superfície de saída da ferramenta, sendo causado pelo atrito da ferramenta com o cavaco e pelas elevadas temperaturas geradas na interface ferramenta / cavaco. Na utilização de ferramentas cerâmicas ou ferramentas de metal duro com revestimento, este desgaste é minimizado, em especial quando se utiliza revestimento à base de Al_2O_3 ;
- c) **Deformação plástica da aresta de corte:** ocorre devido às elevadas pressões e temperaturas geradas na ponta da ferramenta, esta deformação é muito comum acontecer em ferramentas de aço rápido que não suportam elevadas temperaturas;
- d) **Lascamento:** ocorre em ferramentas com material frágil ou com arestas de corte pouco reforçadas, sendo que é a retirada de partículas com razoável tamanho, devido aos esforços de corte;
- e) **Trincas:** ocorrem devido as pressões mecânicas alternadas e/ou variações bruscas e de temperatura, levando à rápida propagação e ruptura. As trincas podem ser transversais ou longitudinais;
- f) **Quebras:** podem ocorrer por inúmeros fatores como: erro do operador, tipo de raio ou ângulos de ponta muito pequenos, carga excessiva sobre a ferramenta, dificuldade de saída de cavacos, etc.

Diniz; Marcondes; Coppini (2001) afirmaram que os mecanismos que proporcionam estas deteriorações são:

- a) **Difusão:** ocorre quando a usinagem atinge temperaturas elevadas proporcionando a mobilidade dos átomos da ferramenta de corte e da peça;
- b) **Aderência:** ocorre entre a ferramenta de corte e a peça devido às altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte;

- c) **Abrasão:** é a remoção do material via o contato entre a peça e a ferramenta de corte, através de mecanismos de micro-corte, sulcamento e trincamentos;
- d) **Oxidação:** está sempre presente devido ao meio em que a zona de corte é encontrada, mas a mesma é potencializada pelas altas temperaturas de corte.

2.3 Integridade da superfície

Integridade da superfície (IS) é o conjunto de características topográficas, mecânicas, químicas e metalúrgicas de uma superfície manufaturada e suas relações com o desempenho funcional da peça (GRIFFITHS, 2001).

O termo integridade de superfície foi criado em 1964 por Field e Kahles (1971), sendo definido como: condição inerente de uma superfície produzida em usinagem ou outra operação de geração de superfície e envolve o estudo e controle de dois fatores: rugosidade ou topografia e metalurgia da superfície.

A topografia da superfície usinada tem sido aceita como critério que controla sua qualidade, sendo que é amplo o relacionamento direto entre a rugosidade e a resistência à fadiga, coeficiente de transmissão de calor e resistência ao desgaste. Entretanto, a topografia é apenas parte da consideração, pois as alterações provocadas pela usinagem que ocorrem abaixo da superfície também possuem um peso fundamental sobre o desempenho dos componentes usinados (GRIFFITHS, 2001).

A figura 2.11 mostra os efeitos da usinagem na integridade da superfície.

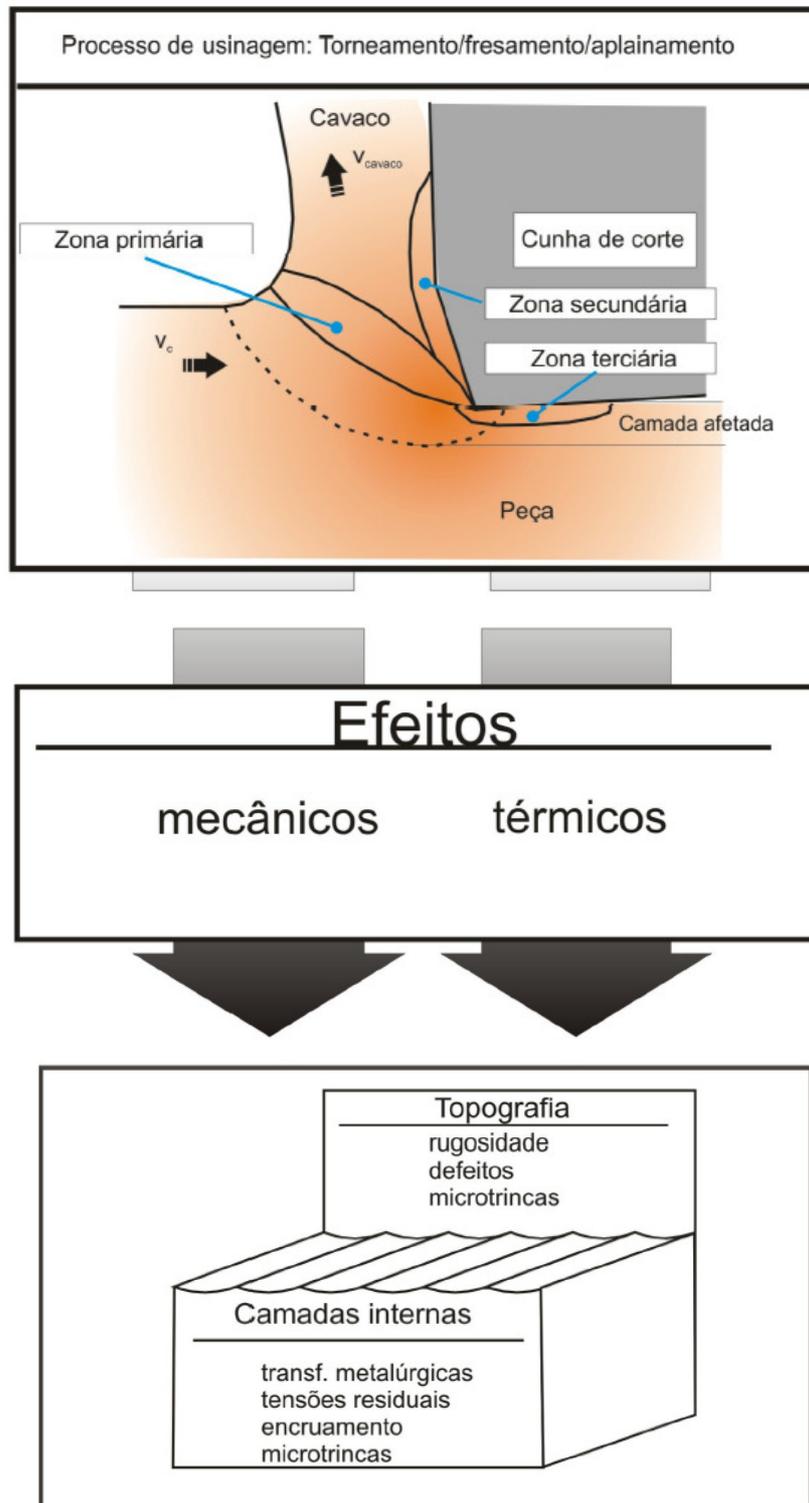


Figura 2.11: Efeitos da usinagem na integridade da superfície.

Fonte: Bethke, 1993.

Praticamente todo trabalho mecânico na usinagem é convertido em calor. No item 2.1.3, que trata do Mecanismo de Formação de Cavacos, foi citado que existem três regiões

principais geradoras de calor, que são: zona primária, onde ocorre a deformação e a separação do cavaco, sendo a principal geradora de calor, seguida pela zona secundária onde o calor é gerado devido ao atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e, a zona terciária, que ocorre devido deformações da peça e seu atrito com a superfície de folga da ferramenta. A parcela de calor dissipado para o cavaco, peça e ferramenta varia de acordo com os parâmetros de usinagem, material da peça e ferramenta utilizada. As alterações nas características de uma superfície usinada são uma somatória dos efeitos térmicos e mecânicos produzidos durante a usinagem.

A figura 2.12 mostra um desenho esquemático das camadas internas. Pode-se observar que a camada limite externa (1 e 2) é considerada como aquela onde ocorre as reações químicas (absorção, oxidação, etc) na superfície recém-usinada. Logo abaixo, na camada limite interna (3 a 5) encontra-se uma camada que sofre transformações metalúrgicas e deformações plásticas devido a ação de corte da ferramenta e variação de temperaturas envolvidas durante o processo de usinagem. A intensidade da deformação plástica e transformação metalúrgica diminuem gradativamente à medida que se distancia da superfície usinada até que não seja mais percebida.

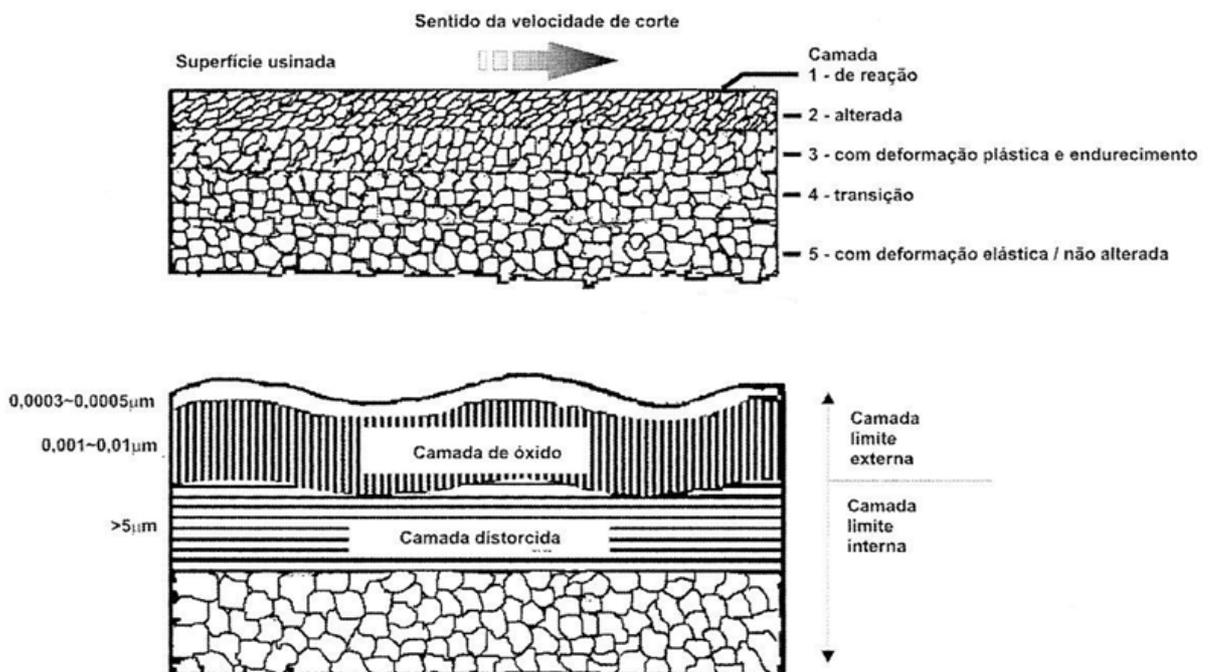


Figura 2.12: Camadas superficiais de corpos sólidos.

Fonte: Boehs, 1992.

Field e Kahles (1971) identificaram os tipos de alterações que ocorrem nas superfícies usinadas e no ano seguinte propuseram as técnicas para mensurar os danos e os conjuntos de informações mínimas para caracterizar a integridade da superfície, conforme mostrado na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Tabelas de conjuntos de características da integridade da superfície.

Caracterização mínima para IS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Acabamento superficial 2. Macroestrutura (l) <ol style="list-style-type: none"> a. Macrotrincas b. Indicação de macroataque 3. Microestrutura <ol style="list-style-type: none"> a. Microtrincas; b. Deformações plásticas; c. Transformação de fases; d. Ataque intergranular; e. defeitos superficiais; f. Aresta postiça; g. Corrosão.
Caracterização padrão para IS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Caracterização mínima para IS 2. Teste de fadiga (simplificado) 3. Teste de corrosão 4. Tensão residual e distorções
Caracterização estendida para IS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Caracterização padrão para IS 2. Teste de fadiga (completo) 3. Ensaio mecânicos adicionais <ol style="list-style-type: none"> a. Tração; b. Tensão de ruptura c. Evolução de atrito em deslizamento, vedação.

Fonte: Field; Kahles; Cammett, 1992

A maioria dos trabalhos se restringe a caracterização mínima ou padrão de superfícies usinadas, sendo que apenas alguns pesquisadores se aprofundam na relação dos parâmetros de corte sobre a integridade da superfície (HIOKI, 2006).

2.3.1 Rugosidade

A textura superficial de componentes usinados pode afetar significativamente várias propriedades como atrito, desgaste, transmissão de calor, resistência mecânica, fadiga e fluxo de fluidos.

Portanto a rugosidade é extremamente importante e deve ser avaliada por seus parâmetros externos, assim como pela sua integridade superficial.

Uma superfície ideal que não contenha erros de forma ou textura secundária (erros macrogeométricos) e de acabamento ou marcas de fabricação (erros microgeométricos) não existem na realidade. Após os processos de usinagem tem-se uma superfície efetiva que pode ser medida e avaliada em relação com a superfície ideal.

A rugosidade de uma superfície usinada pode ser avaliada por vários parâmetros que levam em conta algumas características da superfície, como o comprimento da rugosidade (1), o comprimento da ondulação (2), a amplitude das cristas (3), a amplitude da ondulação (4) e sua orientação (5), como mostrado na figura 2.13 (CAMARGO, 2002).

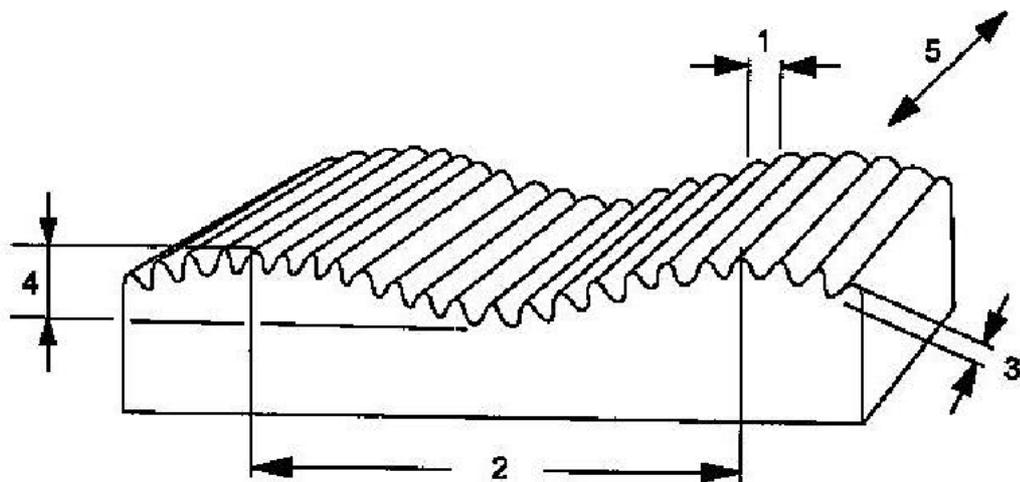


Figura 2.13: Elementos de uma superfície usinada.

Fonte: Camargo, 2002

Segundo Camargo (2002), o parâmetro Ra (“Rogness Average”) é o mais utilizado e aceito por ser aplicado na maioria dos processos, por filtrar grandes variações que alterariam fortemente o valor medido e também por ser utilizado como indicação do estado de superfícies por equivalência a classe de rugosidades, conforme a norma NBR 8401.

A rugosidade Ra pode ser classificada como sendo altura da área entre o perfil de rugosidade e uma linha média, ou a integral dos valores absolutos de altura do perfil no comprimento de medição (l_m), como expressa na fórmula 2.7.

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} f(x) dx \quad (2.7)$$

Diferentes perfis podem ter o mesmo valor de rugosidade, como mostrado na figura 2.14.

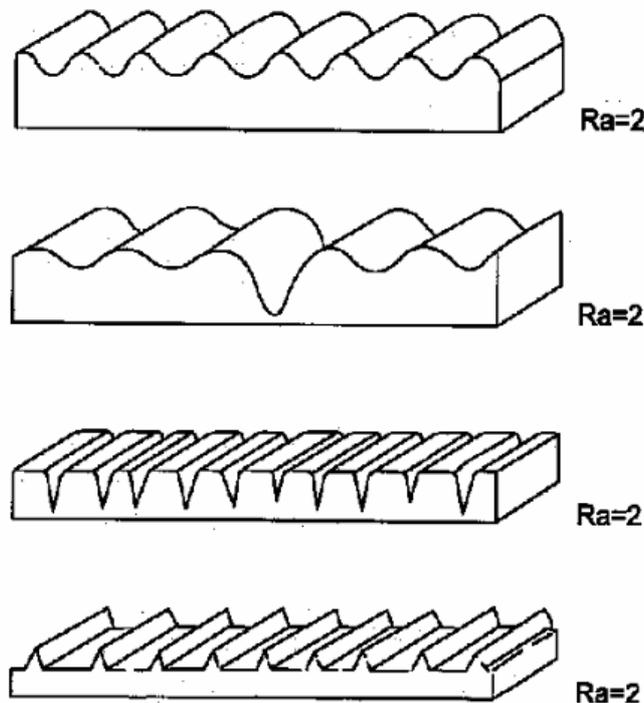


Figura 2.14: Diversos perfis com a mesma rugosidade.

Fonte: Camargo, 2002.

Vale ressaltar que existem outros parâmetros de medição que fornecem informação dos valores reais de altura entre os picos e vales do perfil de rugosidade, como os parâmetros Rz, Rmáx e Rt. O parâmetro Rz é a média aritmética de 5 valores de maiores picos e vales dentro do comprimento da amostragem. O parâmetro Rmáx de maior altura crista/vale entre cinco valores medidos dentro do comprimento de medição. Existem ainda outros parâmetros como o Rq e o R3z.

2.3.2 Camada branca

Após a usinagem de materiais endurecidos são relatados diversos tipos de danos na superfície usinada. Segundo El-Wardany et al. (2000), podem ocorrer trincas, vazios devido à defeitos do material, deformações plásticas e alterações das propriedades das camadas internas, tais como: camada branca, alteração da dureza e tensões residuais.

O termo camada branca foi adotado devido à cor branca que a camada apresenta na microscopia ótica. Na literatura, camada branca está relacionada de uma forma genérica a uma camada dura que se forma em materiais ferrosos sob variadas condições de corte. Os primeiros relatos sobre a camada branca foram feitos em 1912. A espessura típica encontrada nas literaturas é de 10 μm variando conforme as condições de corte (BOSHEH e MATINVEGA, 2005).

Pesquisadores apontam pelo menos três teorias que explicam o mecanismo de formação da camada branca e estão resumidas da seguinte forma:

- a) Mecanismo de escoamento plástico, o qual produz uma estrutura homogênea ou uma estrutura refinada.
- b) Mecanismo de aquecimento e revenimento.
- c) Mecanismos de reação da superfície usinada com o meio ambiente, tais como: nitretação, carbonetação e sulcamento por oxidação (BOSHEH e MANTIVENGA, 2005).

A microestrutura da camada branca é reconhecida como sendo uma “martensita anormal” composta de nanocristais e material parcialmente transformado com alta densidade de discordância. Acredita-se que ela seja composta de linhas de martensitas muito finas

(células má orientadas entre 31 a 100 nm) com carbonetos finamente dispersos e altos teores de austenita retida (POULACHON et al., 2004).

Chou e Evans (1999) investigaram o efeito da velocidade de corte na espessura da camada branca, realizando um estudo no aço 100Cr6 (61-63 HRC). Concluíram que, em geral, a espessura da camada branca aumenta com a velocidade de corte e com o desgaste da ferramenta mas não significativamente sob baixa velocidade (30 m/min).

Bosheh e Mantivenga (2005) afirmam que a espessura da camada branca diminui com a velocidade de corte, devido à redução da temperatura na superfície.

A figura 2.15 mostra a formação da camada branca na superfície usinada (POULACHON et al., 2004).

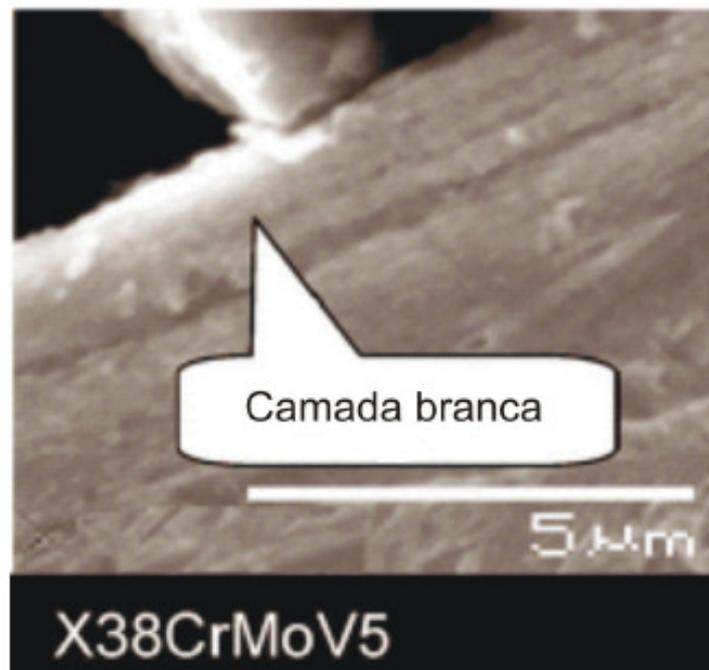


Figura 2.15: Camada branca na superfície usinada.

Fonte: Poulachon et al, 2004.

A figura 2.16 mostra que em determinadas condições de fresamento surge a camada branca e que devido ao avanço por dente (f_z) cíclico da ferramenta o seu evento é periódico.

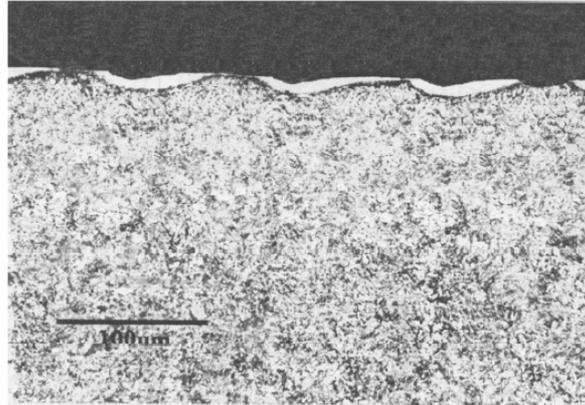


Figura 2.16: Camada branca na superfície fresada, com evento periódico, material AISI 4340 – 50HRC.

Fonte: Field; Kahles, 1971.

O maior problema da camada branca não é quanto a sua formação, composição ou microestrutura, mas sim quanto ao seu efeito nos componentes manufaturados. Yang et al. (1996) comenta que existem divergências entre pesquisadores sobre esta questão.

Alguns pesquisadores afirmam que a camada branca é considerada uma vantagem tribológica, pois confere um aumento da dureza da superfície com estabilidade térmica e um aumento da resistência proporcionado pela transição gradual na microestrutura. Outros pesquisadores afirmam que as microtrincas e os vazios formados no processo de usinagem são nocivos à resistência da superfície. Uma vez que a camada branca é dura e frágil, as trincas são facilmente nucleadas e propagadas (BOSHEH; MANTIVENGA, 2005, YANG et al., 1996).

Yang et al. (1996) produziram uma camada branca homogênea e contínua na superfície por meio de 30 impactos de uma esfera de aço (HRC 60) com 100mm de diâmetro contra a superfície de um bloco de aço temperado e revenido de onde forem retirados alguns pinos para ensaio de desgaste pino-disco. Esses pesquisadores concluíram que a camada branca é prejudicial para resistência ao desgaste. A perda de massa é maior para os pinos com camada branca, devido ao mecanismo de delaminação, quando comparado aos pinos sem camada branca, pois o mecanismo de desgaste por delaminação é acelerado pelas microtrincas existentes na superfície. Para os pinos sem camada branca, o mecanismo de desgaste foi o microcorte.

Axinte e Dewes (2002) não observaram a formação de camada branca. Segundo Poulachon et al. (2004) isso se deve a problema de preparação da amostra. Para que a camada branca não seja removida durante a preparação, devido sua natureza frágil e quebradiça,

recomendam que seja depositada uma camada de níquel na superfície. O polimento deve ser efetuado contra a camada branca para evitar que ela seja removida da borda da amostra embutida.

2.4 Planejamento experimental

Para que os resultados obtidos de ensaios experimentais possam ser analisados através de métodos estatísticos, possibilitando elaborar conclusões objetivas, o planejamento experimental deve ser baseado numa metodologia também estatística, que é a única forma objetiva de avaliar os erros experimentais que afetam esses resultados.

Há três técnicas básicas para a definição dos ensaios num planejamento experimental: o uso de réplicas, da aleatorização (ou “randomização”) e de blocos.

Réplica: consiste na repetição de um ensaio sob condições preestabelecidas. Esta técnica permite obter uma estimativa de como o erro experimental afeta os resultados dos ensaios e se esses resultados são estatisticamente diferentes. Ela também permite verificar qual a influência de uma determinada variável sobre o comportamento de um processo, quando a comparação é feita pela média das amostras.

Aleatorização (ou randomização): é uma técnica de planejamento experimental puramente estatística em que a seqüência dos ensaios é aleatória e a escolha dos materiais que serão utilizados nesses ensaios também é aleatória.

Blocos: permite realizar o experimento com maior precisão, reduzindo a influência de variáveis incontrolláveis. Um bloco é uma porção do material experimental que tem como característica o fato de ser mais homogêneo que o conjunto completo do material analisado. O uso de blocos envolve comparações entre as condições de interesse na experimentação dentro de cada bloco. Na análise com blocos, a aleatorização é restringida à seqüência de ensaios interna dos blocos e não ao conjunto total de ensaios.

O planejamento experimental, também conhecido como delineamento experimental, representa um conjunto de ensaios estabelecido com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo. Tal objetivo pode ser dividido em outros objetivos de acordo com o propósito dos ensaios:

- a) determinar quais variáveis são mais influentes nos resultados;
- b) atribuir valores às variáveis influentes de modo a otimizar os resultados;
- c) atribuir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a variabilidade dos resultados;
- d) atribuir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a influência de variáveis incontroláveis.

A seguir destacam-se alguns benefícios da utilização das técnicas estatísticas de planejamento:

- a) redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- b) estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- c) determinação da confiabilidade dos resultados;
- d) realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- e) seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios;
- f) representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- g) elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

Segundo Montgomery (1991), para melhor entendimento do planejamento experimental e das ferramentas estatísticas utilizadas, é importante destacar alguns conceitos:

- a) Variáveis dependentes: respostas das propriedades de interesse, por exemplo, rugosidade “Ra” de uma superfície.
- b) Variáveis independentes: fatores ou parâmetros que influenciam a resposta, por exemplo, velocidade de corte.
- c) Níveis: valores dos fatores a serem estudados, sendo que cada valor escolhido representa um nível.
- d) Codificação dos fatores: é conveniente codificar os fatores em um sistema de coordenadas adimensionais para simplificar o planejamento de experimentos e aumentar a precisão na análise estatística. Por exemplo, quando tem-se dois níveis de profundidade, 1mm e 2mm, para o nível mais baixo (1mm) é dado o valor codificado

de “-1” e para o nível mais alto (2mm) o valor codificado de “+1”. Para o valor médio (intermediário), é estabelecido o valor codificado “0”.

- e) Delineamento de experimentos: define a seqüência dos experimentos a serem realizados, obtidos por ferramentas de planejamento experimental, na qual são incluídas combinações dos níveis dos fatores a serem estudados.
- f) Aleatorização: é a realização de experimentos delineados em uma seqüência casual, aumentando a probabilidade de eliminação dos efeitos dos fatores não considerados no delineamento e melhorando a análise dos resultados.
- g) Replicação: possibilita obter a estimativa do erro experimental, com o qual é possível verificar se as diferenças observadas nos dados são estatisticamente significativas. Também permite a obtenção de uma estimativa mais precisa dos efeitos dos fatores.
- h) Blocagem: tem o objetivo de aumentar a precisão de um experimento. Em certos processos, pode-se controlar e avaliar a variabilidade resultante da presença de fatores conhecidos (“nuisance factors”) que perturbam o sistema, porém, não se tem interesse de estudá-los. Desta forma, a blocagem é usada, por exemplo, quando o tempo entre os experimentos causou mudanças nas condições de ensaio, na presença de lotes diferentes de um mesmo material ou de ensaios realizados por diferentes indivíduos.
- i) Efeito de um fator: é a variação da magnitude da resposta em função dos níveis inferior e superior de um fator;
- j) Efeito principal: é a média dos efeitos de um fator no nível de outro fator.
- k) Fatores significativos: fatores que têm influência sobre as respostas.
- l) Fatores não-significativos: fatores que, dentro dos intervalos considerados, não apresentam efeito significativo sobre as respostas.

Quando a pesquisa envolve diversas variáveis dependentes e independentes é necessário utilizar técnicas estatísticas de modo a se obter conclusões em relação à dependência das respostas de interesse e em função das variáveis analisadas. Segundo Box (1978) essas técnicas podem ser aplicadas para:

- a) avaliação e comparação de configurações básicas de projeto;
- b) avaliação de diferentes materiais;
- c) seleção de parâmetros de projeto;

- d) determinação de produtos que sejam fáceis de projetar, desenvolver e produzir em menor tempo e que tenham melhor desempenho e confiabilidade que os produzidos pelos concorrentes.

O planejamento experimental, baseado em ferramentas estatísticas permite a execução de experimentos de maneira econômica e eficiente, ajudando a economizar tempo e dinheiro, pois conduzem a objetividade na análise dos resultados. De qualquer forma, esses métodos não substituem o conhecimento, a criatividade e o bom senso do pesquisador (BOX, 1978).

Baseados nos conceitos acima, antes de iniciar os ensaios experimentais são necessário a definição das variáveis envolvidas nos experimentos, faixa de variação das variáveis independentes e os níveis escolhidos para as variáveis bem como o tipo de planejamento experimental a ser feito.

2.4.1 Delineamento composto central

Em função de delineamentos experimentais mais complexos, que utilizam muitas combinações dos fatores em estudo, várias tentativas têm sido feitas para a redução do número de pontos experimentais, através de técnicas como a de repetição fracionada e delineamentos compostos, que foram desenvolvidos inicialmente por Box; Wilson (1951) para o estudo de funções polinomiais de resposta na indústria, onde o erro experimental, em geral, é bem pequeno e as condições do experimento são mais facilmente controláveis.

Dentre os delineamentos padrões, o Delineamento Composto Central (DCC) é considerado ótimo, pertencendo à uma família de delineamentos eficientes, o que requer poucos ensaios para a realização do experimento.

Lucas (1976) mostrou que o DCC apresenta um número menor de tratamentos em relação aos fatoriais completos, podendo ser realizado seqüencialmente - características muito interessantes para a busca da resposta ótima.

Em um trabalho de pesquisa, buscam-se quais fatores ou variáveis são importantes no estudo da superfície de resposta, conduzindo a um delineamento experimental que relacione tais fatores com o objetivo de eliminar as variáveis sem importância. Esse tipo de experimento é chamado de experimento de filtragem “screening experiment” que consiste na escolha das variáveis que são importantes na análise e descarte das que não têm influência no estudo.

Além disso, é necessário definir a região que contém o ótimo, o que torna o DCC um delineamento bastante interessante.

Duas situações distintas podem ocorrer segundo Myers (1971): o caso em que a região experimental usada está na vizinhança do ótimo e aquele em que o ótimo real está longe da região experimental.

Na prática, porém, o pesquisador espera que esta última situação não ocorra. Neste caso, o pesquisador prudente certamente planejaria sua pesquisa de forma que os ensaios estivessem na região experimental na qual ele acha que o ótimo esteja localizado. Entretanto, ele poderia iniciar seu trabalho com completa ignorância a respeito da região adequada e poderia desenvolver um plano experimental de forma a caminhar de uma região distante do verdadeiro ótimo para a região que contivesse as condições desejáveis. Como muitas pesquisas demandam tempo e muitas vezes o número de ensaios é grande, isto, na maioria das vezes, torna essas pesquisas inviáveis em termos econômicos.

De acordo com Davies (1954), nem sempre é possível a pesquisa de uma região completa, principalmente quando o erro experimental é muito grande, pois é necessário um grande número de ensaios para se obter a precisão adequada para a exploração da região completa, a qual é muito grande. Já no caso em que o erro experimental se torna pequeno, como por exemplo, nas pesquisas em laboratórios ou certos tipos de processos na indústria, onde essas condições que afetam o experimento podem ser controladas dentro de pequenos intervalos, é possível o estudo em uma pequena região. Logo, apresentando-se esta situação (erro experimental pequeno) e o pesquisador não conhecendo a vizinhança do ótimo, não é necessário explorar toda região que contém esse ótimo. Basta, através de experimentos seqüenciais, descobrir a região vizinha que contém esse ponto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Este capítulo aborda as condições em que os ensaios foram realizados, em especial os materiais e equipamentos utilizados bem como o método adotado.

O local escolhido para a realização dos ensaios foi a Oficina do Centro Universitário da FEI, que oferece uma excelente estrutura e ótimos equipamentos para a condução dos experimentos necessários.

3.2 Materiais

Visto que o fresamento de aços endurecidos tem sido cada vez mais aplicado na fabricação de moldes e matrizes, foi adotado como critério de seleção um material que estivesse relacionado à esta área. O material utilizado nos ensaios foi o aço AISI H13 devido à sua grande gama de aplicações.

3.2.1 Aço AISI H13

O aço AISI H13 pode ser usado para molde de injeção de plástico, matriz para fundição em pressão, para forjamento, para estampagem, corte de chapa à quente e ferramentas para extrusão (CHIAVERINI, 1979; FALLBOHMER ET al., 2000).

Por ser um material para trabalho à quente, o aço AISI H13 apresenta características como boa tenacidade, boa usinabilidade, excelente resistência ao desgaste, boa resistência ao aparecimento de trincas por fadiga térmica e boa temperabilidade, sendo capaz de manter sua dureza e resistência mesmo submetido à temperaturas superiores a 200°C. A tabela 3.1 informa a composição química do aço AISI H13.

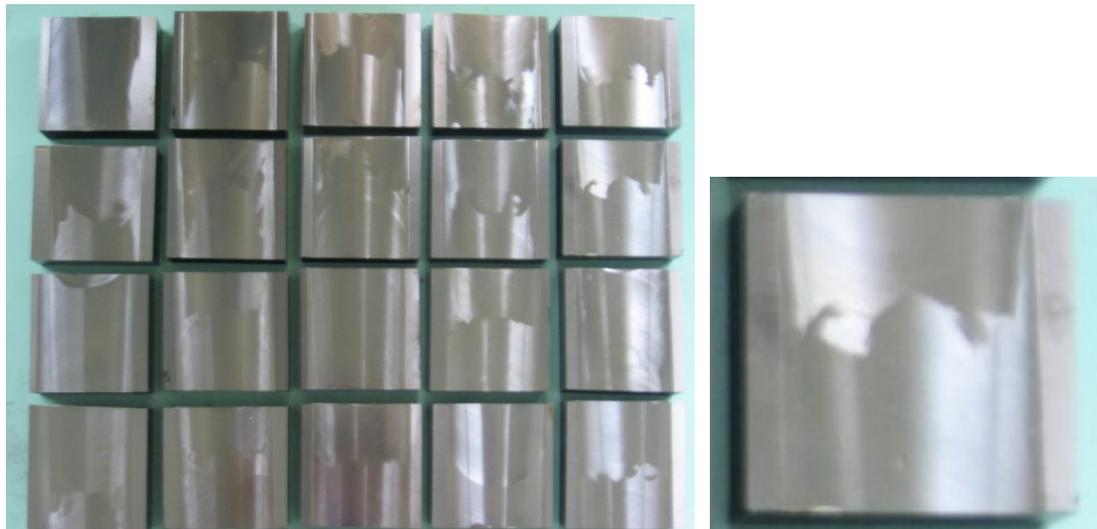
Tabela 3.1: Composição química do aço AISI H13.

Aço/Liga	C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	V	W	Cu	Al
VH13IM	0,39	1,11	0,28	0,019	0,001	0,06	5,09	1,33	0,25	0,81	0,06	0,1	0,02

Valores em % em massa e balanço em Fe.

3.2.2 Corpos-de-prova

Para atingir os objetivos propostos por este trabalho foram efetuados ensaios em 20 corpos-de-prova do aço AISI H13, temperados e revenidos com dureza média de 54 HRC e dimensões de 26 x 80 x 80mm, conforme mostrado na figura 3.1.

**Figura 3.1:** Corpos-de-prova utilizados nos ensaios de fresamento.

Antes de iniciar os ensaios de fresamento, todos os corpos-de-prova passaram por tratamento térmico de têmpera e revenimento. Em seguida, foram feitas medições com o objetivo de verificar e controlar a dureza superficial. Essas medições foram realizadas três vezes em cada peça e a média e o desvio padrão foi calculado, conforme mostrado na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Resultados da dureza obtida nos corpos-de-prova após tratamento térmico.

MEDIDAS DA DUREZA - AÇO AISI H13 [HRC]				
	<i>DUR1</i>	<i>DUR2</i>	<i>DUR3</i>	<i>DURm</i>
1	53	53	55	54
2	54	54	55	54
3	55	56	57	56
4	53	54	54	54
5	54	55	55	55
6	55	54	55	55
7	55	55	55	55
8	54	55	55	55
9	50	51	50	50
10	51	52	52	52
11	54	55	55	55
12	51	53	53	52
13	54	54	54	54
14	54	54	55	54
15	52	53	53	53
16	51	52	50	51
17	53	54	55	54
18	52	53	53	53
19	54	55	54	54
20	52	54	54	53

<i>Med. Médias</i>	54
<i>Desvio Padrão</i>	1

3.3 Desenvolvimento dos ensaios

Nesta pesquisa foi realizado um DCC simétrico constituído de oito pontos de vértices, seis pontos distanciados da face do cubo e seis pontos centrais, demonstrado na figura 3.2. O DCC foi realizado com o intuito de obter um estudo estatístico com uma confiança elevada e com uma repetibilidade de cinco amostras. Isto é justificado pelo fato do processo de fresamento ser estável, podendo-se considerar a variação do ponto central, que foi repetido cinco vezes, para os demais corpos de prova. Com isso, sem o DCC seria necessário um número muito maior de corpos de prova para conseguir o mesmo resultado, e conseqüentemente, tem se uma economia no tempo e nos custos dos ensaios.

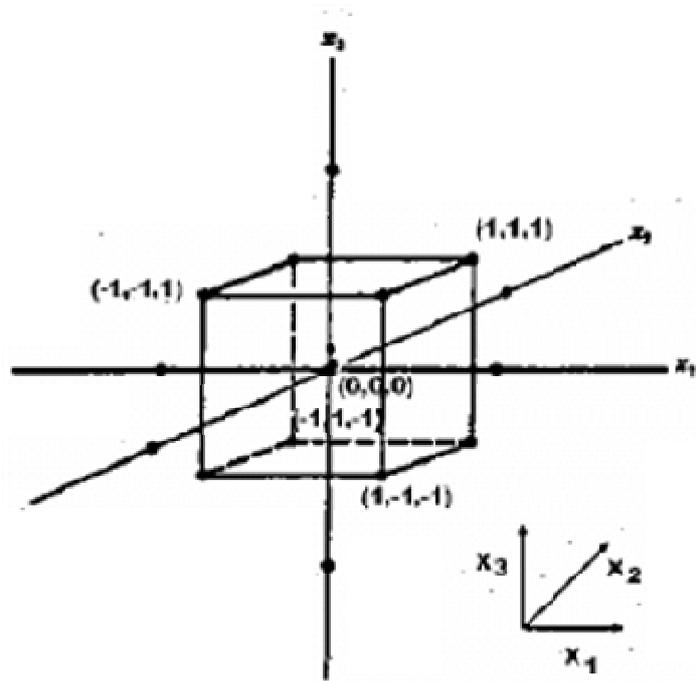


Figura 3.2: Delineamento composto central.

Fonte: Mateus; Barbin; Conagin, 2001

Com o intuito de estudar os dados levantados com o DCC, nessa pesquisa foi utilizado o programa “Statistica”, através do qual foi possível analisar a influência de cada variável independente e suas interações sobre as variáveis dependentes.

3.3.1 Descrição das operações

Como já citado anteriormente, a primeira atividade realizada nos ensaios foi a medição da dureza antes da usinagem, objetivando evitar que diferenças de dureza influenciem nos resultados dos testes experimentais. Em seguida, os corpos-de-prova tiveram todas suas faces usinadas nas mesmas condições, garantindo o paralelismo e o alinhamento entre elas.

Os corpos-de-prova foram fixados sobre um dinamômetro, através de uma morsa sobre dois blocos paralelos de dimensões iguais para garantir a perpendicularidade da face usinada com o eixo da ferramenta, conforme mostrado na figura 3.3.

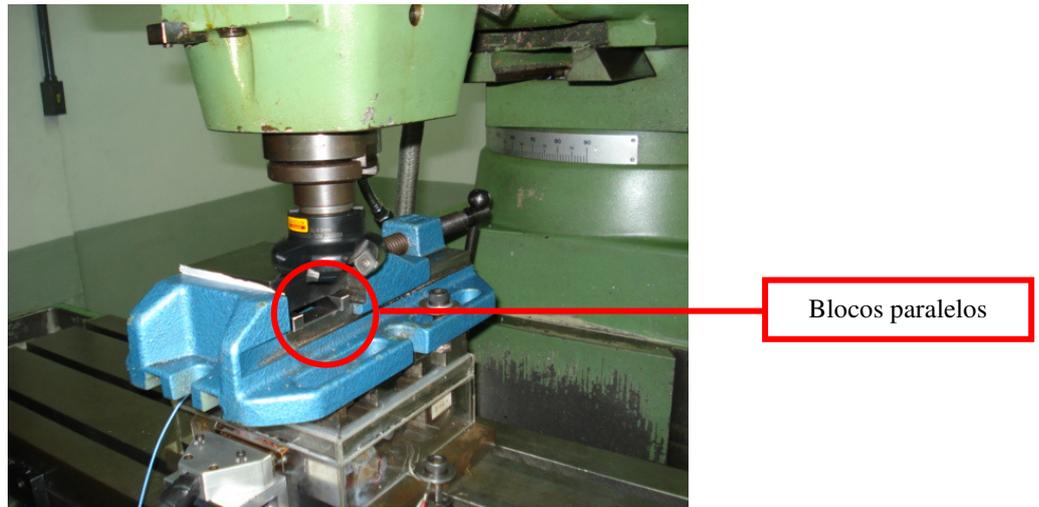


Figura 3.3: Esquema de fixação dos corpos-de-prova.

Na usinagem dos corpos-de-prova foram realizadas as operações de desbaste e acabamento. Os dados tecnológicos foram extraídos de catálogos do fornecedor de ferramentas e estão descritos a seguir.

3.3.1.1 Desbaste

A operação de desbaste tem a função de eliminar irregularidades na superfície dos corpos-de-prova, obtendo uma superfície padrão para a operação de acabamento.

Em todos os corpos-de-prova foram utilizados os mesmos parâmetros na operação de desbaste, tais como: velocidade de corte, profundidade e avanço por aresta, com a finalidade de evitar que variações na superfície influenciem na operação de acabamento, que é o objeto de estudo desta pesquisa.

O desbaste foi realizado numa superfície plana, no sentido transversal, com os seguintes parâmetros de corte:

- a) Rotação (n): 830 rpm;
- b) Velocidade de avanço (V_f): 200 mm/min;

- c) Velocidade de corte (V_c): 130 m/min;
- d) Avanço por aresta (F_z): 0,06 mm;
- e) Profundidade de corte (a_p): 0,2 mm;
- f) Diâmetro da fresa: 50 mm;
- g) Arestas de corte: 4 arestas;
- h) Sem refrigeração.

3.3.1.2 Acabamento

A operação de acabamento tem por finalidade conferir a peça qualidade geométrica e dimensional previstas em projeto, sendo a operação mais importante no processo de usinagem pelo fato de ser responsável pelas características finais do produto.

O objetivo desta pesquisa é analisar as forças de corte e as características da integridade superficial na usinagem em acabamento de superfícies planas do material endurecido AISI H13. Os parâmetros de corte são mostrados na tabela 3.3, obtida através do delineamento composto central (DCC).

Tabela 3.3: Parâmetros de corte utilizados na operação de acabamento.

PARÂMETROS DE FRESAMENTO - AÇO AISI H13					
AMOSTRA	VC (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
1	150	0,05	0,08	760	190
2	150	0,05	0,16	760	190
3	150	0,1	0,08	760	380
4	150	0,1	0,16	760	380
5	210	0,05	0,08	1060	265
6	210	0,05	0,16	1060	265
7	210	0,1	0,08	1060	530
8	210	0,1	0,16	1060	530
9	129,6	0,075	0,12	660	248
10	230,5	0,075	0,12	1170	439
11	180	0,032955	0,12	910	150
12	180	0,117045	0,12	910	533
13	180	0,075	0,055	910	342
14	180	0,075	0,19	910	342
15	180	0,075	0,12	910	342
16	180	0,075	0,12	910	342
17	180	0,075	0,12	910	342
18	180	0,075	0,12	910	342
19	180	0,075	0,12	910	342
20	180	0,075	0,12	910	342

Todas as amostras foram usinadas com sentido de corte discordante, utilizando fresa de diâmetro 63 mm, com cinco arestas de corte, centralizada nos corpos-de-prova.

Os valores de rotação e avanço foram calculados pelas Fórmulas 2.1 e 2.3 respectivamente. Os níveis das variáveis independentes, velocidade de corte (V_c), avanço por faca (f_z) e a profundidade de corte (a_p) foram retirados do catálogo de ferramentas da Sandvik de 2008 e ratificados por consultores da mesma empresa, professores e profissionais com experiência em usinagem de materiais endurecidos.

3.4 Ferramentas utilizadas nos ensaios

Todos os ensaios de usinagem foram realizados com ferramentas cujo fabricante é a Sandvik do Brasil S.A.

Para a operação de desbaste utilizou-se um cabeçote com diâmetro de 50 mm e quatro arestas de corte com insertos intercambiáveis de classe SPKN 12 03 ED R, ilustrado na figura 3.4.



Figura 3.4: Ferramenta utilizada para a operação de desbaste.

Na operação de acabamento utilizou-se cabeçote com diâmetro 63 mm, ângulo de posição de 45° e ângulo de saída 16° com cinco arestas de corte e insertos de CBN da classe R245 12 T3E CB50 9A0813189, mostrado na figura 3.5.



Figura 3.5: Ferramenta utilizada para a operação de acabamento.

3.5 Máquina operatriz

Todos os testes de usinagem (desbaste e acabamento) foram realizados em uma fresadora ferramenteira fabricada pelas Indústrias Sanches Blanes, modelo FU-1 (ISO 40). O fabricante informa que este equipamento possui rotação máxima de 6000 rpm, avanço máximo de 1500 mm/min e régua digital nos três eixos (X, Y e Z). Esta máquina operatriz foi escolhida por possibilitar o ajuste das variáveis independentes escolhidas para a condução dos ensaios.

A figura 3.6 ilustra a máquina operatriz utilizada nos testes.



Figura 3.6: Fresadora Sanches Blanes.

3.6 Medições e instrumentos de medição

3.6.1 Medições de forças de corte através de dinamometria tri-direcional

O dinamômetro foi baseado nas pesquisas de (SAGLAM; UNUVAR, 2001) e seu projeto norteado por dois critérios: rigidez e sensibilidade. É constituído basicamente de uma mesa instrumentada com quatro células de carga, distribuídas duas a duas, em duas direções ortogonais. Cada uma das células de carga foi instrumentada com oito extensômetros elétricos, a fim de medir deformações nas direções axiais e transversais. Com o auxílio de um arranjo adequado das células de carga, o dinamômetro mede as forças nas três direções ortogonais e está ilustrado na figura 3.7.

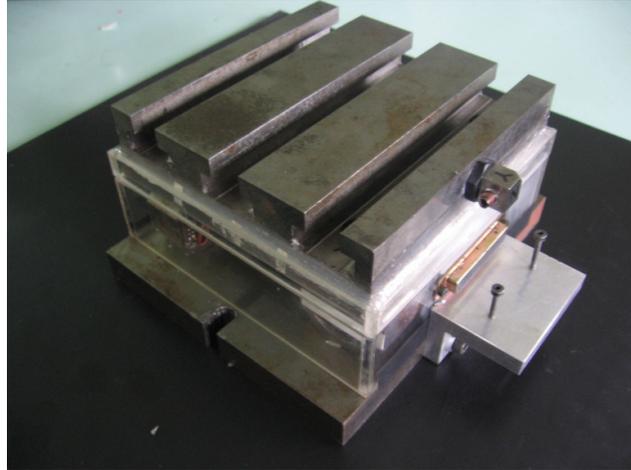


Figura 3.7: Dinamômetro utilizado para medições das forças nas três direções ortogonais.

Todas as máquinas-ferramenta estão submetidas a vibrações forçadas e auto-excitadas, para que os dados de medição de força não sejam influenciados por alguma vibração do dinamômetro durante o corte, a sua frequência natural fundamental é prevista para ser maior que, pelo menos, quatro vezes a da vibração excitada (critério da rigidez).

Este dinamômetro é formado por uma mesa constituída por células de cargas que se apresentam distribuídas em direções ortogonais, instrumentadas para medirem deformações na direção axial e transversal. Cada uma das células de carga tem formato de anel é instrumentada com oito “strain gages” posicionados na região de máxima deformação das células que, quando solicitados, convertem a deformação verificada em sinais elétricos que são captados e analisados posteriormente, conforme ilustrado na figura 3.8.

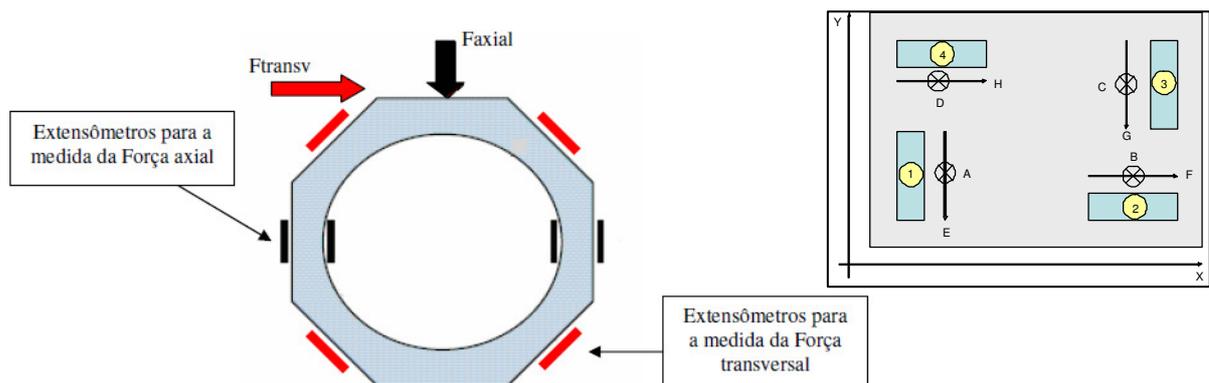


Figura 3.8: Esquema da célula de carga em anel.

Em geral, as células de carga do dinamômetro devem ter uma sensibilidade de 2 mV/V para a carga de fundo de escala. Entretanto, não se pode garantir que, nestas condições, o

critério de rigidez esteja contemplado. Busca-se, então, um compromisso entre os dois critérios.

O material selecionado, tanto para as células de carga quanto para a base e mesa, foi o aço SAE 4340. A fixação das células de carga nas bases foi feita por meio de parafusos M10x20 mm, DIN 912 – Classe 12,9 (ROSSI, 2007).

3.6.2 Medição da rugosidade

A rugosidade das amostras foram medidas na direção perpendicular ao avanço (perpendicular a direção de usinagem), por ser a direção mais crítica. Todas as medições foram feitas com o rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo Sufitest 211, ajustado com um comprimento de amostragem “cut-off” de 0,8 mm, indicado para medições em que se espera um valor baixo de rugosidade, sendo efetuadas três leituras de rugosidade para cada superfície do corpo-de-prova e realizado uma média. A Figura 3.9 ilustra o rugosímetro utilizado para as medições.



Figura 3.9: Rugosímetro Mitutoyo.

3.6.3 Medição da camada branca

Para a medição da camada branca foi utilizado um microscópio óptico com ampliação de 500x, modelo Olympus BH2-UMA, conforme mostra a figura 3.10.



Figura 3.10: Microscópio óptico Olympus BH2-UMA.

As amostras foram retiradas através de um “cut off” Mesotom, fabricado pela Panambra Industrial e Técnica S.A., com licença da Struers tendo o lixamento e polimento efetuados através do equipamento produzido pela Struers (figura 3.11). As vinte amostras foram preparadas com ataque químico de Vilela (álcool etílico, ácido clorídrico e ácido pírico).



Figura 3.11: Equipamento automático de lixamento e polimento das amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados experimentais foi realizada com o auxílio do software “Statistica”, que é um programa integrado para gerenciar análise e base de dados, caracterizando-se por uma ampla aplicação em processos analíticos e experimentais, do básico ao avançado, para as mais diversas áreas. O programa possui gráficos gerais, procedimentos estatísticos e módulos especializados, como análise de regressão (OGLIARI; PACHECO, 2004).

O “Statistica” trabalha com variáveis categorizadas, qualitativas e quantitativas, permitindo a formação de grupos que serão analisados, utilizando técnica apropriada para resumir as informações, adaptando qualquer tipo de variável ao caso estudado e armazenando as variáveis mediante notação dupla (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

Porém, vale ressaltar que a análise completa dos dados depende da criatividade e do conhecimento teórico e prático do usuário. A figura 4.1 mostra a planilha dos dados experimentais deste trabalho utilizados no “Statistica”.

Standard Run	2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 (Trevelin_1) + 4 center points								
	Vc	f	ap	Fr	Fp	Ft	R	Mt	Rug
1	150,0000	0,050000	0,080000	87,86	91,22	88,06	154,26	2,77	0,13
2	150,0000	0,050000	0,160000	139,20	156,90	139,36	251,82	4,39	0,08
3	150,0000	0,100000	0,080000	135,00	212,09	134,90	285,31	4,25	0,11
4	150,0000	0,100000	0,160000	59,84	179,51	59,53	198,37	1,88	0,17
5	210,0000	0,050000	0,080000	70,11	282,04	69,91	298,92	2,20	0,11
6	210,0000	0,050000	0,160000	143,31	153,43	143,79	254,47	4,53	0,08
7	210,0000	0,100000	0,080000	76,06	351,75	76,06	367,83	2,40	0,09
8	210,0000	0,100000	0,160000	53,83	225,51	53,84	238,01	1,70	0,15
9	129,5462	0,075000	0,120000	80,67	43,48	81,29	122,50	2,56	0,13
10	230,4538	0,075000	0,120000	48,38	43,64	48,52	81,23	1,53	0,10
11	180,0000	0,032955	0,120000	94,59	355,70	94,52	380,00	2,98	0,13
12	180,0000	0,117045	0,120000	97,89	410,04	97,64	432,72	3,08	0,14
13	180,0000	0,075000	0,052728	38,39	125,08	38,35	136,34	1,21	0,19
14	180,0000	0,075000	0,187272	121,37	121,54	121,37	210,31	3,82	0,08
15 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	68,66	252,20	68,83	270,29	2,17	0,10
16 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	111,83	142,74	111,41	212,82	3,51	0,10
17 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	89,78	119,81	89,19	174,27	2,81	0,10
18 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	116,47	475,21	115,93	502,82	3,65	0,10
19 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	48,84	138,42	48,73	154,66	1,54	0,13
20 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	87,12	225,68	86,82	262,97	2,73	0,13

Figura 4.1: Planilha de dados utilizada pelo “Statistica”.

Neste capítulo serão mostrados os resultados das influências das variáveis independentes (Vc, f e ap) sobre as variáveis dependentes (Esforços de corte, Rugosidade e Camada Branca). As respectivas discussões serão descritas conforme necessidade, baseado no

planejamento experimental e na revisão bibliográfica, que serviram de base para obtenção e análise dos resultados.

4.1 Análise dos resultados

O planejamento experimental final foi baseado na revisão bibliográfica e na experiência dos professores e profissionais da área. As variáveis dependentes analisadas foram:

- a) forças de usinagem;
- b) rugosidade;
- c) camada branca.

4.1.1 Forças de usinagem

As forças de usinagem, medidas de acordo com o delineamento experimental da tabela 3.3, com tempo de aquisição de 4s e frequência de 1200 Hz, permitiram realizar a análise na seguinte ordem:

- a) Força tangencial (F_t) – Força de avanço;
- b) Momento torçor (M_t);
- c) Força radial (F_r) – Força de corte;
- d) Força passiva (F_p);
- e) Força resultante (R);

4.1.1.1 Força tangencial

Os dados da força tangencial, medidos nos ensaios, podem ser verificados na tabela 4.1, como segue:

Tabela 4.1: Resultados da força tangencial.

PARÂMETROS DE FRESAMENTO - AÇO AISI H13				
AMOSTRA	VC (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)	Ft (N)
1	150	0,05	0,08	88,06
2	150	0,05	0,16	139,36
3	150	0,1	0,08	134,90
4	150	0,1	0,16	59,53
5	210	0,05	0,08	69,91
6	210	0,05	0,16	143,79
7	210	0,1	0,08	76,06
8	210	0,1	0,16	53,84
9	129,6	0,075	0,12	81,29
10	230,5	0,075	0,12	48,52
11	180	0,032955	0,12	94,52
12	180	0,117045	0,12	97,64
13	180	0,075	0,055	38,35
14	180	0,075	0,19	121,37
15	180	0,075	0,12	68,83
16	180	0,075	0,12	111,41
17	180	0,075	0,12	89,19
18	180	0,075	0,12	115,93
19	180	0,075	0,12	48,73
20	180	0,075	0,12	86,82

A análise dos resultados foi realizada através do software “Statistica” considerando um Nível de Confiança de 95%. Observou-se que a Força Tangencial foi influenciada pela interação entre a profundidade de corte (a_p) e o avanço por faca (f_z), conforme tabela 4.2 e figura 4.2.

Tabela 4.2: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Ft.

Effect Estimates; Var.:Ft; R-sqr=.66025; Adj.:.35448 (mestrado)										
3 factors, 1 Blocks, 20 Runs; MS Residual=643,9033										
DV: Ft										
Factor	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	86,3070	10,34925	8,33945	0,000008	63,2475	109,3666	86,3070	10,34925	63,2475	109,3666
(1)Vc (L)	-19,5318	13,73299	-1,42226	0,185386	-50,1308	11,0672	-9,7659	6,86649	-25,0654	5,5336
Vc (Q)	-8,8279	13,36869	-0,66034	0,523952	-38,6152	20,9594	-4,4140	6,68435	-19,3076	10,4797
(2)f (L)	-16,3344	13,73299	-1,18943	0,261746	-46,9334	14,2646	-8,1672	6,86649	-23,4667	7,1323
f (Q)	13,2154	13,36869	0,98854	0,346205	-16,5719	43,0027	6,6077	6,68435	-8,2859	21,5014
(3)ap (L)	24,4851	13,73299	1,78294	0,104924	-6,1139	55,0841	12,2426	6,86649	-3,0569	27,5421
ap (Q)	1,7462	13,36869	0,13062	0,898668	-28,0411	31,5335	0,8731	6,68435	-14,0206	15,7667
1L by 2L	-12,7033	17,94301	-0,70798	0,495127	-52,6828	27,2762	-6,3517	8,97151	-26,3414	13,6381
1L by 3L	18,9355	17,94301	1,05531	0,316111	-21,0440	58,9150	9,4678	8,97151	-10,5220	29,4575
2L by 3L	-55,6917	17,94301	-3,10381	0,011178	-95,6712	-15,7122	-27,8459	8,97151	-47,8356	-7,8561

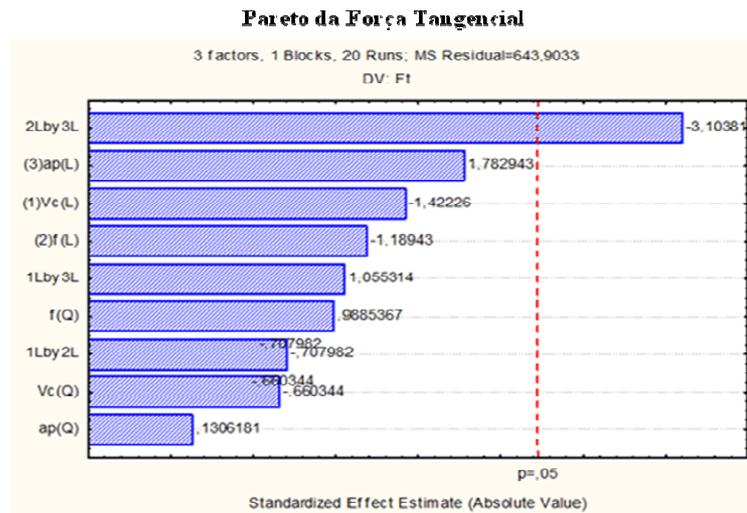


Figura 4.2: Pareto para efeito das variáveis independentes na Ft.

Analisando o gráfico da figura 4.3, pode-se verificar que os valores da Força Tangencial variam em função das variáveis independentes, “ a_p ” e “ f_z ”. Como se sabe, a área de corte pode ser calculada pela multiplicação do avanço da ferramenta pela profundidade de corte, sendo assim, quanto maiores forem esses parâmetros, maiores forças de corte ocorrerão. Como a área de corte é uma junção destas variáveis, a diminuição da área causa diminuição nos esforços de corte, representados no gráfico por $a_p = 0,04\text{mm}$ e $f_z = 0,02\text{mm/dente}$, onde podemos constatar os menores valores para a força tangencial. Por outro lado, o incremento na taxa de remoção de material provocado pelo aumento de “ a_p ” ou pelo aumento de “ f_z ”, conseqüentemente, aumenta a área de corte, elevando os valores da força tangencial gerada durante a usinagem. Por se tratar de uma análise estatística com um nível de confiabilidade previamente definido, não foi levado em consideração os resultados obtidos na situação em que temos os maiores valores de “ a_p ” (0,20mm) e os maiores valores de “ f_z ” (0,13mm/volta) quando usados simultaneamente, pois o resultado mostrou um comportamento não esperado ou definido de forma clara em nenhuma literatura consultada. Foi observado que:

- a) os valores mínimos de Ft ocorrem para o valor mínimo de “ a_p ” (0,04mm) e mínimo de “ f_z ” (0,02mm/dente) quando usados simultaneamente;
- b) os valores máximos de Ft ocorrem em duas situações:
 - para os valores máximo de “ a_p ” (0,20mm) e mínimo de “ f_z ” (0,02mm/dente) quando usados simultaneamente;

- para os valores mínimo de “ a_p ” (0,04mm) e máximo de “ f_z ” (0,13mm/volta), quando usados simultaneamente.

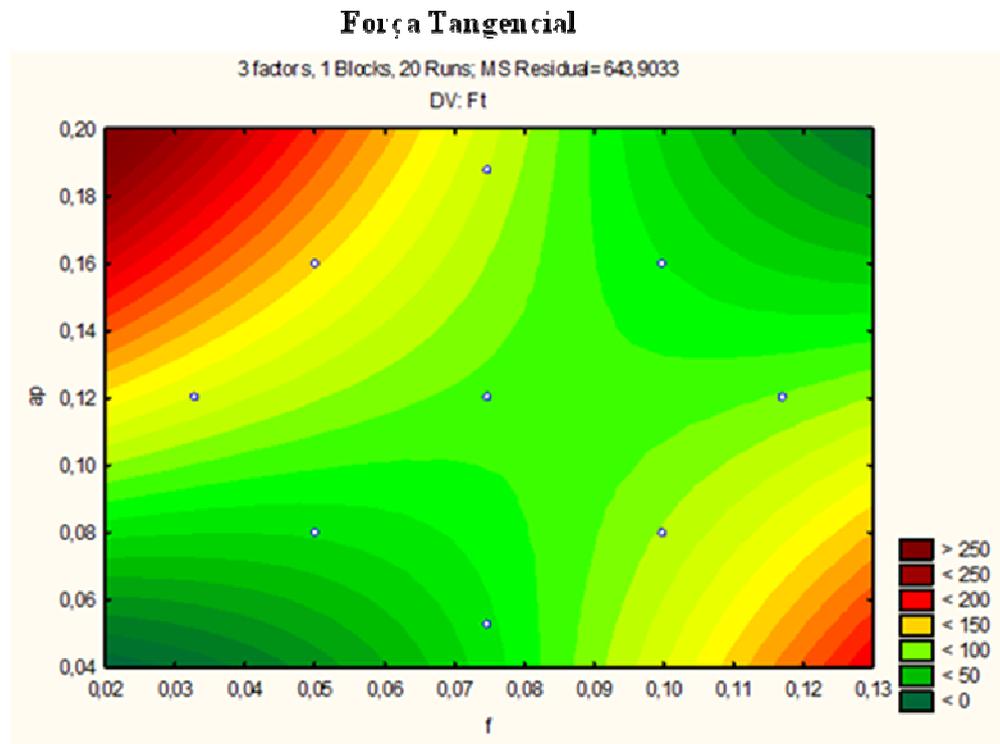


Figura 4.3: Gráfico: “ $a_p \times f_z$ ” para força tangencial.

4.1.1.2 Momento torçor

Os dados do momento torçor, medidos nos ensaios, podem ser verificados na tabela 4.3, como segue:

Tabela 4.3: Resultados do momento torçor.

PARÂMETROS DE FRESAMENTO - AÇO H13				
CORPO	VC (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)	Mt (N.m)
1	150	0,05	0,08	2,77
2	150	0,05	0,16	4,39
3	150	0,1	0,08	4,25
4	150	0,1	0,16	1,88
5	210	0,05	0,08	2,20
6	210	0,05	0,16	4,53
7	210	0,1	0,08	2,40
8	210	0,1	0,16	1,70
9	129,6	0,075	0,12	2,56
10	230,5	0,075	0,12	1,53
11	180	0,032955	0,12	2,98
12	180	0,117045	0,12	3,08
13	180	0,075	0,055	1,21
14	180	0,075	0,19	3,82
15	180	0,075	0,12	2,17
16	180	0,075	0,12	3,51
17	180	0,075	0,12	2,81
18	180	0,075	0,12	3,65
19	180	0,075	0,12	1,54
20	180	0,075	0,12	2,73

Observou-se que o Momento Torçor foi influenciado pela interação entre a profundidade de corte (a_p) e o avanço por face (f_z), conforme tabela 4.4 e figura 4.4.

Tabela 4.4: ANOVA para efeito das variáveis independentes no Mt.

Effect Estimates; Var.:Mt; R-sqr= 66025; Adj.:35448 (mestrado) 3 factors, 1 Blocks, 20 Runs; MS Residual=,638913 DV: Mt										
Factor	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	2,71867	0,326001	8,33945	0,000008	1,99230	3,445048	2,718672	0,326001	1,99230	3,445048
(1)Vc (L)	-0,61525	0,432589	-1,42226	0,185386	-1,57912	0,348616	-0,307626	0,216295	-0,78956	0,174308
Vc (Q)	-0,27808	0,421114	-0,66034	0,523952	-1,21638	0,660220	-0,139040	0,210557	-0,60819	0,330110
(2)f (L)	-0,51453	0,432589	-1,18943	0,261746	-1,47840	0,449335	-0,257267	0,216295	-0,73920	0,224668
f (Q)	0,41629	0,421114	0,98854	0,346205	-0,52201	1,354586	0,208143	0,210557	-0,26101	0,677293
(3)ap (L)	0,77128	0,432589	1,78294	0,104924	-0,19259	1,735150	0,385641	0,216295	-0,09629	0,867575
ap (Q)	0,05501	0,421114	0,13062	0,898668	-0,88329	0,993305	0,027503	0,210557	-0,44165	0,496652
1L by 2L	-0,40015	0,565205	-0,70798	0,495127	-1,65951	0,859200	-0,200077	0,282602	-0,82975	0,429600
1L by 3L	0,59647	0,565205	1,05531	0,316111	-0,66289	1,855824	0,298234	0,282602	-0,33144	0,927912
2L by 3L	-1,75429	0,565205	-3,10381	0,011178	-3,01364	-0,494934	-0,877144	0,282602	-1,50682	-0,247467

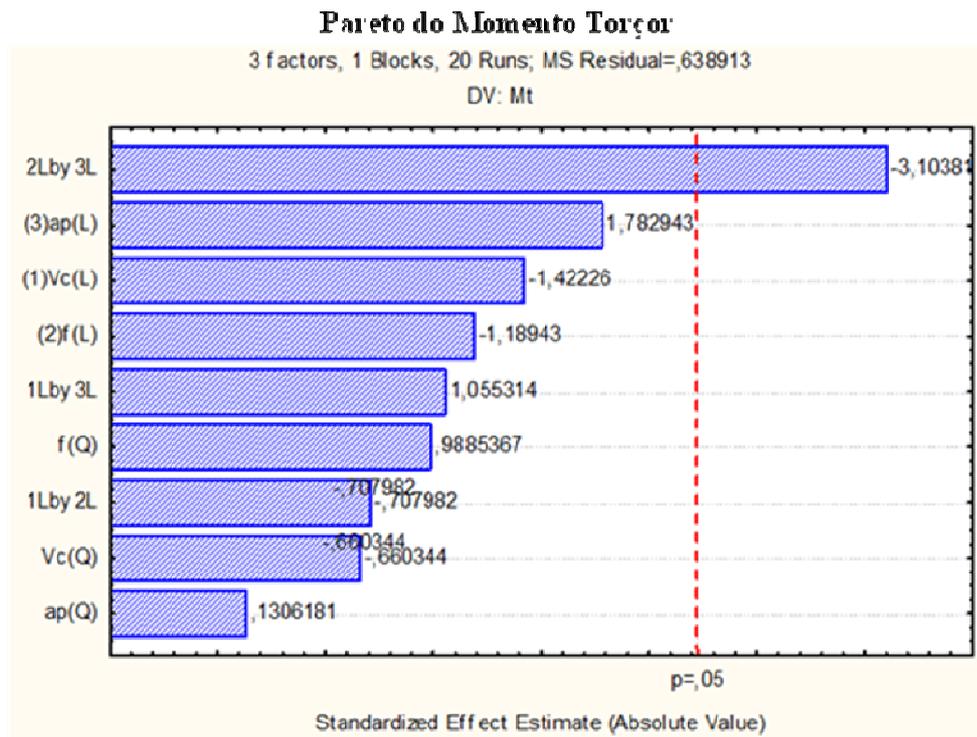


Figura 4.4: Pareto para efeito das variáveis independentes no Mt.

Analisando o gráfico da figura 4.5, podemos verificar que os valores do Momento Torçor variam em função das variáveis independentes, “ a_p ” e “ f_z ”, sendo que:

- a) os valores mínimos de Mt ocorrem para o valor mínimo de “ a_p ” (0,04mm) e mínimo de “ f_z ” (0,02mm/dente) quando usados simultaneamente;
- b) os valores máximos de Mt ocorrem em duas situações:
 - para os valores máximo de “ a_p ” (0,20mm) e mínimo de “ f_z ” (0,02mm/dente) quando usados simultaneamente;
 - para os valores mínimo de “ a_p ” (0,04mm) e máximo de “ f_z ” (0,13mm/dente), quando usados simultaneamente.

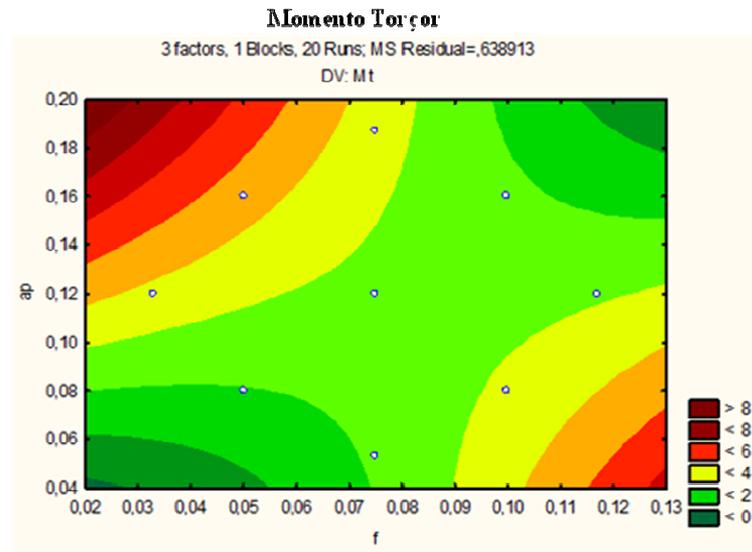


Figura 4.5: Gráfico: “ $a_p \times f_z$ ” para momento torçor.

O Momento Torçor teve um comportamento muito similar à Força Tangencial.

4.1.1.3 Força radial

Os dados da força radial, medidos nos ensaios, podem ser verificados na tabela 4.5, como segue:

Tabela 4.5: Resultados da força radial.

PARÂMETROS DE FRESAMENTO - AÇO AISI H13				
AMOSTRA	VC (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	Fr (N)
1	150	0,05	0,08	87,86
2	150	0,05	0,16	139,2
3	150	0,1	0,08	135
4	150	0,1	0,16	59,84
5	210	0,05	0,08	70,11
6	210	0,05	0,16	143,31
7	210	0,1	0,08	76,06
8	210	0,1	0,16	53,83
9	129,6	0,075	0,12	80,67
10	230,5	0,075	0,12	48,38
11	180	0,032955	0,12	94,59
12	180	0,117045	0,12	97,89
13	180	0,075	0,055	38,39
14	180	0,075	0,19	121,37
15	180	0,075	0,12	68,66
16	180	0,075	0,12	111,83
17	180	0,075	0,12	89,78
18	180	0,075	0,12	116,47
19	180	0,075	0,12	48,84
20	180	0,075	0,12	87,12

Observou-se que a força radial foi influenciada pela interação entre a profundidade de corte (a_p) e o avanço por face (f_z), conforme a tabela 4.6 e figura 4.6.

Tabela 4.6: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Fr.

Effect Estimates; Var.:Fr, R-sqr=.65678; Adj.:.34788 (mestrado)										
3 factors, 1 Blocks, 20 Runs; MS Residual=649,9915										
DV: Fr										
Factor	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	86,6047	10,39806	8,32893	0,000008	63,4364	109,7731	86,6047	10,39806	63,4364	109,7731
(1)Vc (L)	-19,4620	13,79776	-1,41052	0,188726	-50,2054	11,2813	-9,7310	6,89888	-25,1027	5,6406
Vc (Q)	-9,2832	13,43174	-0,69114	0,505206	-39,2110	20,6446	-4,6416	6,71587	-19,6055	10,3223
(2)f (L)	-16,1384	13,79776	-1,16964	0,269268	-46,8817	14,6049	-8,0692	6,89888	-23,4409	7,3024
f (Q)	13,1427	13,43174	0,97848	0,350914	-16,7851	43,0705	6,5714	6,71587	-8,3925	21,5352
(3) a_p (L)	24,4134	13,79776	1,76937	0,107261	-6,3299	55,1567	12,2067	6,89888	-3,1650	27,5784
a_p (Q)	1,5744	13,43174	0,11722	0,909008	-28,3534	31,5022	0,7872	6,71587	-14,1767	15,7511
1L by 2L	-12,8275	18,02764	-0,71155	0,493010	-52,9956	27,3406	-6,4138	9,01382	-26,4978	13,6703
1L by 3L	18,6975	18,02764	1,03716	0,324091	-21,4706	58,8656	9,3487	9,01382	-10,7353	29,4328
2L by 3L	-55,4825	18,02764	-3,07764	0,011688	-95,6506	-15,3144	-27,7412	9,01382	-47,8253	-7,6572

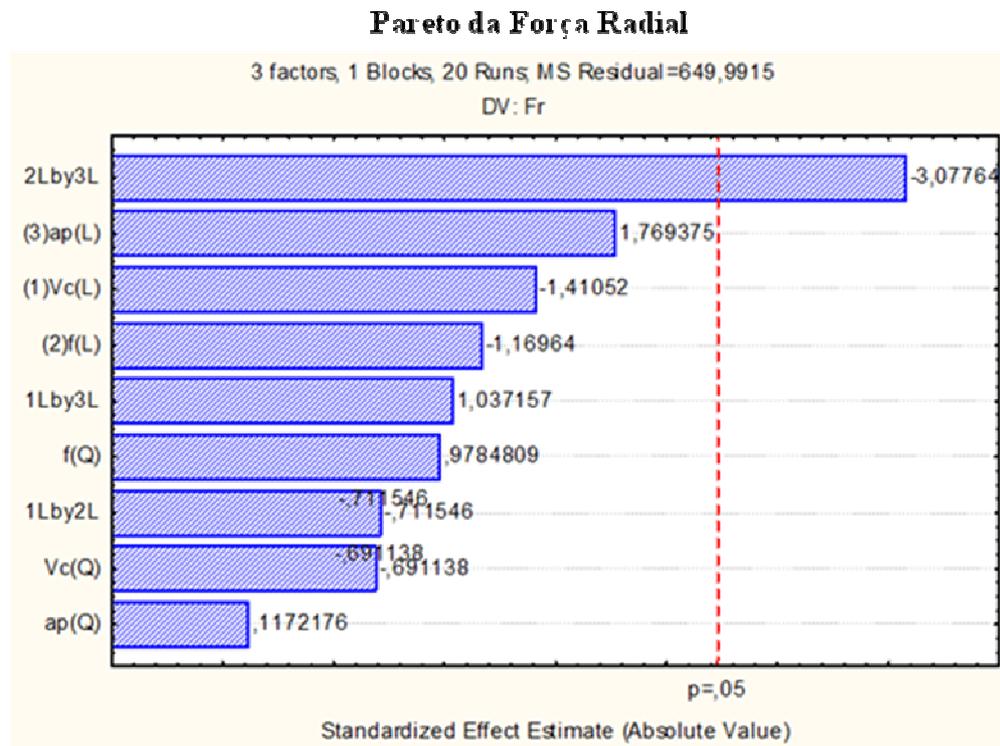


Figura 4.6: Pareto para efeito das variáveis independentes na Fr.

Analisando o gráfico da figura 4.7, podemos verificar que os valores da força radial variam em função das variáveis independentes, “ a_p ” e “ f_z ”, sendo que:

- a) os valores mínimos de F_r ocorrem para o valor mínimo de “ a_p ” (0,04mm) e mínimo de “ f_z ” (0,02mm/dente) quando usados simultaneamente;
- b) os valores máximos de F_r ocorrem em duas situações:
 - para os valores máximo de “ a_p ” (0,20mm) e mínimo de “ f_z ” (0,02mm/dente) quando usados simultaneamente;
 - para os valores mínimo de “ a_p ” (0,04mm) e máximo de “ f_z ” (0,13mm/dente), quando usados simultaneamente.

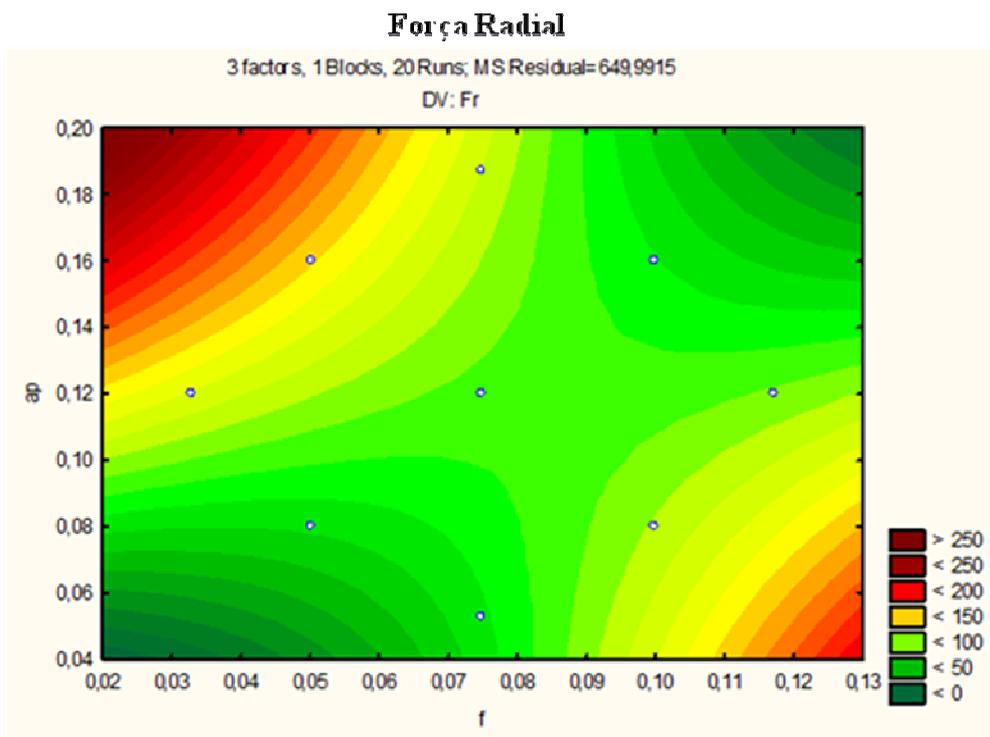


Figura 4.7: Gráfico: “ $f_z \times a_p$ ” para força radial.

De um modo geral, pode-se observar que a força radial teve um comportamento muito similar à força tangencial e ao momento torçor.

4.1.1.4 Força passiva

Os dados da força passiva, medidos nos ensaios, podem ser verificados na tabela 4.7, como segue:

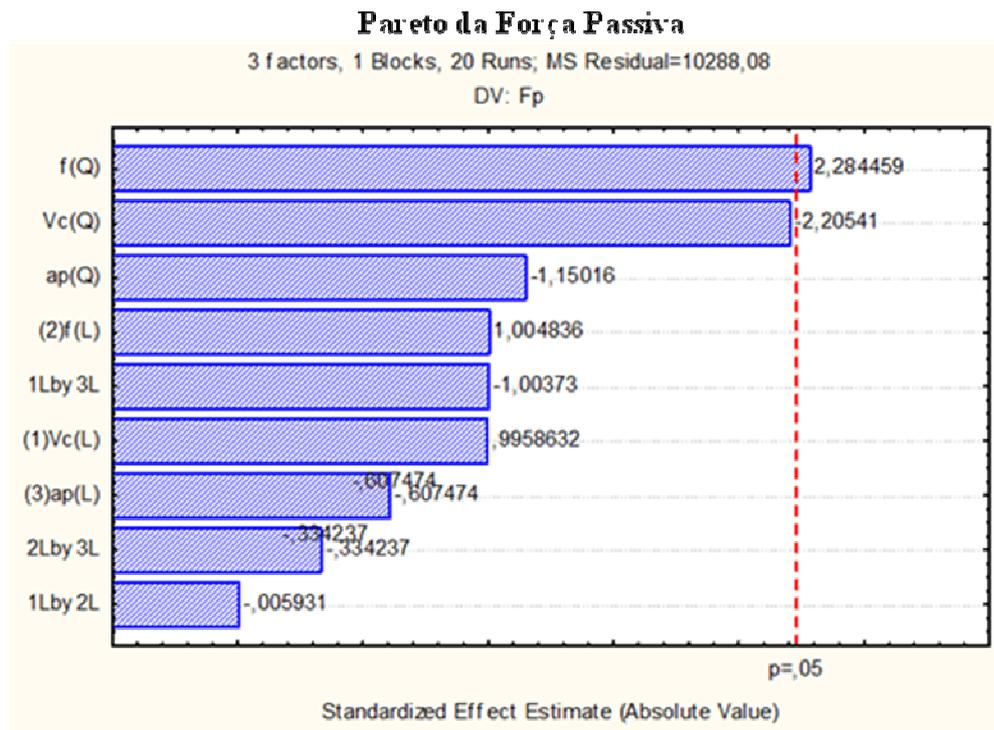
Tabela 4.7: Resultados da força passiva.

PARÂMETROS DE FRESAMENTO - AÇO AISI H13				
AMOSTRA	VC (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)	Fp (N)
1	150	0,05	0,08	91,22
2	150	0,05	0,16	156,90
3	150	0,1	0,08	212,09
4	150	0,1	0,16	179,51
5	210	0,05	0,08	282,04
6	210	0,05	0,16	153,43
7	210	0,1	0,08	351,75
8	210	0,1	0,16	225,51
9	129,6	0,075	0,12	43,48
10	230,5	0,075	0,12	43,64
11	180	0,032955	0,12	355,70
12	180	0,117045	0,12	410,04
13	180	0,075	0,055	125,08
14	180	0,075	0,19	121,54
15	180	0,075	0,12	252,20
16	180	0,075	0,12	142,74
17	180	0,075	0,12	119,81
18	180	0,075	0,12	475,21
19	180	0,075	0,12	138,42
20	180	0,075	0,12	225,68

Observou-se que, a força passiva foi influenciada pelo avanço por faca (f_z) e pela velocidade de corte (V_c), conforme a tabela 4.8 e a figura 4.8.

Tabela 4.8: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Fp.

Effect Estimates; Var.:Fp; R-sqr=.61608; Adj.:.27055 (mestrado)										
3 factors, 1 Blocks, 20 Runs; MS Residual=10288,08										
DV: Fp										
Factor	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	224,842	41,36812	5,43516	0,000287	132,669	317,0163	224,8424	41,36812	132,669	317,0163
(1)Vc (L)	54,667	54,89361	0,99586	0,342803	-67,644	176,9771	27,3333	27,44680	-33,822	88,4885
Vc (Q)	-117,851	53,43744	-2,20541	0,051963	-236,917	1,2147	-58,9257	26,71872	-118,459	0,6073
(2)f (L)	55,159	54,89361	1,00484	0,338670	-67,151	177,4697	27,5795	27,44680	-33,576	88,7348
f (Q)	122,076	53,43744	2,28446	0,045440	3,010	241,1417	61,0378	26,71872	1,505	120,5709
(3)ap (L)	-33,346	54,89361	-0,60747	0,557079	-155,657	88,9642	-16,6732	27,44680	-77,828	44,4821
ap (Q)	-61,462	53,43744	-1,15016	0,276840	-180,528	57,6044	-30,7308	26,71872	-90,264	28,8022
1L by 2L	-0,425	71,72195	-0,00593	0,995385	-160,232	159,3811	-0,2127	35,86098	-80,116	79,6906
1L by 3L	-71,990	71,72195	-1,00373	0,339176	-231,796	87,8167	-35,9949	35,86098	-115,898	43,9083
2L by 3L	-23,972	71,72195	-0,33424	0,745104	-183,779	135,8343	-11,9861	35,86098	-91,889	67,9172

**Figura 4.8:** Pareto para efeito das variáveis independentes na Fp.

O gráfico da figura 4.9, mostra que os valores da força passiva variam em função das variáveis independentes “ f_z ” e “Vc”, sendo que:

- a) os valores mínimos de F_p ocorrem para o valor mínimo para “ V_c ” (120 m/min) e médio para “ f_z ” (entre 0,07 e 0,08 mm/dente) quando utilizados simultaneamente;
- b) os valores máximos de F_p ocorrem para os valores médios de “ V_c ” (180m/min) e máximos de “ f_z ” (0,13mm/dente) quando utilizados simultaneamente.

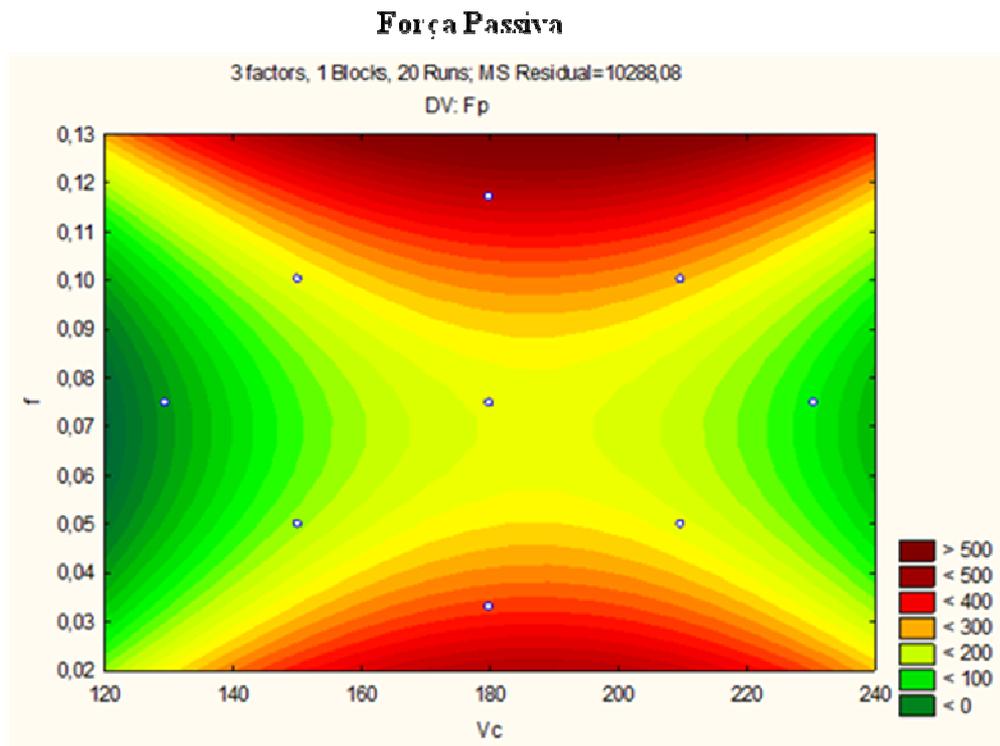


Figura 4.9: Gráfico: “ $f_z \times V_c$ ” para força passiva.

Dentre as componentes das forças de usinagem analisadas nesta pesquisa, a força passiva ou força de penetração apresentou os maiores valores. Isto se deve ao fato de que a força passiva é muito dependente do avanço por faca e da penetração da ferramenta na peça, por oferecerem maior resistência à ação do corte, exigindo maior esforço. Estas componentes são responsáveis pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte. O aumento da velocidade de corte eleva a força passiva até certo ponto e logo após passa a sofrer redução. Esta análise pode permitir a escolha dos parâmetros de corte que apresente menores variações da força passiva, pois conseqüentemente haverá menores variações de tolerâncias de forma e dimensional, se estes fatores forem os mais significativos no processo.

4.1.1.5 Força resultante

Os dados da força resultante, medidos nos ensaios, podem ser verificados na tabela 4.9, como segue:

Tabela 4.9: Resultados da força resultante.

PARÂMETROS DE FRESAMENTO - AÇO H13				
CORPO	VC (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)	R (N)
1	150	0,05	0,08	154,26
2	150	0,05	0,16	251,82
3	150	0,1	0,08	285,31
4	150	0,1	0,16	198,37
5	210	0,05	0,08	298,92
6	210	0,05	0,16	254,47
7	210	0,1	0,08	367,83
8	210	0,1	0,16	238,01
9	129,6	0,075	0,12	122,50
10	230,5	0,075	0,12	81,23
11	180	0,032955	0,12	380,00
12	180	0,117045	0,12	432,72
13	180	0,075	0,055	136,34
14	180	0,075	0,19	210,31
15	180	0,075	0,12	270,29
16	180	0,075	0,12	212,82
17	180	0,075	0,12	174,27
18	180	0,075	0,12	502,82
19	180	0,075	0,12	154,66
20	180	0,075	0,12	262,97

As variáveis que exerceram maior influência na Força Resultante foram o avanço por faca (f_z) e a velocidade de corte (V_c), conforme mostrado na tabela 4.10 e na figura 4.10.

Tabela 4.10: ANOVA para efeito das variáveis independentes na R.

Effect Estimates; Var.:R; R-sqr=.55865; Adj.:.16144 (mestrado)										
3 factors, 1 Blocks, 20 Runs; MS Residual=9698,356										
DV: R										
Factor	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	261,970	40,16499	6,52234	0,000067	172,477	351,4629	261,9697	40,16499	172,477	351,4629
(1)Vc (L)	29,299	53,29712	0,54972	0,594572	-89,455	148,0521	14,6494	26,64856	-44,727	74,0261
Vc (Q)	-100,791	51,88330	-1,94265	0,080726	-216,394	14,8122	-50,3955	25,94165	-108,197	7,4061
(2)f (L)	32,029	53,29712	0,60096	0,561240	-86,724	150,7828	16,0147	26,64856	-43,362	75,3914
f (Q)	114,521	51,88330	2,20728	0,051799	-1,082	230,1242	57,2605	25,94165	-0,541	115,0621
(3)ap (L)	-5,748	53,29712	-0,10785	0,916250	-124,501	113,0054	-2,8740	26,64856	-62,251	56,5027
ap (Q)	-50,260	51,88330	-0,96872	0,355532	-165,863	65,3430	-25,1301	25,94165	-82,932	32,6715
1L by 2L	-6,287	69,63604	-0,09028	0,929847	-161,446	148,8720	-3,1434	34,81802	-80,723	74,4360
1L by 3L	-46,219	69,63604	-0,66373	0,521874	-201,378	108,9396	-23,1096	34,81802	-100,689	54,4698
2L by 3L	-67,470	69,63604	-0,96889	0,355449	-222,629	87,6890	-33,7349	34,81802	-111,314	43,8445

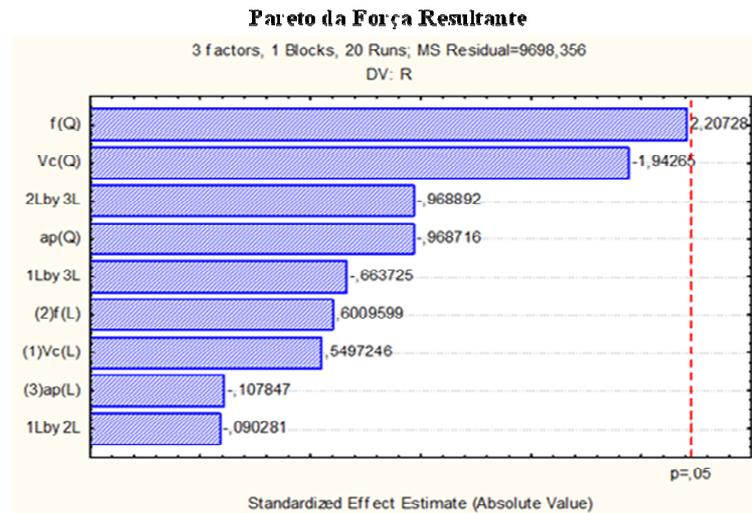


Figura 4.10: Pareto para efeito das variáveis independentes na R.

O gráfico da figura 4.11 mostra que os valores da Força Resultante variam em função das variáveis independentes “ f_z ” e “ V_c ”, sendo que:

- os valores mínimos de R ocorrem para o valor mínimo para “ V_c ” (120 m/min) e médio para “ f_z ” (entre 0,07 e 0,08 mm/dente) quando utilizados simultaneamente;
- os valores máximos de R ocorrem para os valores médios de “ V_c ” (180m/min) e mínimos de “ f_z ” (0,02mm/dente) quando utilizados simultaneamente.

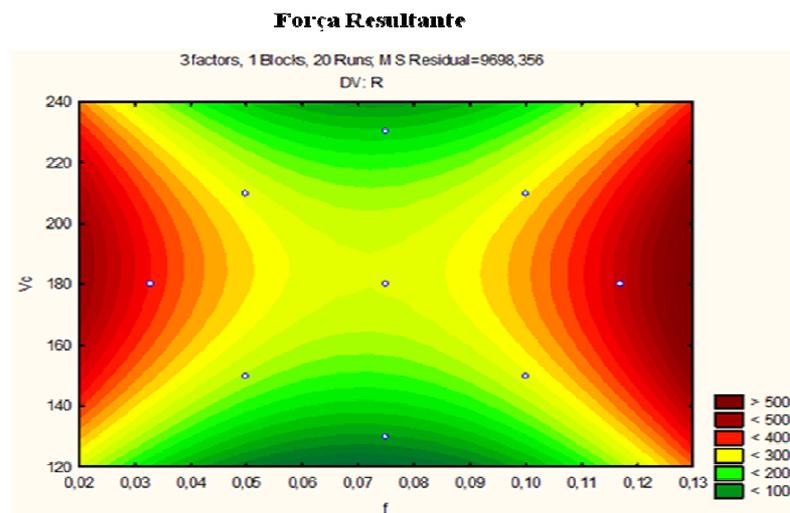


Figura 4.11: Gráfico: “ $V_c \times f_z$ ” para força resultante.

A análise mostrou que a força resultante teve um comportamento similar à força passiva.

4.2 Integridade Superficial

4.2.1 Rugosidade

As rugosidades dos corpos de prova foram medidas na direção contrária ao avanço de usinagem. Foram feitas três medições em cada condição e, em seguida, calculada a respectiva média, com o objetivo de melhorar a confiabilidade dos resultados. Segue, na Tabela 4.11, os valores médios de rugosidade “Ra” medidos após usinagem.

Tabela 4.11: Resultados da rugosidade.

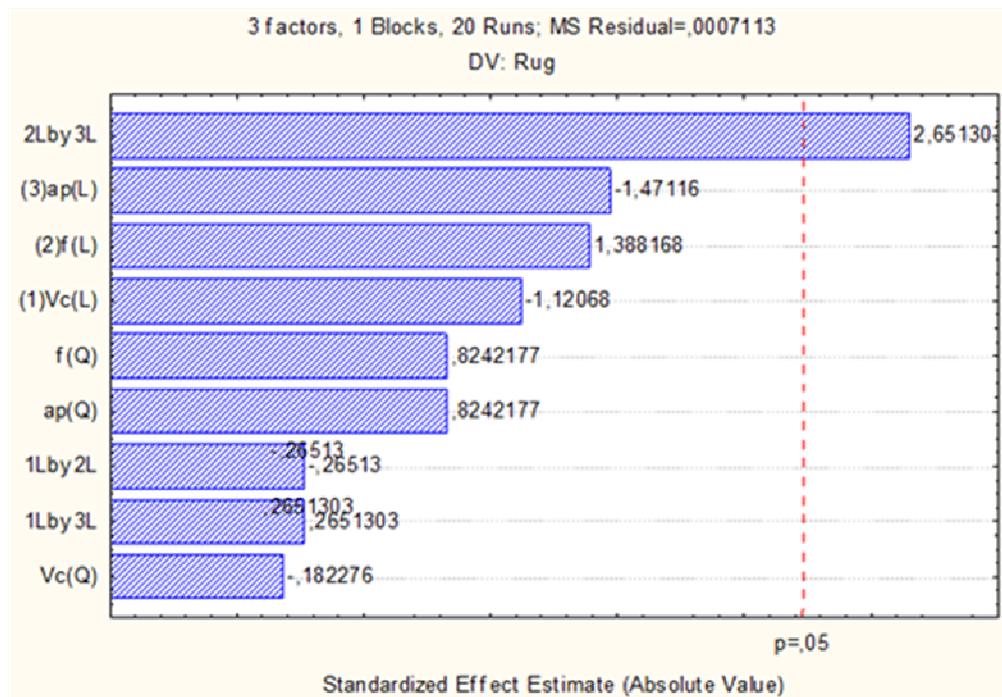
PARÂMETROS DE FRESAMENTO - AÇO H13				
CORPO	VC (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)	RUG (μm)
1	150	0,05	0,08	0,13
2	150	0,05	0,16	0,08
3	150	0,1	0,08	0,11
4	150	0,1	0,16	0,17
5	210	0,05	0,08	0,11
6	210	0,05	0,16	0,08
7	210	0,1	0,08	0,09
8	210	0,1	0,16	0,15
9	129,6	0,075	0,12	0,13
10	230,5	0,075	0,12	0,10
11	180	0,032955	0,12	0,13
12	180	0,117045	0,12	0,14
13	180	0,075	0,055	0,19
14	180	0,075	0,19	0,08
15	180	0,075	0,12	0,10
16	180	0,075	0,12	0,10
17	180	0,075	0,12	0,10
18	180	0,075	0,12	0,10
19	180	0,075	0,12	0,13
20	180	0,075	0,12	0,13

Podemos comparar os valores rugosidade “Ra” obtidos neste experimento com a tabela de rugosidades 4.12.

Tabela 4.13: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Rugosidade.

Effect Estimates; Var.:Rug; R-sqr=.58097; Adj.:.20385 (mestrado) 3 factors, 1 Blocks, 20 Runs; MS Residual=.0007113 DV: Rug										
Factor	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,110466	0,010877	10,15561	0,000001	0,086230	0,134703	0,110466	0,010877	0,086230	0,134703
(1)Vc (L)	-0,016176	0,014434	-1,12068	0,288618	-0,048336	0,015985	-0,008088	0,007217	-0,024168	0,007992
Vc (Q)	-0,002561	0,014051	-0,18228	0,859009	-0,033868	0,028746	-0,001281	0,007025	-0,016934	0,014373
(2)f (L)	0,020037	0,014434	1,38817	0,195232	-0,012124	0,052197	0,010018	0,007217	-0,006062	0,026098
f (Q)	0,011581	0,014051	0,82422	0,429036	-0,019726	0,042888	0,005791	0,007025	-0,009863	0,021444
(3)ap (L)	-0,021234	0,014434	-1,47116	0,172003	-0,053395	0,010926	-0,010617	0,007217	-0,026697	0,005463
ap (Q)	0,011581	0,014051	0,82422	0,429036	-0,019726	0,042888	0,005791	0,007025	-0,009863	0,021444
1L by 2L	-0,005000	0,018859	-0,26513	0,796294	-0,047020	0,037020	-0,002500	0,009429	-0,023510	0,018510
1L by 3L	0,005000	0,018859	0,26513	0,796294	-0,037020	0,047020	0,002500	0,009429	-0,018510	0,023510
2L by 3L	0,050000	0,018859	2,65130	0,024259	0,007980	0,092020	0,025000	0,009429	0,003990	0,046010

Pareto da Rugosidade

**Figura 4.12:** Pareto para efeito das variáveis independentes na Rugosidade.

Analisando o gráfico da figura 4.13, podemos verificar que os valores da Rugosidade variam em função das variáveis independentes, “ a_p ” e “ f_z ”, sendo que:

- os valores mínimos de Ra ocorrem para o valor máximo de “ a_p ” (0,20mm) e mínimo de “ f_z ” (0,02mm/dente) quando usados simultaneamente;
- os valores máximos de Ra ocorrem em duas situações:

- para o valor mínimo de “ a_p ” (0,04mm) e mínimo de “ f_z ” (0,02mm/dente) quando usados simultaneamente.
- para o valor máximo de “ a_p ” (0,20mm) e máximo de “ f_z ” (0,13mm/dente) quando usados simultaneamente.

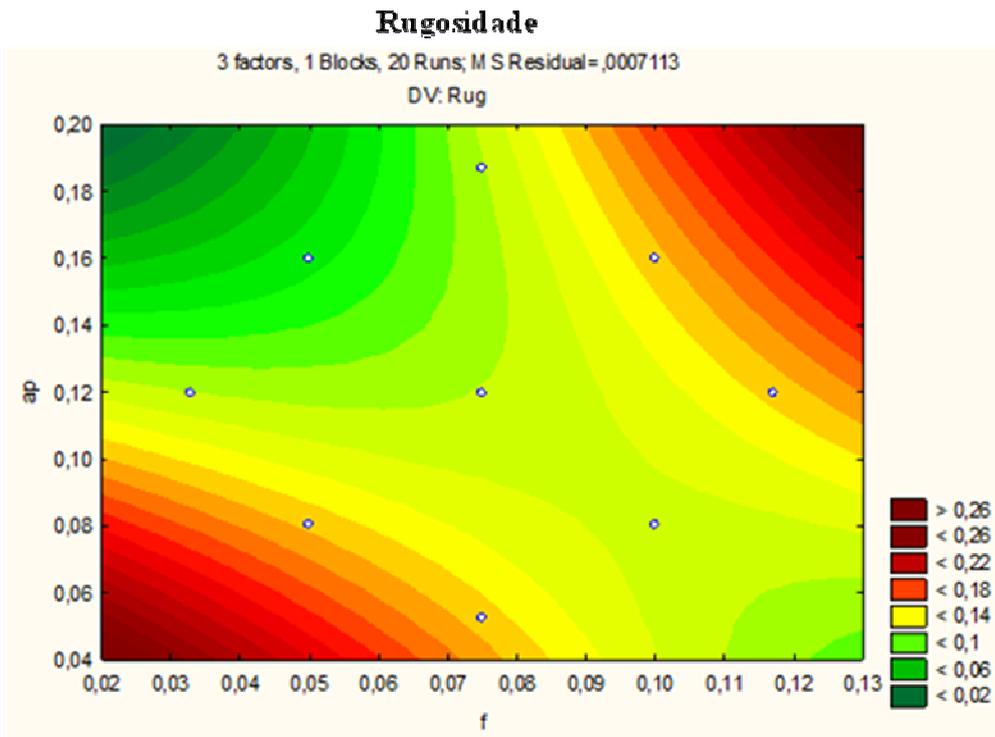


Figura 4.13: Gráfico: “ a_p x f_z ” para rugosidade.

Justifica-se a influência do avanço na rugosidade pelo fato de que com um avanço alto obtém-se um comprimento maior de material a ser retirado pela faca ou dente da ferramenta de corte e, dependendo do raio de ponta da ferramenta (r_e), a mesma não tem área de contato suficiente para manter a superfície sem ondulações. Essa característica justifica também o fato de quanto maior o avanço maior a rugosidade, pois o passo das ondulações aumenta e conseqüentemente aumenta a altura média dos picos. Quanto à profundidade de corte, dentro do intervalo escolhido (0,04 a 0,20mm), sua influência está no nível de rigidez da máquina, pois observa-se que com “ a_p ” pequeno a influência da rigidez é alta. À medida em que aumenta-se o “ a_p ” e diminui-se o “ f_z ” obtém-se os melhores valores para a rugosidade R_a .

4.2.2 Camada branca

A Figura 4.14 é a micrografia da amostra do corpo de prova 1 com ampliação de 500x, onde observa-se uma estrutura martensítica revenida, conforme esperado devido ao tratamento térmico, porém não há indícios de formação de camada branca em nenhuma amostra do experimento. As fotos dos demais corpos de prova podem ser vistas no anexo I.

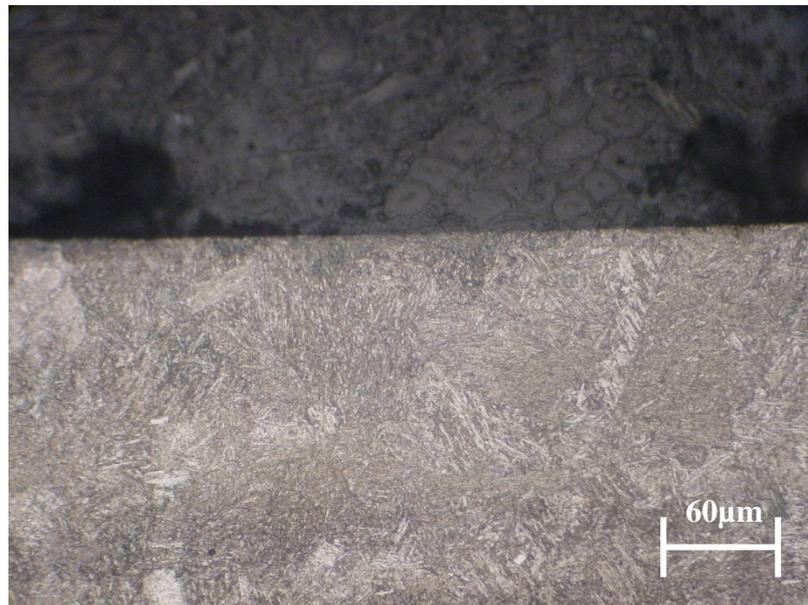


Figura 4.14: Corpo-de-prova 1.

O maior problema da camada branca não é quanto à sua formação, composição ou microestrutura, mas sim quanto ao seu efeito nos componentes manufaturados, o que causa divergência na opinião de muitos pesquisadores. Alguns afirmam que a camada branca é uma vantagem tribológica, pois confere um aumento da dureza da superfície com estabilidade térmica e um aumento da resistência proporcionado pela transição gradual na microestrutura, porém outros pesquisadores afirmam que as microtrincas e os vazios formados no processo de usinagem são nocivos à resistência da superfície, uma vez que a camada branca é dura e frágil, as trincas são facilmente propagadas.

O aço AISI H13, material de estudo deste experimento, é aplicado em trabalhos nos quais recebe constantes impactos, como matriz para estampagem e corte de chapas à quente, necessitando, portanto, de boa resistência ao aparecimento de trincas.

Segundo El-Wardany et al. (2000), com a formação da camada branca podem ocorrer trincas, vazios devido à defeitos do material, deformações plásticas e alterações das propriedades das camadas internas. Desta forma, para o aço AISI H13 o surgimento desta microestrutura seria nocivo ao ponto de poder propagar trincas durante o trabalho.

Um dos fatores de maior relevância na formação da Camada Branca é o desgaste da ferramenta, pois este fenômeno eleva a temperatura na interface ferramenta / peça, favorecendo o seu surgimento. Assim sendo, uma justificativa para a não formação da Camada Branca durante este experimento é o fato de que não houve desgaste de ferramentas, pois as amostras foram usinadas com ferramentas novas.

4.3 Resultados de outros pesquisadores

De um modo geral, os resultados encontrados nesta pesquisa estão de acordo com pesquisas já realizadas por diferentes autores. Segundo Fang e Wu (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006), o aumento da velocidade de corte eleva as forças até certo ponto e logo após passa a sofrer redução, semelhante ao ocorrido com as forças Passiva e Resultante deste experimento. Ferraresi (1970) constatou que o aumento da área de corte eleva a força de usinagem (conforme ocorrido com as forças Tangencial, Radial e Momento Torçor) e que o aumento da velocidade de corte reduz levemente as forças de usinagem. Martinho, Silva e Baptista (2008) concluíram que o aumento do avanço causa o aumento das forças de corte, porém, para a velocidade de corte, não constataram influência significativa. Para Lalwani, Mehta e Jain (2008) o avanço e profundidade de corte são os fatores mais influentes nas forças de usinagem, seguido da velocidade de corte.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentado um estudo experimental para avaliar o efeito das estratégias de fresamento em acabamento do aço endurecido AISI H13 com insertos de CBN no comportamento das forças de usinagem (Força Tangencial, Momento Torçor, Força Radial, Força Passiva e Força Resultante) e integridade superficial (Rugosidade e Camada Branca). Com o intuito de facilitar a compreensão das conclusões, elas serão apresentadas na mesma seqüência em que foram apresentados os resultados e conclusões. Portanto, com base nos ensaios apresentados, as seguintes conclusões são delineadas:

5.1 Conclusões sobre forças de usinagem

5.1.1 Força tangencial

- a) menor avanço por faca e menor profundidade de corte temos a menor força tangencial.
- b) maior profundidade de corte e maior avanço por faca temos a maior força tangencial.
- c) menor profundidade de corte e maior avanço por faca temos a maior força tangencial.

5.1.2 Momento torçor

- a) menor avanço por faca e menor profundidade de corte temos o menor momento torçor.
- b) maior profundidade de corte e maior avanço por faca temos o maior momento torçor.
- c) menor profundidade de corte e maior avanço por faca temos o maior momento torçor.

5.1.3 Força radial

- a) menor avanço por faca e menor profundidade de corte temos a menor força radial.
- b) maior profundidade de corte e maior avanço por faca temos a maior força radial.
- c) menor profundidade de corte e maior avanço por faca temos a maior força radial.

5.1.4 Força passiva

- a) menor velocidade de corte e valores médios de avanço por faca temos a menor força passiva.
- b) valor médio para velocidade de corte e maior avanço por faca temos a maior força passiva.

5.1.5 Força resultante

- a) menor velocidade de corte e valores médios de avanço por faca temos a menor força resultante.
- b) valor médio para velocidade de corte e maior avanço por faca temos a maior força resultante.

5.1.6 Resumo para forças de usinagem

- a) O acréscimo do avanço por faca e da profundidade de corte causaram um aumento nas forças de usinagem. Esse aumento é influenciado pela maior taxa de remoção de cavaco, resultando assim em maiores forças.
- b) A força resultante foi significativamente influenciada pela força passiva.
- c) A profundidade de corte foi o parâmetro de maior efeito sobre os esforços de corte.
- d) A velocidade de corte influenciou as forças de usinagem com menor intensidade que os demais parâmetros estudados.

5.2 Conclusões sobre integridade superficial

5.2.1 Rugosidade

- a) maior profundidade de corte e menor avanço por faca temos os valores mínimos de rugosidade.

- b) menor profundidade de corte e menor avanço por faca temos os valores máximos de rugosidade.
- c) maior profundidade de corte e maior avanço por faca temos os valores máximos de rugosidade.
- d) valores de rugosidade encontrados próximos aos valores obtidos em operações de super-acabamento, tornando possível a substituição do processo de retífica pelo fresamento.

5.2.2 Resumo para rugosidade

- a) Os valores encontrados de rugosidade variaram entre 0,08 e 0,19 μ m.
- b) Os resultados obtidos para acabamento superficial foram similares aos resultados obtidos em usinagens finas, como super acabamento.
- c) A rugosidade foi influenciada pelo avanço por faca, mesmo que em baixa intensidade.
- d) Para avanços de faca maiores foram obtidos os piores resultados de rugosidade.

5.2.2 Camada branca

- a) parâmetros de corte adequados utilizados nos ensaios não possibilitaram a formação de camada branca em nenhum corpo-de-prova.
- b) arestas de corte das pastilhas de CBN utilizadas nos ensaios sempre na condição nova não possibilitaram o surgimento da camada branca.

5.2.4 Resumo para camada branca

- a) Não houve formação de camada branca em nenhum corpo-de-prova estudado.

5.3 Sugestões de trabalhos futuros

A seguir são apresentadas sugestões e propostas de atividades de pesquisa que podem contribuir e dar continuidade ao trabalho desenvolvido até o momento.

- a) Avaliar a influencia do desgaste dos insertos de CBN nas forças de usinagem e integridade superficial do aço AISI H13 fresado no estado endurecido.
- b) Avaliar a influencia da ferramenta de corte de metal duro na usinagem do aço AISI H13 fresado no estado endurecido.
- c) Avaliar tensão residual no fresamento do aço AISI H13 no estado endurecido.
- d) Avaliar a influencia dos parâmetros de corte da ferramenta de CBN na formação da camada branca no aço AISI H13 fresado no estado endurecido.
- e) Avaliar a correlação entre os resultados obtidos neste trabalho com a operação de torneamento do aço AISI H13 no estado endurecido.

REFERÊNCIAS

- ABRAO, A. M. ; ASPINWALL, D. K. ; NG, E. Temperature evaluation when machining hardened hot work die steel using pcbn tooling. **Industrial Diamond Review**, Londres, Reino Unido, v. 56, n. 569, p. 40-44, 1996.
- ALTAN, T.; LILLY, B.; YEN, Y. C. **Manufacturing of dies and molds**. Annals of the CIRP, v. 50, n. 2, p. 405-423, 2001.
- ALTINTAS, Y. **Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design**. Cambridge University Press. United Kingdom: Cambridge, 2000.
- ATKINSON, A. C.; DONEV, A. N. **Optimum experimental designs**. Oxford: Clarendon Press, 1992.
- AXINTE, D. A.; DEWES R. C. Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling - experimental data and empirical models. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.127, n.1 p. 325-335, 2002.
- BETHKE, J. **Surface technology in production engineering**. Apostila. Universidade Federal de Santa Catarina: 1993.
- BLACK, J. T. Mechanics of chip formation. In: DAVIS J. R. (Ed). **Metals handbook: machining**. 9. Ed. Ohio, USA: ASM 1989. v. 16. p7-18.
- BOEHS, L. **Análise de superfícies usinadas**. Apostila – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 1992.
- BOSHEH, S. S.; MANTIVEGA, P. T. White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speed using CBN tolling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, n. 0, p. 225-233, Manchester: 2005.
- BOX, G. E. P. **Statistics for experiments: introduction to design, data analyses and model building**. New York: Ed. John Wiley and Sons, 1978.
- BRAGHINI, A. **Metodologia para escolha de fluido de corte não agressivo para o meio ambiente para aplicações em usinagens de metais**. Tese de doutorado – Escola De Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: 2002.
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D. **Planejamento de experimentos usando o Statistica**. Livro. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2003.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 4ed, São Paulo: ABM, 1979, 504p.

DAMASCENO, D. **Análise das tensões residuais após torneamento e retificação do aço ABNT 52100 endurecido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP: 1993.

DAVIES, O. L. **Design and analysis of industrial experiments.** Edinburgh: Oliver and Boyd, 1954.

DAVIM, J. P.; GAITONDE, V. N.; KARNIK, S.R. **Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models.** Journal of Materials Processing Technology, v. 205, p. 16-23, 2008.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 3 ed., São Paulo: Artliber Editora, 2001.

Tecnologia da usinagem dos materiais. 5 ed. São Paulo: Artliber, 2006. 255p.

EL-WARDANY, T.I.; KISHAWY, H.A., ELBESTAWI, M.A. **Surface integrity of die material in high speed hard machining, part 1: Micrographical analysis.** Transactions of the ASME v. 122, p. 620-631, 2000.

EKMEKCI, B.; ELKOCA, O.; ERDEN, A. A comparative study on the surface integrity of plastic mold steel due to hard milling. **Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science**, v. 36, n. 1, p. 117-124, 2005.

FALLBÖHMER, P., RODRIGUES, C.A., ÖZEL, T., ALTAN, T. High speed machining for cast iron and alloy steel for die and mold manufacturing. **Journal of material processing technology**, v. 98, p. 104-115, 2000.

FANG, N.; WU Q. A. Comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti-6Al-4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 209 n.209, p.4385-4389, 2009.

FERCABE. Tabela de rugosidades. Disponível em: www.fercabe.com.br Acesso em: 10 de outubro de 2010.

FERRARESI, D. **Fundamento da usinagem dos metais.** São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 754p.

Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FIELD, M.; KAHLES, J. F. **Review of surface integrity of machine components.** Annals of the CIRP, v.20, n.2, p.153-163, 1971.

FIELD, M.; KAHLES, J. F.; CAMMETT, J. T. **Review of measuring methods for surface integrity.** Annals of the CIRP, 1972.

GRIFFITHS, B. J. **Manufacturing surface technology.** 1. ed. London: Penton Press, 2001.

- HIOKI, D. **Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido.** Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2006.
- KOMANDURI, R. **Machining and grinding: a historical review of the classical papers.** In: Symposium on US Contributions to Machining & Grinding Research in the 20th Century, Oklahoma: 1993.
- KOSHY, P, DEWES, R.C., ASPINWALL, D.K. High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel. **Journal of Materials Processing Technology.** v.127, p.266-273, 2002.
- KRATOCHVIL, R. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial.** 2004. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- LALWANI, D. I.; MEHTA, N. K.; JAIN, P. K. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. **Journal of Materials Processing Technology,** Amsterdam, v. 206, n.1, p. 167-179, 2008.
- LI, H. Z.; LIU, K.; LI, X. P. A new method for determining the undeformed chip thickness in milling. **Journal of Materials Processing Technology,** 2001.
- LIMA, F. E. ; CORRÊA, M. . Usinagem de materiais endurecidos. **Revista tecnologia, Fortaleza-CE,** v. 23, n. 1, p. 38-44, 2002.
- LUCAS, J. M. **Which response surface design is best.** Technometrics, v.18, p.411-417, 1976.
- MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais.** 8 ed. Apostila, Minas Gerais: 2004, 257 p.
- MARTINHO, R. P.; SILVA F. J. G.; BAPTISTA, A. P. M. Cutting forces and wear analysis of Si3N4 diamond coated tools in high speed machining. **Vacuum,** Amsterdam, v.83, n.1, p. 1415-1420, 2008.
- MONTGOMERY, D. C. **Diseno y analisis de experimentos.** John Wiley and Sons, 1991.
- MYERS, R.H. **Response surface methodology.** Boston: Allyn and Bacon, 1971.
- NING. Y., RAHMAN M., WONG Y. S. Investigation of chip formation in high speed end milling. **Journal of Materials Processing Technology,** v.113, p.360-367, 2001.
- OGLIARI, P. J.; PACHECO, J. A. **Análise estatística usando Statistica 6.0.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

POULACHON, G. et al. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p.139-144, 2003 - A.

An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.45, p.211-218, 2004.

ROSA, L. C.; SIQUEIRA, C. **Fresadora e processo de fresamento.** Apostila Engenharia Controle de Automação - UNESP. Sorocaba: 2001.

ROSSI, G. C. **Estudos das forças de corte no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para fabricação de tubos de aço com costura.** Tese de Mestrado. Engenharia Mecânica de Projetos de Fabricação – Escola Politécnica da USP, São Paulo: 2007.

SAGLAM, H.; UNUVAR, A. Three component, strain gage based milling dynamometer design and manufacturing. **Journal of Integrated Design and Process Science**, Vol. 5, Nº 2, 2001.

SANDVIK, C. **Die and Mould Making:** Application Guide, Sandvik-Coromant, 1999.

SANDIVIK COROMANT. **Catálogo principal.** São Paulo, 2008. 1038p.

SCHROETER, R. B., WEINGAERTNER, W. L., MACEDO, S.E.M., Análise de forças no fresamento de topo reto. **Máquinas e Metais**, p. 130-139, 2001.

WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida.** 1. ed. Florianópolis: [s.n.], 2002.

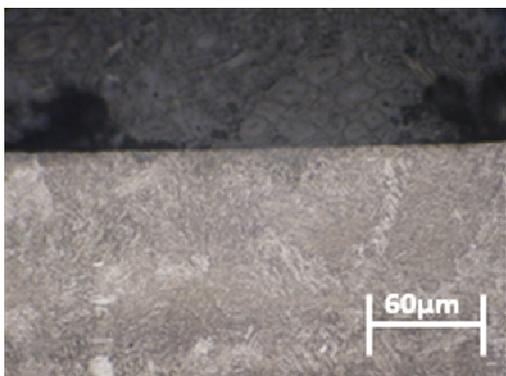
WU, X.; KITA, Y.; IKOKU, K. New polishing technology of free form surface by GC. **Journal of Materials Processing Technology**, 2007.

YANG, Y.Y.; FANG, H. S.; HUANG, W.G. **A study of wear resistance of white layer.** Tribology International, 1996.

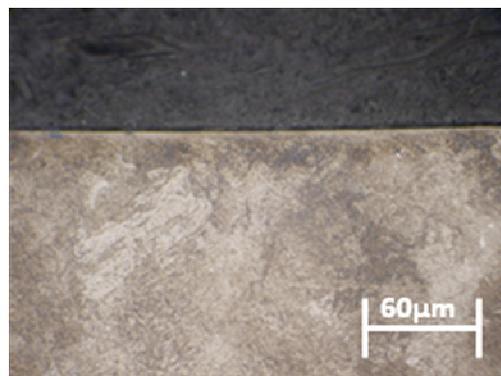
ZEILMANN, R. P.; VALLEJOS, R. V.; LINZMEIER, P. R.; BORBA, D.; ROVARIS, J. L.; BESUTTI, K.; KUZER, M. S.; SANTIN, R. **Ensaio Experimental 03: Avaliação dos Critérios de Usinabilidade Referente ao Aço AISI H13.** Caxias do Sul: UCS Departamento de Engenharia Mecânica, Relatório de Pesquisa, 2004.

ANEXOS

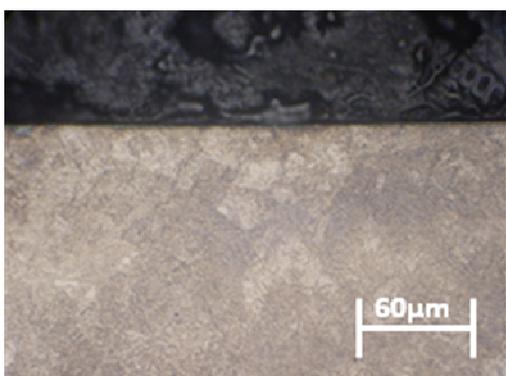
✓ **Em anexo 1 – Corpos-de-prova**



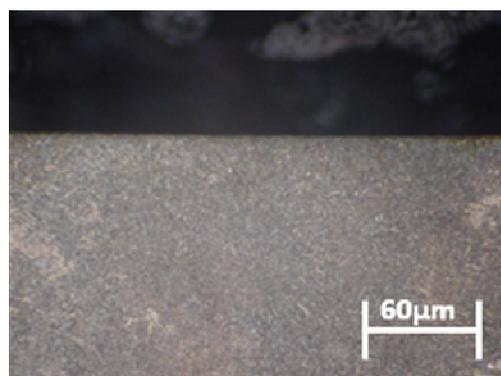
Corpo de prova 1



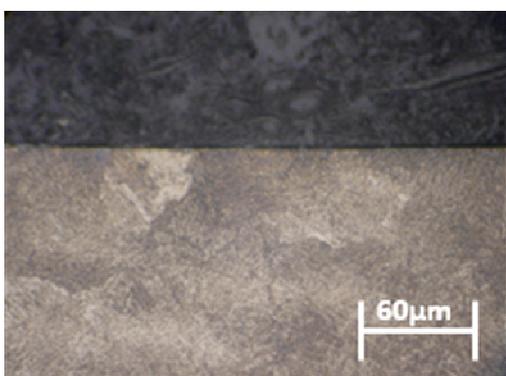
Corpo de prova 2



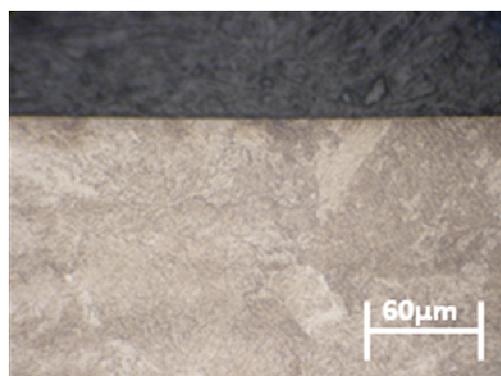
Corpo de prova 3



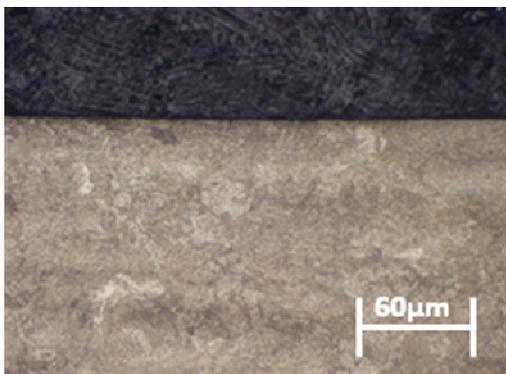
Corpo de prova 4



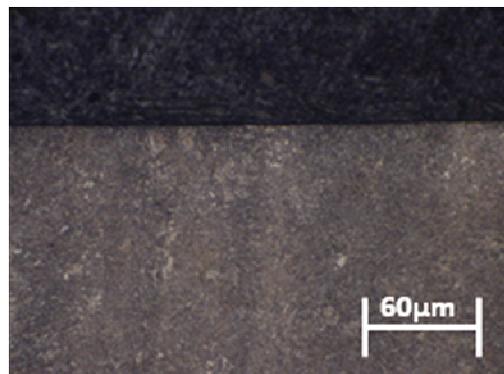
Corpo de prova 5



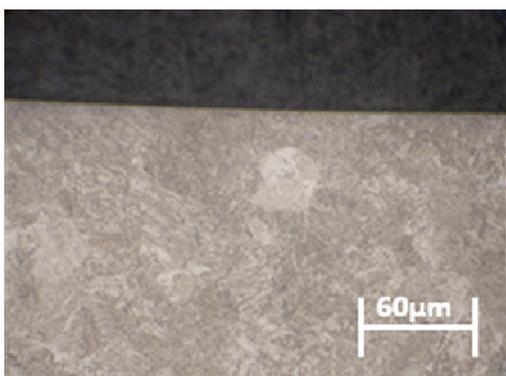
Corpo de prova 6



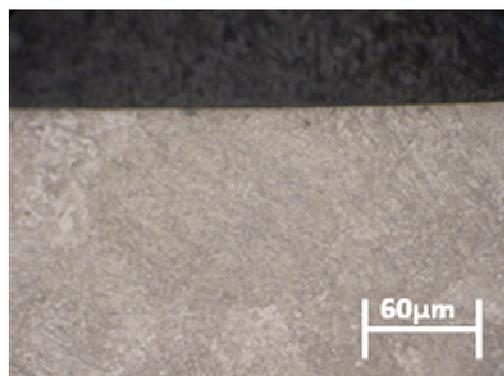
Corpo de prova 7



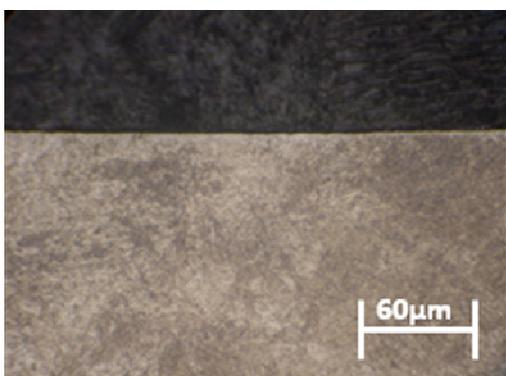
Corpo de prova 8



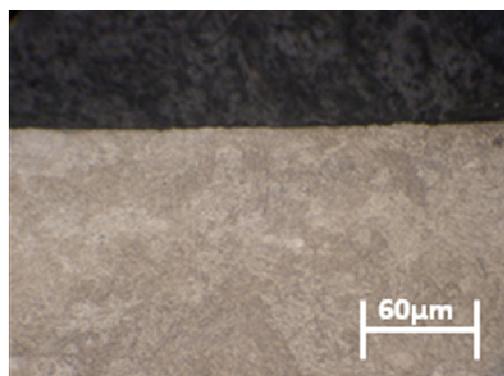
Corpo de prova 9



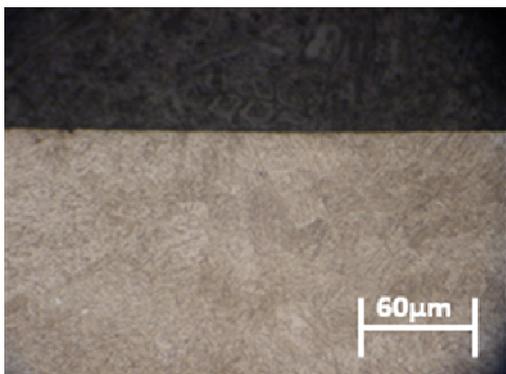
Corpo de prova 10



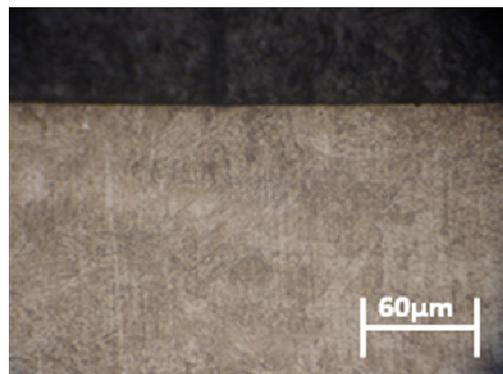
Corpo de prova 11



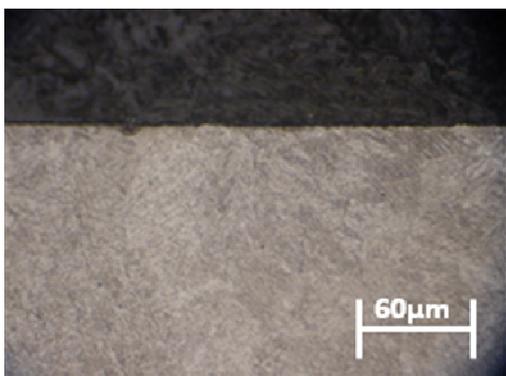
Corpo de prova 12



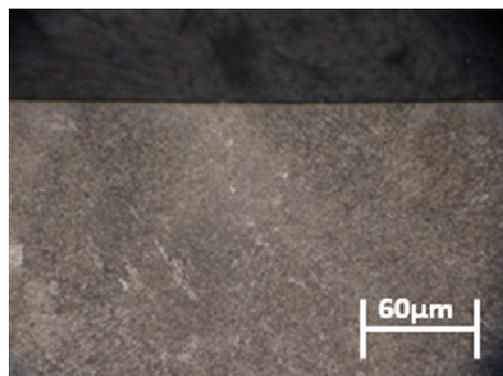
Corpo de prova 13



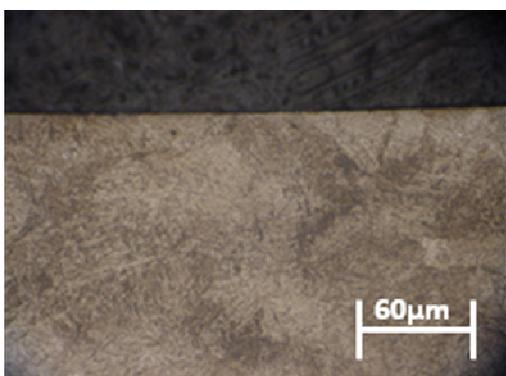
Corpo de prova 14



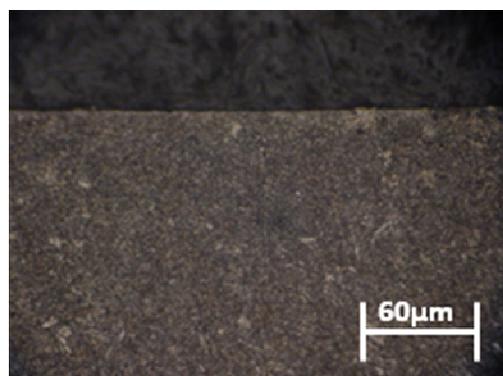
Corpo de prova 15



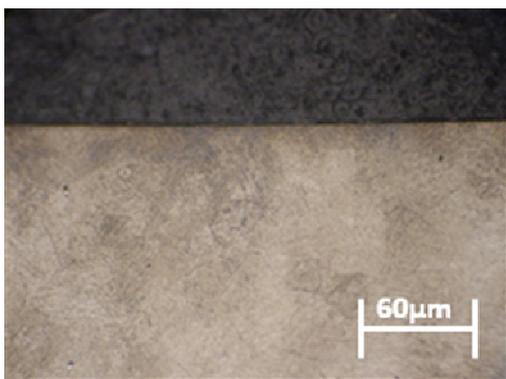
Corpo de prova 16



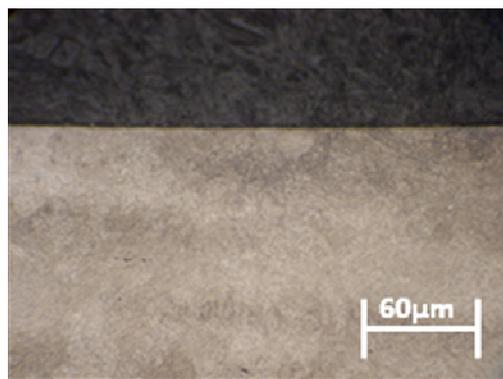
Corpo de prova 17



Corpo de prova 18



Corpo de prova 19



Corpo de prova 20