

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

JOSÉ ROBERTO BANIN JÚNIOR

207.104-1

**ANALISE DE TENSÕES RESIDUAIS, INTEGRIDADE
SUPERFICIAL E FORÇAS DE USINAGEM NO
FRESAMENTO DE TOPO DE AÇO SAE 4340 ENDURECIDO**

São Bernardo do Campo
2009

JOSÉ ROBERTO BANIN JÚNIOR

207.104 - 1

**ANALISE DE TENSÕES RESIDUAIS, INTEGRIDADE
SUPERFICIAL E FORÇAS DE USINAGEM NO
FRESAMENTO DE TOPO DE AÇO SAE 4340 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 Delijacov.

São Bernardo do Campo
2009

Banin Júnior, José Roberto

Análise de tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento de topo de aço SAE 4340 endurecido / José Roberto Banin Júnior. São Bernardo do Campo, 2009.

111 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Sérgio Delijacov

1. Fresamento. 2. Usinagem. 3. Material Endurecido. 4. Integridade Superficial. 5. Tensão Residual. I. Delijaicov, Sérgio, orient. II. Título.

CDU 621.7

José Roberto Banin Júnior

Análise de tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento de
topo de aço SAE 4340 endurecido

Mestrado em Engenharia Mecânica
Centro Universitário da FEI

Comissão Julgadora

Orientador e Presidente

Examinador 1

Examinador 2

São Bernardo do Campo

_____/_____/2009

Dedico este trabalho ao meu orientador, meus pais, meus irmãos, meus avôs, meus amigos e principalmente a minha esposa que tanto amo por me apoiar nesta longa e difícil trajetória e por compreender todo o tempo que foi dedicado a este trabalho.

Agradecimentos

Agradeço a empresa Mercedes Benz do Brasil, principalmente para todos os colegas do Pré-Planejamento Industrial, aos Engenheiros Oscar Harayama, Rui Minoru Hotta, Édison Mansano e aos tecnólogos Luciano Luminatti, Alverino Ribeiro e José Mario Cestari que me incentivaram e me orientaram em meu desenvolvimento profissional.

Agradeço também 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.

Aos companheiros de pesquisa: Felipe Mariano Brandão, Martha Romanelli Perressim e Nineth Bacovic López, pelo apoio e enriquecedoras discussões técnicas durante a pesquisa;

Ao Professor Dr. Sergio Delijacov, meu orientador, que colocou desafios crescentes e enriquecidos com o seu conhecimento, seu apoio e sua costumeira dedicação na orientação que permitiram a conclusão deste trabalho.

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

A Deus pela graça do poder realizar.

*"A felicidade é quando o que você pensa, fala e
faz, estão em harmonia".*

Ghandi

Resumo

Este trabalho teve o objetivo de estudo das influências dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte) sobre a integridade superficial de corpos de prova prismáticos de aço SAE 4340 endurecidos a 52 HRC, durante o fresamento de topo, com o uso de ferramentas convencionais de Metal Duro com cobertura. As características da integridade da superfície analisadas foram: rugosidade da superfície, camada branca e tensões residuais. As forças de corte foram medidas através de um dinamômetro tri-direcional, acoplado à mesa da máquina utilizada e com a aquisição dos dados feita pelo Sistema Spider – Catman da HBM. A fase experimental foi planejada e realizada através de um delineamento composto central e analisada pelo software “Statistica”. As tensões residuais foram medidas pela técnica do furo cego incremental e interpretadas pelo método Integral com o auxílio do software H-Drill. Os resultados demonstram que a profundidade de corte foi o parâmetro que mais influenciou nas forças de corte. No que diz respeito à integridade superficial, a rugosidade da superfície apresentou valores de rugosidade “Ra” somente encontrados em processos de usinagem mais fina, como a retífica ou mesmo a lapidação. Constatou-se a presença de camada branca, em todos os corpos de prova, porém, com pequenas variações de espessura. As tensões residuais, na maioria dos corpos de prova, mostraram-se positivas na superfície dos corpos de prova e fortemente compressivas na sub-superfície. Não foi observada correlação entre as forças de corte e a integridade superficial no nível de confiança usado neste trabalho.

Palavras chaves: Fresamento, Usinagem, Material endurecido, Integridade Superficial, Tensão residual.

Abstract

This work aim to evaluate the influences of cutting parameters (cutting speed, feed rate per tooth and cutting depth) on the surface integrity of end milled prismatic work pieces made of steel SAE 4340 tempered to 52 HRC, machined with conventional tools coated hard metal inserts. The surface integrity characteristics were analyzed trough the surface roughness, white layer formation and residual stresses. The milling forces were measured by a tri-directional dynamometer, coupled to the table of the milling tool. The data acquisition was carried out through the commercial system HBM Spider-Cadman. The statistical design of the experiments was planned and carried out by a central composite design and analyzed using the software Statistica. The residual stresses were measured by the technique of incremental blind hole and interpreted by the integral method using the software H-Drill. The results show that the cutting depth was the parameter that most influenced the milling forces. Regarding the surface integrity, the surface roughness presented average roughness "Ra" only found in the finishing machining processes such as grinding or even honing / polishing. However, with small variations in thickness, it was noted the presence of white layer in all work pieces. The residual stresses, in the majority of work pieces, were shown to be positive on the work pieces' surface, and a strongly compressive state in the sub surface. No correlationship was observed between the milling forces and the surface integrity at a statistical significant level of confidence.

Keywords: Milling, Machining, hardened material, Surface Integrity, Residual Stresses.

Lista de Abreviaturas

- **AISI:** American Iron and Steel Institute - Instituto Americano do Ferro e do Aço
- **HRC:** Rockwell C
- **IS:** Integridade da Superfície
- **DIN:** Deutsches Institut für Normung – Instituto Alemão para Normalização
- **ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- **PCBN:** Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
- **EDM:** Electrical Discharge Machining – Usinagem por Descargas Elétricas
- **EPI's:** Equipamentos de Proteção Individual
- **DCC:** Delineamento Composto Central
- **ISO:** Organização Internacional para Normalização - International Organization for Standardization
- **SAE:** Sociedade de Engenheiros da Mobilidade
- **APC:** Aresta Postiça de Corte
- **P_{máx}:** Fósforo máximo
- **S_{máx}:** Enxofre máximo
- **RPM:** Rotações Por Minuto

Lista de Figuras

Figura 1.1: Exemplos das fresas de topo

Figura 2.1: Regiões geradoras de calor na usinagem

Figura 2.2: A) Distribuição da dissipação de energia de corte com a velocidade de corte
B) Distribuição típica da temperatura (°C) na ferramenta metal duro

Figura 2.3: Perfil real (A) e teórico (B) do cavaco não-deformado

Figura 2.4: Variação da profundidade de corte (a_p) devido a vibração alto excitada

Figura 2.5: Classificação de materiais para ferramentas com geometria definida

Figura 2.6: Tenacidade vs Dureza

Figura 2.7: Dureza a quente para materiais de ferramentas de corte

Figura 2.8: Sentidos de corte

Figura 2.9: Efeitos da usinagem na integridade da superfície

Figura 2.10: Camadas superficiais de corpos sólidos

Figura 2.11: Definição de erro de forma, ondulação, rugosidade e trinca

Figura 2.12: Elementos da topografia

Figura 2.13: Camada branca na superfície fresada do material SAE 4340 50 HRC

Figura 2.14: Delineamento composto central

Figura 3.1: Ensaio inicial

Figura 3.2: Corpos de prova utilizados para os ensaios de usinagem

Figura 3.3: Fixação do corpo de prova

Figura 3.4: Operação de acabamento

Figura 3.5: Ferramenta para desbaste

Figura 3.6: Ferramenta para acabamento

Figura 3.7: Dimensões da ferramenta de corte

Figura 3.8: Fresadora Sanches Blanes

Figura 3.9: Dinamômetro para medições de forças

Figura 3.10: Esquema da célula de carga em anel

Figura 3.11: Rugosímetro Mitutoyo

Figura 3.12: Microscópio Olympus BH2-UMA.

Figura 3.13: Fresa de metal duro – alta rotação: FG 39

Figura 3.14: Fresadora pneumática SR 200

Figura 3.15: Medidor de Microdeformações P3

Figura 4.1: Planilha de dados utilizada pelo “Statistica”

Figura 4.2: Resumo planejamento experimental

Figura 4.3: Pareto para efeito das variáveis independentes no M_t

Figura 4.4: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”; “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para momento torçor

Figura 4.5: Pareto para efeito das variáveis independentes na F_t

Figura 4.6: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”; “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para força tangencial

Figura 4.7: Pareto para efeito das variáveis independentes na F_r

Figura 4.8: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”; “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para força radial

Figura 4.9: Pareto para efeito das variáveis independentes na F_p

Figura 4.10: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”; “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para força passiva

Figura 4.11: Pareto para efeito das variáveis independentes na F_{result}

Figura 4.12: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”; “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para força resultante

Figura 4.13: Pareto para efeito das variáveis independentes na rugosidade “ R_a ”

Figura 4.14: Gráficos: “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para rugosidade “ R_a ”

Figura 4.15: Camada branca do corpo de prova 1

Figura 4.16: Pareto para efeito das variáveis independentes na espessura de camada branca

Figura 4.17: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”; “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para espessura de camada branca

Figura 4.18: Corpo de prova 7 - Tensão residual em função da profundidade da superfície

Figura 4.19: Pareto para efeito das variáveis independentes na tensão residual superficial

Figura 4.20: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”; “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para tensão residual superficial

Figura 4.21: Pareto para efeito das variáveis independentes na tensão residual máxima de compressão

Figura 4.22: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”; “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para tensão residual máxima de compressão

Lista de Fórmulas

Fórmula 2.1: Espessura instantânea do cavaco (h)

Fórmula 2.2: Espessura média do cavaco por volta (h_a)

Fórmula 2.3: Velocidade de corte (V_c)

Fórmula 2.4: Velocidade de avanço (V_f)

Fórmula 2.5: Avanço por dente (f_z)

Fórmula 2.6: Avanço de corte (f_c)

Fórmula 2.7: Forças de corte ($F_t - F_r - F_a$)

Fórmula 2.8: Componentes de força, considerando um plano cartesiano ($F_x - F_y - F_z$)

Fórmula 2.9: Espaçamento entre os dentes da ferramenta (ϕ_p)

Fórmula 2.10: Ângulo de varredura (ϕ_s)

Fórmula 2.11: Componentes de força, considerando a contribuição de cada dente da ferramenta ($F_x - F_y - F_z$)

Fórmula 2.12: Força de corte resultante na ferramenta (F)

Fórmula 2.13: Torque instantâneo de corte no eixo-árvore (T_c)

Fórmula 2.14: Potência necessária no motor (P_t)

Fórmula 4.1: Rugosidade teórica “Ra” (R_a)

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Condições de corte recomendadas para aços endurecidos

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

Tabela 3.1: Composição do aço AISI-SAE 4340

Tabela 3.2: Parâmetros de corte para o acabamento

Tabela 4.1: Resultados do momento torçor

Tabela 4.2: ANOVA para efeito das variáveis independentes no M_t

Tabela 4.3: Resultados da força tangencial

Tabela 4.4: ANOVA para efeito das variáveis independentes na F_t

Tabela 4.5: Resultados da força radial

Tabela 4.6: ANOVA para efeito das variáveis independentes na F_r

Tabela 4.7: Resultados da força passiva

Tabela 4.8: ANOVA para efeito das variáveis independentes na F_p

Tabela 4.9: Resultados da força resultante

Tabela 4.10: ANOVA para efeito das variáveis independentes na F_{result}

Tabela 4.11: Resultado da rugosidade “ R_a ”

Tabela 4.12: Tabela de Rugosidades

Tabela 4.13: ANOVA para efeito das variáveis independentes na rugosidade “ R_a ”

Tabela 4.14: Resultados da espessura da camada branca

Tabela 4.15: ANOVA para efeito das variáveis independentes na espessura de camada branca.

Tabela 4.16: Resultados da tensão residual

Tabela 4.17: ANOVA para efeito das variáveis independentes na tensão residual superficial

Tabela 4.18: ANOVA para efeito das variáveis independentes na tensão residual máxima de compressão

Tabela 5.1: Resumo do comportamento das forças de corte

Tabela 5.2: Resumo do comportamento da rugosidade

Tabela 5.3: Resumo do comportamento da espessura da camada branca

Tabela 5.4: Resumo do comportamento da tensão residual superficial

Tabela 5.5: Resumo do comportamento da tensão residual máxima de compressão

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
a	Comprimento da borda de contato	mm
a_e	Penetração de trabalho	mm
a_h	Área variável do cavaco	mm ²
a_p	Profundidade de usinagem	mm
d	Diâmetro da ferramenta	mm
f	Avanço	mm / volta
F	Força total de corte	N
F_a	Força axial	N
f_c	Avanço de corte	mm
F_p	Força passiva	N
F_r	Força radial	N
F_{result}	Força resultante	N
F_t	Força tangencial	N
F_x	Componente de força no eixo X	N
F_y	Componente de força no eixo Y	N
f_z	Avanço por dente	mm / faca
F_z	Componente de força no eixo Z	N
h	Espessura instantânea do cavaco	mm
h_a	Espessura média de cavaco por volta	mm/volta
K_{ac}	Constante força de corte axial	-
K_{ae}	Constante de borda axial	-
K_{rc}	Constante força de corte radial	-
K_{re}	Constante de borda radial	-
K_{tc}	Constante força de corte tangencial	-
K_{te}	Constante de borda tangencial	-
M_t	Momento torçor	Nm
n	Rotação da ferramenta	rpm
P_t	Potência necessária no motor	W
R_a	Média aritmética das alturas da rugosidade	μm
RMS	Média quadrática de valores em análise (Root Mean Square)	μm

Rt	Rugosidade total, correspondente a maior distância entre o ponto mais elevado e o mais profundo.	μm
Rz	Valor médio da altura, distância entre o ponto mais alto ao mais baixo das cinco maiores irregularidades medidas em uma determinada distancia da linha de base.	μm
Tc	Torque instantâneo de corte no eixo árvore	Nm
Vc	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	Número de dentes da ferramenta	-
Z	Orientação no eixo das elevações, valor da elevação do eixo Z no plano XY	mm
π	Número Pi, pode ser definido como o perímetro da circunferência dividido pelo diâmetro da mesma	-
ϕ	Ângulo instantâneo de imersão	graus
ϕ_{ex}	Ângulo de saída da ferramenta de corte	graus
ϕ_j	Ângulo do dente da ferramenta de corte	graus
ϕ_P	Ângulo de espaçamento entre os dentes	graus
r _e	Raio de ponta da ferramenta	mm
ϕ_s	Ângulo de varredura	graus
ϕ_{st}	Ângulo de entrada da ferramenta de corte	graus
σ_1	Macrotensões	MPa
σ_2	Pseudo-Macrotensões	MPa
σ_3	Microtensões	MPa
φ	Ângulo entre a direção de avanço e a direção de corte	graus

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Tema	15
1.2 Tecnologia da usinagem nas empresas	15
1.3 Fresamento de materiais endurecidos	17
1.4 Integridade da superfície no fresamento de materiais endurecidos	18
1.5 Objetivos e Metodologia.....	19
1.5.1 Objetivo geral	19
1.5.2 Objetivos específicos.....	20
1.5.3 Metodologia.....	20
1.6 Organização da dissertação	21
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1 Fresamento	22
2.1.1 Mecanismo de formação de cavaco.....	23
2.1.2 Grandezas no processo de usinagem	26
2.1.3 Ferramentas de corte.....	28
2.1.4 Fluido de corte para o fresamento	32
2.1.5 Sentido de corte do fresamento	33
2.2 Integridade da superfície	34
2.2.1 Mecanismos de alteração nas características da superfície usinada.....	38
2.2.2 Topografia da superfície ou rugosidade da superfície.....	40
2.2.3 Camada branca	42
2.2.4 Tensões residuais.....	44
2.3 Forças de corte	47
2.4 Planejamento experimental	49
3. DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS.....	52
3.1 Experimentos iniciais	52
3.2 Desenvolvimento dos ensaios de usinagem.....	53
3.2.1 Corpos de prova.....	53
3.2.2 Preparação dos ensaios	54
3.2.3 Descrição das operações.....	55
3.2.4 Ferramental utilizado nos ensaios	57
3.2.5 Fresadora utilizada nos ensaios	59
3.3 Medições e instrumentos de medição.....	60

3.3.1	Medições de forças de corte através de dinamometria tri-direcional	60
3.3.2	Medição de rugosidade	61
3.3.3	Microscópio para medição de camada branca.....	62
3.3.4	Medição das tensões residuais.....	63
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	Análise dos resultados iniciais	66
4.2	Análise dos resultados definitivos	66
4.2.1	Esforços de corte	67
4.2.2	Rugosidade	78
4.2.3	Camada branca	81
4.2.4	Tensão residual	84
5.	CONCLUSÕES.....	90
5.1	Conclusões sobre os esforços de corte.....	90
5.2	Conclusões sobre a rugosidade	91
5.3	Conclusões sobre a camada branca	92
5.4	Conclusões sobre a tensão residual	92
6.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	94
7.	BIBLIOGRAFIA	95

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Os conceitos e conhecimentos desenvolvidos na usinagem de aço endurecido são aplicados para se obter superfícies e produção desejadas no menor tempo possível, eliminando-se operações futuras, principalmente, a retificação. A escolha da ferramenta e a aplicação adequada dos parâmetros de corte podem contribuir não somente com a obtenção das superfícies especificadas, mas proporcionar a execução das 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; JAWAHIR; PHEULPIN; SEGUIN, 2003-A). 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, sobrematerial, avanço por 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, neste trabalho todas essas variáveis foram mantidas constantes com exceção dos parâmetros de corte que são as variáveis independentes dessa pesquisa.

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).

1.2 Tecnologia da usinagem nas empresas

O ciclo de usinagem, segundo FERRARESI (1977) é uma operação de corte de material, geralmente através de uma máquina, sendo as mais comuns: fresadora, torno e retífica. O ciclo pode ser estruturado da seguinte maneira:

- a) preparo da máquina-ferramenta para execução de um lote de peças;
- b) adequação e fixação da peça na máquina-ferramenta;
- c) aproximação ou posicionamento para início do corte;
- d) operação de corte da ferramenta;
- e) afastamento da ferramenta;
- f) inspeção (se necessário) e retirada da peça usinada;
- g) remoção da ferramenta para substituição ou afiação;
- h) recolocação e ajustagem da ferramenta no suporte.

Na usinagem de peças pelo processo de fresamento são, normalmente, utilizadas fresas de topo, estas ferramentas proporcionam a execução de superfícies de formas complexas, rasgos e cortes de diferentes tipos e tamanhos. A versatilidade das fresas de topo está relacionada ao fato destas possuírem arestas de corte tanto na sua periferia quanto no topo. A aresta lateral pode ser reta ou cônica e o topo pode ser reto, toroidal ou esférico. Construtivamente, as fresas de topo podem ser sólidas, com pastilhas soldadas ou com pastilhas intercambiáveis (SANDVIK, 2006). A Figura 1.1 demonstra alguns exemplos de fresas de topo.



Figura 1.1: Exemplos das fresas de topo (SANDVIK, 2006)

Segundo SLACK et al (2002) pode-se obter ganhos expressivos através de soluções simples, atuando em atividades que não agregam valor ao processo, ou seja, atividades da manufatura onde a ferramenta de corte não está retirando material da peça. Como por exemplo, a eliminação de tempos necessários para busca de ferramentas de corte, transportes desnecessários da peça e usinagem em vazios.

Contudo, para se 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).

1.3 Fresamento de materiais endurecidos

O fresamento de aço endurecido é um processo de usinagem de materiais com dureza superior a 45 HRC, sendo que normalmente se encontram trabalhos com materiais de dureza entre 58 e 68 HRC.

Por usinar diretamente materiais que já passaram por tratamento térmico, verifica-se que algumas características do fresamento duro diferem dos parâmetros conhecidos na usinagem de materiais sem tratamentos ou não endurecidos, ou seja, fresamento com material normal. Segundo KOEPFER (2007), estes 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;

Segundo LIMA; CORRÊA (2002) tem-se como principal motivo para a adoção desse tipo de usinagem, a possibilidade de eliminar a etapa de retificação na operação de acabamento, sendo possível obter peças com boa qualidade dimensional e superficial sem o uso deste último processo. Desta forma, pode-se reduzir de forma significativa tempo e custos agregados à fabricação, visto que existe a possibilidade de uso de máquinas-ferramenta mais simples, possibilidade de executar diversas operações com um único setup, sem necessidade de transportes desnecessários e menor gasto com ferramentas de corte, 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 um maior tempo quando comparada à realização da usinagem antes do tratamento térmico. Este fato está relacionado à determinação de parâmetros de usinagem mais agressivos diante da usinagem do material antes do tratamento térmico. Entretanto, ao se realizar usinagem no estado endurecido, a etapa de retificação pode ser eliminada (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.

RORBERTS; CARY (1992) descrevem que a usinagem de acabamento das gravações profundas, cantos vivos, ou seja, locais de fácil concentração de tensões residuais, devem ser evitadas antes do tratamento térmico, com o objetivo de não causar falhas devido a concentrações de tensões. Com isso, o tempo no processo é maior, pois necessita de uma operação de acabamento após o tratamento. No entanto, os autores defendem a solução de eliminar o acabamento depois do tratamento térmico e a realização do mesmo no estado endurecido, onde elimina uma etapa do processo, e conseqüentemente, o problema de tensões causadas pelo tratamento térmico.

1.4 Integridade da superfície no fresamento de materiais 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 tem dois aspectos importantes que precisam ser definidos e controlados. O primeiro se refere às irregularidades geométricas da superfície e o segundo se refere às alterações metalúrgicas da superfície, 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 1.2738, após usinagem por eletro-erosão com eletrodos de grafite e cobre, identificaram 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, as quais são características do processo de eletro-erosão, prejudicam o desempenho da peça usinada em relação à fadiga devido a fragilização da superfície e ao surgimento de microtrincas (BOSHEH; MATIVENGA, 2005)

O fresamento de materiais endurecidos é uma ótima alternativa para itens que exijam procedimentos especiais em operações substitutas aos processos de retificação ou eletro erosão, quando estas são improdutivas ou possuem seqüência de produção inflexível e, em certos casos, quando as especificações de peças acabadas exijam integridade da superfície (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

O estudo da influência dos parâmetros de usinagem, na integridade superficial tem influências significativas na vida dos produtos (POULACHON et al, 2003 -A) e conseqüentemente na qualidade e credibilidade de uma empresa.

1.5 Objetivos e Metodologia

Como em qualquer pesquisa faz-se necessário à definição dos objetivos, pois, são eles que irão direcionar andamento da mesma, a fim de que os resultados sejam os mais eficientes possíveis.

Para que o entendimento seja facilitado, os objetivos serão divididos em:

- a) Objetivo geral;
- b) Objetivos específicos.

Além disso, a metodologia utilizada na pesquisa também será descrita, no intuito de esclarecer como os objetivos serão alcançados.

1.5.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral caracterizar a influência dos parâmetros de corte na integridade, textura e no nível das tensões residuais da superfície usinada, durante o processo de fresamento em operações de acabamento do aço SAE 4340, no estado endurecido a 52 HRC. As forças de corte foram analisadas durante a usinagem através de um dinamômetro acoplado a mesa da máquina utilizada. Através desta caracterização pretende-se fornecer informações qualitativas, que orientem a melhor escolha da tecnologia de usinagem, tendo em vista a qualidade e produtividade dos produtos usinados numa empresa.

1.5.2 Objetivos específicos

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.

Podem-se enumerar os objetivos da seguinte maneira:

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

1.5.3 Metodologia

A dissertação iniciou-se com a pesquisa bibliográfica, utilizando principalmente, artigos de revistas especializadas nacionais e internacionais, artigos de congressos e artigos disponíveis na Internet. Devido o tema ser relativamente novo, o número de livros sobre o assunto é pequeno, somado ao fato que os poucos encontrados são em sua maioria em alemão.

Foram realizados ensaios preliminares de usinagem, a fim de detectar possíveis imprevistos do processo de usinagem dos materiais endurecidos, sendo utilizados corpos de prova preliminares. Com os ensaios preliminares foi possível detectar quais os fatores críticos que influenciam no processo e conseqüentemente otimizar os problemas encontrados.

Através da experiência adquirida com os ensaios preliminares, tornou-se possível à realização dos ensaios definitivos. Nessa segunda fase dos ensaios, foi detectado a influência dos parâmetros de corte na integridade superficial. Além disso, as forças de corte que interferem diretamente na integridade superficial também foram estudadas.

Para efeito de validação dos resultados, eliminação ou redução dos erros grosseiros e redução do número dos corpos de prova foi realizado um delineamento composto central. Em função disso, chegou-se a um número de vinte corpos de provas para a usinagem.

As medições foram focadas na operação de acabamento e como as operações de desbaste e semi-acabamento dos corpos de prova têm menos importância para a análise, nas mesmas não foram realizadas medições. A escolha pela análise do acabamento é justificada por ser uma operação crítica na manufatura, tanto quanto ao tempo de usinagem, quanto ao

acabamento final. Somado ao fato de ser esta operação onde são formadas as características do produto final.

1.6 Organização da dissertação

Com a finalidade de facilitar a compreensão e leitura do texto, o presente estudo foi dividido em cinco capítulos. Começando pelo capítulo 1 (introdução), onde foi abordada a contextualização do trabalho, onde se apresenta uma visão geral, os objetivos desta pesquisa e as características introdutórias para os principais temas estudados.

No capítulo 2 (revisão da literatura) são desenvolvidos temas cujo conteúdo é relevante para o desenvolvimento da parte experimental e discussão dos resultados deste trabalho. Desta forma, neste capítulo, faz-se uma breve descrição do processo de fresamento; descreve-se o conceito de integridade superficial e a caracterização de superfícies usinadas, bem como, os efeitos do processo de usinagem, nos esforços de usinagem e uma explanação do planejamento experimental utilizado na pesquisa.

Alem disso, no capítulo 3 (desenvolvimento dos ensaios) são descritos os equipamentos, procedimentos, materiais e critérios adotados para a realização dos ensaios, já no capítulo 4 (resultados e discussões) são apresentados os resultados dos ensaios realizados durante todo o projeto. Para então, no capítulo 5 (conclusões) ser apresentadas as principais conclusões, obtidas a partir da análise dos resultados e da observação dos objetivos propostos.

Finalmente, no capítulo 6 (sugestões para trabalhos futuros) são apresentadas sugestões para trabalhos de continuidade, com a exploração de outros aspectos do tema abordado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Existem vários fatores que estão relacionados ao estudo do efeito dos parâmetros de corte na integridade da superfície e esforços de corte durante o fresamento do aço SAE 4340 endurecido e que podem ser cruciais para uma aplicação eficiente desses métodos. Em vista deste fato, foi realizado um estudo bibliográfico para o levantamento do Estado da Arte sobre o tema, descrito nos próximos tópicos.

2.1 Fresamento

O fresamento é uma operação intermitente de usinagem que utiliza uma ferramenta de corte com um ou mais dentes, denominada fresa. A fresa é fixada no eixo árvore da fresadora, enquanto a peça que é fixada na mesa, a mesa move-se linearmente, com a ferramenta de corte atuando sobre a peça (ALTINTAS, 2000).

Outra definição é apresentada pelo autor FERRARESI (1977), onde o fresamento é a operação cuja ferramenta, a 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. O movimento de avanço é feito geralmente pela mesa da máquina.

As principais características do fresamento são (ROSA; SÍQUEIRA, 2001):

- a) utilizar ferramenta multi-cortante (fresa) provida de arestas cortantes dispostas simetricamente ao redor de um eixo;
- b) movimento de rotação da ferramenta ao redor de seu eixo, permitindo, assim que cada uma das arestas cortantes (dentes da fresa) retire parte de material separadamente;
- c) o movimento de avanço, que permite o prosseguimento da operação, é geralmente feito pela mesa da máquina, onde a peça está fixada;
- d) o movimento de avanço obriga a peça passar sob a ferramenta que lhe dá a forma e dimensão desejada;
- e) a diversidade das ferramentas multi-cortantes (fresas), confere a esta operação um caráter de versatilidade das varias superfícies necessárias numa peça.

Dentre as operações de usinagem existentes, o fresamento é a mais versátil na geração de superfícies planas não de revolução. Sua versatilidade é justificada principalmente à grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, tornando possível, por

consequência, a geração de um número igualmente vasto de superfícies (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001). Além disto, a operação de fresamento apresenta outra vantagem em relação aos demais processos de usinagem, que é o fato de apresentar alta produtividade aliada a um bom acabamento. Isto se deve, ao fato de utilizar ferramentas que podem apresentar um número elevado de arestas de corte, as mesmas proporcionam um avanço de mesa alto, e conseqüentemente, uma alta produtividade. Como o número de arestas é alto, pode-se utilizar um avanço por dente (f_z) pequeno, que a produtividade ainda será alta. Essa situação, de maneira geral, proporciona um ótimo acabamento.

2.1.1 Mecanismo de formação de cavaco

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

Uma usinagem estável proporciona diversos benefícios para o processo, entre eles, uma melhora na geração de cavaco. Para que isto ocorra, faz-se necessário utilizar a melhor combinação de variáveis, dentre elas a rotação da árvore da máquina juntamente com modificações no avanço, proporcionando uma profundidade da usinagem máxima.

Praticamente todo o trabalho mecânico na usinagem é convertido em calor, sendo três as regiões geradoras de calor conhecidas, denominadas respectivamente como zona primária, secundária e terciária, que podem ser vistas na Figura 2.1. Na zona primária ocorre a deformação e separação de cavaco devido ao atrito do mesmo com a superfície de saída; esta zona é considerada a principal geradora de calor, seguida pela zona secundária. Por fim tem-se a zona terciária, que gera calor devido às deformações da peça e seu atrito contra a superfície de folga da ferramenta (MACHADO; DA SILVA, 2004). A Figura 2.2 demonstra as parcelas de calor dissipadas para o cavaco, peça e ferramenta que variam conforme a velocidade de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001) e (KÖENIG, 1981). Sendo assim, é possível afirmar que as alterações nas características das superfícies usinadas são uma somatória dos efeitos térmicos e mecânicos provenientes da usinagem.

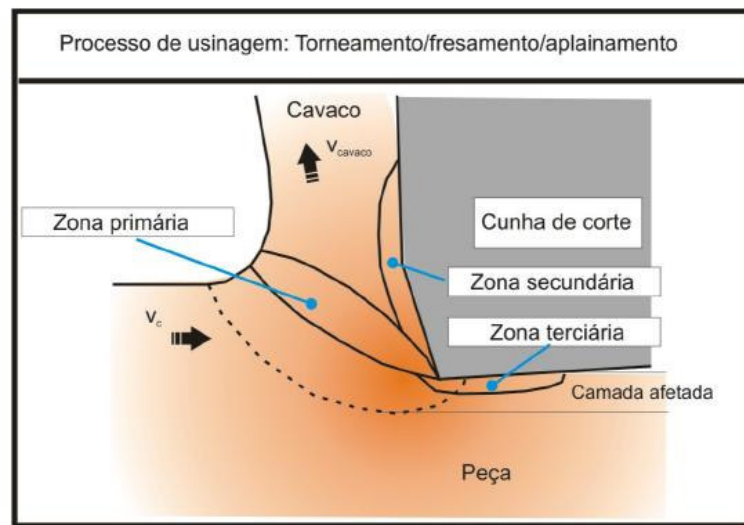


Figura 2.1: Regiões geradoras de calor na usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

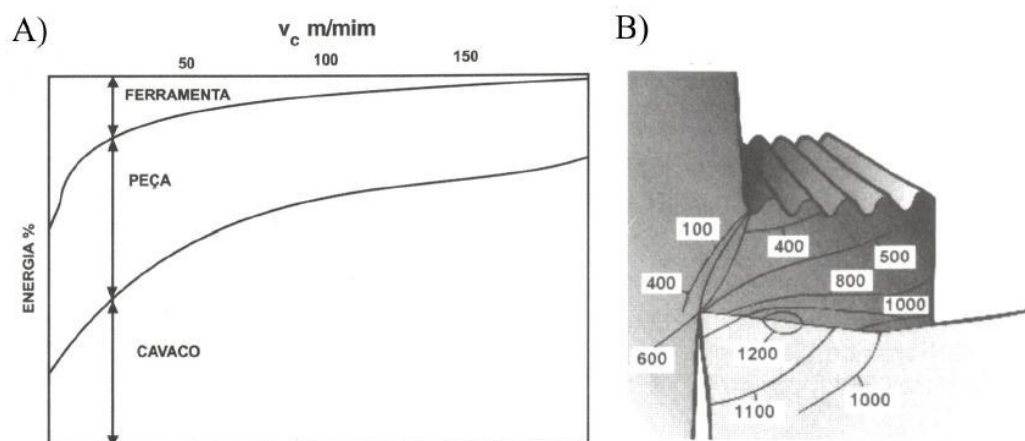


Figura 2.2: A) Distribuição da dissipação de energia de corte com a velocidade de corte
B) Distribuição típica da temperatura (°C) na ferramenta metal duro (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001)

A velocidade de corte é o parâmetro que apresenta o maior efeito sobre a temperatura da interface cavaco/ferramenta (ABRAO; ASPINWALL; NG, 1996). Com baixas velocidades, o desgaste da ferramenta é dominado por deformações plásticas e pela abrasão. A partir do momento em que a velocidade aumenta, a porcentagem de energia que tende a ir para a ferramenta diminui (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001). Entretanto, a quantidade de energia total é cada vez maior aumentando a temperatura, o que acaba por intensificar os mecanismos de desgaste por difusão e oxidação da ferramenta (dependentes da temperatura).

KOMANDURI (1993) relata que na usinagem de materiais endurecidos há uma tendência para a formação de um cavaco cisalhado, isso ocorre em função da instabilidade da usinagem e esse fenômeno é potencializado com o aumento das velocidades de corte.

LI; LIU; LI (2001) estudaram a trajetória real da ferramenta no processo de fresamento. 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 ciclóide. 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, como é mostrado na Figura 2.3. Esta diferença influencia a carga do cavaco sobre a ferramenta e também a forma não-deformada do mesmo durante o fresamento. A diferença fundamental entre as trajetórias mostradas na Figura 2.3 é que, na trajetória teórica, consideram-se as duas metades do cavaco, a inicial e a final, como sendo idênticas.

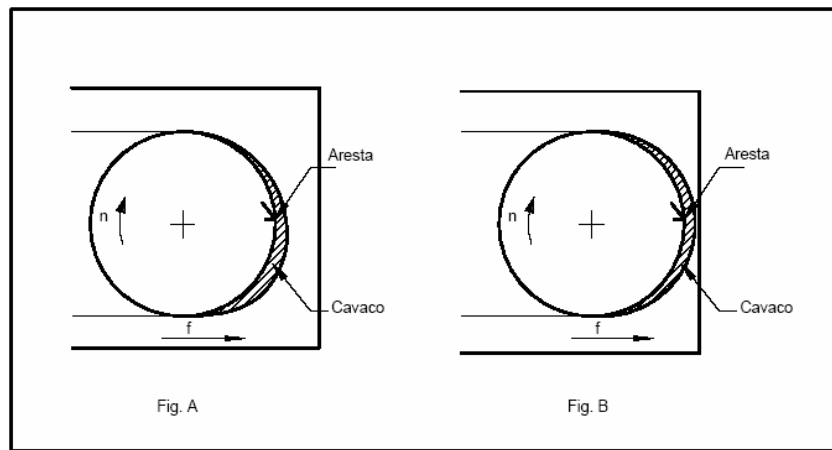


Figura 2.3: Perfil real (A) e teórico (B) do cavaco não-deformado (LI; LIU; LI, 2001)

Ao contrário do torneamento, no fresamento a espessura instantânea do cavaco (h) varia periodicamente em função da imersão da ferramenta de corte (ALTINTAS, 2000). A espessura instantânea do cavado pode ser expressa pela Fórmula 2.1.

$$h(\phi) = f_z * \sin \phi \quad (2.1)$$

A espessura média do cavaco por volta é expressa a partir da zona de corte e segundo ALTINTAS (2000) pode ser equacionada de acordo com a Fórmula 2.2.

$$h_a = \frac{\int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} f_z \sin \phi \cdot d\phi}{\phi_{ex} - \phi_{st}} = -f_z \frac{\cos \phi_{ex} - \cos \phi_{st}}{\phi_{ex} - \phi_{st}} \quad (2.2)$$

2.1.2 Grandezas no processo de usinagem

Segundo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001) as grandezas e suas relações geométricas, descritas a seguir, apresentam uma terminologia baseada na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). As grandezas, segundo o autor, podem ser divididas em:

- **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.

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (2.3)$$

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

$$V_f = f * n \quad (2.4)$$

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

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (2.5)$$

- **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.

$$f_c = f_z * \sin \varphi \quad (2.6)$$

- **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.
- **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.

Tendo em vista que o material endurecido apresenta limitações ao ser usinado e levando em consideração a resistência da ferramenta e rigidez do sistema de fixação, recomenda-se a aplicação de valores pequenos de profundidade de corte para as operações de acabamento. Conseguindo-se manter os esforços de corte baixos, a deflexão é minimizada e assim obtêm-se bons acabamentos superficiais na peça usinada (SANDVIK, 1999).

Considerando a vibração alto excitada presente no fresamento, a profundidade de corte (a_p) muda de intensidade em função das rotações do eixo arvore, devido a estabilidade encontrada para alguns valores de rotação (Figura 2.4).

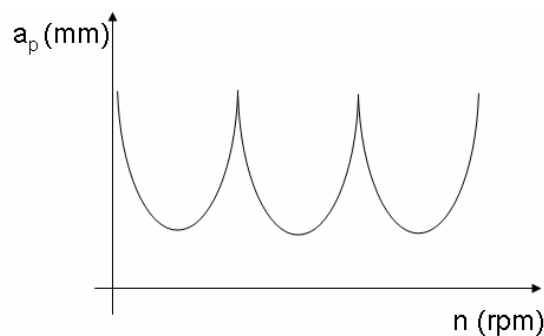


Figura 2.4: Variação da profundidade de corte (a_p) devido a vibração alto excitada

As condições de corte recomendadas por SANDVIK (1999) para aços endurecidos são mostradas na Tabela 2.1.

Parâmetro	Operação de desbaste	Operação de semi-acabamento	Operação acabamento
v_c - velocidade de corte real [m/min]	100	150 a 200	200 a 250
a_p - profundidade de corte [mm]	6% a 8% do diâmetro da fresa	3% a 4% do diâmetro da fresa	0,1 a 0,2 mm
a_e - profundidade de corte axial [mm]	35% a 40% do diâmetro da fresa	20% a 40% do diâmetro da fresa	0,1 a 0,2 mm
f_z - avanço [mm/dente]	0,05 a 0,1 mm/dente	0,05 a 0,015 mm/dente	0,02 a 0,2 mm/dente

Tabela 2.1: Condições de corte recomendadas para aços endurecidos (SANDVIK, 1999).

2.1.3 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 de boro cúbico (década de 50);
- g) diamante mono e policristalino (últimas décadas).

Os materiais de ferramentas listados anteriormente podem ser classificados de acordo com a Figura 2.5.

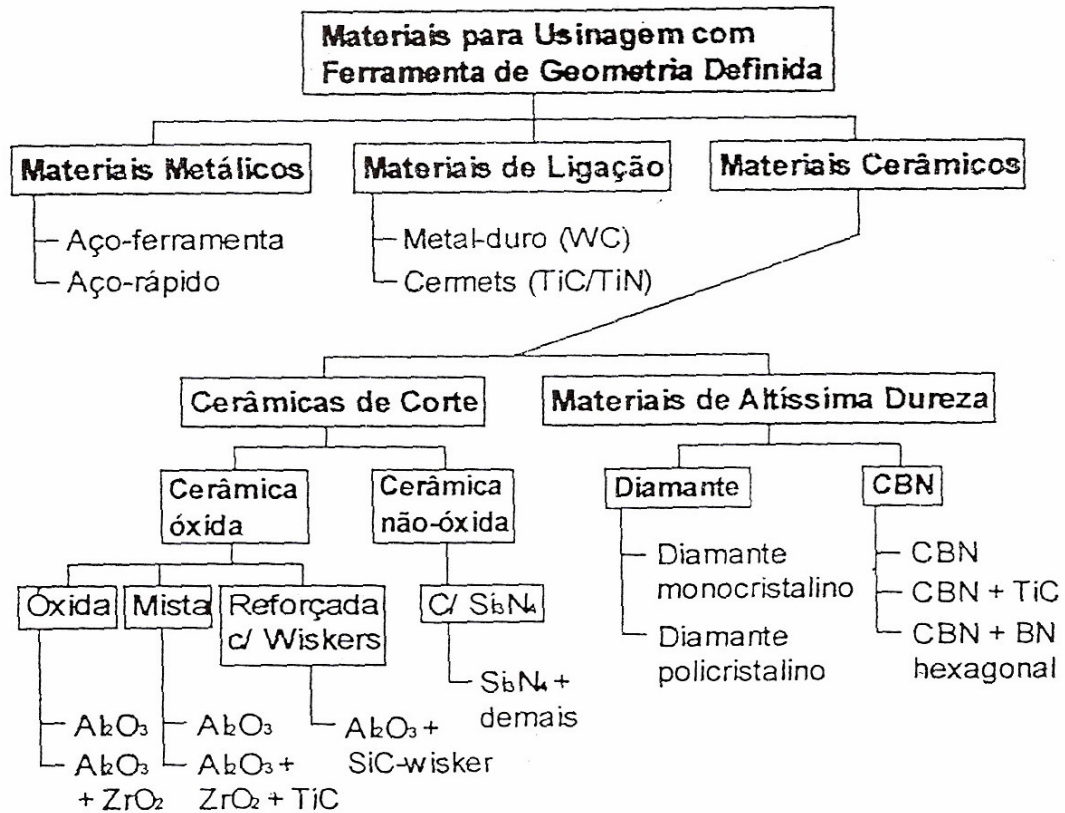


Figura 2.5: Classificação de materiais para ferramentas com geometria definida (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

Para se escolher o material da ferramenta, deve-se levar em consideração alguns fatores importantes (MACHADO; DA SILVA, 2004):

- a) dureza a quente;
- b) tenacidade;
- c) estabilidade química;
- d) resistência ao desgaste e à compressão.

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 2.6, 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.

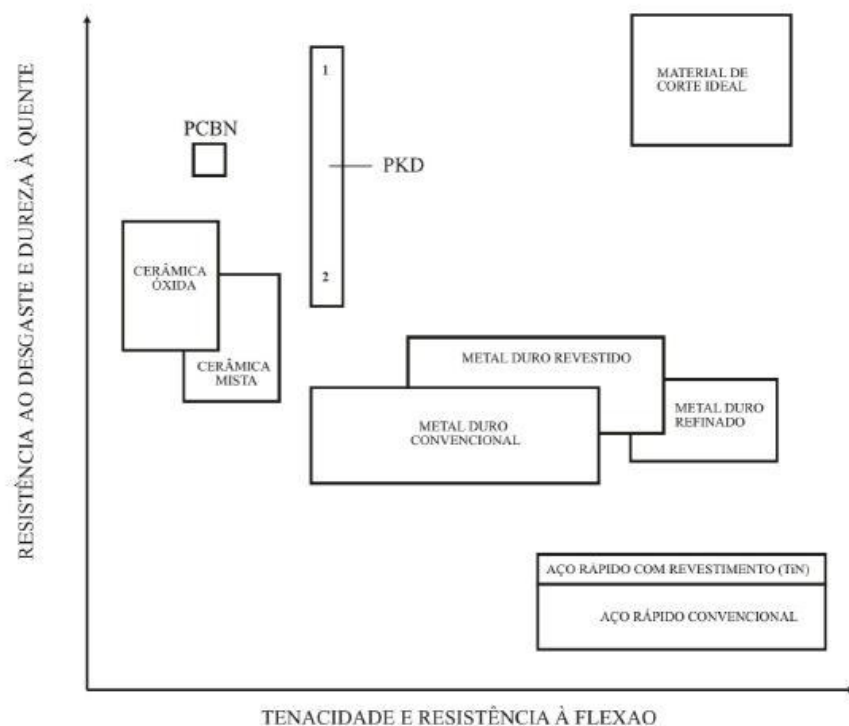


Figura 2.6: Tenacidade vs Dureza (MACHADO; DA SILVA, 2004)

A ferramenta de corte que foi utilizada nos ensaios é da empresa Sandvik, classe GC 4020 HC (R245-12 T3M-PM), ou seja, uma pastilha de metal duro com cobertura de óxido de alumínio para fresamento de materiais endurecidos. O metal duro é a ferramenta mais utilizada pelas empresas, por apresentar um ótimo custo/benefício, uma dureza alta e resistência ao calor, como pode ser notado na Figura 2.7. Além disso, como pode ser

visualizado na Figura 2.6, o metal duro está na diagonal de direção mais curta ao “Material de Corte Ideal”, ou seja, tem uma ótima relação entre as características vertical do gráfico (resistência ao desgaste e dureza a quente) e as características do eixo na horizontal (tenacidade e resistência a flexão).

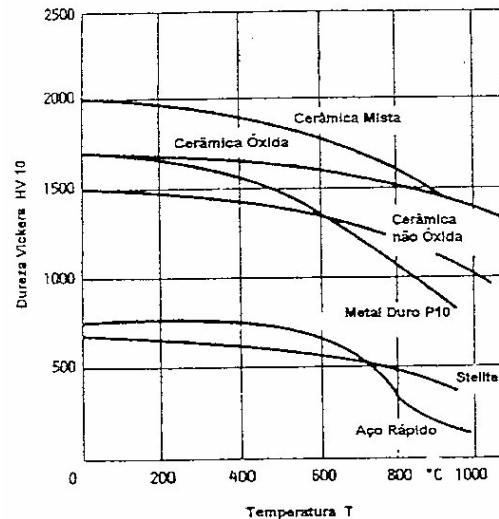


Figura 2.7: Dureza a quente para materiais de ferramentas de corte (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

2.1.3.1 Ferramentas de metal duro

O metal duro é o material de ferramenta mais largamente utilizado na indústria atualmente, sendo que somente a indústria automobilística consome cerca de 50% das ferramentas de metal duro produzidas no mundo. Este material apresenta melhor relação custo / benefício na maioria das aplicações em usinagem, devido à grande variedade de tipos obtidos pela adição de elementos liga e diferentes revestimentos, o que possibilita a obtenção de propriedades adequadas às solicitações em diferentes condições de usinagem. A possibilidade da utilização de inserts intercambiáveis é também um fator positivo, tornando as ferramentas versáteis e econômicas (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

Metais duros são materiais compostos, constituídos de um ligante metálico dúctil (cobalto ou níquel) e de carbonetos dos metais de transição (como: W, Ti, Ta, Nb, etc). Os materiais duros são à base da dureza e da resistência ao desgaste, enquanto a função do ligante é constituir a ligação dos carbonetos frágeis, formando um corpo relativamente resistente e dúctil (KRAIN; SHARMAN; RIDGWAY, 2006).

2.1.3.2 Vida da ferramenta de corte

Segundo DINIZ; MARCONDES; COPPINI (2001) e MACHADO; DA SILVA (1999), os tipos de deterioração mais comuns encontrados 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 e é causado pelo atrito da ferramenta com o cavaco e pelas elevadas temperaturas geradas pela interface entre o cavaco e a ferramenta. Na utilização de ferramentas cerâmicas ou ferramentas de metal duro com recobrimento, 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:** é o arrancamento de partículas com razoável tamanho, comuns em ferramentas com metal frágil ou com arestas de corte pouco reforçadas;
- e) **Trincas:** são provocadas por 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.

Segundo DINIZ; MARCONDES; COPPINI (2001) e STEMMER (1989), 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.

2.1.4 Fluido de corte para o fresamento

Segundo SANTOS (2003) as funções do fluido de corte são:

- a) lubrificação;
- b) refrigeração;
- c) retirada do cavaco;
- d) proteção contra corrosão.

O autor salienta que as duas últimas funções têm menos importância, e a refrigeração cresce de importância conforme vai aumentando a velocidade de corte. Já a função de lubrificação é importante para reduzir o atrito e evitar a formação de aresta postiça de corte (APC).

Quanto maiores as velocidades de corte, maiores são os percentuais de calor que vão para o cavaco e para o meio ambiente e menores são os percentuais que vão para a peça e para a ferramenta. Isso ocorre porque, com aceleração do processo, maior é a convecção com o meio ambiente e o tempo para a transferência do calor gerado no cisalhamento do material nos planos primário e secundário é reduzido. Com isso o cavaco carrega a maior porcentagem do calor gerado. No entanto, o calor absoluto que chega à ferramenta é aumentado. Isso explica porque o calor gerado na ferramenta aumenta proporcionalmente com o aumento da velocidade de corte, razão pela qual sempre existirá uma velocidade de corte limite para evitar o colapso da ferramenta por aquecimento.

Segundo DINIZ; MARCONDES; COPPINI (2001) a seleção do fluido de corte ideal para cada tipo de usinagem é influenciada por vários fatores, entre eles:

- a) material da peça;
- b) condições de usinagem;
- c) operação de usinagem;
- d) material da ferramenta.

Considerando todos esses fatores somados às características de cada tipo de fluido, permite-se a escolha correta do fluido.

Segundo SANTOS (2003) a classificação dos fluidos de corte é:

- a) **Ar;**
- b) **Aquosos:** água, emulsões (óleos solúveis) e soluções químicas;
- c) **Óleos:** minerais, graxos, compostos, extrema pressão e de usos múltiplos.

Os benefícios que os fluidos de corte podem proporcionar são:

- a) aumento da vida útil da ferramenta;

- b) redução das forças de corte e, portanto redução de potência;
- c) melhora no acabamento superficial da peça;
- d) fácil remoção do cavaco da zona de corte;
- e) menos distorção da peça pela ação refrigerante.

Nesta pesquisa não foi utilizado fluido de corte, uma vez que, por um lado, seria ecologicamente correto e por outro, a intermitência do corte no fresamento gera efeitos discutíveis quanto à eficiência da sua função.

2.1.5 Sentido de corte do fresamento

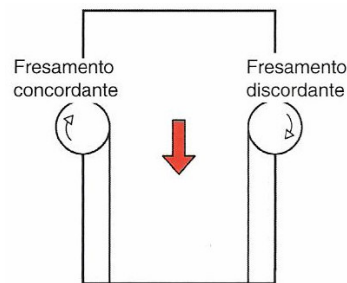


Figura 2.8: Sentidos de corte (SANTOS, 1999)

O sentido de corte (Figura 2.8) é uma variável muito importante na usinagem e pode ser diferenciado em:

- a) sentido de corte concordante;
- b) sentido de corte discordante.

Segundo SANDVIK (1999) uma aplicação importante para o metal duro é o máximo uso possível de percursos de ferramentas em fresamento concordante, pois a aresta de corte é exposta principalmente a esforços de compressão, enquanto que no fresamento discordante a aresta de corte é exposta principalmente a esforços de tração. Lembrando que a ferramenta de metal duro utilizada nessa pesquisa possui característica de materiais frágeis, suportando bem mais as solicitações de compressão do que as de tração.

Por essa razão quase sempre, é mais vantajoso fazer fresamento concordante do que discordante. Quando a aresta de corte entra em contato com a peça no fresamento concordante, a espessura do cavaco tem seu valor máximo. No fresamento discordante, quando a aresta de corte entra em contato com a peça, a espessura do cavaco tem seu valor mínimo. A vida útil da ferramenta é geralmente menor no fresamento discordante do que no

fresamento concordante, devido à geração de calor ser consideravelmente maior no fresamento discordante, causada pelo atrito que antecede a efetivação do processo de corte. As forças radiais também são consideravelmente mais altas no fresamento discordante, o que afeta negativamente os rolamentos do fuso (KANG et al., 2001 e SCHULZ, 1995).

No fresamento periférico (acabamento) com fresas inteiriças de metal duro, principalmente em materiais endurecidos, o fresamento discordante se torna à primeira opção. Nestes tipos de operações com o fresamento discordante se obtém melhores tolerâncias de perpendicularismo das paredes usinadas (90 graus). As diferenças entre passes serão menores, ou até mesmo nulas. Isso se deve, principalmente, à direção das forças de corte, com uma aresta de corte muito viva, as forças de corte tendem a “puxar” a fresa em direção ao material e o fresamento discordante minimiza esta tendência (SANDVIK, 1999).

Nessa pesquisa, como a usinagem ocorreu em superfícies planas com a ferramenta de corte atuante de forma frontal na sua totalidade do diâmetro, o sentido de corte em questão foi tanto o concordante como o discordante.

2.2 Integridade da superfície

O termo Integridade da Superfície (IS) foi criado em 1964 por FIELD; KAHLES (1971) definido como: condição inerente de uma superfície produzida em uma usinagem ou outra operação de geração de superfície. Para esses autores a integridade da superfície (IS) envolve o estudo e controle de dois fatores:

- a) rugosidade da superfície ou topografia da superfície;
- b) metalurgia da superfície.

Segundo GRIFFITHS (2001), "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".

Neste trabalho, foi adotada a definição dada por FIELD; KAHLES (1971) estendida por GRIFFITHS (2001), considerando, que esse agrupamento de definições é o mais adequado para o conhecimento dos processos de fabricação e suas implicações no desempenho funcional. Apesar de existirem outras definições para integridade da superfície (IS), segundo HIOKI (2006) a definição original de FIELD; KAHLES (1971) somada a definição de GRIFFITHS (2001) são as que melhor atendem os processos metalúrgicos.

O estudo da Integridade de Superfície (IS) desta pesquisa foi direcionado tanto para parte topográfica da superfície, quanto para as camadas internas da mesma. Segundo GRIFFITHS (2001), a topografia da superfície ou rugosidade, é parte do desempenho funcional dos componentes usinados. Considerando que alterações provocadas pela usinagem abaixo da superfície também são fundamentais para o desempenho dos mesmos. A Figura 2.9 demonstra os efeitos da usinagem na integridade da superfície.

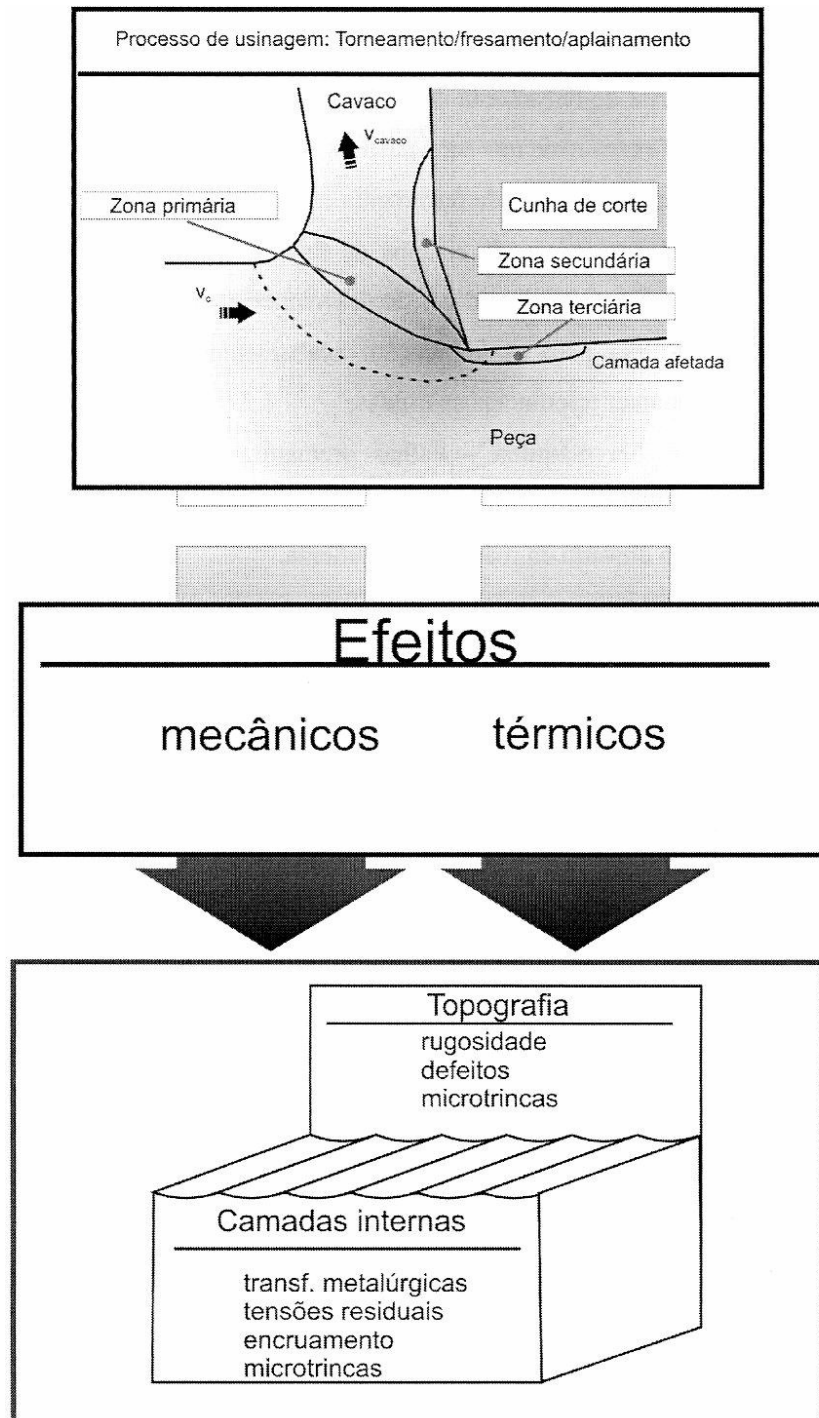


Figura 2.9: Efeitos da usinagem na integridade da superfície (BETHKE, 1993).

As camadas internas podem ser visualizadas na Figura 2.10. Essa figura mostra um desenho esquemático das camadas abaixo da superfície segundo a visão de BOEHS (1992).

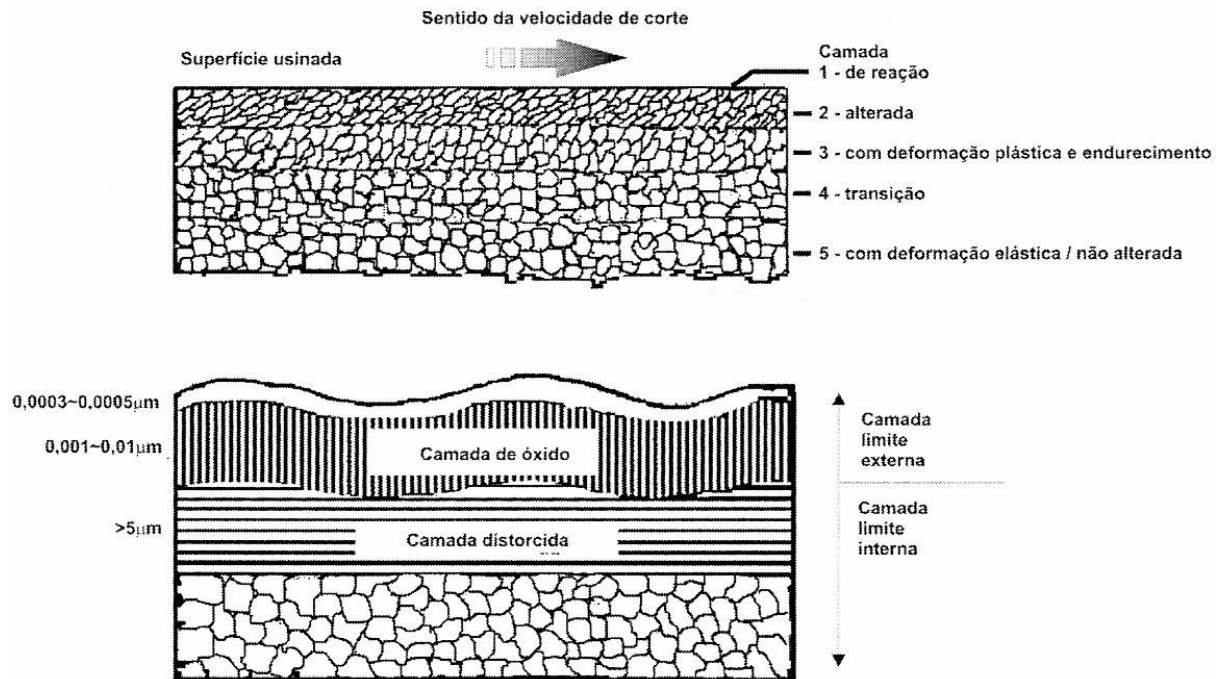


Figura 2.10: Camadas superficiais de corpos sólidos (BOEHS, 1992).

A camada limite externa (1 e 2) é considerada como aquela onde ocorrem as reações químicas (adsorção, oxidação, etc) na superfície recém-usinada. Logo abaixo, camada limite interna (3 a 5), encontra-se uma camada que sofre transformações metalúrgicas e deformações plásticas devido à ação de corte da ferramenta e variação de temperaturas envolvidas durante a 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.

Depois da criação do termo integridade de superfície (IS), FIELD; KAHLES; CAMMETT (1972) propuseram as técnicas para mensurar os danos e os conjuntos de informações mínimas, padrão e estendida para caracterizar a integridade da superfície (IS), Tabela 2.2.

Caracterização mínima para IS	
1.	Acabamento superficial
2.	Macroestrutura (10 vezes ou menos) - Macrotrincas; - Indicação de macro ataque.
3.	Microestrutura - Microtrincas; - Deformações plásticas; - Transformação de fases; - Ataque intergranular; - Defeitos superficiais; - Aresta postiça; - Corrosão.
Caracterização padrão para IS	
1.	Caracterização mínima para IS
2.	Teste de fadiga (simplificado)
3.	Teste de corrosão
4.	Tensão residual e distorções
Caracterização estendida para IS	
1.	Caracterização padrão para IS
2.	Teste de fadiga (completo)
3.	Ensaio mecânicos adicionais - Tração; - Evolução de atrito em deslizamento, vedação.

Tabela 2.2: Tabelas de conjuntos de características da integridade da superfície (FIELD; KAHLES; CAMMETT, 1972)

Segundo HIOKI (2006) a maioria dos trabalhos se restringe à caracterização mínima ou padrão de superfícies usinadas; apenas alguns se aprofundam na relação dos parâmetros de corte sobre a integridade da superfície (IS). Até 2001, a Organização Internacional para Normalização (ISO) tratava das características da IS e topografia em normas separadas. Contudo, no levantamento bibliográfico realizado constatou-se uma carência de artigos que relatem aos efeitos dos parâmetros de corte sobre o desempenho de superfície usinada.

2.2.1 Mecanismos de alteração nas características da superfície usinada

Durante a usinagem, o processo de remoção de material, geralmente, produz uma alteração nas características da superfície usinada. Estas podem ser profundas, ou, o que é mais comum, superficiais. A identificação das alterações na camada superficial é importante quando a peça trabalha sob alta solicitação, especialmente se alternada, ou em altas temperaturas ou em atmosfera corrosiva.

Quando uma superfície é usinada muitas alterações superficiais podem ser produzidas, entre elas (DEONISIO, 2004):

➤ **Alterações Mecânicas:**

- a) deformações plástica resultantes de trabalhos a quente ou a frio;
- b) emendas e defeitos do tipo de trincas (associados a engrossamento da aresta de corte na usinagem);
- c) alterações de dureza;
- d) trincas macro e microscópicas;
- e) tensões residuais distribuídas na camada superficial;
- f) introdução de inclusões de processamento;
- g) resíduos com deformação plástica devido a retificação;
- h) vazios, buracos, rebarbas, ou materiais estranhos engastados na superfície.

➤ **Alterações Metalúrgicas:**

- a) transformações de fases;
- b) tamanho e distribuição de granulação;
- c) tamanho e distribuição de precipitação
- d) inclusões estranhas no material;
- e) geminação (agrupamento de dois ou mais cristais);
- f) recristalização;
- g) martensita não temperada ou supertemperada;
- h) resolução ou reversão da austenita.

➤ **Alterações Químicas:**

- a) corrosão intergranular;
- b) dissolução preferencial de microcomponentes;
- c) contaminação;
- d) fragilização por absorção química de elemento como o hidrogênio e o cloro;
- e) cavidades ou erosão seletiva;

- f) corrosão;
- g) corrosão por tensão.

➤ **Alterações Térmicas:**

- a) zona afetada pelo calor;
- b) material refundido ou depositado;
- c) partículas espirradas ou metal refundido depositado na superfície;
- d) material resolidificado.

➤ **Alterações Elétricas:**

- a) mudanças de condutividade;
- b) mudanças magnéticas;
- c) aquecimento ou superaquecimento resistivo.

Além dos efeitos citados, outros podem surgir, dependendo do material usinado. Entre as principais causas das alterações superficiais, têm-se:

➤ *Altas temperaturas e altos gradientes de temperatura desenvolvidos nos processos de remoção de material:*

Quase todo o trabalho mecânico na usinagem é convertido em calor. Como já citado, são três as fontes geradoras de calor: zona primária, secundária e terciária.

➤ *Deformação plástica e fragmentos deformados plasticamente:*

Segundo DEONISIO (2004), durante a deformação plástica, na formação do cavaco, dois parâmetros básicos devem ser considerados, os parâmetros mecânicos e os parâmetros do material usinado. Os parâmetros mecânicos incluem o ângulo de saída da ferramenta, o ângulo de inclinação da aresta, o tipo de operação (desbaste, pré-acabamento ou acabamento), o avanço, a profundidade de corte, a velocidade de corte e em alguns casos o comprimento de contato na interface da ferramenta com o cavaco. No entanto, especificar as propriedades do material não é uma tarefa fácil e pode incluir dois fatores (DEONISIO, 2004):

- a) as forças de corte e a morfologia do cavaco;
- b) estado metalúrgico básico da nova superfície gerada (pode incluir efeitos mecânicos).

A dinâmica geral do processo e as respostas metalúrgicas são fortemente influenciadas pelas forças de corte e pelo mecanismo de formação do cavaco. Assim as forças de corte representam um resumo do que ocorre nos limites da zona plástica, tendo uma ligação direta com as propriedades do material em termos de tensão/taxa de deformação e temperatura local.

A estrutura cristalina do material, o tamanho de grão, a composição química, as inclusões e as impurezas são os principais parâmetros de influência na resposta de deformação. Esta resposta se manifesta no movimento de deslocamento sub-superficial. O

deslocamento interage com todos os tipos de defeitos, contornos de grão e vazios. Esses mecanismos constituem a base para o entendimento do endurecimento por deformação e fratura na maioria dos materiais.

➤ *Reação química e subsequente absorção na superfície usinada:*

É uma das principais causas de alteração superficial, porém não é o foco desse trabalho.

Praticamente todos os métodos de remoção de material produzem condições de alteração da superfície e da sub-superfície. As zonas com alterações mecânicas e metalúrgicas produzidas pelos processos de remoção de material, também podem se estender para dentro da superfície até uma profundidade considerável, dependendo das condições de desbaste ou condições de acabamento no processo de remoção de material.

2.2.2 Topografia da superfície ou rugosidade da superfície

Na fabricação, o termo topografia da superfície é utilizado para descrever as características da superfície da peça que consiste em trincas, ondulações, rugosidade e erro de forma. A diferença entre essas irregularidades se dá pela relação da distância entre elas e a profundidade das mesmas. A Figura 2.11 mostra essa relação:

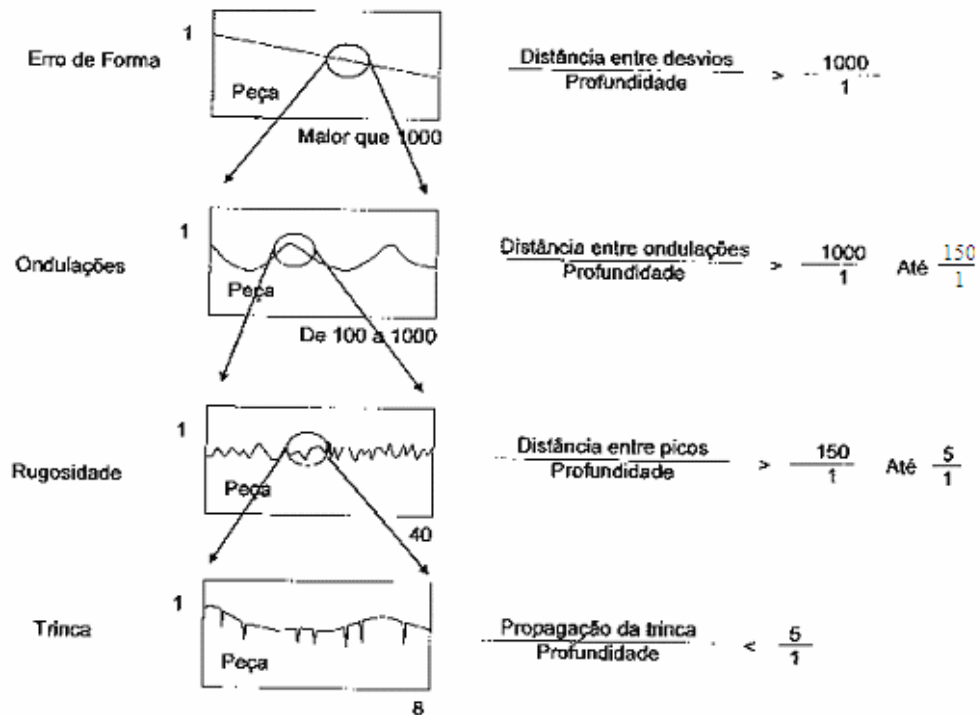


Figura 2.11: Definição de erro de forma, ondulação, rugosidade e trinca (SOUSA, 2003)

Abaixo são listados alguns efeitos de natureza geométrica para caracterização de uma superfície usinada (WHITEHOUSE, 1994):

- a) comprimento transversal típico;
- b) defeito;
- c) posicionamento;
- d) espaçamento na ondulação;
- e) profundidade de ondulação;
- f) espaçamento da rugosidade;
- g) comprimento de corte freqüente da rugosidade;
- h) vales;
- i) picos.

Na Figura 2.12 segue o desenho esquemático em detalhe da topografia de superfície.

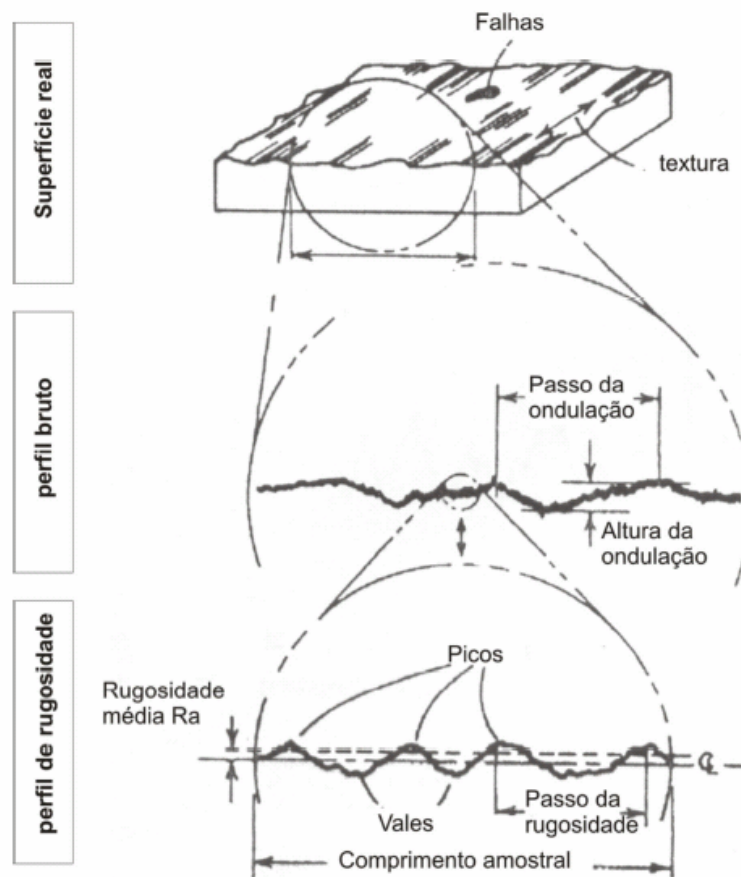


Figura 2.12: Elementos da topografia (HIOKI, 2006)

A qualidade da superfície influi diretamente sobre a capacidade de resistência à corrosão, à fadiga, ao desgaste e ainda define o atrito. Para as peças submetidas a esforços ou

condições de trabalho crítico, o acabamento deverá ser melhor do que as peças auxiliares. Um rolamento, por exemplo, deverá ter melhor acabamento que uma simples alavanca de comando manual.

Para NUSSBAUM (1988), a avaliação da superfície é feita por:

- a) microscópicos metalográficos ou eletrônicos sobre o plano horizontal;
- b) apalpadores num plano normal à superfície;
- c) métodos de interferência óptica num plano oblíquo transversal.

O rugosímetro mais comum na indústria consiste num apalpador, geralmente com ponta diamantada cônica ou piramidal, com ângulo de sessenta graus e raio na ponta, que se desloca em contato com a superfície da peça.

A rugosidade é medida em micron (1/1000 mm) e dependendo do método e da norma utilizada, apresenta variações de critérios:

- a) **Ra:** Norma DIN, é a profundidade média da aspereza superficial.
- b) **RMS:** “Root Mean Square” ou média quadrática.
- c) **Rz:** Valor médio da altura, distância entre o ponto mais alto ao mais baixo, das cinco maiores irregularidades medidas em uma determinada distancia da linha de base.
- d) **Rt:** Rugosidade total, correspondente a maior distância entre o ponto mais elevado e o mais profundo.

2.2.3 Camada branca

O termo camada branca é originado pela cor branca que a camada apresenta na microscopia óptica. Na literatura, a camada branca está relacionada, de uma forma genérica, a uma camada dura que se forma em materiais ferrosos sob variadas condições de corte. A espessura típica encontrada na literatura é de 10 µm variando conforme a condição de corte (BOSHEH; MATINVEGA, 2005).

A camada branca (Figura 2.13) pode ser originada a partir da formação do cavaco e pode ser vista somente através da microscopia óptica; além disso, influência na resistência à fadiga da peça, bem como no comportamento da mesma quando submetida ao atrito, afetando significativamente a performance do componente usinado. Existem pelo menos três diferentes origens de sua formação (BOSHEH; MATINVEGA, 2005):

- a) o mecanismo de escoamento plástico, no qual produz uma estrutura homogênea ou uma estrutura refinada;

- b) mecanismo de aquecimento e têmpera;
- c) mecanismo de reação da superfície com o ambiente tais como: nitretação, carbonetação e sulcamento por oxidação.

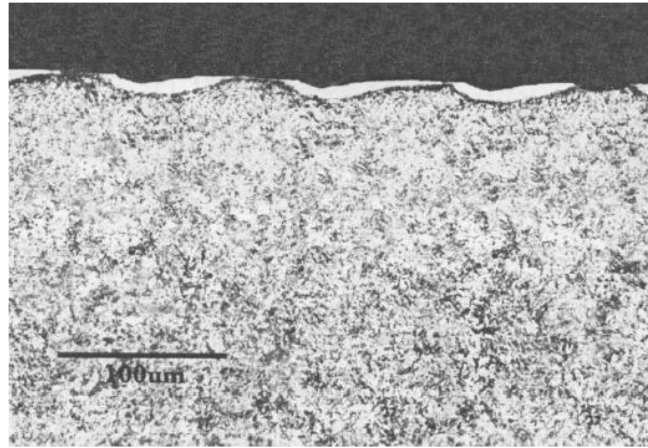


Figura 2.13: Camada branca na superfície fresada do material SAE 4340 50 HRC (FIELD; KAHLES, 1971)

A usinagem de aços endurecidos, devido à deformação plástica na formação do cavaco, envolve altas pressões, temperaturas, deformações e taxas de deformação. A superfície da peça está sujeita a mudanças metalúrgicas, que podem proporcionar a “camada branca”, que tem a influência significativa na fadiga, na corrosão sob tensão e no desgaste das peças (POULACHON et al, 2003 -A). Além da camada branca se formar na superfície usinada, o estudo do cavaco revela que há camadas brancas nos cavacos gerados na usinagem destes aços (POULACHON et al, 2003 -B).

Segundo POULACHON et al (2004) na microestrutura da camada branca é encontrada uma "martensita abnormal" composta de nanocristais de material parcialmente transformado com alta densidade de discordância. Segundo os autores ela é composta de linhas de martensita muito fina (células mal orientadas entre 30 a 100 nm) com carbonetos finamente dispersos e altos teores de austenita retida.

BOSHEH; MATIVENGA (2005) concluíram em seus estudos que a espessura da camada branca diminui com o aumento da velocidade de corte (V_c), devido à redução da temperatura na superfície. Porém esse resultado é contrário aos encontrados por BRAGHINI (2002), que defende que a energia acumulada na peça tende sempre a subir com a velocidade de corte (V_c). Contudo, nota-se que o mecanismo de formação da camada branca é complexo, merecendo mais experimentos para determinar a sua relação com os parâmetros de corte.

No entanto, o maior problema da camada branca não é quanto a sua formação, composição ou microestrutura, mas quanto ao seu efeito nos componentes manufaturados.

YANG; FANG; HUANG (1996) comentam que existem divergências entre diversos pesquisadores sobre esta questão.

A camada branca é considerada uma vantagem tribológica, pois confere um aumento da dureza da superfície com estabilidade térmica. Além disso, a transição gradual na microestrutura proporciona um aumento da resistência. Para outros, as microtrincas e vazios formados no cisalhamento adiabático 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; FANG; HUANG (1996) produziram uma camada branca homogênea e contínua na superfície de um bloco de aço temperado e revenido, por meio de 30 impactos de uma esfera de aço (HRC 60) com 100mm de diâmetro contra a superfície de onde foram retirados pinos para ensaio de desgaste pino-disco. Estes pesquisadores concluíram que a camada branca é prejudicial para a 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. 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.

2.2.4 Tensões residuais

A tensão residual é definida, segundo MATSUMOTO; BARASH; LIU (1986), como tensão que permanece no componente usinado após a solicitação à qual foi submetido. A tensão residual é introduzida na superfície através do processo de remoção de material, sua presença pode ser útil ou desastrosa dependendo da aplicação da peça e a mesma pode ser trativa ou compressiva, alta ou baixa.

As tensões são introduzidas no metal por processos mecânicos, térmicos, químicos ou uma combinação desses processos, resultando em uma permanente mudança na sua forma (EVANS, 1971). Tem-se como exemplo os seguintes processos:

- a) Mecânico: usinagem, conformação mecânica, montagem;
- b) Térmico: soldagem, fundição, tratamento térmico;
- c) Químico: oxidação, corrosão, eletrodeposição.

Um exemplo de operação que gera impacto térmico na superfície é a eletroerosão (EDM). Este invariavelmente conduz a tensões trativas na sub-superfície e a profundidade de penetração depende da energia da descarga. (GUU et al, 2003)

Segundo WHITEHOUSE (1994), a divisão das causas que formam a tensão, em mecânica, térmica e química, é um pouco arbitrária porque na maioria das vezes, mais de uma delas ocorre simultaneamente. A combinação mais comum encontrada é a ocorrência das causas mecânicas e térmicas conjuntamente.

Segundo LIU; BARASH (1982), na mesma linha que Whitehouse, defendem que a tensão residual pode ser classificada conforme a sua origem:

- a) tensão residual mecânica;
- b) tensão residual contingente.

A tensão residual mecânica é causada pelo escoamento plástico não homogêneo, causado por forças externas ou gradiente térmico, efeito de orientação cristalina, do contorno de grão, entre outros efeitos mecânicos. A tensão residual contingente é aquela gerada por efeito químico ou estrutural, transformação de fase, efeito térmico causando relativa expansão entre diferentes constituintes, entre outros efeitos químicos e estruturais. Por exemplo, o jateamento produz tensões residuais mecânicas, enquanto a nitretação e a cementação produzem tensão residual contingente.

A principal diferença entre os dois tipos está na existência ou não de alterações químicas ou estruturais no novo estado da superfície. Portanto, apesar da tensão residual mecânica e contingente serem ocasionadas por mecanismos diferentes, podem ser geradas simultaneamente (LIU; BARASH, 1982).

MATSUMOTO; BARASH; LIU (1986) afirmam que dependendo da dureza do componente, a usinagem pode gerar tensões residuais de compressão ou de tração. Para aços de baixa dureza a tensão residual na superfície é de tração e quando é de alta dureza a tensão residual é de compressão. EI-KHABEERY; FATTOUH (1989) encontraram que a tensão residual toma-se mais trativa com o aumento da resistência à tração do material da peça usinada.

De uma forma geral, a existência da tensão residual de tração na superfície incentiva a ocorrência de fissura reduzindo a resistência à fadiga, enquanto que a tensão residual de compressão aumenta a resistência à fadiga (USUDA et al, 1983). As tensões de compressão podem ser introduzidas através de tratamentos térmicos (têmpera seguida de revenimento) e de operações de usinagem em aços endurecidos e de tratamento superficial, como o

jateamento. A fim de diferenciar os tipos de tensões residuais, DAMASCENO (1993), define três tipos de tensões residuais:

- **Tensões residuais de 1ª ordem, também chamadas de tensões do Tipo I ou Macrotensões (σ_1):**

As tensões de 1ª ordem, ou macrotensões (σ_1), são homogêneas no volume de vários grãos e causam deformações uniformes apreciáveis da rede cristalina na região em que atuam. Em geral são as que despertam maiores interesses aos problemas relacionados com a engenharia, em função de sua ação sobre os materiais. Atuam na escala de alguns tamanhos de grãos.

- **Tensões residuais de 2ª ordem, do Tipo II ou Pseudo-Macrotensões (σ_2):**

As tensões de 2ª ordem, ou Pseudo-Macrotensões (σ_2), são quase homogêneas e atuam na escala do tamanho de um grão na estrutura cristalina.

- **Tensões residuais de 3ª ordem, do Tipo III ou Microtensões (σ_3):**

As tensões de 3ª ordem, ou Microtensões (σ_3), são homogêneas em regiões muito limitadas, menores que um grão (isto é, atuam na faixa de alguns espaçamentos interatômicos). A presença das microtensões provoca pequenas flutuações nos espaçamentos dos planos da rede cristalina do material.

NOYAN; COHEN (1987) citam que as microtensões podem surgir devido a várias causas: deformação plástica não homogênea, assim como, uma deformação plástica entre matriz e precipitados de uma liga de duas fases gera um campo de microtensões em torno de cada precipitado. A distribuição não homogênea das constantes elásticas do material pode causar a formação de um campo de microtensões, quando uma tensão homogênea for aplicada em torno do material.

As definições descrevem condições ideais e se referem exclusivamente a materiais sólidos policristalinos (é o caso do material em estudo, o aço SAE 4340). De forma geral essas tensões (1ª, 2ª e 3ª ordens) atuam em conjunto ou superpostas.

As tensões de primeira ordem também denominadas macrotensões podem ser medidas através de processos mecânicos, usando extensômetros; as de segunda e terceira ordem (microtensões) somente podem ser medidas através da difração de raios-X. As tensões residuais que foram medidas nessa pesquisa são as de primeira ordem, também denominadas macrotensões e foram medidas através de extensômetros. As macrotensões são umas das mais interessantes na engenharia por afetar o desempenho de um componente, já as microtensões residuais homogêneas e não homogêneas são de grande interesse em ciência dos materiais.

Em uma escala macroscópica, as macrotensões são homogêneas em pelo menos uma direção, ela se estende a uma distância que é grande em relação ao tamanho do grão do material e são de interesse geral para um projeto e análise de falha. A macrotensão, para uma dada localização e direção, é determinada pela medida da deformação naquela direção em um único ponto. Quando as macrotensões são determinadas, ao menos em três direções conhecidas, uma condição de plano é assumida e as tensões podem ser combinadas usando o círculo de Mohr para se determinar a tensão residual máxima e mínima, a tensão cisalhante máxima e suas orientações relativas para uma referida direção (PREVEY, 1986).

Quando se fala dos efeitos das tensões residuais, as opiniões são divergentes de acordo com a aplicação do produto. No entanto, DAMASCENO (1993), assim como muitos autores defendem a idéia que na maior parte dos casos, os efeitos das tensões residuais são nocivos ao produto, uma vez que as mesmas podem causar deformações, aumentar a velocidade das transformações de fase e auxiliam no processo de corrosão.

2.3 Forças de corte

O conhecimento dos esforços de corte envolvidos no processo mostra-se particularmente interessante para que se possa analisar a usinabilidade de determinado material, definir métodos econômicos do ponto de vista energético e permitir com que se escolha uma máquina-ferramenta rígida o suficiente para garantir qualidade dimensional.

Diversos fatores influenciam a intensidade destes esforços, tais como: elementos de liga existentes no material usinado, a resistência ao cisalhamento, taxa de encruamento e dureza do mesmo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Durante a usinagem, não se conhece a direção e o sentido da força de usinagem, com isso ela não pode ser medida. Para tanto, faz-se necessário projetar componentes de força de usinagem em planos ortogonais, tornando assim direções conhecidas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001). Essa força de usinagem pode ser decomposta em componentes ativas e uma componente passiva:

- Forças ativas: Força de corte
 Força de avanço
- Força passiva: Força de profundidade

Porém, somente as forças ativas, por estarem contidas no plano de trabalho, consomem potência. Apesar deste fato, o valor da força passiva tem uma influência

importante nas operações de fresamento, pois a flambagem do porta-ferramentas depende diretamente do valor desta força.

As forças de corte no fresamento podem ser expressas pelas seguintes equações (ALTINTAS, 2000):

$$\begin{aligned} F_t(\phi) &= K_{tc}ah(\phi) + K_{te}a \\ F_r(\phi) &= K_{rc}ah(\phi) + K_{re}a \\ F_a(\phi) &= K_{ac}ah(\phi) + K_{ae}a \end{aligned} \quad (2.7)$$

Onde K_{tc} , K_{rc} e K_{ac} são constantes das ações das forças de corte na direção tangencial, radial e axial respectivamente. Além disso, os coeficientes K_{te} , K_{re} e K_{ae} são as constantes de borda.

As componentes de força, considerando um plano cartesiano, na ferramenta de corte em contato com a peça são expressas de acordo com a Fórmula 2.8 (ALTINTAS, 2000).

$$\begin{aligned} F_x(\phi) &= -F_t \cos \phi - F_r \sin \phi \\ F_y(\phi) &= +F_t \sin \phi - F_r \cos \phi \\ F_z(\phi) &= +F_a \end{aligned} \quad (2.8)$$

Essas componentes são produzidas quando a ferramenta de corte está em contato com a peça, além disso, pode haver mais de um dente da ferramenta de corte atuando simultaneamente para gerar as componentes de força, isso depende do número de dentes, do tipo da ferramenta e da profundidade radial de corte. Haverá mais de um dente da ferramenta cortando simultaneamente quando o ângulo de varredura for maior que o ângulo de espaçamento entre os dentes da ferramenta, ou seja, $\phi_s > \phi_p$. O espaçamento entre os dentes e o ângulo de varredura são expressos nas Fórmulas 2.9 e 2.10 respectivamente (ALTINTAS, 2000).

Sendo:

$$F_x(\phi), F_y(\phi), F_z(\phi) > 0 \xrightarrow{\text{quando}} \phi_{st} \leq \phi \leq \phi_{ex}$$

$$\phi_p = \frac{2\pi}{z} \quad (2.9)$$

$$\phi_s = \phi_{ex} - \phi_{st} \quad (2.10)$$

Quando mais de um dente da ferramenta corta simultaneamente, faz-se necessário considerar a contribuição de cada dente para a força total ou das suas componentes de força de avanço, normal e axial (ALTINTAS, 2000).

$$F_x = \sum_{j=1}^N F_{xj}(\phi_j) \quad F_y = \sum_{j=1}^N F_{yj}(\phi_j) \quad F_z = \sum_{j=1}^N F_{zj}(\phi_j) \quad (2.11)$$

Sendo: $\phi_{st} \leq \phi_j \leq \phi_{ex}$

Contudo, cada dente presente na zona de imersão representa uma parcela da força total de corte. Sendo assim, a força de corte resultante na ferramenta é expressa pela Fórmula 2.12, o torque instantâneo de corte no eixo-árvore na Fórmula 2.13 e a potência necessária no motor na Fórmula 2.14 (ALTINTAS, 2000).

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2.12)$$

$$T_c = \frac{d}{2} \sum_{j=1}^N F_{tj}(\phi_j) \quad \text{Sendo: } \phi_{st} \leq \phi_j \leq \phi_{ex} \quad (2.13)$$

$$P_t = V_c \sum_{j=1}^N F_{tj}(\phi_j) \quad \text{Sendo: } \phi_{st} \leq \phi_j \leq \phi_{ex} \quad (2.14)$$

Segundo LIMA; CORRÊA (2002) as forças de corte na usinagem de materiais endurecidos, que foram os materiais utilizados nesta pesquisa, mostram-se de 30 a 80% maiores do que as medidas quando se usina materiais de dureza comum. Conseqüentemente, tem-se um maior torque e a necessidade de maior potencia para o motor da máquina.

2.4 Planejamento experimental

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

- Variáveis dependentes: respostas das propriedades de interesse, por exemplo, a rugosidade “Ra” de uma superfície.
- Variáveis independentes: fatores ou parâmetros que influenciam a resposta, por exemplo, a velocidade de corte.
- Níveis: valores dos fatores a serem estudados, sendo que cada valor escolhido representa um nível.
- Codificação dos fatores: para simplificar o planejamento de experimentos e aumentar a precisão na análise estatística, é conveniente codificar os fatores em um sistema de

coordenadas adimensionais. Por exemplo, quando se tem dois níveis de profundidade: 1 mm e 2 mm, para o nível mais baixo (1 mm) é dado o valor codificado de “-1” e, para o nível mais alto (2 mm), o valor codificado de “+1”. Para o valor intermediário (médio), é estabelecido o valor codificado de “0”.

- e) Delineamento de experimentos: seqüência dos experimentos a serem realizados, obtidos por ferramentas de planejamento de experimentos, na qual são incluídas combinações dos níveis dos fatores a serem estudados.
- f) Aleatorização: realização de experimentos delineados em uma seqüência casual, aumentando-se com isto a probabilidade de eliminação dos efeitos dos fatores não considerados no delineamento e melhorando-se a análise dos resultados.
- g) Replicação: com isso é possível 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, sistematicamente, a variabilidade resultante da presença de fatores conhecidos que perturbam o sistema, porém, não se tem interesse de estudá-los. Assim, 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 nos níveis 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.

Para as pesquisas que envolvem diversas variáveis independentes e dependentes, faz-se necessário utilizar técnicas estatísticas, de modo a se obter conclusões em relação à dependência das respostas de interesse em função das variáveis analisadas. Segundo BOX (1978) essas técnicas estatísticas 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 parâmetros de projeto que melhorem o desempenho de produtos;
- e) obtenção de produtos que sejam fáceis de fabricar, projetados, desenvolvidos e produzidos em menos tempo e que tenham melhor desempenho e confiabilidade que os produzidos pelos competidores.

O planejamento de experimentos utilizando ferramentas estatísticas permite a execução de experiências de maneira econômica e eficiente. Ou melhor, ajudam a economizar tempo e dinheiro, visto que conduzem à objetividade da análise dos resultados. Lembrando, que esses métodos não substituem o conhecimento, a criatividade e o bom senso do executor (BOX, 1978).

Antes de iniciar os ensaios experimentais, com base nos conceitos acima, faz-se necessário a definição de alguns fatores:

- a) variáveis envolvidas nos experimentos;
- b) faixa de variação das variáveis independentes;
- c) níveis escolhidos para essas variáveis;
- d) planejamento experimental.

As três etapas iniciais geralmente envolvem um grupo de pessoas e delas depende o sucesso de um planejamento de experimentos. Quanto maior o conhecimento e experiência do grupo, melhor será a definição dessas etapas possibilitando uma pesquisa com resultados mais claros e exatos.

Na etapa de planejamento experimental, deve ser considerado o tamanho da amostra (número de repetições), a seleção da ordem de execução dos experimentos e a possibilidade ou não de fazer a blocagem.

Neste trabalho, foram empregadas ferramentas estatísticas com o objetivo de selecionar os principais fatores que influenciaram a integridade da superfície. Neste contexto, foi abordada uma ferramenta estatística de seleção de fatores: o delineamento composto central, maiores detalhes sobre o delineamento em anexo 1.

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

3. DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS

Para alcançar plenamente os objetivos propostos foram desenvolvidos experimentos preliminares e em seguida os ensaios definitivos. Contudo, esperou-se obter todos os dados necessários, para através das análises chegar as conclusões necessárias.

Os experimentos, tanto iniciais como os definitivos, foram realizados na Oficina do Centro Universitário da FEI, escolhido por oferecer toda uma estrutura para realização dos ensaios necessários.

A integridade da superfície (IS) é resultado do balanço da energia introduzida pelo processo de fabricação, ou seja, quanto menor a energia introduzida na superfície, menores serão as alterações provocadas pelo processo. Para isso, no caso da usinagem, faz-se necessário compreender como os parâmetros de cortes afetam as características da IS por meio de testes que, por sua vez, implicam em custos adicionais. Contudo, estes testes tornam-se justificáveis a medida que aumentam as exigências com relação ao desempenho, custo, confiabilidade do componente e, principalmente, à segurança.

3.1 Experimentos iniciais



Figura 3.1: Ensaio inicial

Para a preparação dos ensaios definitivos e complementação de alguns conceitos utilizados durante a revisão bibliográfica, foram realizados experimentos iniciais em um corpo de prova, conforme características baseadas no ponto central do delineamento

composto central utilizado nos ensaios definitivos, ou seja, o ponto ótimo das variáveis independentes:

- Corpo de prova:

- a) Material: AISI-SAE 4340
- b) $V_c = 180$ m/min;
- c) $a_p = 0,12$ mm;
- d) $f_z = 0,075$ mm/volta;
- e) sem refrigeração.

A usinagem desse corpo de prova tem a finalidade de detectar os problemas iniciais de usinagem e realizar a simulação dos ensaios definitivos. Foram medidas as forças de corte e a IS (rugosidade, camada branca e tensões residuais).

Com a realização dos ensaios iniciais ou preliminares foi possível levantar prováveis distorções e conseqüentemente realizar possíveis correções, a fim de evitar problemas nos ensaios definitivos.

3.2 Desenvolvimento dos ensaios de usinagem

Os ensaios de usinagem foram conduzidos através de um planejamento experimental composto central, a fim de obter uma confiabilidade dos resultados e conhecer a relação entre as variáveis de entrada ou variáveis independentes.

As características detalhadas de cada corpo de prova e as operações realizadas nos mesmos serão descritas a seguir.

3.2.1 Corpos de prova

Foram realizados ensaios de usinagem em vinte corpos de prova com material aço AISI-SAE 4340, temperado e revenido, com dureza média de 52 HRC. Antes da realização dos ensaios experimentais, foram feitas medidas nos corpos de prova, a fim de controlar a dureza inicial de superfície e conseqüentemente evitar alterações causadas pela mesma nos resultados.

Segundo FAVORIT (2008) o aço 4340 é um aço para beneficiamento de alta resistência mecânica, elevada temperabilidade, alta tenacidade, baixa usinabilidade e baixa

soldabilidade. A dureza superficial na condição temperada varia entre 50 e 59 HRC, podendo ser aumentada através de nitretação. Destinado à fabricação de eixos, bielas, virabrequins e peças com alta solicitação mecânica; na indústria aeroespacial, automobilística e de máquinas e equipamentos. A composição química deste material pode ser observada pela Tabela 3.1.

SAE	C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Ni	Cr	Mo
4340	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30

Tabela 3.1: Composição do aço AISI-SAE 4340

As dimensões dos corpos de prova usados foram de 26 x 80 x 80 mm, com uma geometria final conforme a Figura 3.2.

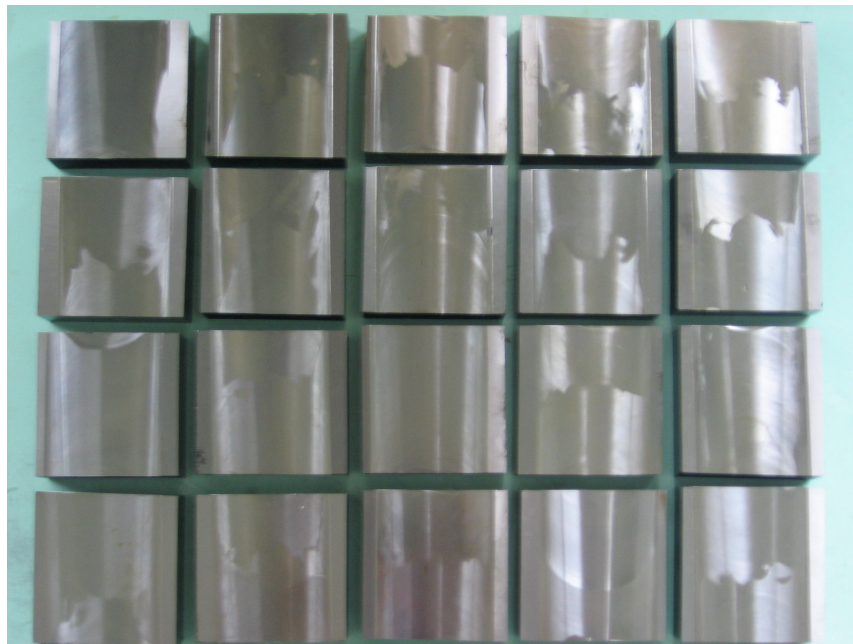


Figura 3.2: Corpos de prova utilizados para os ensaios de usinagem

3.2.2 Preparação dos ensaios

Como já citado anteriormente, a primeira atividade como preparação dos ensaios é a medição de dureza antes da usinagem dos corpos de prova, visando-se evitar que diferenças de dureza influenciem nos resultados dos testes experimentais.

Antes da usinagem, os corpos de prova foram esquadrejados, ou seja, foram usinadas todas as suas faces com as mesmas condições de corte, evitando-se a falta de alinhamento entre as faces.

Os corpos de prova foram fixados sobre um dinamômetro, através de uma morsa, sobre dois paralelos de dimensões iguais, a fim de manter o seu alinhamento. Apesar de que, qualquer variação no alinhamento seria eliminada com a operação de desbaste realizada anteriormente a usinagem final dos corpos de prova (Figura 3.3).



Figura 3.3: Fixação do corpo de prova

Como em toda usinagem a preocupação com a segurança foi prioridade durante os testes. Para tanto, a utilização dos EPI's foi indispensável, além da total atenção com a segurança das pessoas e dos bens envolvidos com a usinagem.

3.2.3 Descrição das operações

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

3.2.3.1 Desbaste

A operação de desbaste tem a função de eliminar grandes distorções na superfície e preparar uma superfície padrão para o acabamento.

Para todos os corpos de prova foram utilizados os mesmos parâmetros tecnológicos na operação de desbaste, tais como: velocidade de corte, profundidade e avanço por aresta de corte. Isso é justificado pelo fato de se evitar que uma possível variação da superfície, após a operação de desbaste, influencie na operação final de acabamento, ou seja, a operação estudada nessa pesquisa.

A operação de desbaste foi realizada numa superfície plana, no sentido transversal e com uma ferramenta de topo contendo quatro arestas de corte indexáveis. Para esta operação utilizou-se os seguintes parâmetros de corte:

- a) desbaste paralelo ao eixo X do movimento longitudinal;
- b) rotação do eixo árvore (n): 830 rpm;
- c) velocidade de avanço (V_f): 200 mm/min;
- d) velocidade de corte (V_c): 130 m/min;
- e) avanço por aresta (f_z): 0,06 mm;
- f) profundidade de corte (a_p): 0,2 mm;
- g) diâmetro da ferramenta: 50 mm;
- h) arestas de corte: 4;
- i) sem refrigeração.

3.2.3.2 Acabamento

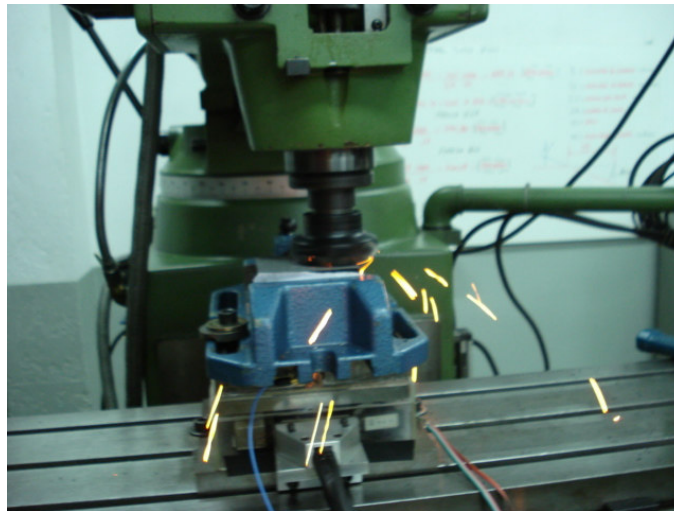


Figura 3.4: Operação de acabamento

Esta operação tem por finalidade acabar a peça, sendo por isso, a operação mais importante de usinagem, pelo fato de ser responsável pelas características finais do produto. Esta pesquisa visou analisar as forças de corte e as características de integridade superficial na usinagem de acabamento de superfícies planas do material endurecido SAE 4340. Os parâmetros de corte podem ser vistos na Tabela 3.2, que é a planilha do delineamento experimental:

- a) acabamento paralelo ao eixo X em único sentido;

- b) diâmetro da ferramenta: 63 mm;
- c) arestas de corte: 5;
- d) sem refrigeração.

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação rpm	Avanço mm/min
1	150	0,050	0,08	760	190
2	150	0,050	0,16	760	190
3	150	0,100	0,08	760	380
4	150	0,100	0,16	760	380
5	210	0,050	0,08	1060	265
6	210	0,050	0,16	1060	265
7	210	0,100	0,08	1060	530
8	210	0,100	0,16	1060	530
9	129,5	0,075	0,12	660	248
10	230,5	0,075	0,12	1170	439
11	180	0,033	0,12	910	150
12	180	0,117	0,12	910	533
13	180	0,075	0,05	910	342
14	180	0,075	0,19	910	342
15-c	180	0,075	0,12	910	342
16-c	180	0,075	0,12	910	342
17-c	180	0,075	0,12	910	342
18-c	180	0,075	0,12	910	342
19-c	180	0,075	0,12	910	342
20-c	180	0,075	0,12	910	342

Tabela 3.2: Parâmetros de corte para o acabamento

Os valores de rotação e avanço foram calculados pelas Fórmulas 2.3 e 2.4 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 catalogo de ferramentas da Sandvik de 2008 e ratificados por consultores da mesma empresa, professores e profissionais com experiência em usinagem de materiais endurecidos.

3.2.4 Ferramental utilizado nos ensaios

Os ensaios de usinagem foram realizados com ferramental produzido pela empresa de ferramentas de corte Sandvik do Brasil S.A., para a realização dos ensaios foram utilizados

duas ferramentas, uma para operação de acabamento e outra para desbaste. Seguem as características de cada ferramenta:

- Operação de Desbaste: 1 cabeçote Sandvik de diâmetro 50 mm com quatro arestas de cortes para insertos intercambiáveis SPKN 12 03 ED R (Figura 3.5);



Figura 3.5: Ferramenta para desbaste

- Operação de Acabamento: 1 cabeçote Sandvik de diâmetro 63 mm com cinco insertos intercambiáveis, modelo R245-063Q22-12M, com ângulo de posição de 45 graus, ângulo de saída de 16 graus (Figura 3.6) e pastilhas de metal duro com cobertura de óxido de alumínio de classe GC 4020 HC (R245-12 T3M-PM).



Figura 3.6: Ferramenta para acabamento

Segundo o manual Técnico da Usinagem da Sandvik do ano de 2008, essas pastilhas são da classe de Metal Duro com cobertura, para fresamento leve a pesado e suporta temperaturas elevadas. Recomendadas para utilização em usinagem em aços endurecidos ou usinagem em altas velocidades de corte. A Figura 3.7 demonstra as dimensões das pastilhas utilizadas.

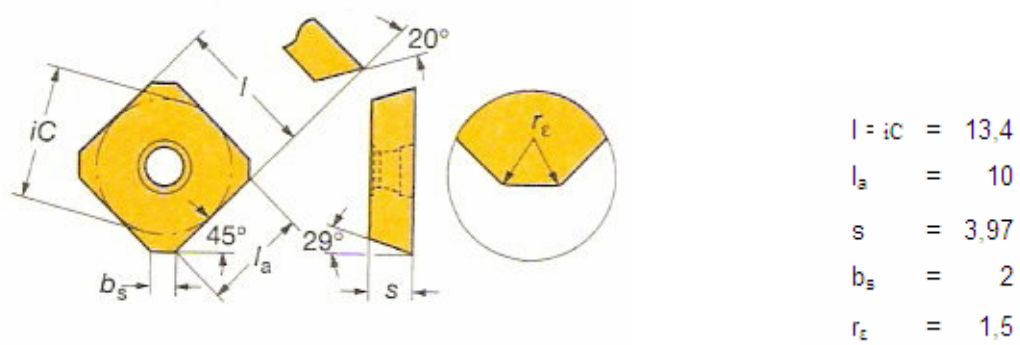


Figura 3.7: Dimensões da ferramenta de corte (SANDVIK, 2006)

Para a operação de acabamento foi trocado o inserto para cada novo corpo de prova, a fim de não prejudicar a avaliação dos esforços e da integridade de superfície pelo desgaste do inserto.

3.2.5 Fresadora utilizada nos ensaios

Os experimentos, tanto iniciais como os definitivos, foram realizados numa Fresadora Vertical convencional, modelo FU-1 (ISO 40), fabricado pelas Indústrias Sanches Blanes, conforme ilustrado na Figura 3.8, apresentando as seguintes especificações técnicas:

- a) **Rotação máxima:** 6.000 RPM;
- b) **Avanço rápido:** 1.500 mm/min;
- c) **Régua digital nos três eixos:** X, Y e Z.

A escolha desta máquina foi justificada pelo fato da mesma ter a robustez e estrutura necessária na usinagem de materiais endurecidos.



Figura 3.8: Fresadora Sanches Blanes

3.3 Medições e instrumentos de medição

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

O projeto do dinamômetro baseou-se no trabalho de (SAGLAM; UNUVAR, 2001) e 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 em três direções ortogonais e o mesmo pode ser visualizado na Figura 3.9.

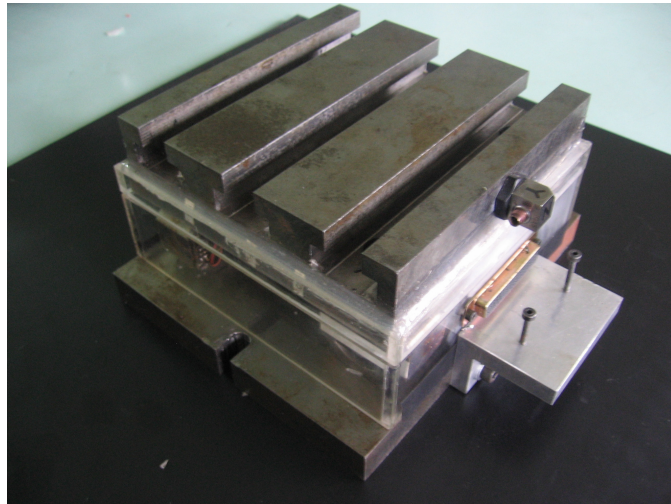


Figura 3.9: Dinamômetro para medições de forças

Dois critérios norteiam o projeto do dinamômetro: rigidez e sensibilidade.

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).

Em geral, as células de carga devem ter uma sensibilidade de 2 mV/V para a carga de fundo de escala (critério da sensibilidade). Busca-se, então, um compromisso entre os dois critérios (ROSSI, 2007).

As células de carga devem ser usinadas idênticas e simetricamente para evitar efeitos cruzados de uma componente de força sobre as outras. A simetria da célula de carga gera

caminhos paralelos para a transferência de calor, o que, teoricamente, faz com que dois pontos em lados opostos da célula estejam sempre à mesma temperatura.

O comportamento elástico do material deve ser coerente com a frequência do carregamento. Para aumentar a vida à fadiga em casos de cargas vibratórias e/ou variáveis, materiais com alta tenacidade devem ser selecionados. Para reduzir os efeitos da temperatura na medição, o material da célula de carga deve ter baixo coeficiente de expansão e alta condutibilidade térmica.

O material selecionado, tanto para as células de carga quanto para a base e mesa, foi o aço ABNT 4340. A fixação das células de carga nas bases foi feita por meio de parafusos M10x20 mm, DIN 912 – Classe 12.9 (ROSSI, 2007).

O esquema da célula de carga pode ser visualizado na Figura 3.10.

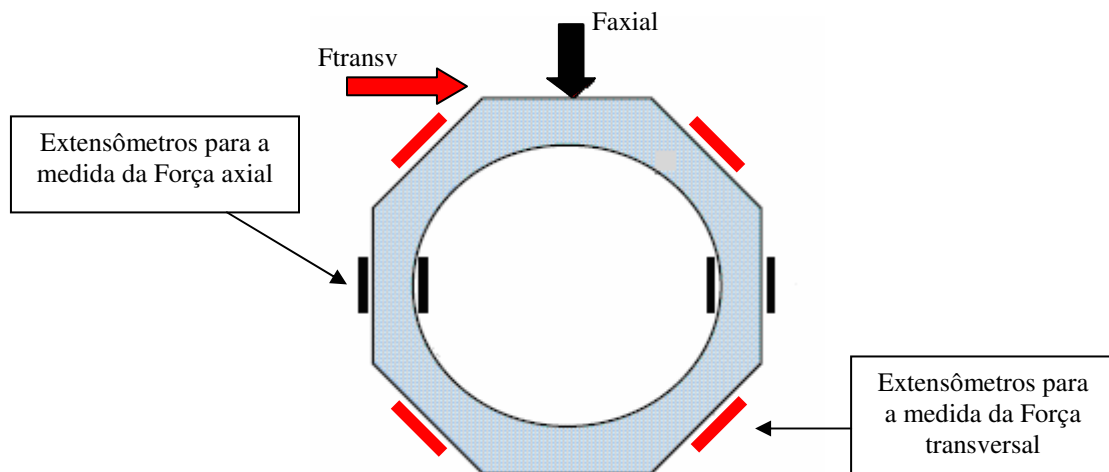


Figura 3.10: Esquema da célula de carga em anel

A calibração do dinamômetro foi feita estaticamente, sendo que foram aplicadas cargas conhecidas em diversos pontos e em diversas direções sobre o mesmo. Após a calibração obteve-se as seguintes equações de forças (ROSSI, 2007):

- $F_x = 1,05X - 0,3291Y - 0,1Z - 1$
- $F_y = 0,1338X + 1,0395Y - 0,042Z$
- $F_z = 0,0228X - 0,04Y + 0,9524Z$

3.3.2 Medição de rugosidade

As medições de rugosidade das superfícies dos corpos de prova foram realizadas com o rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo Suftest 211, ajustado com um comprimento de amostragem “cut-off” de 0,8 mm. As medições de rugosidade foram efetuadas na direção

perpendicular ao avanço ou perpendicular a direção de usinagem, isto se deve por ser a direção mais crítica. Foram efetuadas três leituras de rugosidade para cada superfície ensaiada do corpo de prova e realizado uma média. A Figura 3.11 ilustra o rugosímetro e a medição da rugosidade.



Figura 3.11: Rugosímetro Mitutoyo

3.3.3 Microscópio para medição de camada branca

A camada branca foi identificada através de um microscópio óptico com ampliação de 500x, modelo 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 e preparadas com ataque químico de Nital, Álcool Etílico e Acido Nítrico (Nital 2%). O microscópio é ilustrado na Figura 3.12.



Figura 3.12: Microscópio Olympus BH2-UMA.

3.3.4 Medição das tensões residuais

No presente trabalho, as análises de tensões residuais foram realizadas através do Método do Furo Cego. O Método do Furo Cego é um método semidestrutivo (o volume de material removido não é considerado prejudicial ao desempenho do componente ou pode ser reparado) baseado na medida da deformação aliviada, causada pela introdução de um pequeno furo cego na superfície do componente.

Geralmente, este furo é usinado através de pequenos incrementos e a deformação aliviada medida em três direções por meio de rosetas especiais de resistência elétrica (LU, 1996 e GRANT, 2002).

Como as tensões residuais não são completamente aliviadas na região do furo, não é possível calculá-las através da lei de Hooke. Assim o método exige uma etapa de calibração experimental ou computacional (KOCKELMANN, 1993). No caso dessa pesquisa, o software utilizado foi o H-Drill e o método de cálculo foi o integral.

Os equipamentos e ferramentas utilizadas para medição de tensão residual através do método do furo foram:

- **Rosetas extensométricas**

Fabricante : Excel

Modelo : PA-062RE-120-L

- **Fresa cônica invertida – Metal duro de alta rotação** (Figura 3.13)

Fabricante : KGSorensen

Modelo : FG 39

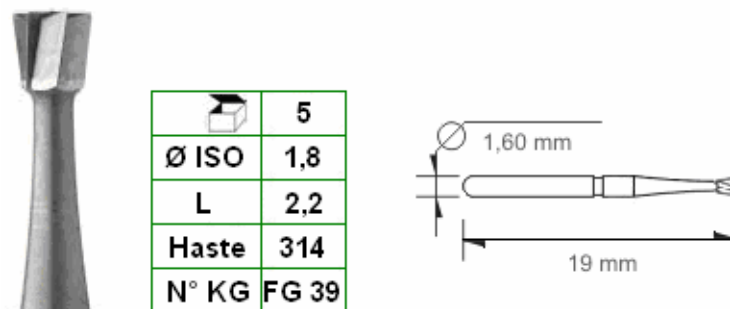


Figura 3.13: Fresa de metal duro – alta rotação: FG 39 (KGSORENSEN, 2008)

- **Fresadora Pneumática – Alta Rotação (Figura 3.14)**

Fabricante : Vishay

Modelo : SR 200



Figura 3.14: Fresadora pneumática SR 200 (VISHAY, 2008)

- **Medidor de micro deformações digital (Figura 3.15)**

Fabricante : Vishay

Modelo : P3

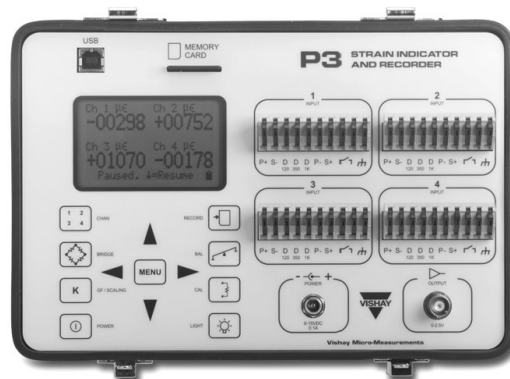


Figura 3.15: Medidor de Microdeformações P3 (VISHAY, 2008)

- **Software de avaliação das tensões residuais**

Software : H-drill

Fornecedor : Vishay

Modulo usado : Método Integral

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados dos experimentos 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, quantitativas e qualitativas, permitindo a formação de grupos que serão analisados, ou seja, utiliza uma técnica apropriada para resumir as informações, adaptando qualquer tipo de variável ao caso estudado e armazenando as variáveis mediante notação dupla (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

No entanto, a análise completa dos dados depende da criatividade e conhecimento teórico do usuário. Na Figura 4.1 pode-se verificar a planilha de dados utilizada pelo “Statistica” que pode ser importada diretamente do Excel.

Run	Vc (m/min)	fz (mm/volta)	ap (mm)	Ra
20 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	0,16
10	230,4538	0,075000	0,120000	0,16
5	210,0000	0,060000	0,080000	0,11
15 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	0,27
13	180,0000	0,075000	0,052728	0,21
2	150,0000	0,060000	0,160000	0,16
4	150,0000	0,100000	0,160000	0,23
14	180,0000	0,075000	0,187272	0,15
6	210,0000	0,060000	0,160000	0,09
9	129,5462	0,075000	0,120000	0,14
11	180,0000	0,032955	0,120000	0,09
1	150,0000	0,060000	0,080000	0,11
8	210,0000	0,100000	0,160000	0,21
19 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	0,15
12	180,0000	0,117045	0,120000	0,13
17 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	0,08
18 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	0,22
16 (C)	180,0000	0,075000	0,120000	0,16
7	210,0000	0,100000	0,080000	0,16
3	150,0000	0,100000	0,080000	0,18

Figura 4.1: Planilha de dados utilizada pelo Statistica

Os resultados das variáveis dependentes do ensaio serão demonstrados nesse capítulo e as respectivas discussões serão descritas conforme necessidade. No entanto, antes de descrever os resultados, segue na Figura 4.2 o resumo do planejamento experimental realizado que serviu de base para a obtenção dos resultados e discussões.

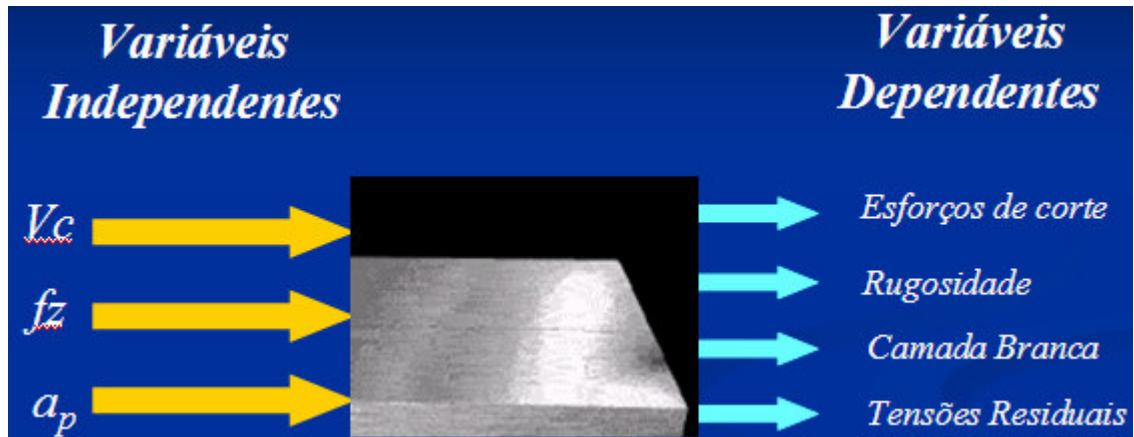


Figura 4.2: Resumo planejamento experimental

4.1 Análise dos resultados iniciais

Com a realização dos ensaios iniciais foi possível analisar os esforços de corte e todas as variáveis dependentes sem maiores problemas; surgiram apenas pequenos imprevistos na preparação e montagem dos equipamentos que foram solucionados em tempo. Enfim, os experimentos iniciais proporcionaram uma base para realização dos ensaios definitivos, evitando-se, com isso, pequenos contratempos que poderiam prejudicar a análise dos resultados.

4.2 Análise dos resultados definitivos

O planejamento experimental final foi baseado nos resultados dos ensaios iniciais, na revisão bibliográfica e na experiência de professores e profissionais da área. As variáveis dependentes analisadas, conforme Figura 4.2, foram:

- a) esforços de corte;
- b) rugosidade;
- c) camada branca;
- d) tensões residuais.

4.2.1 Esforços de corte

Os esforços de corte, medidos com o auxílio do transdutor, de acordo com o delineamento experimental da Tabela 3.2, permitiu que se fizesse a análise na seguinte ordem:

- a) momento torçor (M_t);
- b) força tangencial (F_t);
- c) força radial (F_r);
- d) força passiva (F_p);
- e) força resultante (F_{result}).

4.2.1.1 Momento torçor

Os dados de momento torçor, medidos nos ensaios, podem ser verificados na Tabela 4.1, como segue:

Corpo	Vc (m/min)	fz (mm/volta)	ap (mm)	Mt (N.m)
1	150,00	0,05	0,08	1,0
2	150,00	0,05	0,16	4,3
3	150,00	0,10	0,08	4,7
4	150,00	0,10	0,16	3,5
5	210,00	0,05	0,08	2,7
6	210,00	0,05	0,16	6,0
7	210,00	0,10	0,08	3,4
8	210,00	0,10	0,16	4,8
9	129,55	0,08	0,12	3,8
10	230,45	0,08	0,12	5,4
11	180,00	0,03	0,12	3,8
12	180,00	0,12	0,12	2,3
13	180,00	0,08	0,05	1,9
14	180,00	0,08	0,19	5,2
15	180,00	0,08	0,12	3,4
16	180,00	0,08	0,12	3,8
17	180,00	0,08	0,12	4,0
18	180,00	0,08	0,12	4,4
19	180,00	0,08	0,12	5,2
20	180,00	0,08	0,12	2,2

Tabela 4.1: Resultados do momento torçor

A análise dos resultados foi realizada através do software “Statistica” considerando um Nível de Confiança de 95%. Observou-se que, o momento torçor foi influenciado pela profundidade de corte (a_p) e pela interação entre a profundidade de corte (a_p) e o avanço por faca (f_z), conforme a Tabela 4.2 e Figura 4.3.

	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	3.81006	0.358698	10.62193	0.000001	3.01084	4.609293	3.810064	0.358698	3.01084	4.609293
(1)Vc (m/min)(L)	0.88823	0.475976	1.86613	0.091588	-0.17231	1.948775	0.444117	0.237988	-0.08615	0.974388
Vc (m/min)(Q)	0.60408	0.463350	1.30373	0.221540	-0.42833	1.636488	0.302040	0.231675	-0.21416	0.818244
(2)fz (mm/volta)(L)	-0.03052	0.475976	-0.06412	0.950141	-1.09106	1.030022	-0.015259	0.237988	-0.54553	0.515011
fz (mm/volta)(Q)	-0.54154	0.463350	-1.16876	0.269608	-1.57395	0.490864	-0.270771	0.231675	-0.78697	0.245432
(3) a_p (mm)(L)	1.80130	0.475976	3.78444	0.003576	0.74076	2.861840	0.900650	0.237988	0.37038	1.430920
a_p (mm)(Q)	-0.15965	0.463350	-0.34455	0.737568	-1.19206	0.872759	-0.079824	0.231675	-0.59603	0.436380
1L by 2L	-0.82340	0.621892	-1.32403	0.214960	-2.20906	0.562260	-0.411701	0.310946	-1.10453	0.281130
1L by 3L	0.64265	0.621892	1.03339	0.325768	-0.74301	2.028317	0.321327	0.310946	-0.37150	1.014159
2L by 3L	-1.59582	0.621892	-2.56607	0.028079	-2.98148	-0.210155	-0.797909	0.310946	-1.49074	-0.105077

Tabela 4.2: ANOVA para efeito das variáveis independentes no Mt

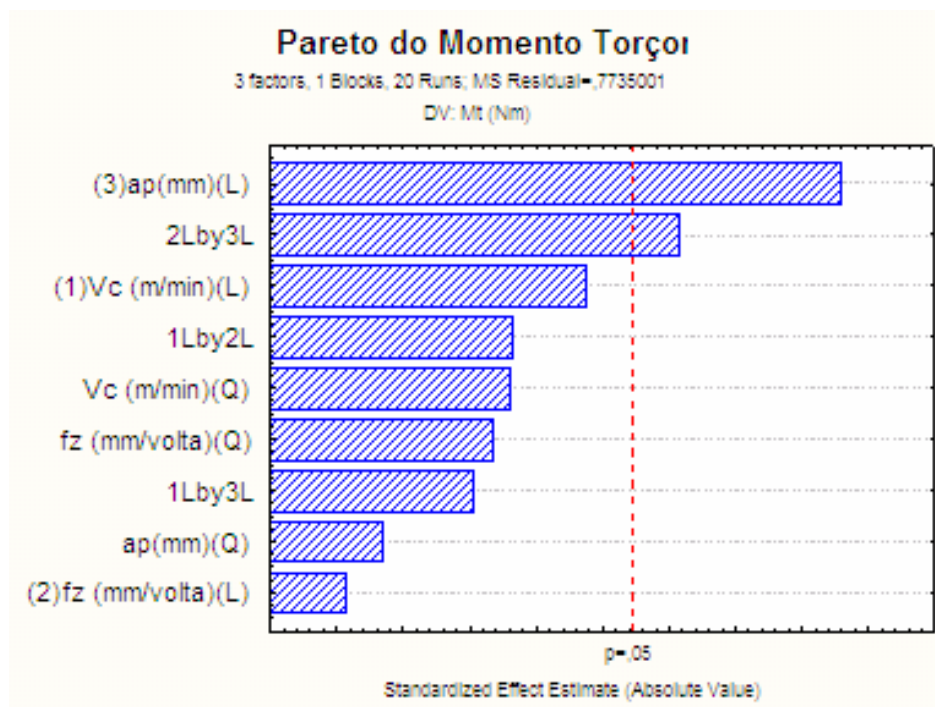


Figura 4.3: Pareto para efeito das variáveis independentes no Mt

Segundo os gráficos da Figura 4.4, os valores de momento torçor variam em função das variáveis independentes da seguinte maneira:

- Gráfico “ $V_c \times a_p$ ”:** Valores mínimos de M_t ocorrem para valores mínimos de “ a_p ”;
- Gráfico “ $V_c \times f_z$ ”:** Valores mínimos de M_t ocorrem para valores de “ V_c ” de médio para baixo e valores mínimos de “ f_z ”;
- Gráfico “ $f_z \times a_p$ ”:** Valores mínimos de M_t ocorrem para valores mínimos “ a_p ” e “ f_z ”.

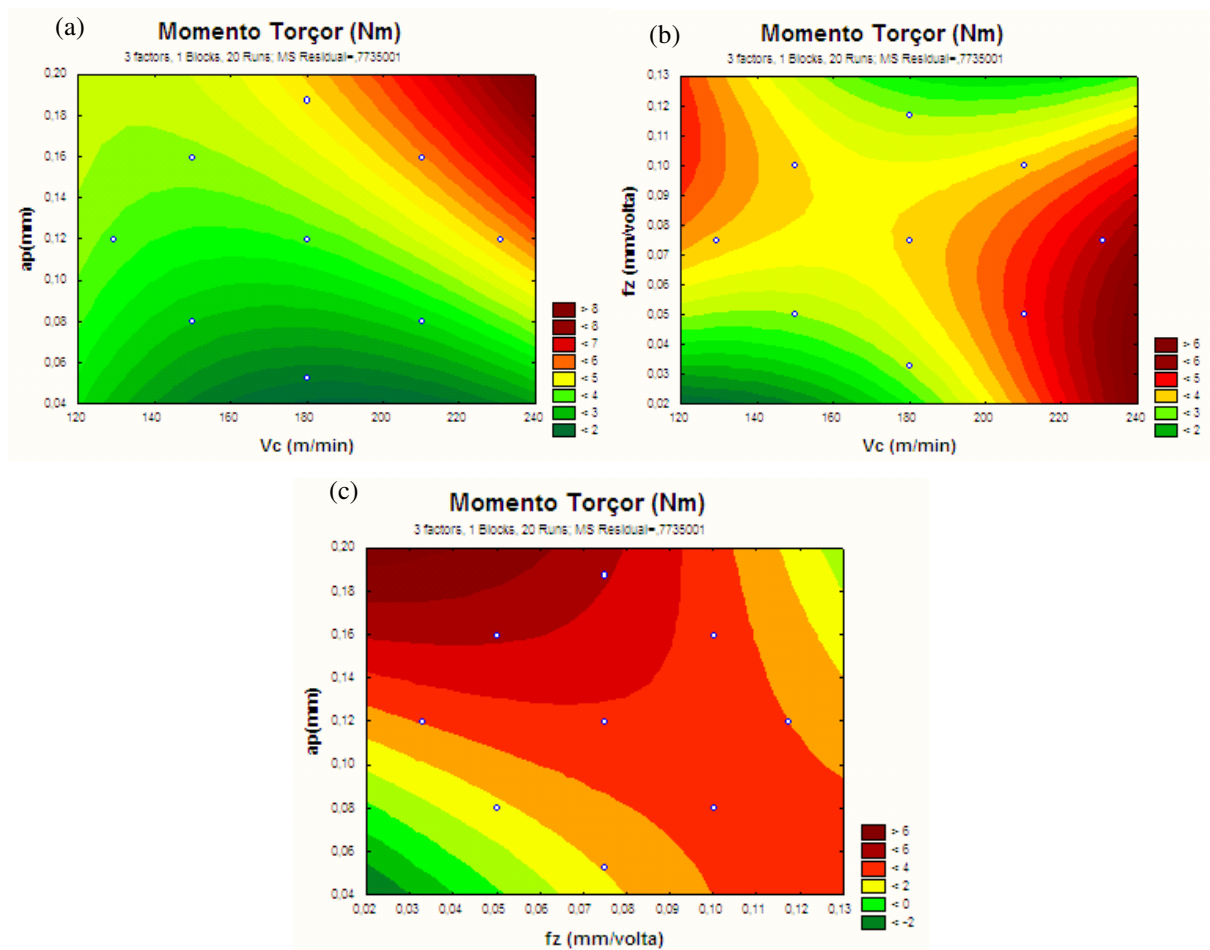


Figura 4.4: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”, “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para momento torçor

De um modo geral, pode-se verificar que todos os parâmetros, em seus valores máximos, proporcionam um momento torçor alto. Com exceção de alguns pontos no gráfico, onde se pode notar valores de momento torçor baixos, mesmo com parâmetros de corte altos.

4.2.1.2 Força tangencial

Os dados de força tangencial, medidos nos ensaios, podem ser verificados na Tabela 4.3, como segue:

Corpo	Vc (m/min)	fz (mm/volta)	ap (mm)	Ft (N)
1	150,00	0,05	0,08	31,49
2	150,00	0,05	0,16	137,65
3	150,00	0,10	0,08	147,99
4	150,00	0,10	0,16	110,15
5	210,00	0,05	0,08	85,45
6	210,00	0,05	0,16	189,73
7	210,00	0,10	0,08	106,98
8	210,00	0,10	0,16	152,63
9	129,55	0,08	0,12	121,60
10	230,45	0,08	0,12	172,16
11	180,00	0,03	0,12	119,24
12	180,00	0,12	0,12	71,65
13	180,00	0,08	0,05	61,39
14	180,00	0,08	0,19	163,79
15	180,00	0,08	0,12	107,24
16	180,00	0,08	0,12	119,43
17	180,00	0,08	0,12	125,41
18	180,00	0,08	0,12	140,26
19	180,00	0,08	0,12	163,86
20	180,00	0,08	0,12	69,95

Tabela 4.3: Resultados da força tangencial

Observou-se que, a força tangencial foi influenciada pela profundidade de corte (a_p) e pela interação entre a profundidade de corte (a_p) e avanço por faca (f_z), conforme a Figura 4.5 e Tabela 4.4.

	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	120,9544	11,38723	10,62193	0,000001	95,5821	146,3268	120,9544	11,38723	95,5821	146,3268
(1)Vc (m/min)(L)	28,1979	15,11034	1,86613	0,091588	-5,4700	61,8659	14,0990	7,55517	-2,7350	30,9329
Vc (m/min)(Q)	19,1772	14,70951	1,30373	0,221540	-13,5977	51,9520	9,5886	7,35475	-6,7988	25,9760
(2)fz (mm/volta)(L)	-0,9688	15,11034	-0,06412	0,950141	-34,6368	32,6991	-0,4844	7,55517	-17,3184	16,3496
fz (mm/volta)(Q)	-17,1918	14,70951	-1,16876	0,269608	-49,9667	15,5830	-8,5959	7,35475	-24,9833	7,7915
(3)ap(mm)(L)	57,1841	15,11034	3,78444	0,003576	23,5162	90,8521	28,5921	7,55517	11,7581	45,4260
ap(mm)(Q)	-5,0682	14,70951	-0,34455	0,737568	-37,8430	27,7066	-2,5341	7,35475	-18,9215	13,8533
1L by 2L	-26,1398	19,74261	-1,32403	0,214960	-70,1290	17,8495	-13,0699	9,87131	-35,0645	8,9248
1L by 3L	20,4017	19,74261	1,03339	0,325768	-23,5875	64,3910	10,2009	9,87131	-11,7938	32,1955
2L by 3L	-50,6609	19,74261	-2,56607	0,028079	-94,6502	-6,6716	-25,3304	9,87131	-47,3251	-3,3358

Tabela 4.4: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Ft

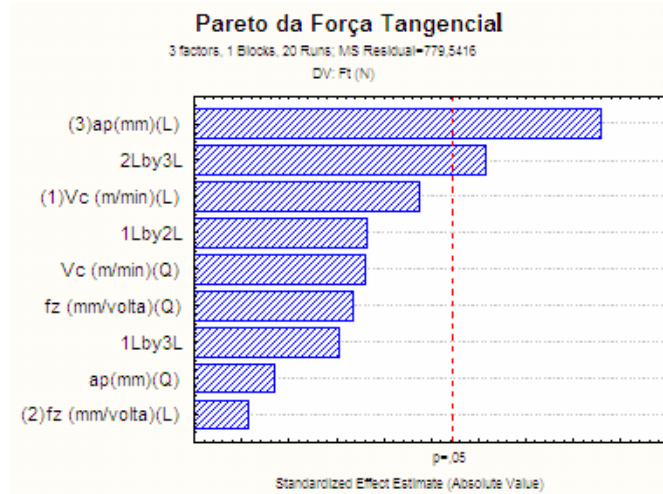


Figura 4.5: Pareto para efeito das variáveis independentes na Ft

Segundo os gráficos da Figura 4.6, os valores da força tangencial variam em função das variáveis independentes da seguinte maneira:

- Gráfico “Vc x a_p ”:** Valores mínimos de Ft ocorrem para valores mínimos de “ a_p ”;
- Gráfico “Vc x f_z ”:** Valores mínimos de Ft ocorrem com valores de “Vc” de médio para baixo e valores mínimos de “ f_z ”;
- Gráfico “ f_z x a_p ”:** Valores mínimos Ft ocorrem para valores mínimos “ a_p ” e “ f_z ”.

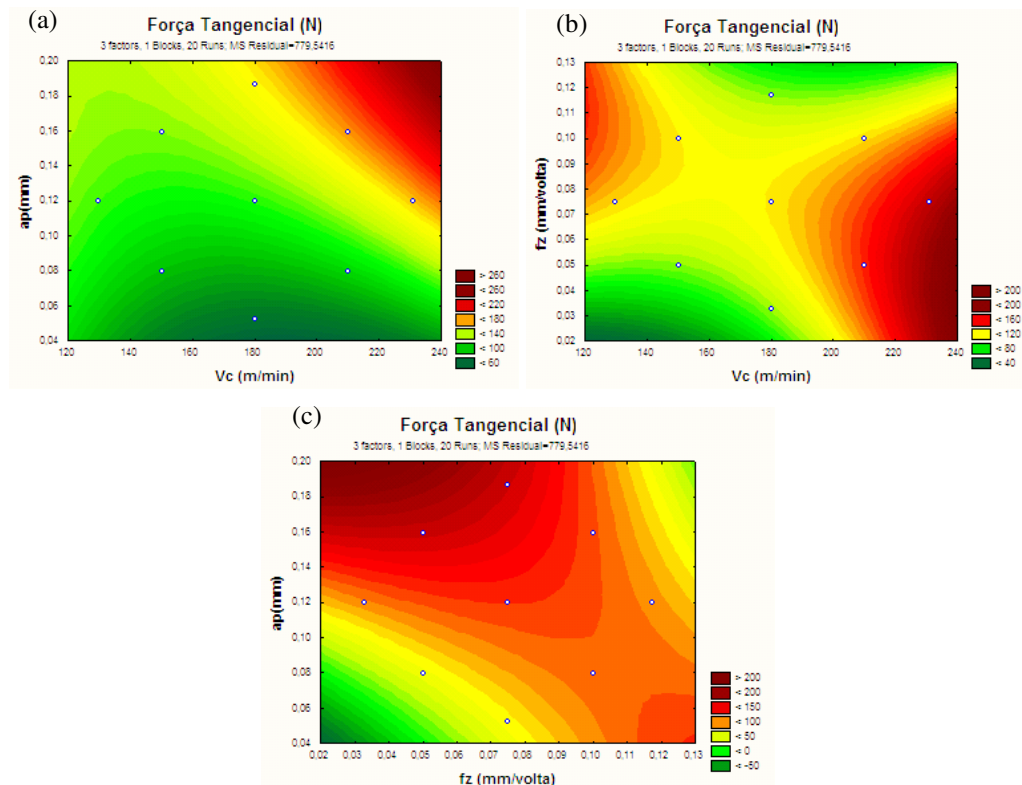


Figura 4.6: Gráficos: “Vc x a_p ”; “Vc x f_z ” e “ f_z x a_p ” para força tangencial

O resultado da análise mostrou que a força tangencial teve um comportamento muito similar ao momento torçor.

4.2.1.3 Força radial

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

Corpo	Vc (m/min)	fz (mm/volta)	ap (mm)	Fr (N)
1	150,00	0,05	0,08	31,44
2	150,00	0,05	0,16	137,96
3	150,00	0,10	0,08	147,72
4	150,00	0,10	0,16	110,04
5	210,00	0,05	0,08	85,29
6	210,00	0,05	0,16	189,52
7	210,00	0,10	0,08	106,89
8	210,00	0,10	0,16	152,13
9	129,55	0,08	0,12	121,33
10	230,45	0,08	0,12	172,56
11	180,00	0,03	0,12	119,27
12	180,00	0,12	0,12	71,43
13	180,00	0,08	0,05	61,42
14	180,00	0,08	0,19	164,05
15	180,00	0,08	0,12	107,57
16	180,00	0,08	0,12	120,30
17	180,00	0,08	0,12	125,51
18	180,00	0,08	0,12	140,56
19	180,00	0,08	0,12	164,52
20	180,00	0,08	0,12	70,17

Tabela 4.5: Resultados da força radial

Observou-se que, a força radial foi influenciada pela profundidade de corte (a_p) e pela interação entre a profundidade de corte (a_p) e avanço por fca (f_z), conforme a Figura 4.7 e Tabela 4.6.

	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	121,3755	11,40865	10,63891	0,000001	95,9555	146,7956	121,3755	11,40865	95,9555	146,7956
(1)Vc (m/min)(L)	28,2364	15,13875	1,86518	0,091732	-5,4948	61,9677	14,1182	7,56938	-2,7474	30,9838
Vc (m/min)(Q)	18,8660	14,73717	1,28017	0,229385	-13,9704	51,7025	9,4330	7,36858	-6,9852	25,8512
(2)fz (mm/volta)(L)	-1,1538	15,13875	-0,07621	0,940752	-34,8850	32,5775	-0,5769	7,56938	-17,4425	16,2887
fz (mm/volta)(Q)	-17,6172	14,73717	-1,19543	0,259499	-50,4537	15,2193	-8,8086	7,36858	-25,2268	7,6096
(3)ap(mm)(L)	57,2485	15,13875	3,78159	0,003593	23,5173	90,9798	28,6243	7,56938	11,7586	45,4899
ap(mm)(Q)	-5,3224	14,73717	-0,36115	0,725499	-38,1588	27,5141	-2,6612	7,36858	-19,0794	13,7571
1L by 2L	-26,0364	19,77973	-1,31632	0,217439	-70,1084	18,0356	-13,0182	9,88987	-35,0542	9,0178
1L by 3L	20,1576	19,77973	1,01910	0,332175	-23,9144	64,2296	10,0788	9,88987	-11,9572	32,1148
2L by 3L	-50,7952	19,77973	-2,56804	0,027984	-94,8672	-6,7232	-25,3976	9,88987	-47,4336	-3,3616

Tabela 4.6: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Fr

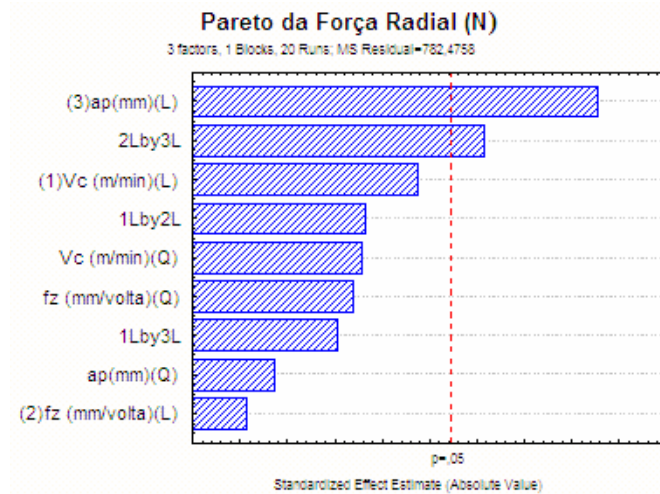


Figura 4.7: Pareto para efeito das variáveis independentes na Fr

Segundo os gráficos da Figura 4.8, os valores de força radial variam em função das variáveis independentes da seguinte maneira:

- Gráfico “Vc x a_p ”:** Valores mínimos de Fr ocorrem para valores mínimos de “ a_p ”;
- Gráfico “Vc x f_z ”:** Valores mínimos de Fr ocorrem com valores “Vc” de médio para baixo e valores mínimos de “ f_z ”;
- Gráfico “ f_z x a_p ”:** Valores mínimos Fr ocorrem para valores mínimos “ a_p ” e “ f_z ”.

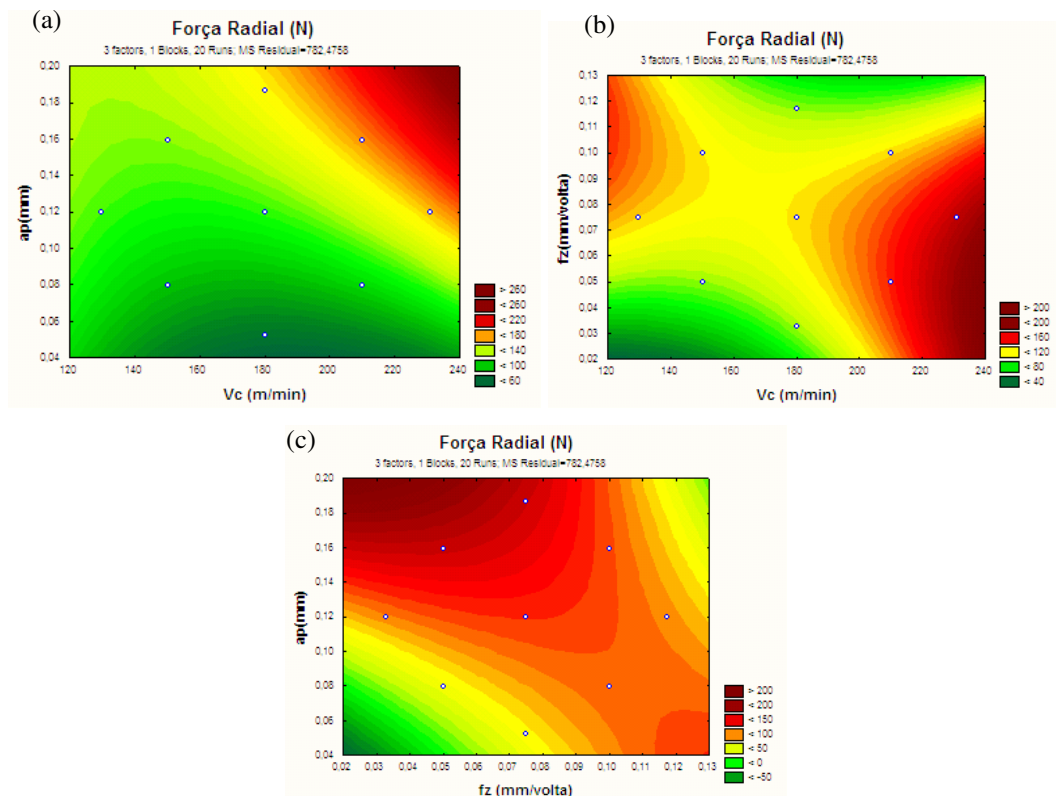


Figura 4.8: Gráficos: “Vc x a_p ”; “Vc x f_z ” e “ f_z x a_p ” para força radial

A análise mostrou que a força radial tem comportamento similar ao Mt e Ft.

4.2.1.4 Força passiva

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

Corpo	Vc (m/min)	fz (mm/volta)	ap (mm)	Fp (N)
1	150,00	0,05	0,08	124,69
2	150,00	0,05	0,16	568,76
3	150,00	0,10	0,08	577,27
4	150,00	0,10	0,16	390,11
5	210,00	0,05	0,08	308,93
6	210,00	0,05	0,16	832,11
7	210,00	0,10	0,08	437,50
8	210,00	0,10	0,16	568,99
9	129,55	0,08	0,12	510,12
10	230,45	0,08	0,12	729,41
11	180,00	0,03	0,12	463,72
12	180,00	0,12	0,12	264,77
13	180,00	0,08	0,05	242,51
14	180,00	0,08	0,19	654,37
15	180,00	0,08	0,12	388,80
16	180,00	0,08	0,12	490,03
17	180,00	0,08	0,12	502,92
18	180,00	0,08	0,12	547,64
19	180,00	0,08	0,12	589,79
20	180,00	0,08	0,12	294,00

Tabela 4.7: Resultados da força passiva

Observou-se que, a força passiva foi influenciada pela profundidade de corte (a_p), pela velocidade de corte (V_c) e pela interação entre a profundidade de corte (a_p) e avanço por faca (f_z), conforme a Figura 4.9 e Tabela 4.8.

	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	468,929	37,89635	12,37399	0,000000	384,491	553,367	468,929	37,89635	384,491	553,3673
(1)Vc (m/min)(L)	125,284	50,28673	2,49139	0,031914	13,238	237,330	62,642	25,14337	6,619	118,6649
Vc (m/min)(Q)	105,873	48,95277	2,16277	0,055848	-3,200	214,947	52,937	24,47639	-1,600	107,4735
(2)fz (mm/volta)(L)	-28,586	50,28673	-0,56846	0,582262	-140,632	83,460	-14,293	25,14337	-70,316	41,7299
fz (mm/volta)(Q)	-74,805	48,95277	-1,52811	0,157477	-183,879	34,268	-37,403	24,47639	-91,939	17,1342
(3)ap(mm)(L)	234,935	50,28673	4,67192	0,000878	122,890	346,981	117,468	25,14337	61,445	173,4906
ap(mm)(Q)	-15,272	48,95277	-0,31198	0,761462	-124,346	93,801	-7,636	24,47639	-62,173	46,9006
1L by 2L	-102,120	65,70278	-1,55428	0,151170	-248,515	44,275	-51,060	32,85139	-124,258	22,1373
1L by 3L	99,435	65,70278	1,51340	0,161122	-46,960	245,830	49,717	32,85139	-23,480	122,9148
2L by 3L	-255,730	65,70278	-3,89223	0,002999	-402,125	-109,335	-127,865	32,85139	-201,063	-54,6677

Tabela 4.8: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Fp

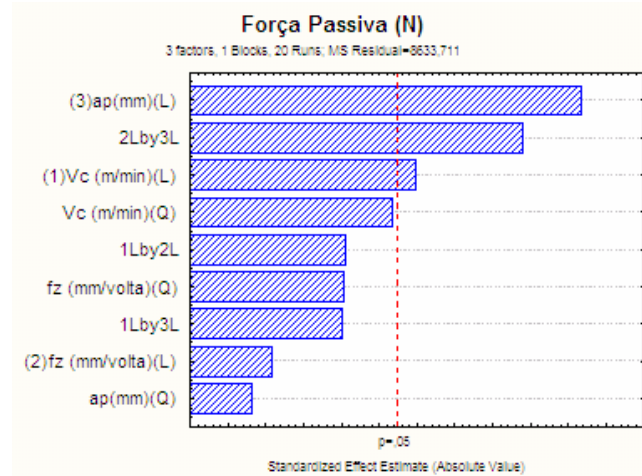


Figura 4.9: Pareto para efeito das variáveis independentes na Fp

Segundo os gráficos da Figura 4.10, os valores de força passiva variam em função das variáveis independentes da seguinte maneira:

- Gráfico “Vc x a_p ”:** Valores mínimos de Fp ocorrem para valores mínimos de “ a_p ”;
- Gráfico “Vc x f_z ”:** Valores mínimos Fp ocorrem em duas situações. A primeira com “Vc” de médio para baixo e “ f_z ” mínimo e a segunda com “Vc” médio e “ f_z ” máximo;
- Gráfico “ f_z x a_p ”:** Valores mínimos Fp ocorrem para valores mínimos “ a_p ” e “ f_z ”.

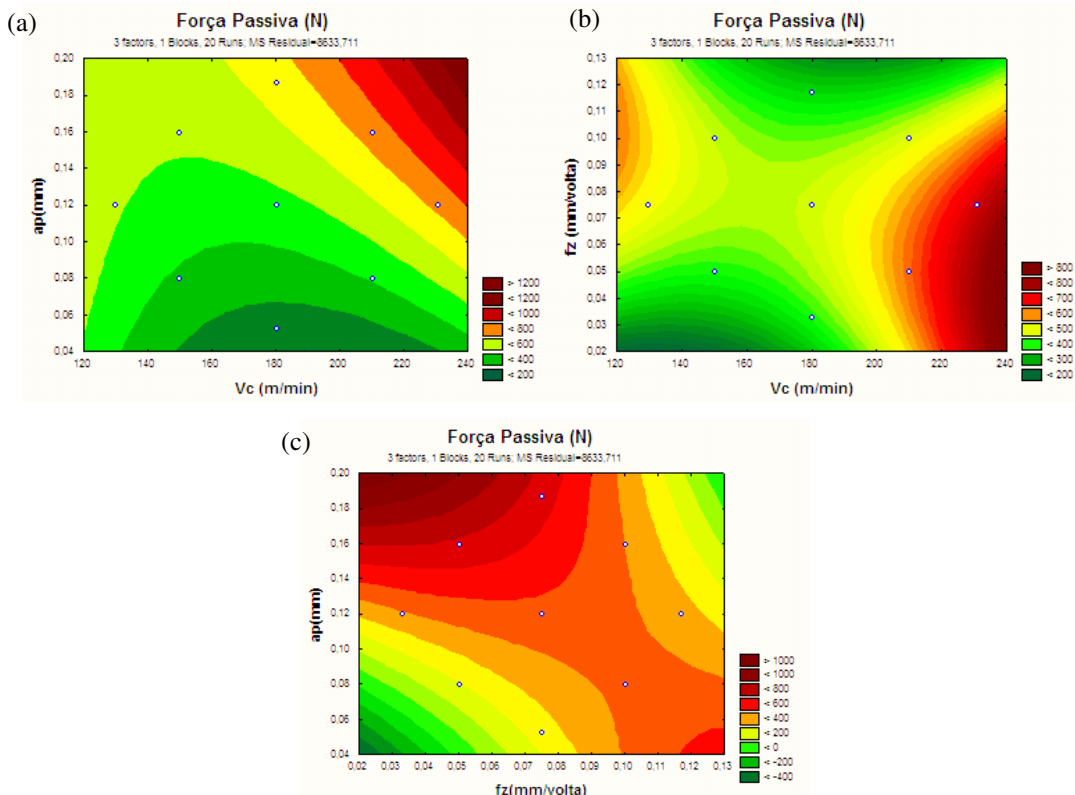


Figura 4.10: Gráficos: “Vc x a_p ”; “Vc x f_z ” e “ f_z x a_p ” para força passiva

A força passiva foi influenciada por “ a_p ”, “ f_z ” e “Vc” diferentemente das outras componentes da força de usinagem, que foram influenciadas somente por “ a_p ” e “ f_z ”.

A força passiva ou de penetração foi a componente do esforço de usinagem que apresentou os maiores valores, influenciando a força resultante com mais intensidade. Isto se deve ao fato de que a força passiva é muito dependente da penetração da ferramenta, pois a mesma é a que oferece maior resistência a ação da ferramenta de corte, exigindo, conseqüentemente, uma força maior.

4.2.1.5 Força resultante

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

Corpo	Vc (m/min)	fz (mm/volta)	ap (mm)	Fresult (N)
1	150,0000	0,050000	0,080000	132,39
2	150,0000	0,050000	0,160000	601,23
3	150,0000	0,100000	0,080000	613,97
4	150,0000	0,100000	0,160000	420,03
5	210,0000	0,050000	0,080000	331,68
6	210,0000	0,050000	0,160000	874,25
7	210,0000	0,100000	0,080000	462,90
8	210,0000	0,100000	0,160000	608,43
9	129,5462	0,075000	0,120000	538,27
10	230,4538	0,075000	0,120000	769,06
11	180,0000	0,032955	0,120000	493,43
12	180,0000	0,117045	0,120000	283,45
13	180,0000	0,075000	0,052728	257,59
14	180,0000	0,075000	0,187272	694,22
15	180,0000	0,075000	0,120000	417,42
16	180,0000	0,075000	0,120000	518,53
17	180,0000	0,075000	0,120000	533,30
18	180,0000	0,075000	0,120000	582,53
19	180,0000	0,075000	0,120000	633,85
20	180,0000	0,075000	0,120000	310,25

Tabela 4.9: Resultados da força resultante

Observou-se que, a força resultante foi influenciada pela profundidade de corte (a_p), pela velocidade de corte (V_c) e pela interação entre a profundidade de corte (a_p) e avanço por faca (f_z), conforme a Figura 4.11 e Tabela 4.10.

	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	499,339	41,01203	12,17542	0,000000	407,958	590,719	499,339	41,01203	407,958	590,7192
(1)Vc (m/min)(L)	131,478	54,42109	2,41594	0,036313	10,221	252,736	65,739	27,21055	5,110	126,3680
Vc (m/min)(Q)	108,805	52,97746	2,05380	0,067080	-9,236	226,846	54,403	26,48873	-4,618	113,4231
(2)fz (mm/volta)(L)	-27,440	54,42109	-0,50421	0,625036	-148,697	93,818	-13,720	27,21055	-74,349	46,9090
fz (mm/volta)(Q)	-78,735	52,97746	-1,48620	0,168056	-196,776	39,306	-39,368	26,48873	-98,388	19,6529
(3)ap(mm)(L)	248,566	54,42109	4,56746	0,001030	127,308	369,824	124,283	27,21055	63,654	184,9118
ap(mm)(Q)	-16,890	52,97746	-0,31881	0,756429	-134,931	101,151	-8,445	26,48873	-67,465	50,5757
1L by 2L	-108,749	71,10459	-1,52942	0,157155	-267,180	49,682	-54,374	35,55229	-133,590	24,8410
1L by 3L	103,298	71,10459	1,45277	0,176935	-55,133	261,729	51,649	35,55229	-27,566	130,8646
2L by 3L	-264,953	71,10459	-3,72625	0,003935	-423,384	-106,522	-132,477	35,55229	-211,692	-53,2611

Tabela 4.10: ANOVA para efeito das variáveis independentes na Fresult

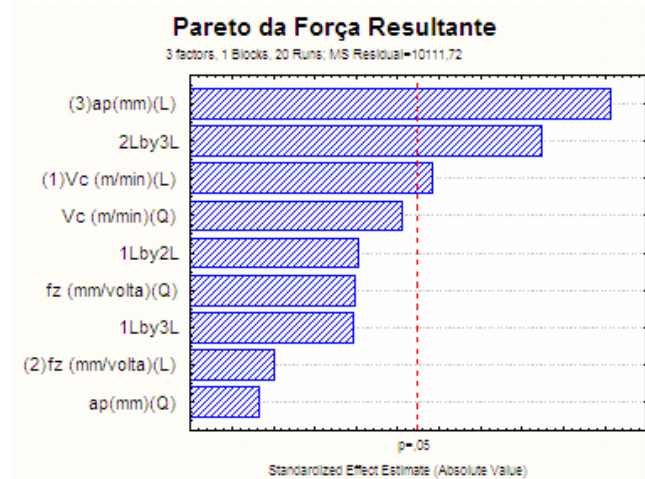


Figura 4.11: Pareto para efeito das variáveis independentes na Fresult

Segundo os gráficos da Figura 4.12, os valores de força resultante variam em função das variáveis independentes da seguinte maneira:

- Gráfico “Vc x a_p ”:** Valores mínimos Fresult ocorrem com valores mínimos de “ a_p ”;
- Gráfico “Vc x f_z ”:** Valores mínimos de Fresult ocorrem em duas situações. A primeira com “Vc” de médio para baixo e “ f_z ” mínimo e a segunda com “Vc” médio e “ f_z ” máximo;
- Gráfico “ f_z x a_p ”:** Valores mínimos Fresult ocorrem para valores mínimos “ a_p ” e “ f_z ”.

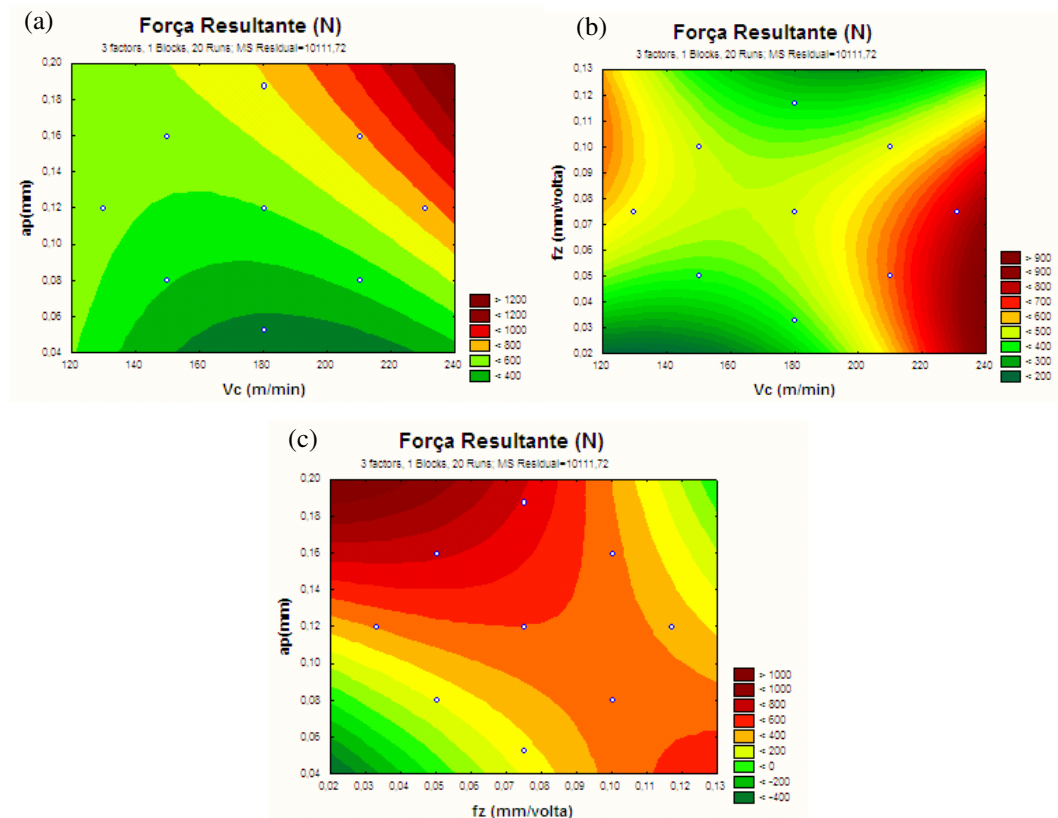


Figura 4.12: Gráficos: “Vc x a_p ”; “Vc x f_z ” e “ f_z x a_p ” para força resultante

4.2.2 Rugosidade

As rugosidades dos corpos de prova foram medidas na direção perpendicular 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.

Corpo	Vc (m/min)	fz (mm/volta)	ap (mm)	Rugos. "Ra"
1	150,00	0,05	0,08	0,11
2	150,00	0,05	0,16	0,16
3	150,00	0,10	0,08	0,18
4	150,00	0,10	0,16	0,23
5	210,00	0,05	0,08	0,11
6	210,00	0,05	0,16	0,09
7	210,00	0,10	0,08	0,16
8	210,00	0,10	0,16	0,21
9	129,55	0,08	0,12	0,14
10	230,45	0,08	0,12	0,16
11	180,00	0,03	0,12	0,09
12	180,00	0,12	0,12	0,13
13	180,00	0,08	0,05	0,21
14	180,00	0,08	0,19	0,15
15	180,00	0,08	0,12	0,28
16	180,00	0,08	0,12	0,16
17	180,00	0,08	0,12	0,08
18	180,00	0,08	0,12	0,22
19	180,00	0,08	0,12	0,14
20	180,00	0,08	0,12	0,16

Tabela 4.11: Resultado da rugosidade “Ra”

Os valores rugosidade “Ra” podem qualificar o processo do fresamento deste experimento pela Tabela 4.12. Segundo a mesma, os resultados apresentaram um valor de rugosidade “Ra” equivalentes aos de um processo de usinagem fina, permitindo concluir que pode substituir operações posteriores de retífica.

Ra (μ inch)	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	0,5
Ra (μ m)	51	25,4	12,7	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,013
Ms (μ inch)	2112	1056	528	265	134	66,2	35,5	16,8	8,4	4,1	2,06	1,03	0,52
Rms (μ m)	53,6	26,8	13,4	6,7	3,4	1,68	0,86	0,42	0,21	0,105	0,053	0,026	0,013
Rmax (μ inch)	-	-	-	590	406	209	103	50	24	12	5,9	2,9	1,5
Rmax (μ m)	-	-	-	15	10,3	5,3	2,70	1,25	0,60	0,30	0,15	0,07	0,04
Corte por chama													
Moldagem em areia													
Laminação a quente													
Forjamento													
Plainamento													
Rasquete													
Corte de serra													
Furação													
Usinagem química													
Corrosão eletrolítica													
Frezamento													
Torneamento													
Mandrilhamento													
Brochamento													
Alargamento													
Moldagem em Conquilha													
Moldagem de precisão													
Extrusão													
Laminação a frio													
Moldagem sobre pressão													
Retífica													
Espelhamento													
Polimento Eletrolítico													
Rolagem													
Polimento													
Lapidação													
Super acabamento													
Aplicação menos comum													
Campo usual de aplicação													

Tabela 4.12: Tabela de Rugosidades (FERCABE, 2008)

Considerando o Nível de Confiança de 95%, nenhuma variável independente foi representativa para os resultados de rugosidade (Figura 4.13 e Tabela 4.13).

	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	0.172972	0.022217	7.78568	0.000015	0.123470	0.222473	0.172972	0.022217	0.123470	0.222473
(1)Vc (m/min)(L)	-0.011183	0.029480	-0.37934	0.712363	-0.076870	0.054503	-0.005592	0.014740	-0.038435	0.027252
Vc (m/min)(Q)	-0.011772	0.028698	-0.41019	0.690316	-0.075716	0.052172	-0.005886	0.014349	-0.037858	0.026086
(2)fz (mm/volta)(L)	0.055250	0.029480	1.87413	0.090393	-0.010436	0.120937	0.027625	0.014740	-0.005218	0.060468
fz (mm/volta)(Q)	-0.040056	0.028698	-1.39576	0.193002	-0.104000	0.023888	-0.020028	0.014349	-0.052000	0.011944
(3)ap(mm)(L)	0.004260	0.029480	0.14452	0.887962	-0.061426	0.069947	0.002130	0.014740	-0.030713	0.034974
ap(mm)(Q)	0.009441	0.028698	0.32899	0.748953	-0.054503	0.073386	0.004721	0.014349	-0.027251	0.036693
1L by 2L	0.007500	0.038518	0.19471	0.849516	-0.078324	0.093324	0.003750	0.019259	-0.039162	0.046662
1L by 3L	-0.017500	0.038518	-0.45433	0.659292	-0.103324	0.068324	-0.008750	0.019259	-0.051662	0.034162
2L by 3L	0.017500	0.038518	0.45433	0.659292	-0.068324	0.103324	0.008750	0.019259	-0.034162	0.051662

Tabela 4.13: ANOVA para efeito das variáveis independentes na rugosidade “Ra”

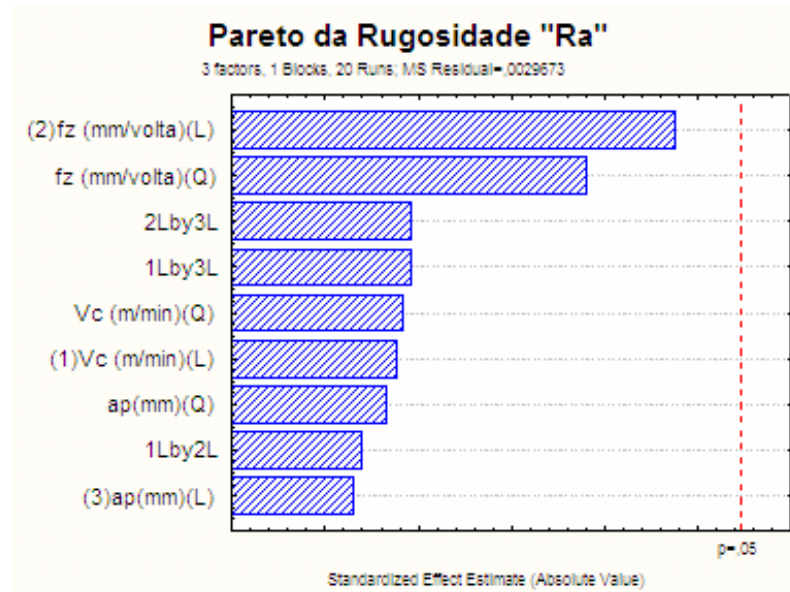


Figura 4.13: Pareto para efeito das variáveis independentes na rugosidade “Ra”

Por outro lado, a variável independente “ f_z ” se destaca das demais, como se observa na Tabela 4.13 e Figura 4.13. A Figura 4.14, então, oferece condições para as seguintes observações:

- Gráfico “ $V_c \times f_z$ ”:** Os valores mínimos de rugosidade ocorrem para os valores mínimos de “ f_z ”;
- Gráfico “ $f_z \times a_p$ ”:** Os valores mínimos de rugosidade ocorrem para os valores mínimos de “ f_z ”.

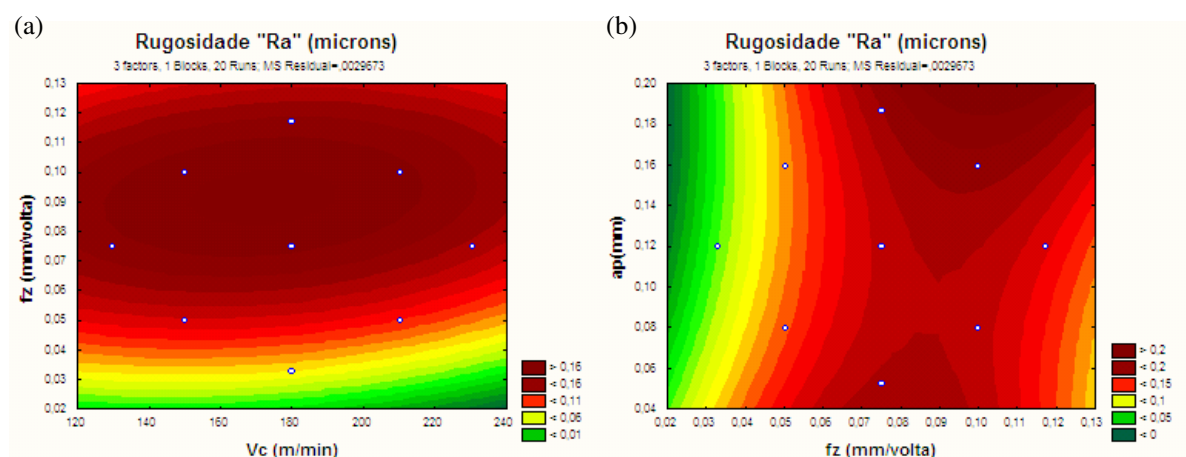


Figura 4.14: Gráficos: “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para rugosidade “Ra”

Uma justificativa para a influencia do “ f_z ” na rugosidade é o fato de que com um avanço alto, obtem-se um comprimento maior de material para 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 plana ou sem ondulações. Essa característica justifica também o fato de quanto maior o “ f_z ” maior a rugosidade, pois o passo das ondulações aumenta e conseqüentemente aumenta a altura média dos picos.

Os resultados encontrados nesta pesquisa corroboram com a Fórmula 4.1, para o cálculo teórico da Rugosidade “Ra”, onde o avanço (f) e o raio de ponta da ferramenta (r_e) são os únicos parâmetros de influência (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989 apud DAVIM; GAITONDE; KARNIK, 2008).

$$R_a = \frac{1000 f^2}{32 r_e} \quad (4.1)$$

4.2.3 Camada branca

As espessuras da camada branca medidas foram organizadas segundo Tabela 4.14 onde se observou uma grande uniformidade nestas camadas, facilitando as medições e análise.

A Figura 4.15 é a micrografia da amostra do corpo de prova 1 com ampliação de 500x, onde se observa uma estrutura martensítica revenida logo abaixo da camada branca, devido ao tratamento térmico. As fotos dos demais corpos de prova estão em anexo 2.

Corpo	Vc (m/min)	fz (mm/volta)	ap (mm)	Espessura (μ m)
1	150,00	0,05	0,08	4,38
2	150,00	0,05	0,16	2,50
3	150,00	0,10	0,08	1,88
4	150,00	0,10	0,16	0,63
5	210,00	0,05	0,08	1,25
6	210,00	0,05	0,16	1,25
7	210,00	0,10	0,08	1,25
8	210,00	0,10	0,16	1,88
9	129,55	0,08	0,12	1,25
10	230,45	0,08	0,12	1,25
11	180,00	0,03	0,12	1,25
12	180,00	0,12	0,12	1,25
13	180,00	0,08	0,05	1,25
14	180,00	0,08	0,19	1,88
15	180,00	0,08	0,12	1,25
16	180,00	0,08	0,12	1,88
17	180,00	0,08	0,12	1,25
18	180,00	0,08	0,12	2,50
19	180,00	0,08	0,12	1,88
20	180,00	0,08	0,12	2,50

Tabela 4.14: Resultados da espessura da camada branca

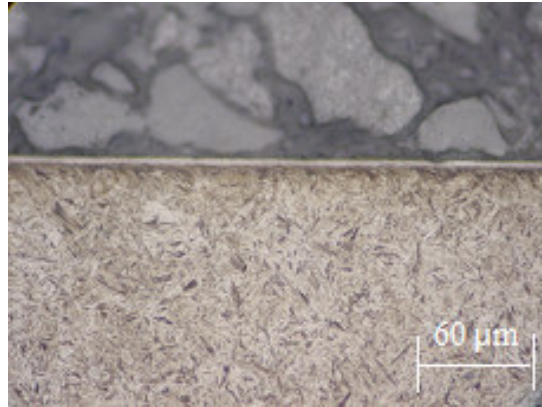


Figura 4.15: Camada branca do corpo de prova 1

Analisando as fotos dos corpos de prova nota-se que, em todos eles, formou-se a camada branca. Uma justificativa para isso é que o mecanismo de escoamento plástico tenha produzido uma estrutura homogênea e refinada na superfície dos corpos e que, sendo a usinagem executada no material endurecido, a temperatura de corte se elevou o suficiente para provocar uma re-têmpera da superfície. O aço SAE 4340, rico em carbono, também favorece esse mecanismo (BOSHEH; MATINVEGA, 2005).

Observou-se que, a espessura de camada branca foi influenciada pela interação entre a velocidade de corte (V_c) e avanço por faca (f_z), conforme a Figura 4.16 e Tabela 4.15.

	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	1,857163	0,283043	6,56143	0,000064	1,22650	2,487821	1,857163	0,283043	1,226505	2,487821
(1) V_c (m/min) (L)	-0,549175	0,375585	-1,46219	0,174394	-1,38603	0,287680	-0,274587	0,187792	-0,693015	0,143840
V_c (m/min) (Q)	-0,208791	0,365621	-0,57106	0,580567	-1,02345	0,605864	-0,104395	0,182811	-0,511723	0,302932
(2) f_z (mm/volta) (L)	-0,549175	0,375585	-1,46219	0,174394	-1,38603	0,287680	-0,274587	0,187792	-0,693015	0,143840
f_z (mm/volta) (Q)	-0,208791	0,365621	-0,57106	0,580567	-1,02345	0,605864	-0,104395	0,182811	-0,511723	0,302932
(3) a_p (mm) (L)	-0,212183	0,375585	-0,56494	0,584563	-1,04904	0,624671	-0,106092	0,187792	-0,524519	0,312336
a_p (mm) (Q)	0,012180	0,365621	0,03331	0,974080	-0,80248	0,826835	0,006090	0,182811	-0,401238	0,413418
1L by 2L	1,250000	0,490725	2,54725	0,029000	0,15660	2,343403	0,625000	0,245362	0,078298	1,171702
1L by 3L	0,937500	0,490725	1,91044	0,085143	-0,15590	2,030903	0,468750	0,245362	-0,077952	1,015452
2L by 3L	0,312500	0,490725	0,63681	0,538550	-0,78090	1,405903	0,156250	0,245362	-0,390452	0,702952

Tabela 4.15: ANOVA para efeito das variáveis independentes na espessura de camada branca

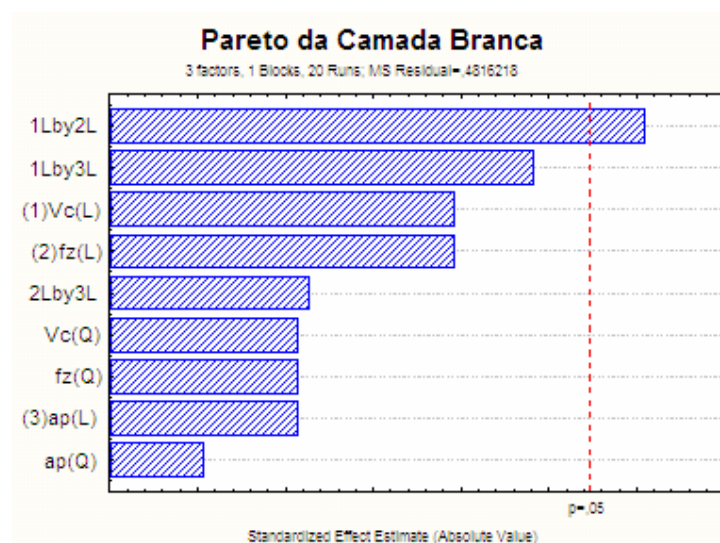


Figura 4.16: Pareto para efeito das variáveis independentes na espessura de camada branca

Segundo os gráficos da Figura 4.17, os valores de espessura de camada branca variam em função das variáveis independentes da seguinte maneira:

- Gráfico “Vc x a_p”:** As espessuras mínimas de camada branca ocorrem em duas situações. A primeira com valores de profundidade máximos e “Vc” mínimos e a segunda com valores de profundidade mínimos e “Vc” máximos;
- Gráfico “Vc x f_z”:** As espessuras mínimas de camada branca ocorrem em duas situações. Uma com valores de avanço máximos e “Vc” mínimos e outra com valores de avanço mínimos e “Vc” máximos;
- Gráfico “f_z x a_p”:** Os valores estudados tendem a valores baixos de espessura de camada branca com profundidade média para baixa e “f_z” máximos.

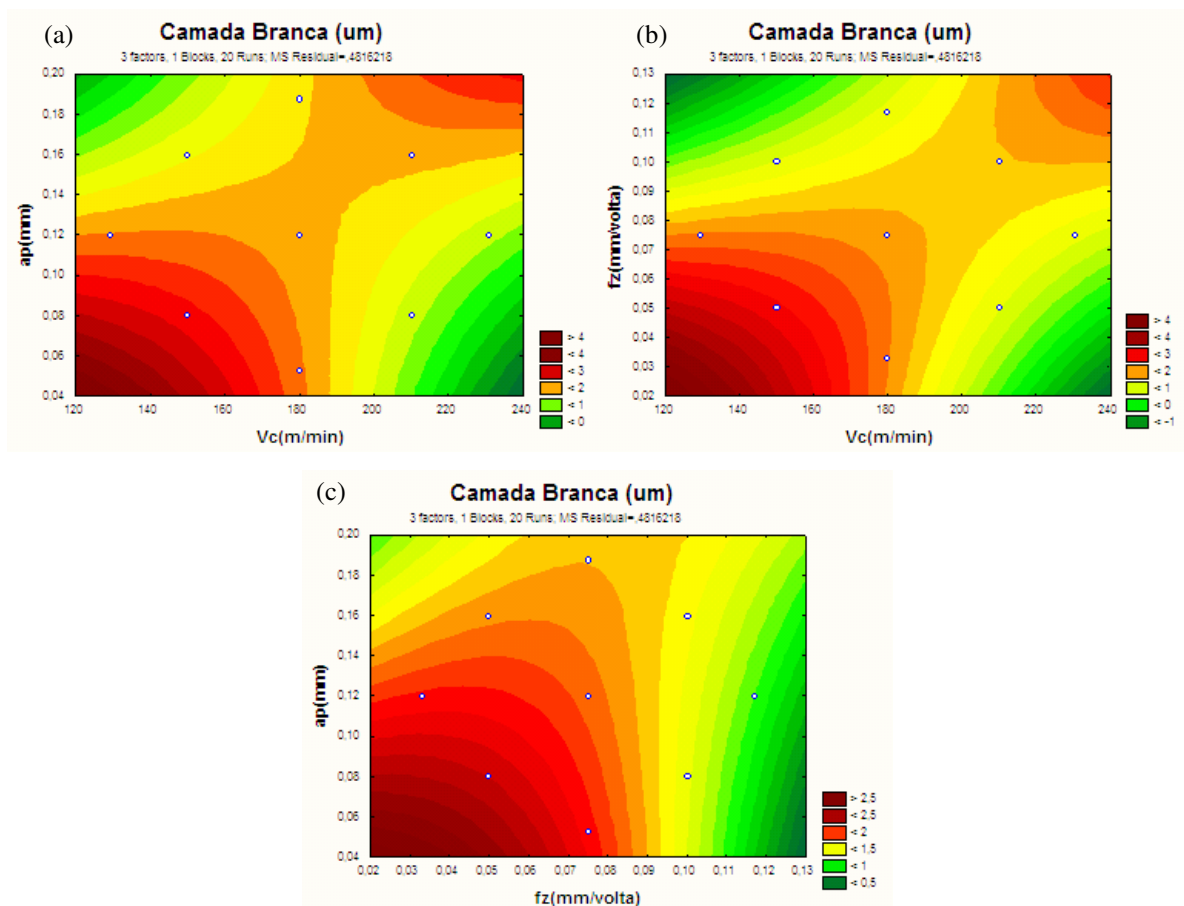


Figura 4.17: Gráficos: “Vc x a_p”; “Vc x f_z” e “f_z x a_p” para espessura de camada branca

O parâmetro “ f_z ”, na faixa de valores médios para mínimos, favorece a ocorrência de uma espessura crescente de camada branca. Isto se deve ao fato, do menor avanço propiciar um maior tempo de contato entre a peça e a ferramenta, e que, aumentando a temperatura da peça, o que facilita a formação desta camada.

O parâmetro velocidade de corte “ V_c ” influencia a espessura da camada branca em função de sua intensidade, ou seja, um valor mínimo de “ V_c ”, tanto proporciona uma alta espessura de camada branca, quanto uma pequena espessura. Esse comportamento pode ser justificado pelo delta de temperatura na peça, a temperatura é a grande responsável por gerar a re-têmpera na superfície, e conseqüentemente, a camada branca. Baseado na Figura 2.2, que demonstra uma diminuição da temperatura transferida para a peça em função do aumento da “ V_c ”. Em contrapartida, aumenta a energia do sistema e, por conseguinte, maior a temperatura na peça. Contudo, com o aumento do “ V_c ” tem-se uma reação de diminuição de temperatura na superfície e outra de aumento.

Esta pode ser uma razão pela qual os autores BOSHEH; MATIVENGA (2005) e BRAGHINI (2002) têm opiniões contrárias sobre o efeito do parâmetro “ V_c ”. Enquanto BOSHEH; MATIVENGA (2005) concluíram em seus estudos que a espessura da camada branca diminui com o aumento da velocidade de corte (V_c), devido à redução da temperatura na superfície (Figura 2.2). O autor BRAGHINI (2002) defende um aumento de espessura em consequência do aumento do “ V_c ”, devido ao aumento de energia acumulada na peça.

4.2.4 Tensão residual

As tensões residuais, medidas pelo método do furo cego, foram apresentadas em termos dos seus respectivos perfis, a partir das superfícies das peças e podem ser vistas no anexo 2. A Figura 4.18 mostra o comportamento típico do perfil das tensões residuais medidas no corpo de prova 7. A Tabela 4.16 reúne os valores da tensão residual na superfície e no pico de compressão dos corpos de prova.

CP	Tensão Superfície		Tensão mínima (pico)	
	X (MPa)	Y (MPa)	X (MPa)	Y (MPa)
1	-45	-18	-330	-46
2	156	180	-461	-443
3	3	117	-35	3
4	-59	-63	-99	-128
5	117	210	-457	-415
6	122	13	-5	-32
7	63	165	-357	-316
8	96	60	-564	-371
9	-33	-20	-82	-111
10	60	11	-24	-43
11	234	67	-631	-387
12	-95	-111	-248	-202
13	139	116	-272	-298
14	48	132	-102	-65
15	5	-53	-128	-132
16	102	-56	-315	-423
17	-33	23	-191	-169
18	-76	-275	-188	-629
19	-170	-92	-183	-214
20	-95	39	-592	-419

x Na direção do avanço

y Direção perpendicular ao avanço

Tabela 4.16: Resultados da tensão residual

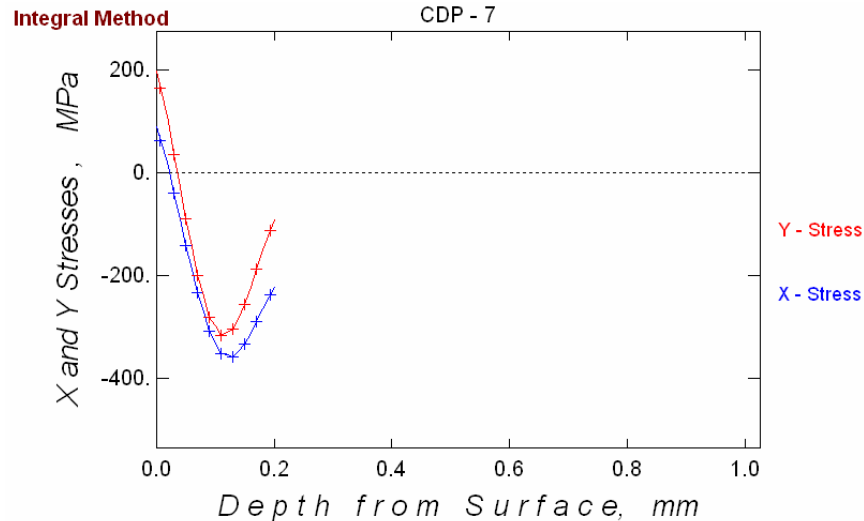


Figura 4.18: Corpo de prova 7 - Tensão residual em função da profundidade da superfície

Como pode ser notado no gráfico do corpo de prova 7 (Figura 4.18), a tensão residual na superfície é de tração e à medida que se aprofunda no corpo, tende a inverter, tornando-se de compressão, até atingir seu pico por volta de 0,1mm de profundidade. A seguir cresce retornando para uma tensão de tração, comportamento observado nos corpos de prova 2 – 3 – 5 – 6 – 7 – 8 – 10 – 11 – 13 – 14 – 15 – 16. Os outros corpos de prova mostraram o mesmo comportamento, embora com tensões residuais de compressão na superfície.

Uma explicação para este comportamento pode ser dada com base na ação simultânea do efeito térmico e mecânico (MATSUMOTO; BARASH; LIU, 1986). Durante a usinagem a seco, a camada próxima à superfície sofre mais aquecimento e dilatação que as camadas interiores. Após o corte, a superfície permanece mais aquecida, uma vez que o resfriamento ocorre do núcleo para a superfície do corpo. A sub-superfície depois de dilatada resfria-se mais rapidamente que a externa (superfície), comprimindo-se e por reação, tracionando a superfície.

Como as curvas de tensão residual na direção do avanço (X), e na direção perpendicular ao avanço (Y), apresentaram comportamentos semelhantes, a análise estatística foi realizada para a tensão residual em “X”, ou seja, na direção do avanço, tanto para a tensão residual de tração na superfície, como para a tensão sub-superficial de compressão (tensão residual máxima de compressão).

Os resultados da tensão residual superficial, segundo a Tabela 4.17 e a Figura 4.19, mostraram que, a variável mais representativa foi o avanço por faca “fz”.

	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	-44,226	35,96989	-1,22954	0,247014	-124,372	35,9196	-44,2263	35,96989	-124,372	35,91960
(1)Vc (m/min)(L)	73,136	47,73040	1,53228	0,156456	-33,214	179,4864	36,5682	23,86520	-16,607	89,74319
Vc (m/min)(Q)	37,435	46,46426	0,80567	0,439173	-66,094	140,9635	18,7173	23,23213	-33,047	70,48175
(2)fz (mm/volta)(L)	-117,203	47,73040	-2,45551	0,033936	-223,553	-10,8527	-58,6013	23,86520	-111,776	-5,42635
fz (mm/volta)(Q)	77,033	46,46426	1,65789	0,128332	-26,496	180,5615	38,5163	23,23213	-13,248	90,28074
(3)ap(mm)(L)	3,508	47,73040	0,07350	0,942854	-102,842	109,8584	1,7542	23,86520	-51,421	54,92918
ap(mm)(Q)	94,003	46,46426	2,02313	0,070610	-9,526	197,5320	47,0016	23,23213	-4,763	98,76602
1L by 2L	21,750	62,36278	0,34877	0,734497	-117,203	160,7029	10,8750	31,18139	-58,601	80,35146
1L by 3L	-25,250	62,36278	-0,40489	0,694085	-164,203	113,7029	-12,6250	31,18139	-82,101	56,85146
2L by 3L	-58,750	62,36278	-0,94207	0,368359	-197,703	80,2029	-29,3750	31,18139	-98,851	40,10146

Tabela 4.17: ANOVA para efeito das variáveis independentes na tensão residual superficial

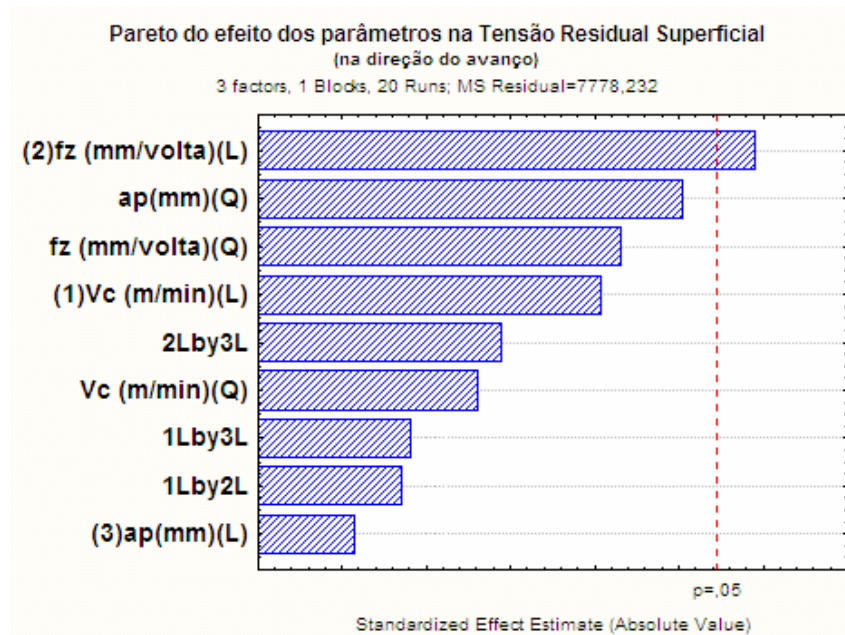


Figura 4.19: Pareto para efeito das variáveis independentes na tensão residual superficial

Segundo os gráficos da Figura 4.20, os valores de tensão residual na superfície variam em função das variáveis independentes da seguinte maneira:

- Gráfico “ $V_c \times a_p$ ”:** Observa-se um extremo positivo devido à curvatura da superfície de resposta. Os valores com menores tensões residuais posicionam-se no quadrante com “ V_c ” abaixo da média e “ a_p ” médio;
- Gráfico “ $V_c \times f_z$ ”:** O comportamento de extremo positivo se repetiu e os valores com menores tensões residuais posicionam-se no quadrante com “ V_c ” abaixo da média e “ f_z ” acima da média;
- Gráfico “ $f_z \times a_p$ ”:** Novamente o comportamento de extremo positivo se repetiu e os valores com menores tensões residuais posicionam-se no quadrante com “ f_z ” acima da média e “ a_p ” médio.

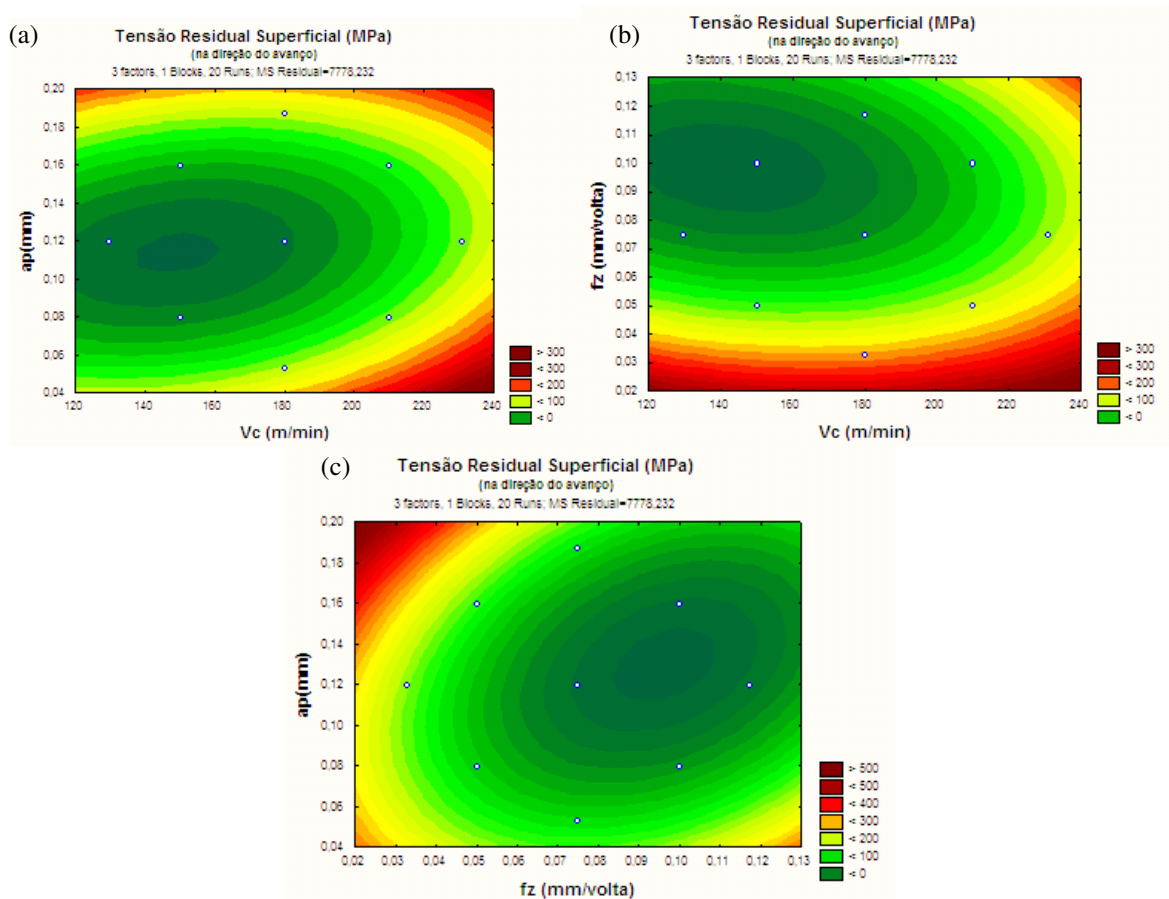


Figura 4.20: Gráficos: “ $V_c \times a_p$ ”; “ $V_c \times f_z$ ” e “ $f_z \times a_p$ ” para tensão residual superficial

Segundo a Tabela 4.18 e a Figura 4.21, observa-se que a tensão residual máxima de compressão (pico) foi influenciada significativamente pela interação linear das variáveis “ f_z ” e “ V_c ”.

	Effect	Std.Err.	t(10)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	-264,087	67,8375	-3,89294	0,002995	-415,238	-112,936	-264,087	67,83749	-415,238	-112,936
(1)Vc (m/min)(L)	-52,788	90,0173	-0,58642	0,570595	-253,359	147,783	-26,394	45,00863	-126,679	73,892
Vc (m/min)(Q)	123,549	87,6294	1,40990	0,188903	-71,701	318,799	61,775	43,81469	-35,851	159,400
(2)fz (mm/volta)(L)	123,327	90,0173	1,37003	0,200649	-77,244	323,898	61,663	45,00863	-38,622	161,949
fz (mm/volta)(Q)	-149,748	87,6294	-1,70888	0,118271	-344,998	45,503	-74,874	43,81469	-172,499	22,751
(3)ap(mm)(L)	49,192	90,0173	0,54647	0,596721	-151,379	249,763	24,596	45,00863	-75,689	124,882
ap(mm)(Q)	28,797	87,6294	0,32862	0,749221	-166,454	224,047	14,398	43,81469	-83,227	112,024
1L by 2L	-279,000	117,6132	-2,37218	0,039131	-541,059	-16,941	-139,500	58,80661	-270,529	-8,471
1L by 3L	110,000	117,6132	0,93527	0,371685	-152,059	372,059	55,000	58,80661	-76,029	186,029
2L by 3L	-148,000	117,6132	-1,25836	0,236847	-410,059	114,059	-74,000	58,80661	-205,029	57,029

Tabela 4.18: ANOVA para efeito das variáveis independentes na tensão residual máxima de compressão

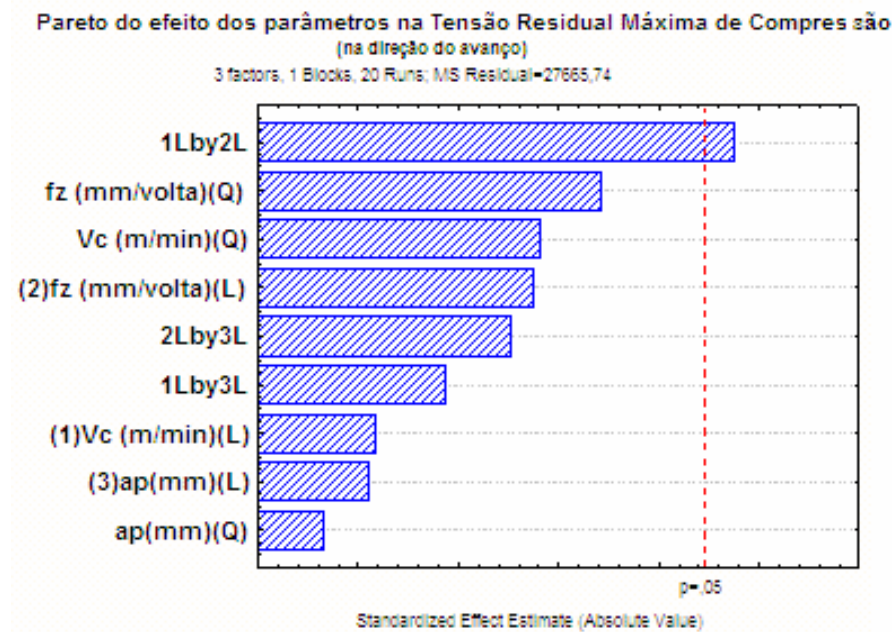


Figura 4.21: Pareto para efeito das variáveis independentes na tensão residual máxima de compressão

Segundo os gráficos da Figura 4.22, os valores das tensões residuais máximas de compressão variam em função das variáveis independentes da seguinte maneira:

- Gráfico “Vc x a_p”:** Os valores mínimos da tensão residual máxima de compressão ocorrem com “a_p” mínimos e “Vc” máximos;
- Gráfico “Vc x f_z”:** Os valores mínimos de tensão residual máxima de compressão ocorrem em duas situações. A primeira com “f_z” mínimo e “Vc” abaixo da média e a segunda com “f_z” máximo e “Vc” acima da média;
- Gráfico “f_z x a_p”:** Os valores mínimos da tensão residual máxima de compressão ocorrem com “f_z” e “a_p” mínimos.

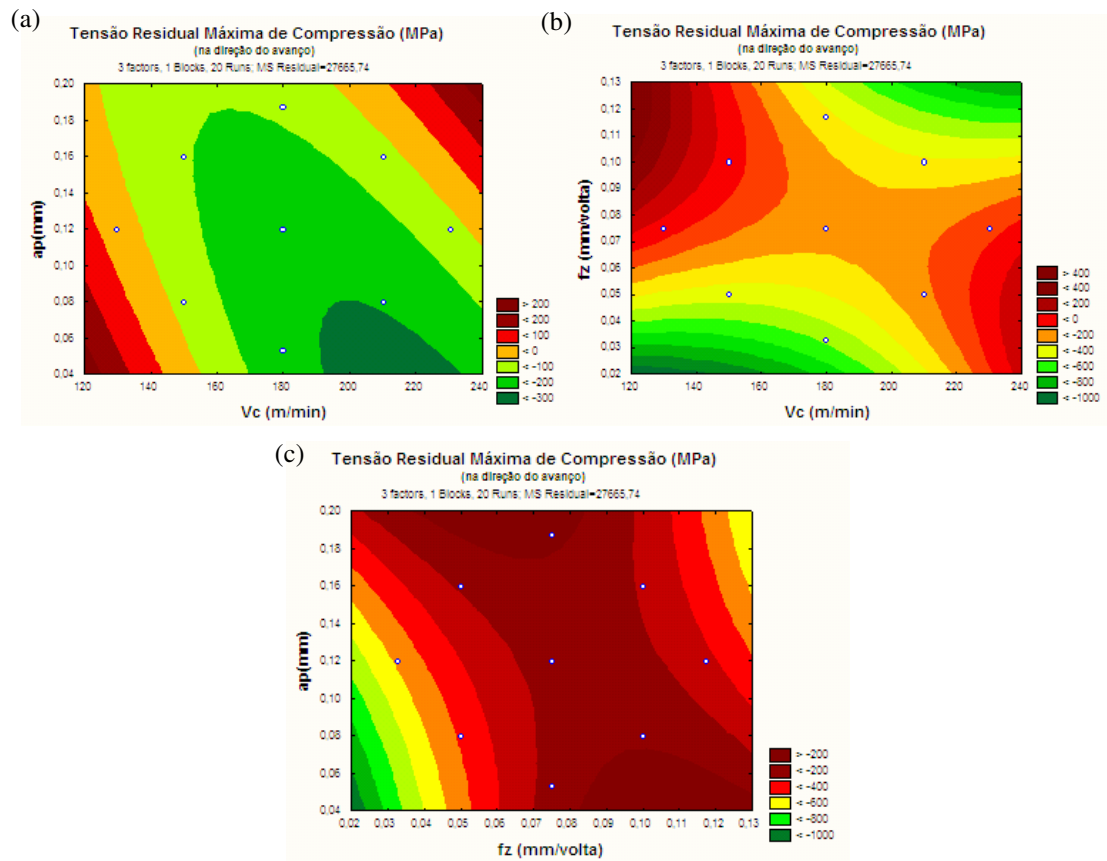


Figura 4.22: Gráficos: “Vc x a_p ”; “Vc x f_z ” e “ f_z x a_p ” para tensão residual máxima de compressão

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões sobre os esforços de corte

- A Tabela 5.1 reúne as principais conclusões relativas aos esforços de corte.

Momento Torçor			RESUMO
<	Avanço e Profundidade	Menor Avanço e menor Profundidade	
>		Maior Profundidade e menor Avanço	
Médio		Maior Avanço e menor Profundidade	
<	Avanço e Vel. de Corte	Menor Avanço e menor Veloc. de Corte	Tendo menor Avanço, menor Profundidade e menor Velocidade de Corte, temos menor Momento Torçor.
>		Maior Veloc. de Corte e menor Avanço	
Médio		Médio Avanço e média Veloc. de Corte	
<	Profundidade e Vel. de Corte	Veloc. de Corte média e menor Profundidade	Tendo menor Avanço, maior Profundidade e maior Velocidade de Corte temos um maior Momento Torçor.
>		Maior Veloc. de Corte e maior Profundidade	
Médio		Veloc. de Corte média e maior Profundidade	
Força Tangencial			RESUMO
<	Avanço e Profundidade	Menor Avanço e menor Profundidade	
>		Maior profundidade e menor Avanço	
Médio		Maior Avanço e menor Profundidade	
<	Avanço e Vel. de Corte	Menor Avanço e menor Veloc. Corte	Tendo menor Avanço, menor Profundidade e menor Velocidade de Corte temos menor Força Tangencial.
>		Menor Avanço e maior Veloc. de Corte	
Médio		Médio Avanço e média Veloc. de Corte	
<	Profundidade e Vel. de Corte	Veloc. de Corte média e menor Profundidade	Tendo maior Profundidade, menor Avanço e maior Velocidade de Corte temos maior Força Tangencial.
>		Maior Profundidade e maior Veloc. de Corte	
Médio		Média Veloc. de Corte e maior Profundidade	
Força de Passiva			RESUMO
<	Avanço e Profundidade	Menor Avanço e menor Profundidade	
>		Maior Profundidade e menor Avanço	
Médio		Maior Avanço e menor Profundidade	
<	Avanço e Vel. de Corte	Menor Avanço e menor Veloc. de Corte	Tendo menor Avanço, menor Profundidade e menor Velocidade de Corte temos menor Força de Passiva.
>		Maior Veloc. Corte e menor Avanço	
Médio		Maior Avanço e menor Veloc. de Corte	
<	Profundidade e Vel. de Corte	Veloc. de Corte média e min Profundidade	Tendo maior Profundidade, menor Avanço e maior Velocidade de Corte temos maior Força de Passiva.
>		Maior Veloc. de Corte e maior Profundidade	
Médio		Média Veloc. de corte e maior Profundidade	
Força Radial			RESUMO
<	Avanço e Profundidade	Menor Avanço e menor Profundidade	
>		Menor Avanço e maior Profundidade	
Médio		Maior Avanço e menor Profundidade	
<	Avanço e Vel. de Corte	Menor Avanço e menor Veloc. de Corte	Tendo menor Avanço, menor Profundidade e menor Velocidade de Corte temos menor Força Radial.
>		Maior Vel. de Corte e médio Avanço	
Médio		Médio Avanço e média Veloc. de Corte	
<	Profundidade e Vel. de Corte	Média Veloc. de Corte e menor Profundidade	Tendo maior Avanço, maior Profundidade e maior Velocidade de Corte temos maior Força Radial.
>		Maior Prof. e maior Veloc. de Corte	
Médio		Média Veloc. de Corte e máx Profundidade	
Força Resultante			RESUMO
<	Avanço e Profundidade	Menor Avanço e menor Profundidade	
>		Maior Profundidade e menor Avanço	
Médio		Maior Avanço e menor Profundidade	
<	Avanço e Vel. de Corte	Menor Avanço e menor Veloc. de Corte	Tendo menor Avanço, menor Profundidade e menor Velocidade de Corte temos menor Força Resultante.
>		Maior Vel. Corte e um Avanço de min. a médio	
Médio		Maior Avanço e menor Veloc. de Corte	
<	Profundidade e Vel. de Corte	Média Veloc. de Corte e min Prof.	Tendo maior Profundidade, menor Avanço e maior Velocidade de Corte temos maior Força Resultante.
>		Maior Prof. e maior Veloc. de Corte	
Médio		Média Veloc. de Corte e máx. Prof.	
RESUMO GERAL			
Tendo menor Avanço, menor Profundidade e menor Velocidade de Corte temos menores Esforços de Corte.			
Tendo maior Avanço, maior Profundidade e maior Velocidade de Corte temos maiores Esforços de Corte.			

Tabela 5.1: Resumo do comportamento das forças de corte

- A força resultante foi significativamente influenciada pela força passiva ou de penetração.
- A profundidade de corte (a_p) foi o parâmetro de maior efeito sobre os esforços de corte.
- O avanço por faca (f_z) influenciou os resultados das forças de corte quando agiu simultaneamente com a profundidade de penetração(a_p), sendo portanto, potencializador do efeito da profundidade de corte (a_p).
- A velocidade de corte (V_c) influenciou as forças de usinagem com menor intensidade que os demais parâmetros estudados.
- As forças de usinagem cresceram com o aumento da velocidade de corte.

5.2 Conclusões sobre a rugosidade

- A Tabela 5.2 reúne as principais conclusões relativas à rugosidade.

Rugosidade			
<	Avanço e Profundidade	Avanço baixo	Valores tendem a uma rugosidade baixa ou fina com um menor avanço
>		Avanço alto	
Médio			
<	Avanço e Vel. de corte	Avanço baixo	
>		Avanço alto	
Médio			
<	Profundidade e Vel. de Corte	Não analisado (Avanço é o único parâmetro que influencia a rugosidade)	Valores tendem a uma rugosidade alta com um maior avanço
>			
Médio			

Tabela 5.2: Resumo do comportamento da rugosidade

- Os valores medidos da rugosidade “Ra” variaram entre 0,08 e 0,27 μ m.
- Os resultados obtidos, em termos de acabamento superficial, foram similares aos resultados de operações de usinagem fina, como a retífica ou mesmo a lapidação.
- No domínio dos experimentos executados, a rugosidade não dependeu das variáveis do processo. O valor médio de “Ra” representou com confiabilidade a rugosidade da peça.
- O avanço por faca (f_z) foi o único parâmetro que se destacou dos demais na influência da rugosidade, mesmo que em baixa intensidade.
- Quanto maior foi o avanço por faca (f_z) pior ficou a superfície em termos da topografia da superfície ou rugosidade.

5.3 Conclusões sobre a camada branca

- A Tabela 5.3 reúne as principais conclusões relativas a espessura de camada branca.

Espessura de Camada Branca			
<	Avanço e Profundidade	Maior avanço e menor profundidade	Valores tendem a uma menor espessura de camada branca com um maior avanço, menor profundidade e alta velocidade de corte
>		Menor profundidade e menor avanço	
Médio		Maior profundidade e médio avanço	
<	Avanço e Vel. de corte	Variável	Valores tendem a uma maior espessura de camada branca com um menor avanço, menor profundidade e menor velocidade de corte
>		Menor vel. de corte e menor avanço	
Médio		Média vel. de corte e médio avanço	
<	Profundidade e Vel. de Corte	Profundidade baixa e alta velocidade de corte	Valores tendem a uma maior espessura de camada branca com um menor avanço, menor profundidade e menor velocidade de corte
>		Menor vel. de corte e menor profundidade	
Médio		Média vel. de corte e média profundidade	

Tabela 5.3: Resumo do comportamento da espessura da camada branca

- Todos os corpos de prova apresentaram camada branca na superfície.
- A profundidade de corte (a_p) influenciou muito pouco a espessura de camada branca.
- O avanço por faca (f_z) influenciou expressivamente a espessura de camada branca quando agiu simultaneamente com a velocidade de corte “Vc”.

5.4 Conclusões sobre a tensão residual

- As tensões residuais tenderam a ser de tração na superfície dos corpos de prova e de compressão na sub-superfície.
- Na sub-superfície, em profundidades de cerca de 0,1 mm, todos os corpos de prova apresentaram picos de tensão residual de compressão, para depois retornar a valores de tração.
- Considerando a medição das tensões na direção do avanço, o valor máximo de tração na superfície foi de 234 MPa e o máximo de compressão na sub-superfície foi de -631 MPa.
- A Tabela 5.4 reúne as principais conclusões relativas a tensão residual superficial.

Tensão Residual Superficial			
<	Avanço e Profundidade	Maior avanço e profundidade média	Valores tendem a uma menor tensão residual superficial com um maior avanço, menor velocidade de corte e profundidade média.
>		Maior profundidade e menor avanço	
Médio		Menor profundidade e menor avanço	
<	Avanço e Vel. de corte	Maior avanço e menor velocidade de corte	Valores tendem a um maior tensão residual superficial com um menor avanço e maior velocidade de corte.
>		Maior vel. de corte e menor avanço	
Médio		Maior vel. de corte e médio avanço	
<	Profundidade e Vel. de Corte	Profundidade média e menor veloc. de corte	Valores tendem a um maior tensão residual superficial com um menor avanço e maior velocidade de corte.
>		Maior vel. de corte e menor profundidade	
Médio		Maior vel. de corte e média profundidade	

Tabela 5.4: Resumo do comportamento da tensão residual superficial

- O avanço por faca “ f_z ” foi o parâmetro que mais influenciou a tensão residual superficial.
- A velocidade de corte (V_c) e a profundidade de corte (a_p) pouco influenciaram a tensão residual superficial.
- A Tabela 5.5 reúne as principais conclusões relativas a tensão residual máxima de compressão.

Tensão Residual Máxima de Compressão			
<	Avanço e Profundidade	Menor avanço e menor profundidade	Valores tendem a uma menor tensão residual máxima de compressão com menor avanço e menor profundidade
>		Maior avanço	
Médio		Maior profundidade e maior avanço	
<	Avanço e Vel. de corte	Menor avanço e menor velocidade de corte	Valores tendem a uma maior tensão residual máxima de compressão com maior avanço e menor velocidade de corte
>		Menor vel. de corte e maior avanço	
Médio		Vel. de corte média e médio avanço	
<	Profundidade e Vel. de Corte	Menor profundidade e maior veloc. de corte	Valores tendem a uma maior tensão residual máxima de compressão com maior avanço e menor velocidade de corte
>		Nos valores altos e baixos de cada variável	
Médio		Maior vel. de corte e menor profundidade	

Tabela 5.5: Resumo do comportamento da tensão residual máxima de compressão

- A profundidade de corte (a_p) pouco influenciou a tensão residual máxima de compressão.
- O avanço por faca (f_z) teve influencia expressiva na tensão residual máxima de compressão quando agiu simultaneamente com o “ V_c ”.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base no estudo realizado neste trabalho e das conclusões obtidas, pode-se sugerir os seguintes temas para a realização de trabalhos futuros:

- a) Avaliar a correlação entre a dinâmica do processo do fresamento de aços endurecidos com a integridade superficial;
- b) Avaliar a influência do desgaste da ferramenta de corte de metal duro na integridade superficial de aços 4340 fresados depois de endurecidos.
- c) Avaliar a influência da ferramenta de corte de CBN na integridade superficial de aços 4340 fresados depois de endurecidos.
- d) Avaliar a influência do desgaste da ferramenta de corte de CBN na integridade superficial de aços 4340 fresados depois de endurecidos

7. BIBLIOGRAFIA

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.

BETHKE, J. **Surface technology in production engineering.** Apostila. Universidade Federal de Santa Catarina: 1993.

BOEHS, L. **Análise de superfícies usinadas.** Apostila – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 1992.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W.A. **Fundamentals of machining and machine tools.** Marcel Dekker, New York: 1989

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, Vol: 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.

BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. **On the experimental attainment of optimum conditions.** J. Royal Stat. Soc., Oxford: 1951.

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.

COOK, N. H., RABINOWICZ, E. **Physical measurement and analysis.** Addison-Wesley, 1963.

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

DEONISIO, C. C. C. **Estudo do fresamento do aço D2 endurecido em altas velocidades de corte.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica, São Paulo: [s.n.], 2004.

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

DONEV, A. N.; ATKINSON, A.C. **Na adjustment algorithm for the construction of exact D-optimum experimental designs.** Technometrics, 1988.

EI-KHABEERY, M. M.; FATTOUH, M. **Residual stress distribution caused by milling.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 29, p. 391-401, 1989.

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

EVANS, E. B. **Residual stress measurement by x-ray diffraction.** 2 ed., SAE Handbook J784a, Society of Automotive Engineers, 1971.

FAVORIT. **Aços especiais.** Disponível em: <http://www.favorit.com.br> Acesso em: 16 setembro 2008.

FERCABE. Disponível em: www.fercabe.com.br Acesso em: 30 de novembro de 2008.

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

GRANT, P.V. et al. **Measurement good practice guide number 53.** UK, National Physical Laboratory, 2002.

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

GUU, Y.H.; HOCHENG, H.; CHOU, C.Y.; DENG, C.S. **Effect of electrical discharge machining on surface characteristics and machining damage of AISI D2 tool steel**. Materials Science and Engineering, v.358, n.1-2, p.37-43, 2003.

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.

KANG, M. C.; KIM, K. K.; LEE, D. W.; KIM, J. S.; KIM, N. K. **Characteristics of inclined planes according to the variations of cutting direction in high speed ball-end milling**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 17, n. 5, p. 323-329, 2001.

KGSORENSEN. **Pontas diamantadas**. Disponível em: <http://www.kgsorensen.com.br>
Acesso em: 16 novembro 2008.

KOCKELMANN, H.; SCHWARZ, T. **Die bohrlochmethode—ein für viele Anwendungsbereiche optimales verfahren zur experimentellen ermittlung von eigenspannungen**. MTB von HBM, 1993.

KÖENIG, W. **Tecnologia da fabricação: torneiar, fresar e furar**. v.1, Aachen: 1981.

KOEPFER, C. **Tooling up for hard turning**. Production Machining. Article, 2007.

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.

KRAIN, H.R.; SHARMAN, A.R.C.; RIDGWAY, K.. **Optimization of tool life and productivity when end milling Inconel 718TM**. 1. ed. Inglaterra: [s.n.], 2006.

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.

LIU, C. R.; BARASH, M. M. **Variables governing patterns of mechanical residuals stress in a machined surface**. Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry, v.104, p.257-264, 1982.

LU, J. **Handbook of measurement of residual stresses**. SEM Inc., 1996.

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.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais.** 4. ed. Uberlândia: Editora Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Apostila. 1999. 224 p.

MATEUS, N. B.; BARBIN, B.; CONAGIN, A. **Viabilidade de uso do delineamento composto central.** Universidade Estadual de Maringá, Paraná: 2001.

MATSUMOTO, Y.; BARASH, M. M.; LIU, C. R. **Effect of hardness on the surface integrity of AISI 4340 steel.** Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry, v.108, p.169-175, 1986.

MICHELLETI, G. F.; KOENIG, W.; VICTOR, R. H. **In process tool wear sensors for cutting operations.** Cirp Annals – Manufacturing technology, v. 25, p. 483 – 496, 1976

MONTGOMERY, D. C. **Diseno y analisis de experimentos.** Ed. John Wiley and Sons, 1991.

MONTGOMERY, D. C.; MYERS, R. H. **Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments.** New York: John Wiley, 1995.

MYERS, R.H. **Response surface methodology.** Boston: Allyn and Bacon, 1971.

NEVES, D. **Uma contribuição ao fresamento de matrizes com fresa de topo.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP: 2002.

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.

NOYAN, I. C.; COHEN, J. B. **Fundamental concepts in stress analysis.** In: Residual stress: measurement by diffraction and interpretation. New York: Springer Verlag, 1987.

NUSSBAUM, G. C. **Rebolos & abrasivos.** 1. ed. São Paulo: Ícone Editora, 1988.

OGLIARI, P. J.; PACHECO, J. A. **Análise estatística usando Statistica 6.0.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 2004.

POULACHON, G.; BANDYOPADHYAY, B. P.; JAWAHIR, I. S.; PHEULPIN, S.; SEGUIN, E. **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.

POULACHON, G.; BANDYOPADHYAY, B. P.; JAWAHIR, I. S.; PHEULPIN, S.; SEGUIN, E. **Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.256, p.302-310, 2003 - B.

POULACHON, G.; ALBERT, A.; SCHURAFF, M.; JAWAHIR, I. F. **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.

PREVEY, P.S. **X-ray diffraction residual stress techniques.** Metals Hand Book, 9ª ed., Ohio: American Society for Metals, v.10, p. 380-392, 1986.

ROBERTS, G. A.; CARY, R. A. **Tool Steel.** 4. ed., Ohio: Editora ASM, 1992. 820p.

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.

SANDIVIK COROMANT. **Catálogo principal.** Catálogo. São Paulo, 2006. 1038p.

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

SANTOS, A. V. et al. **HSM Usinagem em altíssima velocidade.** 1. ed. São Paulo: Érica, 2003.

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.

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

SCHULZ, H. **High speed milling of dies and moulds – cutting conditions and technology.** Annals of the CIRP, v. 44, n. 1, p. 35-38, 1995.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção.** 2. ed., cap. 4 “Projeto em gestão da produção”, São Paulo: Ed. Atlas, 2002.

SOUSA, A. **A medição por coordenadas na garantia da qualidade da produção do 3º milênio.** Apostila de mini-curso. Congresso Brasileiro de Metrologia, 2003.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2 ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1989.

USUDA, H.; KAJIHARA, H.; MACHIDA, M.; ISHIKAWA, M.; NAKAYAMA, N.; NAGATA, H. **Cutting of quenched alloy steel by CBN tools – machinability of quenched alloy with hardness of HRC 60**. Reports of Government Industrial Research Institute, v. 32, n.8, 1983.

VISHAY. **Discrete semiconductors and passive components**. Disponível em: <http://www.vishay.com> Acesso em: 16 novembro 2008.

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of Surface Metrology**. Department of Engineering, University of Warwick, UK: CRC Press, 1994.

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 - Delineamento composto central (DCC)**

Com a execução de delineamentos experimentais mais complexos, que utilizam todas as combinações dos fatores em estudo, várias tentativas têm sido feitas para redução do número de pontos experimentais, através de técnicas como a de repetição fracionada. Além destas técnicas, com o objetivo da redução do número de pontos experimentais, foi criada a técnica que utiliza os delineamentos compostos. Eles 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.

Nessas condições, é comum repetir apenas um tratamento, no caso, o relativo ao ponto central. Posteriormente, foram adaptados a outros ramos da ciência. Várias modificações têm sido propostas tendo como base os delineamentos compostos centrais e não centrais.

Dentre os delineamentos padrões, o Delineamento Composto Central (DCC) é considerado um delineamento ótimo. De acordo com ATKINSON; DONEV (1992), o delineamento composto pertence a uma família de delineamentos eficientes, o qual requer poucos ensaios para sua realização.

Segundo LUCAS (1976) e DONEV; ATKINSON (1988), mostram que o DCC possui características interessantes para a busca da resposta ótima, que são: um número menor de tratamentos em relação aos fatoriais completos e pode ser realizado sequencialmente. Tendo a possibilidade de caminhar no sentido da otimização do sistema, isto é, através da execução de uma parte do experimento com a “técnica do caminhar ascendente ótimo”. Isso consiste em chegar à região que contém o ótimo e, então, comparar a parte do delineamento que consiste dos pontos axiais, com o objetivo de avaliar a parte curvilínea aí existente, de forma a chegar à solução ótima, que maximiza os resultados do sistema. Esta última característica é uma das mais interessantes do delineamento, pois, segundo MONTGOMERY; MYERS (1995) a maioria das aplicações da metodologia de superfície de resposta é de natureza sequencial.

Inicialmente, em um trabalho de pesquisa, buscam-se quais fatores ou variáveis prováveis são importantes no estudo de superfície de resposta. Isto conduz, normalmente, a um delineamento experimental que relacione esses fatores com o objetivo de eliminar as variáveis sem importância. Este tipo de experimento é chamado de experimento de filtragem

(escolha das variáveis que são importantes na análise e descartar as que não têm influência na resposta que se pretende estudar). Além disso, é necessário definir a região que contém o ótimo. É esta a situação que torna o DCC um delineamento bastante interessante.

Duas situações distintas podem ocorrer segundo MYERS (1971): o caso em que a região experimental usada esta 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 planejará 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 sequenciais, descobrir a região vizinha que contém esse ponto.

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 2.14. O DDC 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 DDC 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.

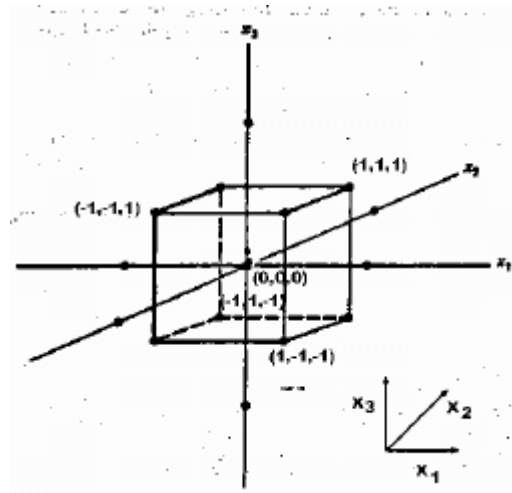
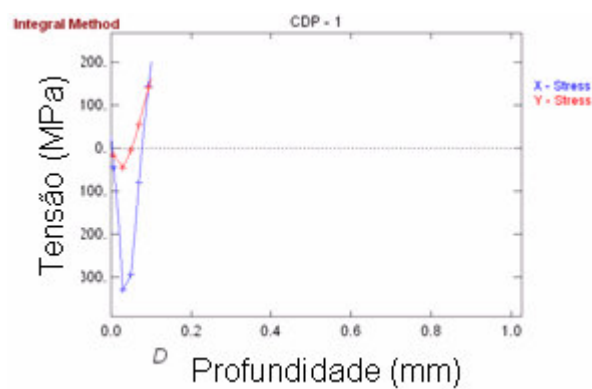
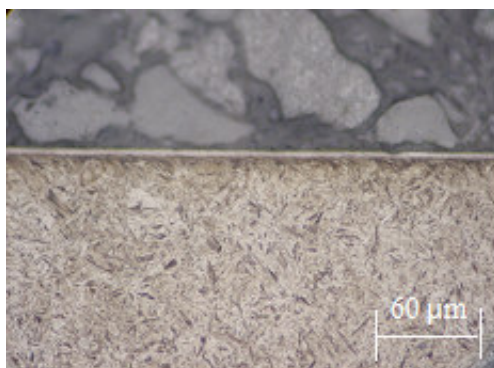


Figura 2.14: Delineamento composto central (MATEUS; BARBIN; CONAGIN, 2001)

- **Em anexo 2 – Tensão residual nos corpos de prova**

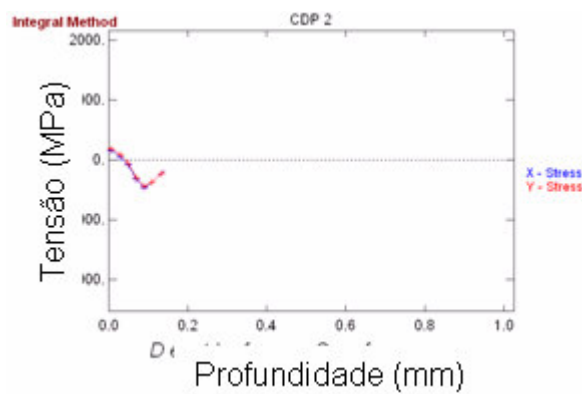
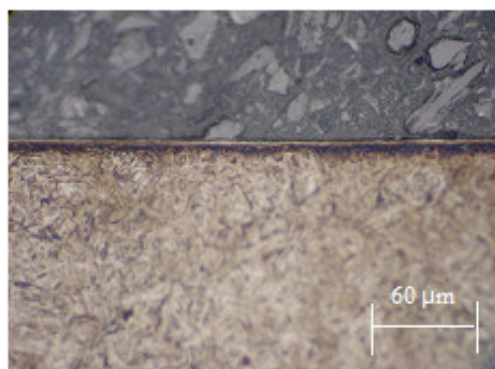
- Corpo de prova 1

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
1	150	0,050	0,08	760	190



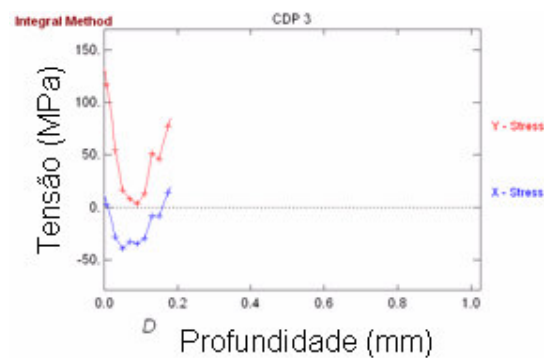
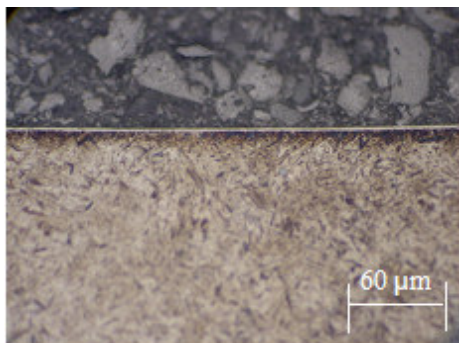
- Corpo de prova 2

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
2	150	0,050	0,16	760	190



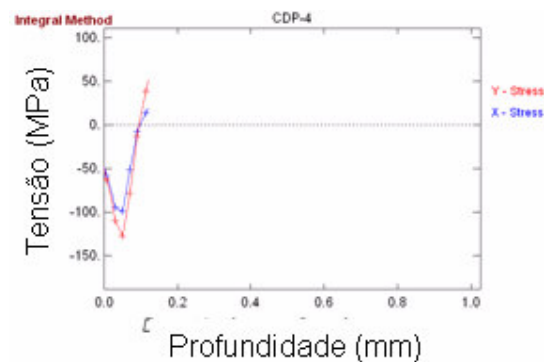
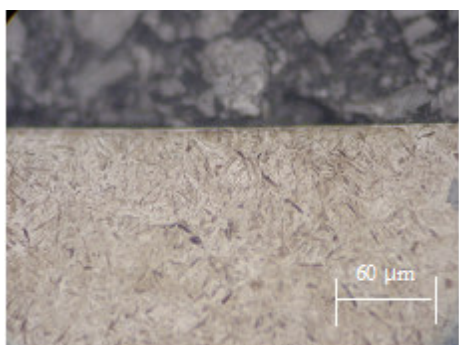
- Corpo de prova 3

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
3	150	0,100	0,08	760	380



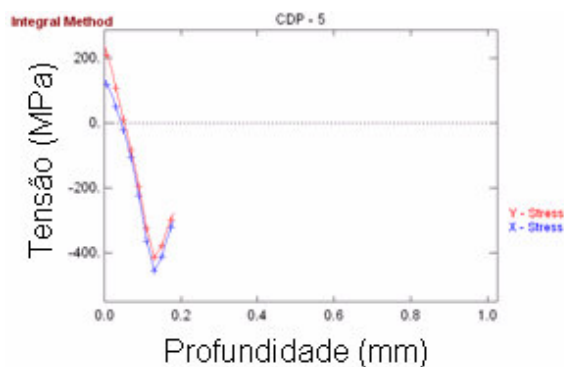
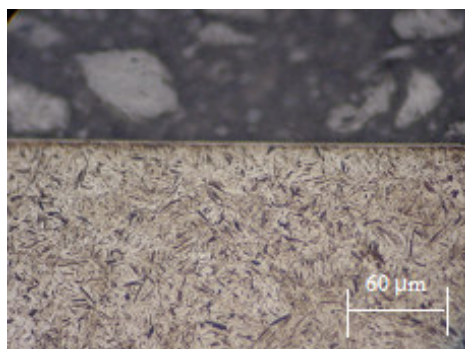
- Corpo de prova 4

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
4	150	0,100	0,16	760	380



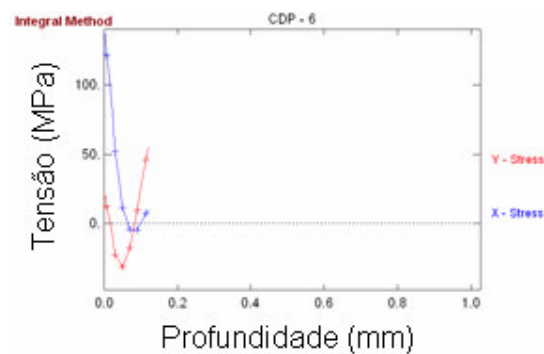
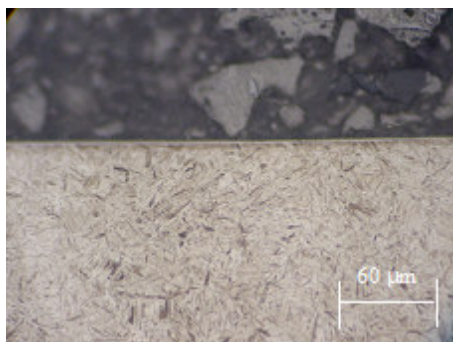
- Corpo de prova 5

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
5	210	0,050	0,08	1060	265



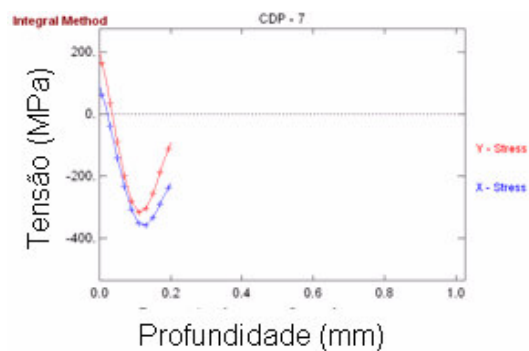
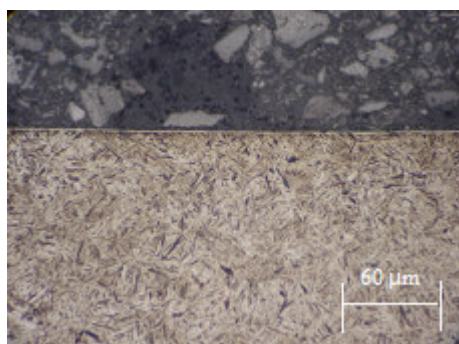
- Corpo de prova 6

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
6	210	0,050	0,16	1060	265



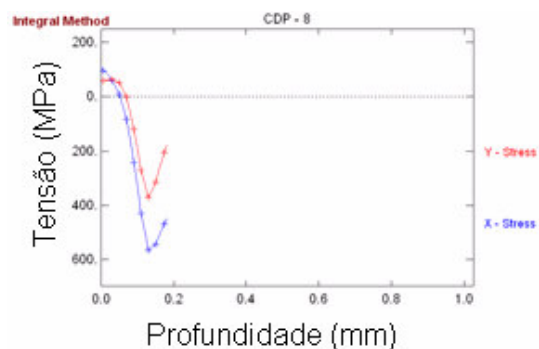
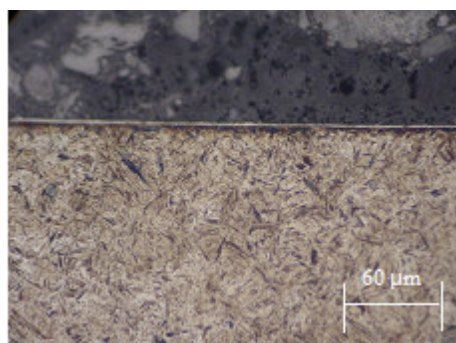
- Corpo de prova 7

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
7	210	0,100	0,08	1060	530



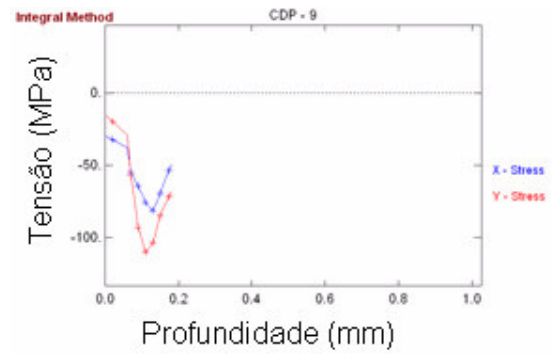
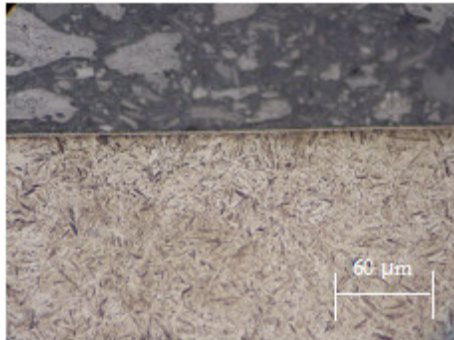
- Corpo de prova 8

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
8	210	0,100	0,16	1060	530



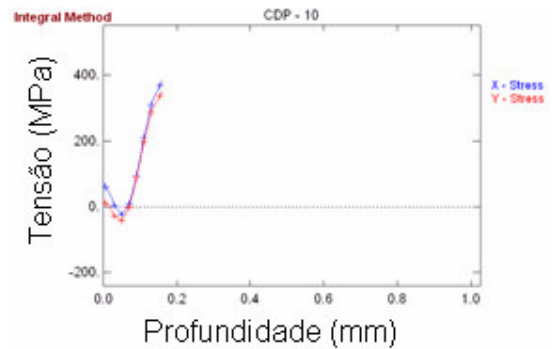
- Corpo de prova 9

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
9	129,5	0,075	0,12	660	248



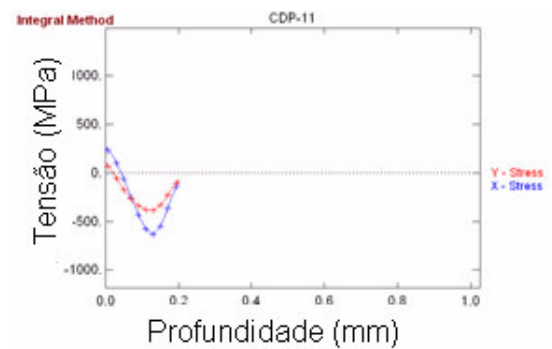
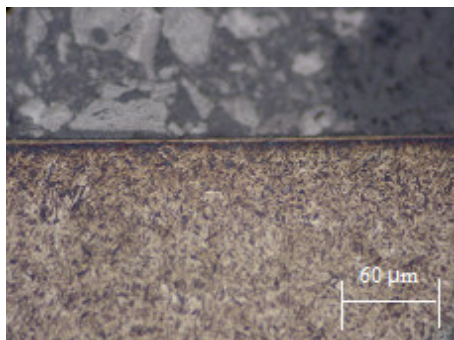
- Corpo de prova 10

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
10	230,5	0,075	0,12	1170	439



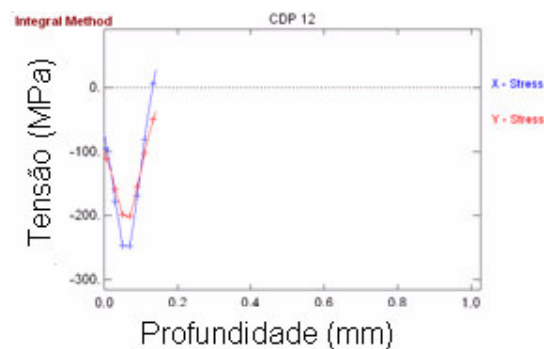
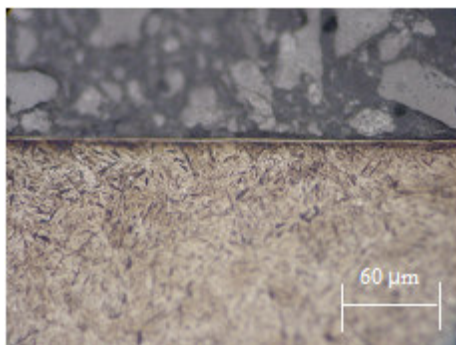
- Corpo de prova 11

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
11	180	0,033	0,12	910	150



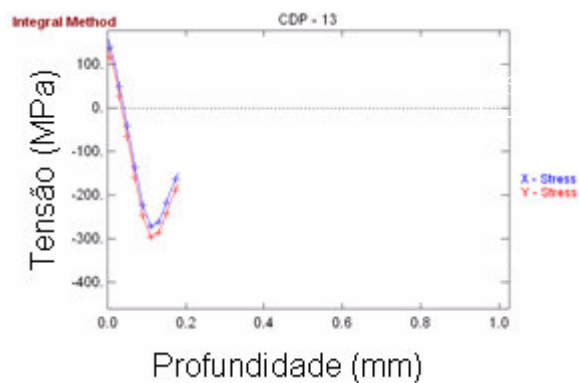
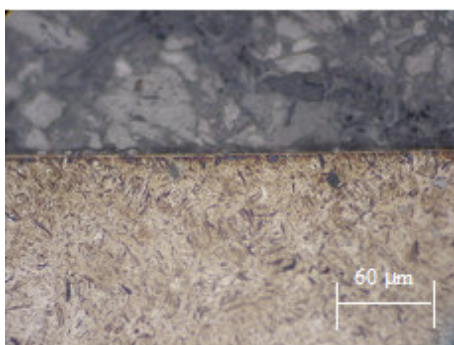
- Corpo de prova 12

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
12	180	0,117	0,12	910	533



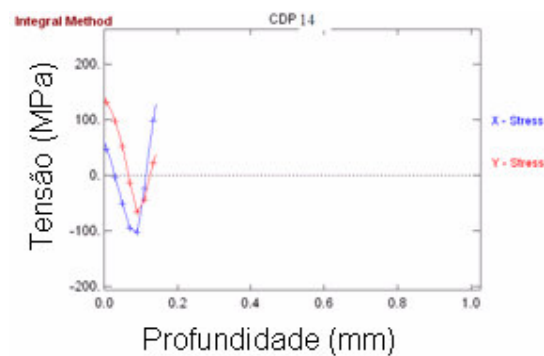
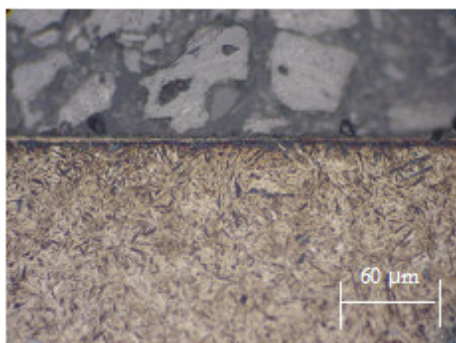
- Corpo de prova 13

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
13	180	0,075	0,05	910	342



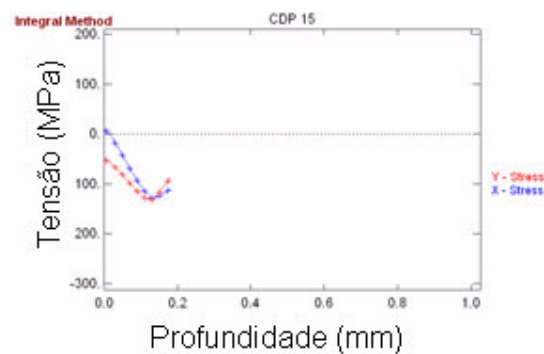
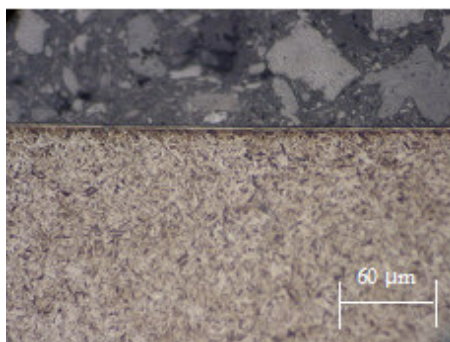
- Corpo de prova 14

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
14	180	0,075	0,19	910	342



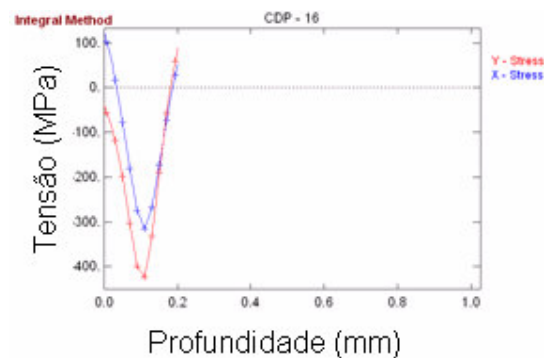
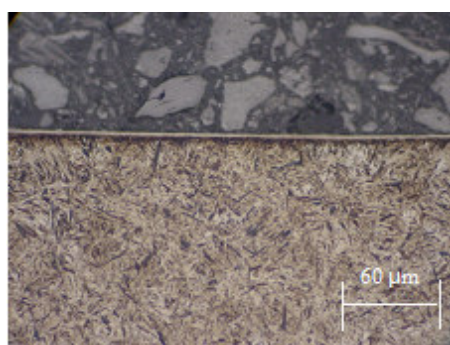
- Corpo de prova 15

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
15-c	180	0,075	0,12	910	342



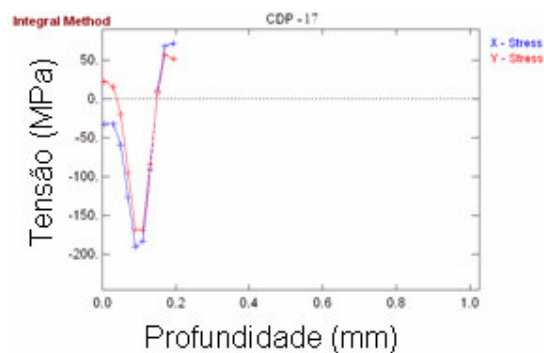
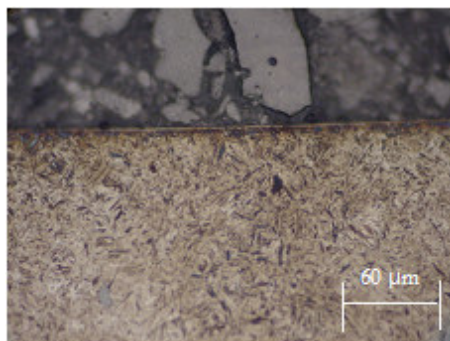
- Corpo de prova 16

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
16-c	180	0,075	0,12	910	342



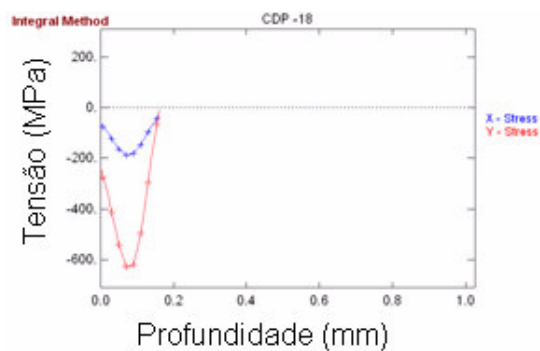
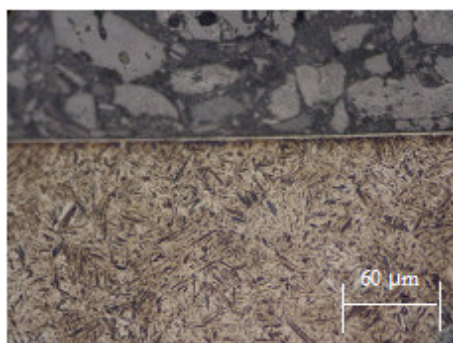
- Corpo de prova 17

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
17-c	180	0,075	0,12	910	342



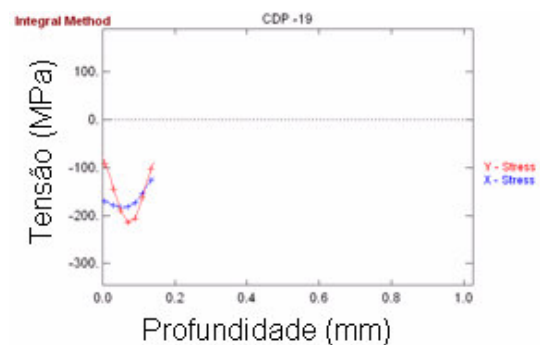
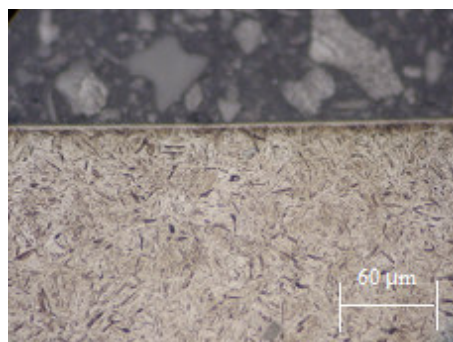
- Corpo de prova 18

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
18-c	180	0,075	0,12	910	342



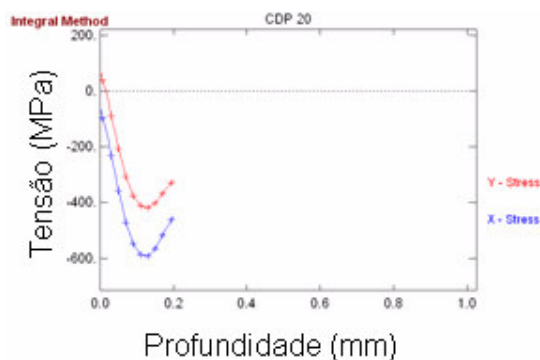
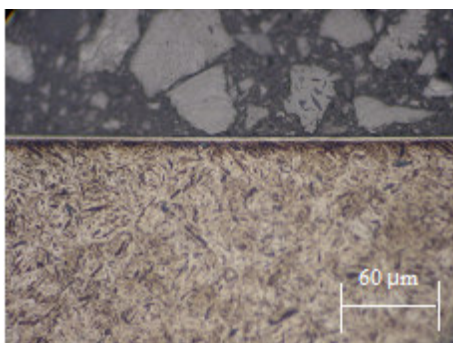
- Corpo de prova 19

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
19-c	180	0,075	0,12	910	342



- Corpo de prova 20

Corpo	Vc (m/min)	f_z (mm/volta)	a_p (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
20-c	180	0,075	0,12	910	342



CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

JOSÉ ROBERTO BANIN JÚNIOR

207.104-1

**ANALISE DE TENSÕES RESIDUAIS, INTEGRIDADE
SUPERFICIAL E FORÇAS DE USINAGEM NO
FRESAMENTO DE TOPO DE AÇO SAE 4340 ENDURECIDO**

São Bernardo do Campo
2009