

ADILSON DONIZETE ALBANO

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE USINAGENS DE
SUPERFÍCIES COMPLEXAS NA FABRICAÇÃO DE MOLDES DE
INJEÇÃO DE PEÇAS PLÁSTICAS AUTOMOTIVAS**

**SÃO PAULO
2007**

01/11

ADILSON DONIZETE ALBANO

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE USINAGENS DE
SUPERFÍCIES COMPLEXAS NA FABRICAÇÃO DE MOLDES DE
INJEÇÃO DE PEÇAS PLÁSTICAS AUTOMOTIVAS**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Mestre Profissional
em Engenharia Automotiva**

**SÃO PAULO
2007**

ADILSON DONIZETE ALBANO

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE USINAGENS DE
SUPERFÍCIES COMPLEXAS NA FABRICAÇÃO DE MOLDES DE
INJEÇÃO DE PEÇAS PLÁSTICAS AUTOMOTIVAS**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Mestre Profissional
em Engenharia Automotiva**

**Orientador: Professor Doutor
Gilmar Ferreira Batalha**

**SÃO PAULO
2007**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Ivaldi e Ormindá (em Memória) pela educação a mim atribuída, a minha esposa Cristina pelo apoio e dedicação aos meus filhos Milena e Vinícius, pela compreensão nos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

A Deus por direcionar minha vida e abençoar-me com saúde para alcançar este privilégio.

Ao Professor Doutor Gilmar Ferreira Batalha por aceitar-me como seu orientado, pela confiança em mim depositada e pela plena e competente orientação ao longo desse trabalho, também pela compreensão nos momentos de dificuldade e principalmente pela amizade.

A todos os professores doutores do Curso de Mestrado em Engenharia Automotiva da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e amigos alunos do curso, que contribuíram com seus conhecimentos transmitidos e momentos de descontração em aulas, ao longo de dois anos de curso, e também ao pessoal de suporte da secretaria do curso que sempre esteve solícito.

Aos ilustres professores doutores que participaram do exame de qualificação e aos que participaram da banca examinadora da apresentação final, cuja visão crítica contribuiu construtivamente para melhoria do trabalho através de sugestões e orientações feitas nestas oportunidades.

A empresa General Motors do Brasil Ltda., pela iniciativa em conjunto com a Escola Politécnica da USP, proporcionando este curso "in Company", formando um grupo seletivo do qual tenho orgulho de fazer parte.

Aos gerentes de departamentos da empresa General Motors do Brasil que tiveram participação direta e foram favoráveis a minha adesão neste curso.

Ao Diretor Angel Zafon Almazan e a todos os amigos da Ferramentaria e Programação CNC da empresa General Motors do Brasil, que auxiliaram e apoiaram de uma ou outra maneira a confecção deste trabalho, tornando possível sua conclusão. Em especial ao meu irmão Herivelto e aos amigos Sergio e Gilberto.

Aos amigos da divisão Coromant da empresa Sandvik do Brasil S/A, que contribuíram com publicações e informações importantes.

EPÍGRAFE

“Confia ao Senhor as tuas obras, e teus pensamentos serão estabelecidos”
Provérbios de Salomão 16:3
BÍBLIA SAGRADA

SUMÁRIO

RESUMO -	viii
ABSTRACT -	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES -	x
LISTA DE TABELAS -	xiii
LISTA DE FÓRMULAS -	xiv
ABREVIATURAS -	xv
NOTAÇÕES E SÍMBOLOS -	xvi
1. INTRODUÇÃO -	1
1.1. JUSTIFICATIVA -	2
1.2. OBJETIVOS E OBJETO DE ESTUDO -	3
1.3. METODOLOGIA -	4
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO -	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA / ESTADO DA ARTE EM USINAGEM -	7
2.1. HSM-HSC -	7
2.2. ALTA VELOCIDADE DE CORTE -	12
2.3. DEFINIÇÃO DE <i>High Speed Machining / High Speed Cutting</i> -	15
2.4. FERRAMENTAS DE ALTA TECNOLOGIA -	20
2.5. O BALANCEAMENTO É UMA NECESSIDADE -	31
2.7. GEOMETRIA DA FERRAMENTA -	28
2.8. GENERALIDADES DO PROJETO DE FERRAMENTA PARA HSC -	29
2.9. SISTEMAS FERRAMENTA x MÁQUINA EM HSC -	30
2.10. NOVAS CONCEPÇÕES -	34
2.10.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS GENÉRICAS DE MÁQUINAS HSM -	35
2.10.2. EIXOS-ÁRVORE, CARROS DE TRANSLAÇÃO, GUIAS E FUSOS -	37
2.10.3. CINEMÁTICA PARALELA -	44
2.10.4. MÁQUINAS FERRAMENTA DE CINEMÁTICA PARALELA -	44
2.10.5. PEÇAS E COMPONENTES PARA CINEMÁTICA PARALELA -	46
2.10.6. USINAGEM DE MOLDES E MATRIZES -	48
2.11. SISTEMAS DE CONTROLE CNC EM HSM -	51

2.11.1. SISTEMAS DE VELOCIDADES DE EXTRAÇÃO DE CAVACOS -	52
2.11.2. ENCAPSULAMENTO -	53
2.11.4. PRECISÃO DA TRAJETÓRIA -	54
2.12. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM HSC NA PROGRAMAÇÃO CNC -	55
2.12.1. A GEOMETRIA -	56
2.12.2. INFLUÊNCIA DO NC NO PROCESSO HSC -	59
2.12.3. TEMPO DE PROCESSAMENTO DE BLOCO -	59
2.12.4. EXECUÇÃO DE PROGRAMAÇÃO -	61
2.13. REPRESENTAÇÃO DE CURVAS E SUPERFÍCIES -	64
2.14. UTILIZAÇÃO DE NURBS NO PROCESSO CAM/CNC -	65
2.15. GRAU DE INOVAÇÃO -	68
2.15.1. MÉTODO OTIMIZADO DE SEMI-ACABAMENTO -	69
2.15.2. OPERAÇÕES DE USINAGEM REALIZADAS POR MEIO DE OBJETOS DE USINAGEM -	70
3. ESTRATÉGIAS DE USINAGEM DE ACABAMENTO NA EMPRESA -	74
3.1. ESTRATÉGIA UTILIZADA ATUALMENTE -	74
3.2. ESTRATÉGIA PROPOSTA -	78
4. TRABALHO EXPERIMENTAL -	79
4.1. DESCRIÇÃO DE PLANEJAMENTO -	79
4.2. MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE DADOS -	89
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES -	90
6. CONCLUSÃO -	98
7. SUGESTÕES -	99
8. REFERÊNCIAS -	100
9. GLOSSÁRIO -	107
10. APÊNDICES	108
10. APÊNDICE A - Relatório de posicionamento das peças	108
10. APÊNDICE B - Relatório de programa normal	109
10. APÊNDICE C - Relatório de programa HSC	110
10. APÊNDICE D- Programa CNC normal	111

10. APÊNDICE E - Programa CNC HSC..... 114

RESUMO

ALBANO, Adilson Donizete (2007). “Estudo Comparativo de Processos de Usinagens de Superfícies Complexas na Fabricação de Moldes de Injeção de peças Plásticas Automotivas”. – São Paulo, 2007. Escola Politécnica da USP - 115p. (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva).

Com a finalidade de aprimorar os conhecimentos e o processo de fabricação de usinagem em matrizes e moldes de injeção da indústria automobilística, através do conceito *High Speed*, este estudo apresenta uma revisão bibliográfica e sobre a usinagem HSC/HSM em moldes; um estudo sobre o fresamento de formas complexas e uma análise sobre a metodologia utilizada por sistemas CAD/CAM e CNC para gerar e interpretar os programas NC em movimentações complexas de ferramenta. Foram realizados alguns ensaios práticos para verificação e comparação do processo proposto. Processo que apresentou resultado diferente do esperado, pelas condições de usinagem a que foram submetidos os corpos de prova e pelo equipamento utilizado neste estudo. O principal foi um grau de rugosidade maior que o apresentado pelo processo atualmente utilizado.

Palavras-chave: Usinagem; Matrizes e moldes; Injeção (Engenharia); Indústria automobilística.

ABSTRACT

ALBANO, Adilson Donizete (2007). "A Comparative Study on the Milling Process of Complex Surfaces at Manufacture Injection Molds for Automotive Plastic Parts". – São Paulo, 2007. Escola Politécnica of the University of São Paulo - 115p. (Professional Master in Automotive Engineering).

With the purpose to improve the knowledge and the process of manufacture to the dies and molds of injection of the automotive industries process manufacture milling, through of the High Speed Machine concepts, this work presents an overview about HSC Technology; a description of the process chain involving the CAD/CAM/CNC systems and the methodologies used by those systems to generate and accomplish complex tool-paths. Some test pieces for verification and comparison of the considered process had been milling. Process that it presented resulted different of the waited one, for the milling conditions the one that had been submitted the test pieces and equipment used in this study. The main was greater roughness degree that the presented one for the process currently used.

Keywords: Milling; Die and mould; Injection (engineering); Automotive Industries.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 - Histórico de ensaios de Usinagem com Altíssima Velocidade.	9
FIGURA 2.2 - Influência da velocidade de corte na temperatura por Salomon e McGee.....	10
FIGURA 2.3 - Variação da temperatura com a velocidade de corte.....	11
FIGURA 2.4 - Influência da velocidade de corte no valor da temperatura de corte...	12
FIGURA 2.5 - Definição atual de usinagem em altíssima velocidade	14
FIGURA 2.6 - Classificação de Fesadoras segundo critérios HSC	16
FIGURA 2.7 - Comparativo dos parâmetros Convencionais e HSM	16
FIGURA 2.8 - Visão Holística do Processo HSC.....	18
FIGURA 2.9 - Vantagens Técnicas da HSC.....	19
FIGURA 2.10 - Fresa de topo com pastilhas reversíveis “T Max”	20
FIGURA 2.11 - Fresa de topo esférico “Ball Nose”	21
FIGURA 2.12 - Propriedades gerais da Usinagem com altíssima velocidade.....	21
FIGURA 2.13 - Inseto de PCD ou CBN.....	22
FIGURA 2.14 - Inseto de cermet.....	23
FIGURA 2.15 - Ferramenta HSC com guias de diamante.....	23
FIGURA 2.16 - Ferramentas de corte e insertos	24
FIGURA 2.17 - Fixação com ajuste excêntrico.....	26
FIGURA 2.18 - Fixadores de ferramentas de alta velocidade de corte	26
FIGURA 2.19 - Movimento causado pela expansão do cone no eixo-árvore provocada pela força centrífuga	27
FIGURA 2.20 - Detalhes que possibilitam maior rigidez na fixação	27
FIGURA 2.21 - Padronização de valores de ferramentas	28
FIGURA 2.22 - Geometria quebra cavaco.....	29
FIGURA 2.23 - Condições de alta rigidez para maiores concentrações de esforços	30
FIGURA 2.24 - Adaptadores para HSC.....	31
FIGURA 2.25 - Sistema de balanceamento automático, chamado de Bala Dyne.....	33
FIGURA 2.26 - Detalhe do acabamento superficial.....	33
FIGURA 2.27 - Porta – ferramentas e adaptadores balanceáveis	34
FIGURA 2.28 - Máquina HSC	35
FIGURA 2.29 - <i>Ultra High Speed Linear Motor Drive Vertical Machining Center</i>	36

FIGURA 2.30 - Eixos árvore disponíveis no mercado	37
FIGURA 2.31 - Aumento de potência dos eixos-motor: 1997-2002	38
FIGURA 2.32 - Rolamento com esferas de aço e de cerâmica.....	39
FIGURA 2.33 - Detalhe das guias lineares para HSC	40
FIGURA 2.34 - Detalhes acoplamento	40
FIGURA 2.35 - Fuso principal HSC de esferas com lubrificação	41
FIGURA 2.36 - Fuso principal HSC de castanhas.....	41
FIGURA 2.37 - Fixação da ferramenta com lubrificação óleo-ar	42
FIGURA 2.38 - Sistema para Motores Lineares	43
FIGURA 2.39 - Fabricante Maho-Deckel - <i>High speed</i>	43
FIGURA 2.40 - Configurações Esquemáticas para máquinas hexápodes	45
FIGURA 2.41 - Estrutura hexapode da 6X Hexa.....	45
FIGURA 2.42 - Junta esférica em corte	47
FIGURA 2.43 - Sistema de eixo linear em máquinas paralelas.....	47
FIGURA 2.44 - Estudo de redução de tempo HSC	50
FIGURA 2.45 - Redução de tempo de produção.....	51
FIGURA 2.46 - Métodos de aplicação de fluido de corte em uma operação de fresamento	52
FIGURA 2.47 - Um exemplo das conseqüências da ruptura de uma pastilha de 0,015kg pode causar	53
FIGURA 2.48 - Peça esta representada por uma malha de triângulos.....	57
FIGURA 2.49 - Tolerância da trajetória da ferramenta	58
FIGURA 2.50 - Trajetória da ferramenta	58
FIGURA 2.51 – Transmissão de programas	61
FIGURA 2.47 - A usinagem da ferramenta em cavidade	61
FIGURA 2.48 - Interpolação da trajetória da ferramenta.....	63
FIGURA 2.49 - Identificação das áreas dos elementos de formas.....	66
FIGURA 2.50 - Manipulação de uma curva.....	67
FIGURA 4.1 - Croquis para preparação dos Corpos de Prova.....	82
FIGURA 4.2 - Representação gráfica dos corpos de prova fixados em placa.....	83
FIGURA 4.3 - Foto dos corpos de prova fixados em placa antes da usinagem	83
FIGURA 4.4 - Presseter de ferramentas	84
FIGURA 45 - Apalpador eletrônico Renishaw	84
FIGURA 4.6 - Centro de usinagem MAKINO MCD1513	85

FIGURA 4.7 - Copiadora Portal SHIN NIPPON KOK – SNK.....	85
FIGURA 4.8 - Fresa Topo esférico para Inserto Diâmetro 25mm	86
FIGURA 4.9 - Inserto Diâmetro 25mm	87
FIGURA 4.10 - Modelo matemático com os dois lotes de corpos de prova	89
FIGURA 4.11 - Corpos de prova fixos na placa de processo.....	90
FIGURA 4.12 - Modelo matemático do corpo de prova.....	90
FIGURA 4.13 - Visualização do caminho de ferramenta.....	91
FIGURA 4.14 – Ponto de contato geometria.....	91
FIGURA 4.15 - Corpo de prova semi acabado.....	91
FIGURA 4.16 - Corpo de prova acabado	91
FIGURA 4.17 - Curvas de distribuição t - Student.....	95

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Áreas de Aplicação da Tecnologia HSC.....	19
TABELA 4.1 - Aço 4340 - Aço Kraft	81
TABELA 4.2 - Composição química nominal do aço SAE 4340	81
TABELA 4.3 - Aços padrão para moldes de injeção de plástico. Fonte Brasimet	81
TABELA 4.4 - Descrição das ferramentas utilizadas para o processo de usinagem	86
TABELA 4.5 - Descrição dos parâmetros da ferramenta.....	87
TABELA 4.6 - Resumo das operações de fresamento	93
TABELA 4.7 - Avaliação estatística dos tempos	93
TABELA 4.8 - Dados coletados de Dureza e Rugosidade dos corpos de prova	96

LISTA DE FÓRMULAS

FÓRMULA 1 - Cálculo da Velocidade de Corte	9
FÓRMULA 2 - Cálculo do Desbalanceamento Permissível.....	32
FÓRMULA 3 - Cálculo da Velocidade de Avanço	60
FÓRMULA 4 - Cálculo do Baud necessário	63
FÓRMULA 5 - Condição de trajetórias para a rede de pontos	71
FÓRMULA 6 - Formulas Distribuição t-Student.....	94

ABREVIATURAS

2D: Usinagem em 2 eixos simultâneos.

3D: Usinagem em 3 eixos simultâneos.

CAD: Computer Aided Design.

CAM: Computer Aided Manufacturing.

CBN: Ferramentas de corte de nitro cúbico de boro.

CNC: Control numerical computer.

DP: Ferramentas de corte carbetto cerâmica.

HSC: High Speed Cutting.

HSM: High Speed Machining.

HVM: High Velocity Machining.

LSM: Low Velocity Machining.

NC: Numerical control.

Nurbs: Non uniform rational B-Spline - Curva definida por uma serie de pontos, utilizando-se um polígono de controle vetores e pesos, com o acréscimo de Non Uniform e Racional.

PCD: Ferramentas de corte de diamante policristalino.

PTW: Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, Darmstadt, Alemanha.

STL: (Stereolithography) representação triangular de uma geometria.

TPB: Tempo processamento de blocos.

UHSM: Ultra High Velocity Machining.

VHSM: Very High Velocity Machining.

LISTA DE NOTAÇÕES E SIMBOLOS

- ap** – profundidade de corte [mm]
bD – largura de corte [mm]
b – largura do chanfro da aresta [mm]
d – diâmetro da ferramenta [mm]
d1 – diâmetro do furo de fixação do inserto [mm]
ER – raio de arredondamento da aresta [mm]
f – avanço de corte [mm]
Fc – força de corte [kgf]
Ff – força de atrito contida no plano que contém a superfície de saída [kgf]
Fn – força normal ao plano que contém superfície de saída [kgf]
fz – avanço por dente [mm]
gl – graus de liberdade
hD – espessura do cavaco não-deformado [mm]
hDmáx – espessura máxima do cavaco [mm]
hm – espessura média do cavaco não-deformado [mm]
i – corrente elétrica [A]
iC – diâmetro do inserto [mm]
j – posição da ferramenta em relação à peça [mm]
Ks – pressão específica de corte [kgf/mm²]
Ksm – pressão específica de corte média [kgf/mm²]
lf – comprimento de corte [mm]
n – rotação do eixo-árvore [rpm] / rotação da ferramenta [min⁻¹]
Pc – potência de corte [kW]
PeI – potência elétrica [kW]
Pmec – potência mecânica [kW]
s – espessura do inserto [mm]
tc – tempo de corte [s]
U – passo da ferramenta [graus]
U – tensão elétrica [V]
VB – desgaste de flanco [mm]
vc – velocidade de corte [m/min]

v_f – velocidade de avanço [mm/min]

z – número de dentes da ferramenta

γ – ângulo do chanfro da aresta [graus]

η – rendimento

θ – ângulo de descida da ferramenta na estratégia em rampa [graus]

ϕ – ângulo de contato do dente com a peça [graus]

π – constante 3,141592654

1. INTRODUÇÃO

A conformação e a injeção de peças automotivas no Brasil tiveram nos últimos anos desde o início da década de noventa nos anos de 1991 e 1992, grandes modificações em seu *design*, devido à busca de novas linhas aerodinâmicas. Esse fato levou a uma complexidade maior no projeto de superfícies, tornando-as cada vez mais arredondadas e curvas, com linhas mais arrojadadas e futuristas, assim tanto a fabricação das matrizes como dos moldes de injeção plástica, tem um desafio maior a superar a cada lançamento de novos produtos. Questões como melhor acabamento superficial, rugosidade e a menor interferência manual, seguidos de menor tempo de construção e ajustes, e em especial as matrizes com mais operações agrupadas em menor número de ferramental dentro da “família”, são buscas constantes da engenharia de ferramental.

Os avanços tecnológicos na fabricação de novos materiais e ligas em ferramentas de corte, pastilhas de metal duro e suas coberturas especiais e também em máquinas ferramenta, melhorando a rigidez e a precisão de posicionamento, leva a busca constante da otimização dos parâmetros de corte e melhorias na usinagem de ferramental. O desenvolvimento de aplicações, oriundas de pesquisas acadêmicas das várias universidades espalhadas pelo mundo, traz grandes contribuições, utilizadas como fonte de apoio às tecnologias. Os laboratórios das universidades com incentivo e parcerias das empresas, produzem excelentes alternativas e respostas aos desafios apresentados pelas circunstâncias inovadoras, através de *softwares* e equipamentos melhores aproveitados, e se mostram capazes de tornar mais competitivas as empresas que tem as portas abertas para pesquisa e investimentos.

O tema deve abordar o estudo para a algumas alterações do atual processo de usinagem utilizado pela ferramentaria da GMB (General Motors do Brasil), na construção de matrizes e moldes, com vista na diminuição do tempo de processo e quiçá melhoria do produto final, com a menor interferência manual nos acabamentos. Tornando assim os componentes ou as peças automotivas, sejam eles conformados ou injetados, com melhor grau de qualidade.

Por maior facilidade ao acesso de informações sobre as características dos materiais e ferramentas de corte utilizadas, o estudo e proposta serão efetuados tomando se como base os processos desenvolvidos e materiais usados na empresa, pelo fato deste autor ser funcionário da mesma. Porém a proposta e os resultados podem atender a outras peças, modelos e a outras empresas existentes no Mercado Nacional.

1.1. JUSTIFICATIVA

Este trabalho busca a melhoria de processos, na área de usinagem, através de novas tecnologias de produção e da otimização da manufatura para ferramental com diferentes propostas para usinagem de moldes e matrizes de peças e componentes automotivos.

Sendo assim o tema, formulado através de algumas informações conseguidas através de literaturas, dissertações, revistas especializadas e testes empíricos, sugere que o ferramental pode ser confeccionado com ferramentas de corte, melhor direcionadas às chamadas condições ideais, com programas CNC (Controle Numérico por Computador) otimizados e com novos materiais. Para a tentativa de se aperfeiçoar a manufatura de tais peças, utilizar menor tempo de processo na produção, visando diminuir a interferência manual, usar materiais e equipamentos mais adequados podendo melhorar a qualidade, se faz necessário um estudo.

Com este estudo, procura-se auxiliar a opção da empresa em utilizar determinados processos, a formular alternativas e propor que sejam utilizados os parâmetros tecnológicos estudados e com a comprovação através de corpos de prova ou cupons usinados com esses conceitos na planta da empresa em São Caetano do Sul, Brasil. Nos últimos anos o número de produtos utilizando moldes e matrizes contendo formas geométricas complexas tem aumentado notoriamente. No entanto, a fabricação destes ferramentais onde se emprega, principalmente, operações de fresamento, não tem acompanhado esta evolução com a mesma velocidade. O advento dos sistemas CAD/CAM, máquinas CNC e da tecnologia de usinagem em altas velocidades HSM/HSC influenciaram positivamente a fabricação de superfícies complexas. Contudo, notam-se ainda ineficiências neste processo

produtivo. A qualidade superficial após as operações de usinagem ainda não é suficiente para que estes ferramentais entrem diretamente na linha de produção. Assim, operações manuais de acabamento são exigidas, elevando o tempo e custo de produção, comprometendo a qualidade dimensional.

1.2. OBJETIVOS / OBJETO DE ESTUDO

Buscar desenvolvimento do processo de manufatura na usinagem de acabamento para moldes e matrizes de peças automotivas, utilizando os materiais (matéria prima) usados pela empresa na confecção dos itens já mencionados, através dos conceitos da tecnologia de altas velocidades de corte, com foco em melhores resultados de processo, reduzindo os tempos de usinagem.

Também é objetivo deste trabalho apresentar um estudo bibliográfico adequado ao entendimento dos principais conceitos da tecnologia HSM/HSC (HSC ou HSM¹).

Como consequência outros resultados inerentes ao processo podem ser alcançados através do conhecimento:

- ◇ Otimização da estratégia e de parâmetros de usinagem em máquinas-ferramenta;
- ◇ Melhoria do acabamento superficial de Ferramental na manufatura;
- ◇ Redução do grau de interferência manual nos processos de acabamento.

(¹) Para alguns, a denominação mais adequada é HSC - High Speed Cutting, ou "corte em alta velocidade"; para outros é HSM - High Speed Machining ou usinagem em alta velocidade.

1.3. METODOLOGIA

A metodologia deste Trabalho de Pós-Graduação Interdisciplinar envolve:

- Pesquisa de campo:
Pesquisa / consulta e estudo de possíveis novos materiais em ferramentas de corte;
Propriedades / Características;
Processos / Aplicações;
- Pesquisa bibliográfica / Revisão da Literatura:
Desenvolvimento teórico do projeto;
- Utilização de recursos de informática (softwares), computação gráfica, e simulação;
- Determinação de parâmetros e variações para análise real;
- Utilização de recursos físicos da empresa (máquinas-ferramenta e respectivos recursos para usinagem, laboratório e equipamentos);
- Análise e comparações dos resultados entre corpos de prova;
- Apoio de pessoal técnico especializado;
- Orientação e supervisão de professores doutores;
- Experiência profissional própria e de envolvidos;

Não existem normas brasileiras registradas para a execução desses testes em questão, mas todos os procedimentos deverão seguir, conforme as especificações dos estudos propostos, e que podem ser diferentes dos procedimentos utilizados atualmente.

Os protótipos poderão ser desenvolvidos em sólidos virtuais, em 3-D em *software* de engenharia, alterando-se somente os dados característicos de cada um dos processos de usinagem para os materiais utilizados. Os testes deverão ser aplicados nas áreas de Engenharia de Ferramental (Programação CNC) e nas áreas de usinagem e sala de medidas / inspeção da ferramentaria e no laboratório de Controle de Qualidade de Peças Compradas, CQPC da empresa.

O acompanhamento dos resultados obtidos nos testes será de responsabilidade das áreas afins já citadas acima, juntamente com este autor.

Devido aos custos e tempo disponível, fica a critério da empresa a viabilização desta proposta para uma análise direta com corpos de prova físicos, com os respectivos tipos de materiais descritos na apresentação deste trabalho. Daí a necessidade dos estudos e análises em modelos virtuais e de simulações gráficas para este ou quaisquer outros projetos, que envolvam produtos e manufatura de peças ou equipamentos, visando o barateamento dos custos estruturais (Kaminski 2000).

Os procedimentos e resultados dos testes que porventura sejam realizados e seus respectivos relatórios serão informados ou divulgados, desde que também não comprometam a segurança de informações da empresa.

Os custos dos testes, da manufatura das peças (protótipos) não serão divulgados.

Independentemente dos resultados obtidos, da viabilidade de aplicação ou não das propostas apresentadas, ficará a critério da empresa a decisão da entrega dos protótipos a outrem.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este Trabalho se divide em dez capítulos, descritos a seguir de forma concisa.

Capítulo 1 – Introdução – Este capítulo trata do contexto deste estudo.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica/Estado da arte em usinagem – Este capítulo mostra uma revisão sobre os temas mais importantes estudados sobre o assunto, do qual trata este trabalho ou seja, tecnologia da usinagem em altas velocidades princípios e conceitos envolvendo máquinas, ferramentas, superfícies e programas NC.

Capítulo 3 – Estratégias de usinagem de acabamento na empresa – Este capítulo apresenta os processos de usinagem de matrizes e moldes de injeção, utilizado na

empresa onde este autor se propôs a efetuar o estudo, processos esses que podem sofrer alterações com as inovações e avanços tecnológicos.

Capítulo 4 – Trabalho experimental – Neste capítulo está descrito os procedimentos e as análises realizadas neste estudo, buscando atingir o objetivo proposto, a fase experimental foi composta por dois lotes de cinco peças que foram usinados, um de forma usual pelo processo atual e outro pelo processo proposto para análise.

Capítulo 5 – Resultados e discussões – Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a análise do processo de usinagem em alta velocidade e discussões oriundas ao processo.

Capítulo 6 – Conclusão – Este capítulo apresenta a conclusão final deste estudo através dos aspectos mais relevantes.

Capítulo 7 – Sugestões – Neste capítulo apresenta-se sugestões para trabalhos futuros que poderão ser investigados nesta área de conhecimento.

Capítulo 8 – Referências– Este capítulo contém, em ordem alfabética, todas as referências deste estudo.

Capítulo 9 – Glossário – Este capítulo contém, em ordem alfabética, todos os significados dos termos técnicos utilizados neste estudo.

Capítulo 10 – Anexo A – Neste capítulo estão anexos a folha de processos de fixação dos corpos de prova, a folha de processos de usinagem e os programas CNC utilizados no comparativo deste estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA / ESTADO DA ARTE EM USINAGEM

A revisão bibliográfica que se segue tem por objetivo apresentar um histórico sobre os principais preceitos da usinagem em alta velocidade de corte tomando se como base sua evolução e avanços tecnológicos para auxiliar este estudo.

2.1. HSM-HSC

Vejamos primeiramente: Usinagem

“As operações que conferem à peça forma, ou dimensão, ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzindo o cavaco que é a porção de material da peça, retirado pela ferramenta, caracterizada por apresentar forma geométrica irregular, têm o nome de usinagem” (FERRARESI, 1982).

Atualmente considerada o estado-da-arte em termos de usinagem, a tecnologia de usinagem em altíssimas velocidades HSM/HSC foi desenvolvida há mais de 75 anos. O método criado por C. Salomon foi patenteado em 27 de abril de 1931, na Alemanha sob número 523594, e a patente foi concedida a Friedrich Krupp AG.

As pesquisas na área de alta velocidade foram retomadas após a Segunda Guerra. Primeiro por Kustnetsov, na Suíça, e depois por Vaughn e Kronenberg, já no final da década de 50 e início dos 60 (Santos et al., 2003).

Depois de décadas relegada ao esquecimento, a tecnologia ressurgiu nos anos 80 a partir de estudos realizados em vários países, especialmente na Alemanha, pelo professor Herbert Schulz, da Darmstadt *University of Technology*, dando início a novas pesquisas visando o desenvolvimento da tecnologia com fins industriais (Schutzer, 1999).

Nos anos 90, chegou ao ambiente industrial. Hoje, pode-se dizer que a HSM/HSC já garantiu seu espaço na manufatura, especialmente nos segmentos de peças aeronáuticas, automobilísticas e de moldes e matrizes, com grande potencial ainda para ocupar outros nichos (Schulz, 1998).

O notável progresso do país no campo metal-mecânico tornou evidente a existência de uma ampla gama de equipamentos, bens, produtos e sistemas, que

necessitam de desenvolvimento tecnológico próprio. Identifica-se assim, a necessidade de atualização e adequação constantes das funções vinculadas à produção, tendo-se em vista o avanço e a profundidade tecnológica atual.

Esta área metal-mecânica vem apresentando nos últimos anos a maior taxa de crescimento industrial em alguns Estados do país. É pertinente mencionar que esse crescimento continua em curso (Moraes, 2002).

Notadamente a instalação de diversas fábricas automotivas em regiões fora do ABC Paulista e da grande São Paulo, outrora áreas de concentração industrial, transforma outros locais em novos pólos automobilísticos brasileiros.

Para apresentar a tecnologia ao mercado brasileiro, a fabricante de ferramentas de corte Sandvik Coromant, reuniu um grupo de pesquisadores, professores, jornalistas e especialistas em ferramentas para escrever o livro "Usinagem em Altíssimas Velocidades - Como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica", Santos, et al., 2003, publicado pela Editora Érica.

No Brasil o crescente o número de usuários da tecnologia HSC, como a Embraer, as montadoras de automóveis, as indústrias de autopeças, peças e as principais ferramentarias do país, estimulam o conceito.

Como explica em seu artigo no livro o professor da Unimep e um dos maiores especialistas no assunto, Klaus Schützer, "o resultado mais importante descrito no trabalho de C. Salomon foi o fato de que, acima de uma determinada velocidade de corte, as temperaturas de corte começavam a cair". Quando desenvolveu seu método, Salomon tinha uma série de limitações em termos de máquinas. Para realizar seus experimentos, utilizou-se de uma serra circular de grande diâmetro. Mesmo com baixa rotação, ela permitia uma velocidade periférica bastante alta.

Considerando que naquela época ainda não existiam máquinas-ferramenta que permitissem altíssimas velocidades de corte, a opção foi pela realização dos ensaios por meios balísticos, iniciando assim um longo período no qual a tecnologia balística foi utilizada em ensaios de usinagem como mostra figura 2.1(Santos et al., 2003).

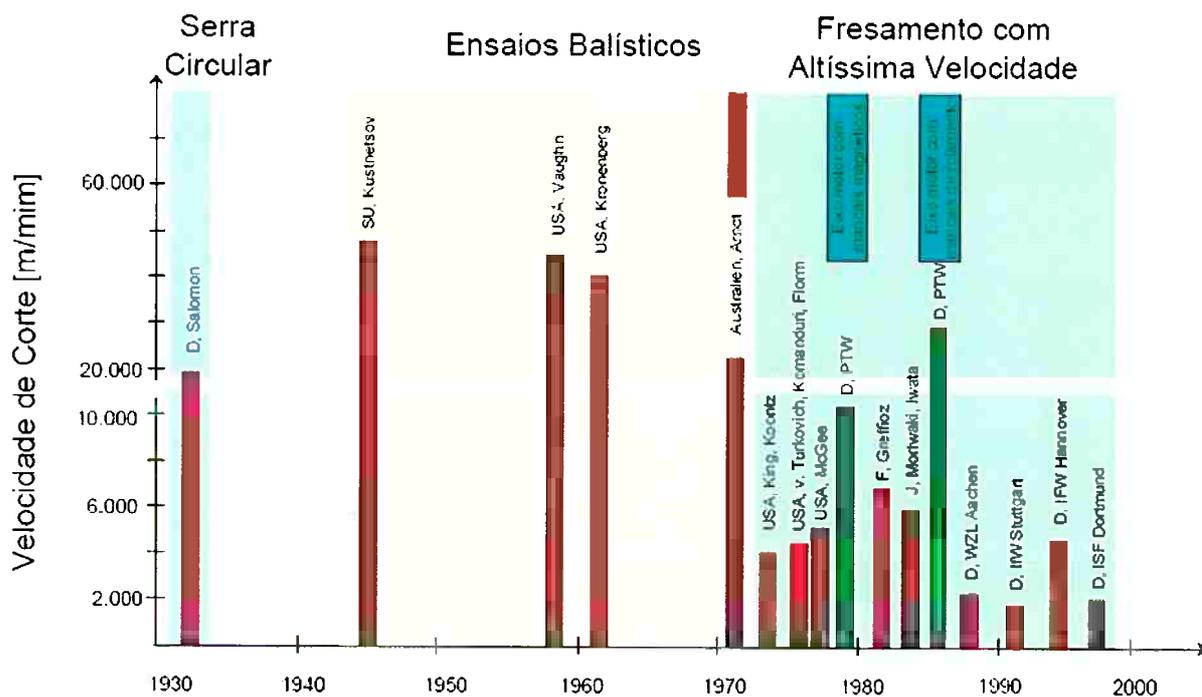


Figura 2.1 – Histórico de ensaios de Usinagem com Altíssima Velocidade.
Fonte Schützer, K. (1999).

De acordo com o conhecimento da época, o aumento da velocidade de corte correspondia um aumento da temperatura. Schützer informou, "O que Salomon pôde observar é que a partir de um determinado ponto as temperaturas caíam. Ou seja, aumentando-se a velocidade, a temperatura caía e as forças de corte também. Ele comprovou experimentalmente um dado novo, contrário às teorias e experimentos até então realizados".

Apresenta-se na figura 2.2, a seguir, as curvas de temperatura versus a velocidade de corte, obtidas por Salomon e por McGee, outro autor que realizou pesquisa semelhante, mas afirmando que a temperatura sempre tendia a subir com o aumento da velocidade de corte (Dewes et al., 1999)

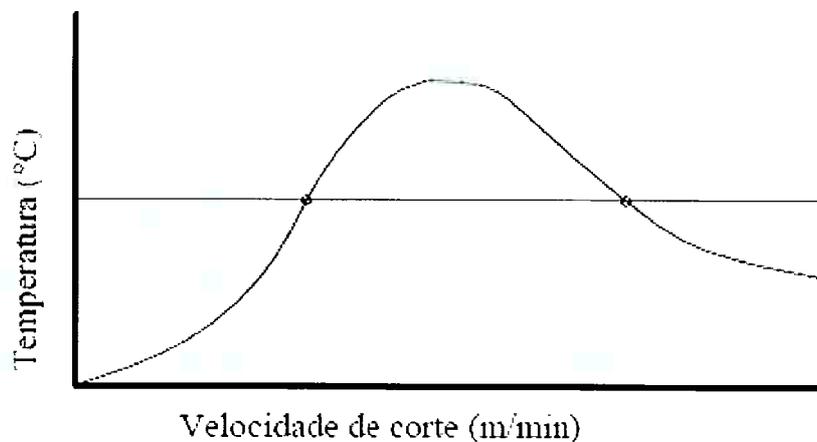
A fórmula da velocidade de corte está apresentada abaixo:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad [1]$$

Onde:

- v_c [m/min] – velocidade de corte
- d [mm] – diâmetro da ferramenta
- n [min^{-1}] – rotação da ferramenta

Curva de Salomon



Curva de McGee

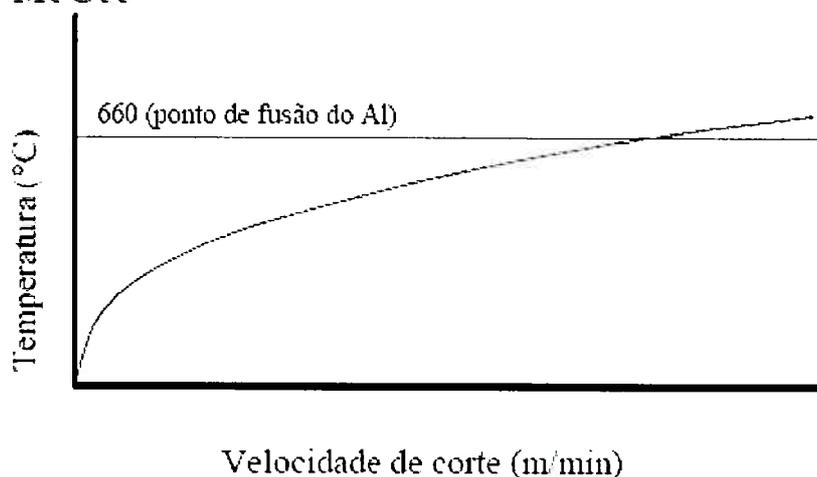


Figura 2.2 – Influência da velocidade de corte na temperatura por Salomon e McGee.
Fonte Dewes, et al. (1999).

A equipe do professor Schulz realizou também outros projetos, visando desenvolver máquinas-ferramenta e acessórios como eixo-motor, dispositivos de acionamento, ferramental, dispositivos de fixação, CNC, etc. Com o término da etapa desses projetos, no início da década de 90, o conceito a HSC se tornou efetivamente um processo de uso industrial. Estes trabalhos também comprovaram as teorias de Salomon, em especial a de que o processo possibilita melhor qualidade superficial. Schulz, aliás, é autor de dois artigos, em parceria com o professor Schützer, no livro citado acima lançado pela editora Érica, e também realizou trabalhos comprovando a variação de temperatura com a velocidade de corte, conforme figura 2.3 a seguir.

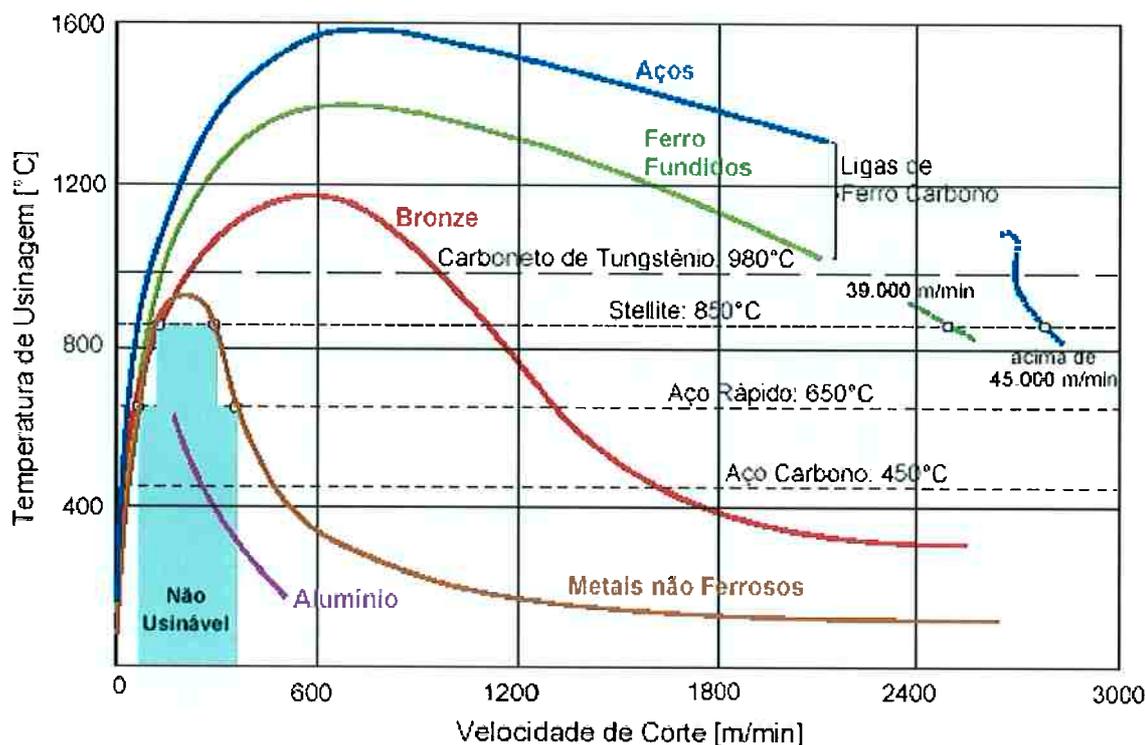


Figura 2.3 – Variação da temperatura com a velocidade de corte. (C. Salomon)
Fonte Schulz, H. (1997).

Outro autor que mostrou a relação entre temperatura e velocidade de corte foi Dagiloke et al., (1995) apud Costa (2003) no modelo proposto, a temperatura do cavaco e da superfície de saída da ferramenta aumenta progressivamente com o aumento da velocidade de corte numa faixa de valores que vai até 10.000 m/min. Nos ensaios anteriormente modelados, feitos pelos autores já citados, observou-se que a temperatura da peça sofre uma pequena redução com o aumento da velocidade de corte. Os autores concluíram que este fenômeno ocorre em função da redução do tempo que o calor gerado tem para se dissipar para a peça. Com o aumento da velocidade de corte o calor se dissipa principalmente pela superfície de saída da ferramenta e pelo cavaco, tendo menos tempo para migrar para a peça. A figura 2.4 mostra a relação entre a velocidade de corte e a temperatura da ferramenta, do cavaco e da peça usinada nas condições modeladas em alta velocidade de corte.

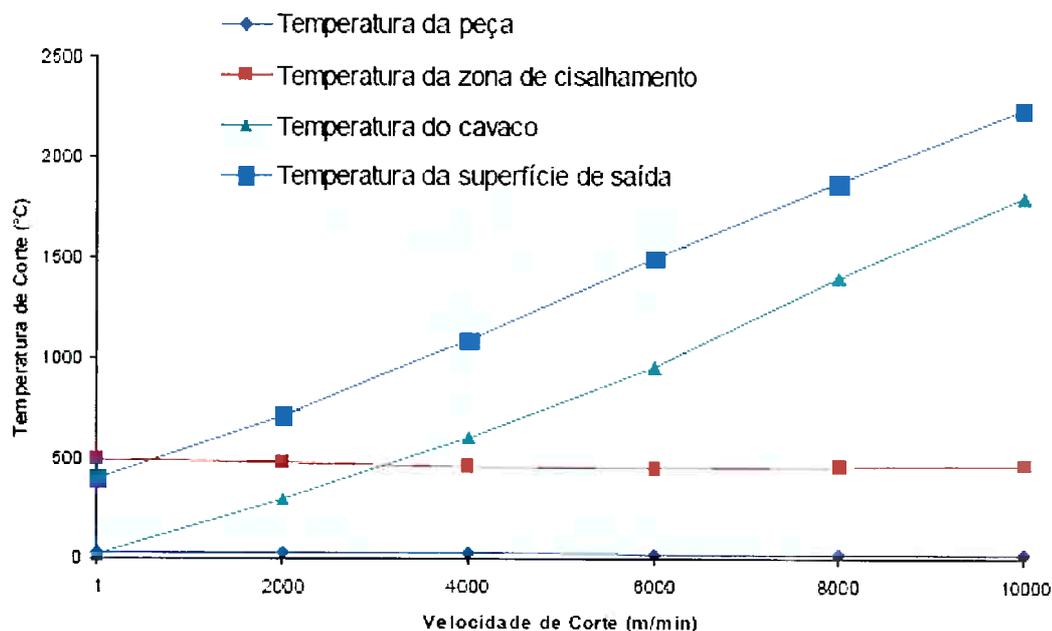


Figura 2.4 – Influência da velocidade de corte no valor da temperatura de corte.
Fonte Dagiloke, et al. (1995).

Na prática:

- A HSM não significa simplesmente usinar com altas velocidades. Ela deve ser vista como um processo em que as operações são realizadas por meio de métodos muito específicos e em equipamentos de produção de alta precisão.
- A HSM não é necessariamente a usinagem com altas velocidades do fuso. Muitas aplicações em HSM são realizadas com velocidades moderadas do fuso e fresas de tamanho grande.
- A HSM é realizada no acabamento de aços endurecidos com velocidades e avanços elevados, freqüentemente 4-6 vezes os dados de corte convencionais.
- A HSM significa Usinagem de Alta Produtividade de peças de todos os tamanhos.

2.2. Alta velocidade de corte

Alguns especialistas consideram que "alta velocidade" é aquela que atinge a faixa de 7 a 10 vezes superior à velocidade de corte v_c convencional para a

usinagem de um determinado tipo de material. Assim, como convencionalmente se usina aços na faixa de 200 m/min, alta velocidade de corte seria o emprego de velocidades superiores a 1.400 m/min em aços.

Assim, o conceito HSC/HSM é dinâmico. Ele acompanha o desenvolvimento tecnológico em termos de máquinas-ferramenta, ferramentas e recobrimento de pastilhas. Conforme avançam as possibilidades convencionais de velocidade, avançam também os requisitos da HSC.

Muitas outras definições para HSM/HSC podem ser encontradas no livro "Usinagem em Altíssimas Velocidades". Por exemplo: "HSC não significa apenas usinar com as mais altas velocidades de corte e avanço, mas sim unir altas taxas de velocidade de corte e avanço a fim de determinar o melhor processo de usinagem por completo". Ou então: "muitos usuários buscam definir a HSM considerando apenas a rpm que uma máquina proporciona, porém nem a velocidade, nem a aceleração, nem a ferramenta, isoladamente, são suficientes para ter sucesso na aplicação da tecnologia. No máximo, pode-se dizer que o número de rpm é um dos meios para se atingir os objetivos ou, ainda, um ponto de partida".

É importante salientar que atualmente não há mais dúvidas quanto a eficácia econômica da usinagem com altíssimas velocidades. E, até por isso, tornou-se estratégico o estudo do processo para o desenvolvimento tecnológico do Brasil e das indústrias aqui instaladas, visando à manutenção da competitividade internacional.

McGee, em 1979 observou, enquanto realizava experimentos com HSM em alumínio para o exército norte-americano, que os conceitos existentes a respeito de usinagem com velocidades de corte altas não eram razoáveis. As teorias vigentes pregavam que existiria uma temperatura máxima de corte a uma velocidade de corte intermediária, e que esta temperatura diminuiria conforme a velocidade de corte fosse aumentada a partir deste ponto.

Caso a temperatura do corte diminuísse após atingir um máximo, haveria então duas velocidades de corte que resultariam em uma mesma temperatura, fato nunca observado: a temperatura era sempre crescente com o aumento da velocidade de corte.

Uma vez que esta influência da temperatura constantemente é ligada ao desgaste da ferramenta, um desenvolvimento mais voltado a este tipo de usinagem veio sendo estudado desde então, apoiado pelo desenvolvimento de novos materiais

para ferramentas. Materiais como nitreto cúbico de boro (CBN) e cerâmico, que suportam maiores temperaturas de trabalho, contribuíram em muito para a busca de novos limites de usinabilidade em materiais.

Atualmente, as grandes consumidoras a adotar esta tecnologia de usinagem têm sido as indústrias automobilísticas, que utilizam principalmente o fresamento de topo com HSM para fabricações de moldes para estamparia. Um dos principais motivos para se adotar a altíssima velocidade de corte para tal tarefa é a possibilidade de se diminuir o tempo de processos de usinagem, juntamente com o fato de eliminar em alguns casos ou diminuir significativamente o retrabalho no acabamento superficial dos moldes, no quesito acabamento ou polimento, efetuado por mão de obra altamente especializada e cara. Fatores como a possibilidade de se usinar em duro e flexibilidade de produção com alto grau de qualidade também influíram nesta decisão.

Além deste tipo de operação com HSM, já existem aplicações também para linhas flexíveis de usinagem de cabeçotes de motor com furações através de usinagem com altíssima velocidade de corte. Tanto cabeçotes de motor de alumínio como de ferro fundido podem ser fabricados utilizando esta tecnologia com níveis de produtividade equivalentes ou melhores que os processos de fabricação convencionais (Santos et al., 2003). Na figura 2.5 a seguir, apresenta-se a visão atual de usinagem em altíssima velocidade de corte para diferentes materiais, considerando-se curvas de transição da usinagem convencional para a HSM. (Faccio, 2002).

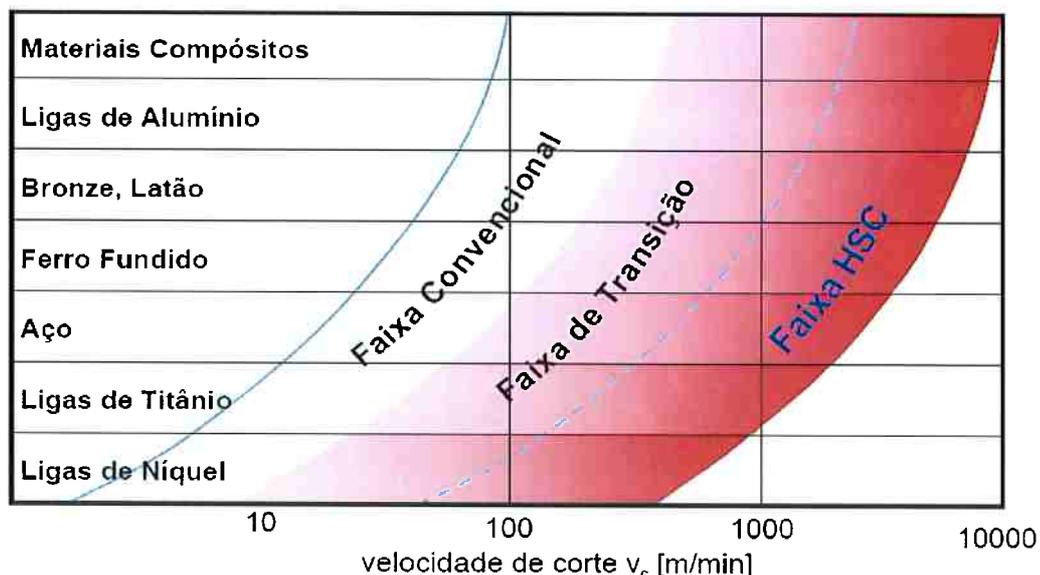


Figura 2.5 – Definição atual de usinagem em altíssima velocidade
Fonte Schützer, K. (1999).

Dagiloke et al., (1995) classificaram os processos de usinagem, de acordo com a faixa de velocidade de corte por eles utilizadas, da seguinte maneira:

- Processos em baixas velocidades de corte (LSM):
 $1\text{m/min} < V_c < 600\text{m/min}$.
- Processos em altas velocidades de corte (HSM):
 $600\text{m/min} < V_c < 1800\text{m/min}$.
- Processos em velocidades muito altas de corte (VHSM):
 $600\text{m/min} < V_c < 1800\text{m/min}$.
- Processos em velocidades ultra-altas de corte (UHSM):
 $1800\text{m/min} < V_c < 300000\text{m/min}$.

2.3. Definição de *High Speed Machining*

Definido pela primeira vez, em 1931 por Salomon como citado anteriormente, o processo de *High Speed Machining* (HSM) é definido como aquele em que a usinagem é feita com velocidades de corte e avanço consideravelmente maiores do que as usadas nos processos convencionais. Atualmente esse termo, HSM, tem sido comumente usado na designação de processos onde são utilizadas altas rotações do eixo-árvore da máquina operatriz ou altas velocidades de corte, situação esta também classificada como *High Velocity Machining* (HVM). No entanto, este termo também vem sendo usado para definir operações onde, apesar de serem utilizadas velocidades de corte não tão altas, utilizam-se parâmetros de corte, principalmente velocidade de avanço (v_f), que proporcionem altíssimas taxas de remoção de material ou processos onde altas velocidades de corte são combinadas com altas taxas de avanço (SANDVIK, 1999).

Na figura 2.6 é mostrada uma classificação de fresadoras segundo um critério mais recente do que vem a ser HSM, apresentando o perfil de necessidades para um centro de usinagem HSC que se orienta para o espectro da peça a ser usinada, bem como para a tecnologia do fresamento HSC necessária (Santos et al., 2003). E na figura 2.7 um comparativo entre usinagem convencional e usinagem HSM na abordagem feita por Peroni e Martinelli em 1999.

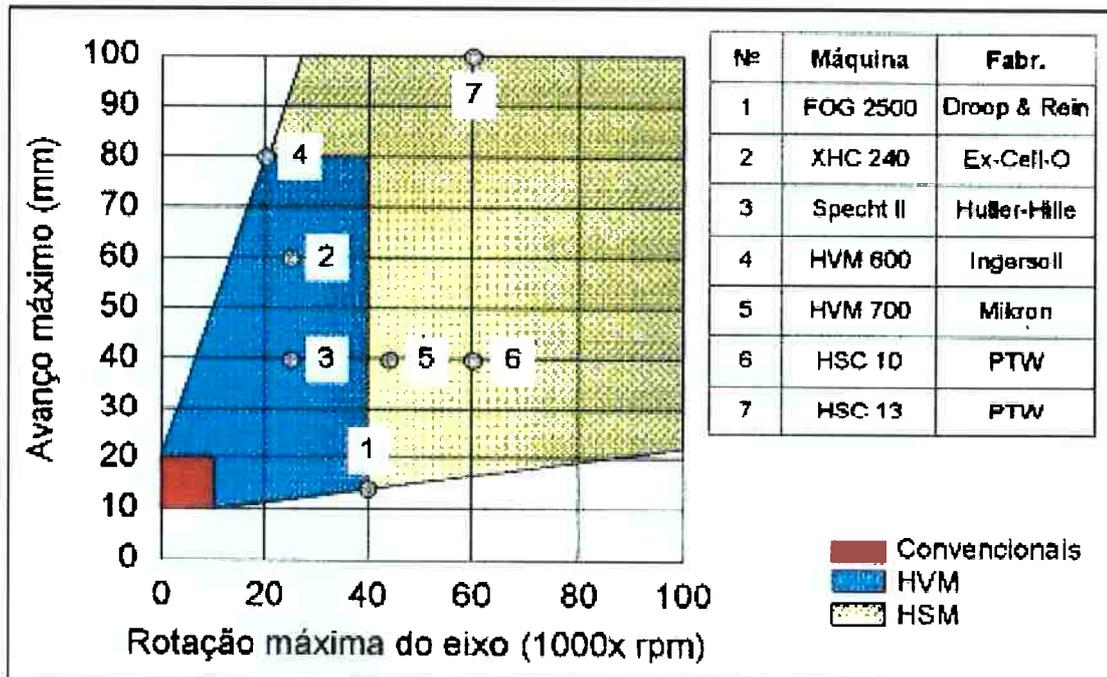


Figura 2.6 – Classificação de fresadoras segundo critérios HSM
SCHMITT – 1998, FINZER – 1998

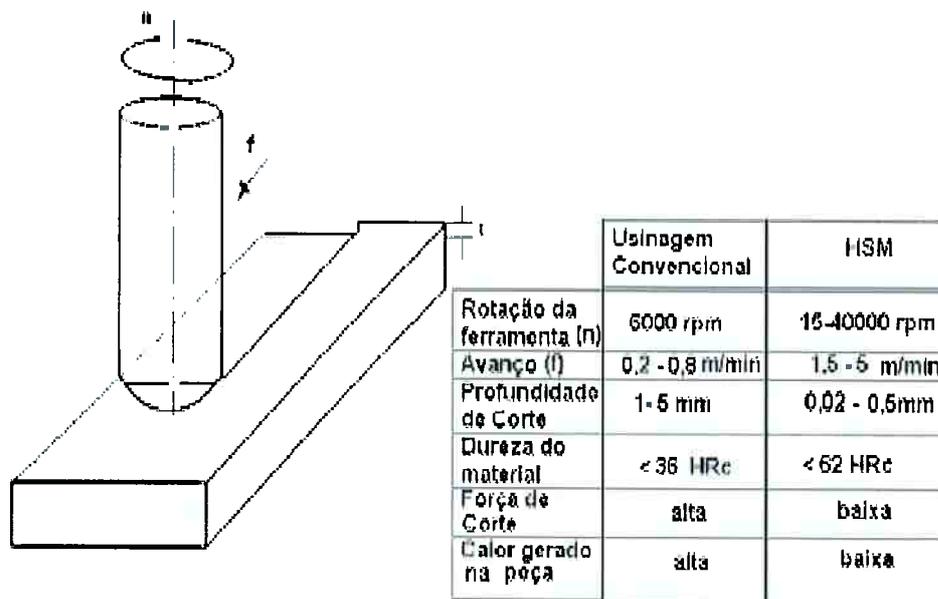


Figura 2.7 – Comparativo dos parâmetros Convencionais e HSM (Peroni e Martinelli, 1999).

O conceito de HSM por muitos anos foi definido, como sendo um processo de fresamento de topo com ferramentas de pequeno diâmetro e rotações na faixa de 10.000 a 100.000 rpm. Entretanto, este processo, inicialmente aplicável a ligas leves, gradualmente foi sendo utilizado para outros materiais, incluindo aços e ferro fundido endurecidos.

A *High Speed Machining* (Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte), no âmbito da melhoria do processo em tempo, pode ser considerada uma redução no tempo global do processo, e não somente durante o corte do material. Os materiais e os elementos de máquina, envolvidos na construção das máquinas que permitem a usinagem em altíssima velocidade garantem uma redução do tempo de aproximação e recuo da ferramenta, bem como do tempo de troca destas ferramentas, além da evidente redução do tempo de usinagem.

Referente à qualidade, os processos em HSM permitem uma qualidade equivalente, às vezes até superior, à de processos convencionais executando as mesmas peças, tanto em qualidade dimensional (tolerâncias de dimensão, forma e ajuste) como em qualidade superficial (rugosidade). Entretanto, é no custo que provavelmente surge o maior obstáculo para a utilização de processos em HSM. Tanto as máquinas, bem como o ferramental e o consumo de energia são até o momento, bastante onerosos e muitas vezes não permitem a utilização deste processo em diversas operações.

Tendo em vista estas três características citadas acima, seria interessante que se verificasse a possibilidade de conseguir processos inteiros (envolvendo máquina, ferramenta, peça e dispositivos) que mostrassem viabilidade de custo, sem deixar de lado, é claro, o tempo e a qualidade desta fabricação. Fabricações difíceis para processos convencionais (por exemplo, usinagem de materiais endurecidos, peças de grande complexidade, alta produtividade aliada a alta flexibilidade de um processo) são os melhores pontos de partida para se verificar tal possibilidade, pois em geral são de custo elevado e permitem uma maior elasticidade ao que seria permitido ou não, quando fosse introduzida a usinagem com altíssima velocidade de corte (Faccio, 2002).

Porém, o material da peça, o material da ferramenta e a operação realizada são alguns dos fatores que influenciam diretamente o valor da velocidade de corte a ser utilizada. Sendo assim, não é coerente fazer-se uma classificação dos processos sem levar em consideração estes fatores e, caso esta classificação seja feita, ela não é válida para qualquer situação. Uma prova disso é que velocidades de corte consideradas altíssimas, para o fresamento de aço endurecidos usinados com ferramentas de metal duro, podem ser consideradas extremamente baixas

comparadas ao torneamento de alumínio utilizando-se ferramentas de diamante poli cristalino.

A figura auto-explicativa 2.8 abaixo, demonstra a Apresentação Holística do Processo HSC, que para atingir os objetivos desta tecnologia, teve sempre uma direção determinada, o que ao final permitiu atingir resultados bem sucedidos para o processo com um todo, com reconhecimento de um grande número de benefícios adicionais (Santos et al., 2003).

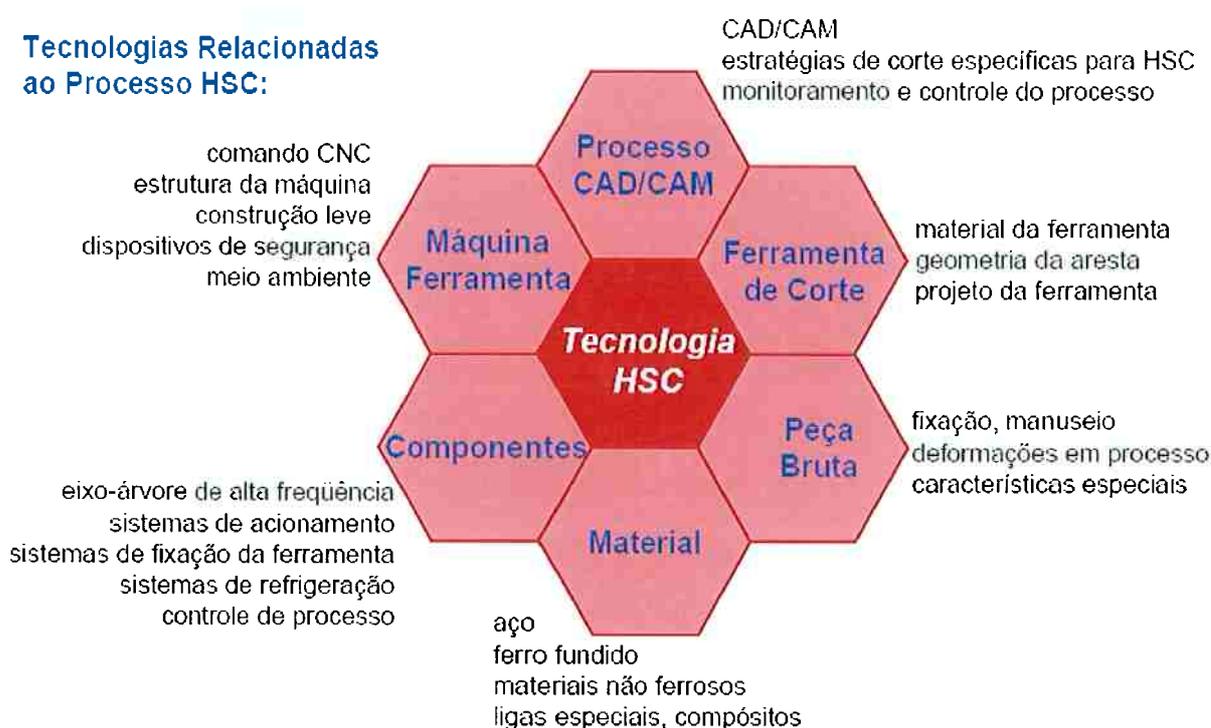


Figura 2.8 – Apresentação Holística do Processo HSC.
Fonte Schützer, K. (1999).

Podem ser citados ainda outros resultados obtidos com a busca da tecnologia HSC, como o aumento da qualidade, a redução do tempo de produção e a redução de custos, como mostrado abaixo na figura 2.9 (Schutzer, 2004).

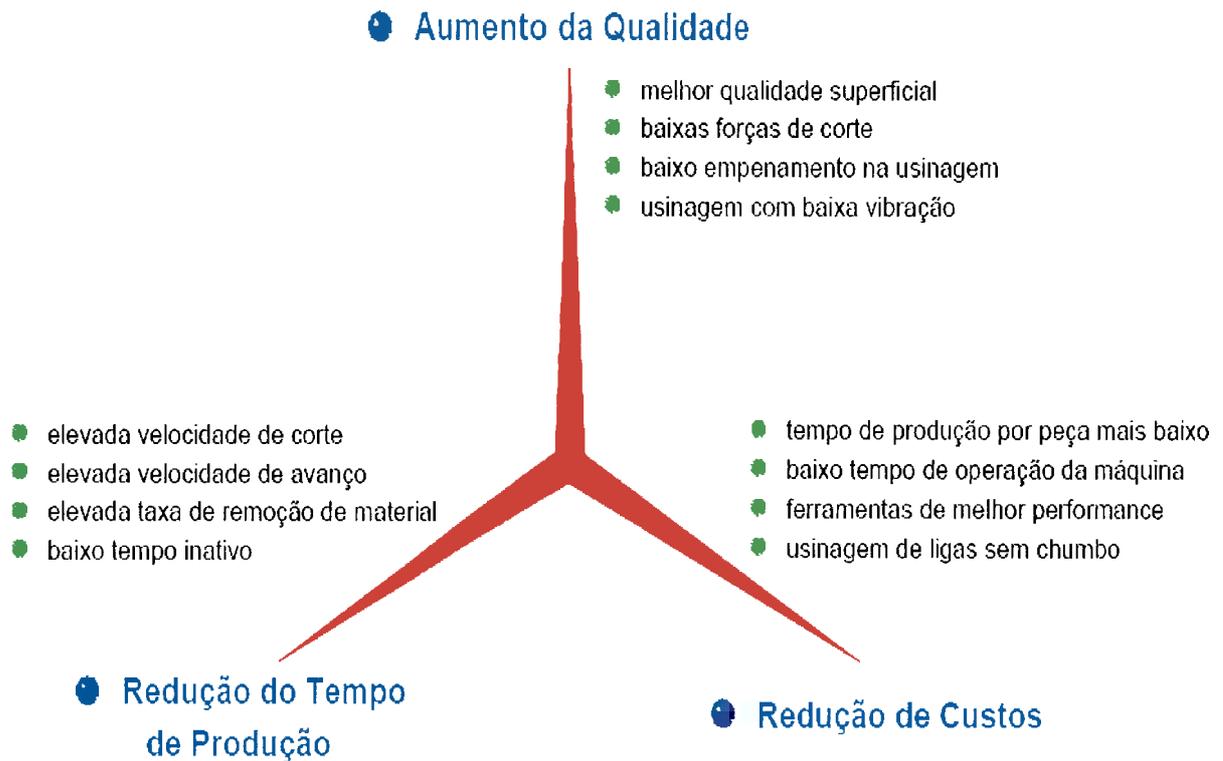


Figura 2.9 – Vantagens da Tecnologia HSC.
Fonte Schützer, K. (2004).

Tabela 2.1 - Áreas de Aplicação da Tecnologia HSC. Fonte Schützer, K. (2004).

Vantagens HSC	Áreas de Aplicação	Exemplos de Aplicação
Grande remoção de material	ligas metálicas leves	indústria aeroespacial
	aço e ferro fundido	moldes e matrizes
Alta qualidade superficial	usinagem de precisão	peças óticas e mecânica fina
	peças especiais	compressores espirais
Baixas forças de corte	peças de paredes finas	indústria aeroespacial; indústria automotiva equipamentos domésticos
Elevada frequência de excitação	usinagem sem vibração de peças Complexas	peças de alta precisão; indústria ótica
Dissipação de calor através do cavaco	usinagem sem empenamento	peças de alta precisão
	baixa temperatura de processo	ligas de magnésio

2.4. FERRAMENTAS DE ALTA TECNOLOGIA

Para falar sobre ferramentas de fresamento deve-se distinguir duas fases na usinagem:

- Desbaste;
- Acabamento.

Na fase de desbaste, a superfície da peça é caracterizada por sulcos produzidos pela ferramenta ao cortar o material, em função da máxima retirada de material no tempo, o que provoca o arrancamento de cavacos grossos. As formas das ferramentas de desbaste são diferentes para cada caso e um dos tipos de ferramenta de desbaste a de topo com pastilhas reversíveis está representado na figura 2.10.

No acabamento, em função da necessidade da tolerância de forma e da textura da superfície são utilizadas ferramentas apropriadas, podendo ter a ponta arredondada que provocam arrancamento de cavacos menores formando superfícies mais lisas, como no caso da ferramenta de insertos cambiáveis tipo *Ball Nose* (Figura 2.11).

Para usinar uma peça a alta velocidade não basta uma máquina ferramenta que permita velocidades de rotação elevadas, grandes avanços e altas acelerações e desacelerações, são necessárias também ferramentas de corte adequadas.



Figura 2.10 - Fresa de topo com pastilhas reversíveis "T Max".

Fonte DEPO Tools, 2006.



Figura 2.11 - Fresa de inserto topo esférico "Ball Nose".

Fonte Tool-Flo, 2006.

Conforme o gráfico a seguir (Figura 2.12), a baixa vida útil da ferramenta de corte é um fator importante a ser considerado nos processos devido aos custos.

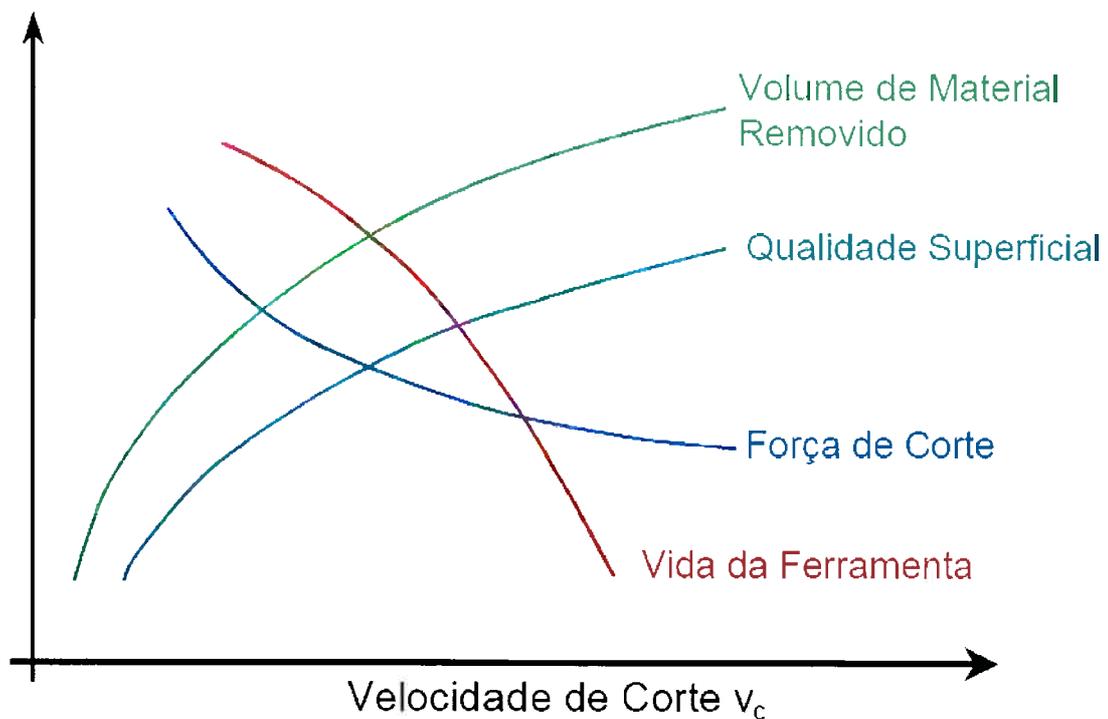


Figura 2.12 – Propriedades gerais da Usinagem com altíssima velocidade.

Fonte Santos, et al. 2003.

As ferramentas HSC típicas são aquelas que geralmente apresentam as arestas de corte de diamante policristalino (PCD, Figura 2.13), ou nitreto cúbico de boro (CBN), firmemente soldadas (fixadas) ao corpo básico, mas podem apresentar também outras configurações.

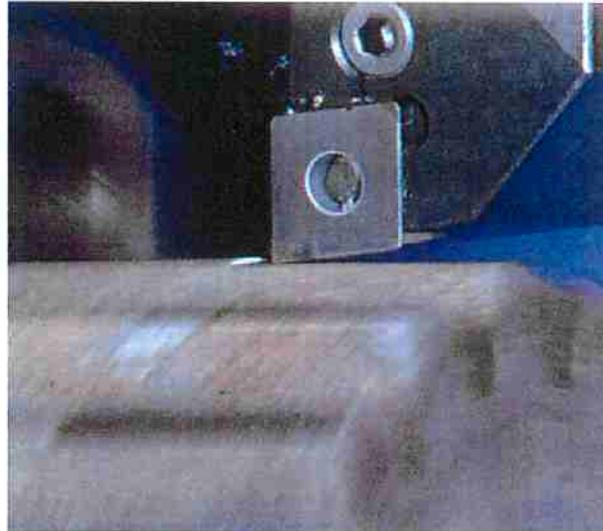


Figura 2.13 - Inserto de PCD ou CBN.

Fonte Máquinas e Metais, 1998.

Elas apresentam resultados muito bons no mandrilamento de furos de precisão e em operações de fresamento circular, entre outras (em diâmetros internos maiores o fresamento circular de interpolação pode ser uma alternativa ao mandrilamento de precisão comparando com ferramentas).

As ferramentas PCD são ideais para a usinagem de materiais não ferrosos (alumínio), atingindo-se vida de ferramenta com níveis muito elevados de qualidade superficial e precisão, dependendo do lote e tamanho das peças.

As ferramentas CBN são ideais para a usinagem de materiais ferrosos (aço e ferro cinzento), tais constatações foram pesquisas da Universidade de Birmingham (Schmitt, 1997).

O conhecimento dos fenômenos de desgaste no material de corte selecionado para utilização em ferramentas é um dos principais fatores de seleção. O desgaste por abrasão torna-se apenas mais um componente a se considerar em usinagem HSC, o aumento da temperatura causada pelo aumento da velocidade de corte tende a acelerar a ocorrência de outros fenômenos de desgaste entre a peça e a ferramenta, a exemplo da difusão e da oxidação.

Os materiais para ferramentas citados anteriormente diamantes poli cristalinos (PCD) e o nitreto cúbico de boro (CBN) apresentam bons resultados nos aspectos vida da ferramenta, rugosidade da peça após a usinagem e custo. Os desgastes demonstram que eles possuem maior resistência à abrasão em altas temperaturas, em comparação com as pastilhas recobertas por carboneto de titânio,

nitreto de titânio, carbonitreto de titânio, óxido de alumínio e materiais cerâmicos (Diniz, Marcondes, Coppini, 2001), como mostra a figura 2.14.

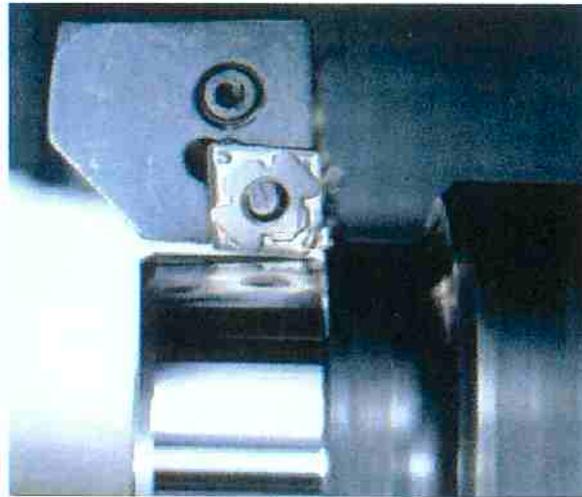


Figura 2.14 - Inseto de cermet.

Fonte Máquinas e Metais, 1998.

Este fato é de grande importância, porque na usinagem HSC as temperaturas são extremamente elevadas, devido às altíssimas velocidades de corte empregadas, e do atrito entre peça e ferramenta.

Os alargadores (Figura 2.15), por exemplo, para corte a alta velocidade, definidos como ferramentas de alta precisão, com almofadas guias, representam uma área especial de uso, permitindo a usinagem de furos nas faixas de tolerância mais apertadas também em centros de usinagem (Faccio, 2002).



Figura 2.15 - Ferramenta HSC com guias de diamante.

Fonte Máquinas e Metais 1998.

No corte de peças de alumínio com ferramentas de diamante de alta precisão com guias, são usadas velocidades de corte de até 2.500 m/mm enquanto,

velocidades de corte de até 1.000 m/min já estão sendo utilizadas com sucesso na usinagem de ferro fundido cinzento. Estas altas velocidades de corte são possíveis devido às guias de diamante e às arestas de corte de diamante ou de nitreto cúbico de boro, e são atingidas qualidades superficiais Ra de 0,2 μm em alumínio, 0,3 μm em aço e 0,8 μm em ferro fundido cinzento (Diniz, 2001).

Normalmente, o refrigerante tem cerca de 8% de óleo de corte e é suprido através da ferramenta de alta precisão para as guias e para as arestas de corte, a uma pressão entre 20 e 30 bar. Atualmente ferramentas assim já estão sendo usadas com lubrificação mínima, em desenvolvimento também estão os processos de alargamento HSC com remoção de micro cavacos a velocidades de corte e avanços elevados(Beck, 1998)

Friedrich Stockinger (1997) em seu trabalho enfatizou que durante o fresamento HSC, do alumínio, foram usadas velocidades de corte de 8.000 m/min, nas quais se considerou, sob o ponto de vista da segurança que o corpo básico torna-se o ponto fraco quando se utiliza grandes diâmetros. Deve-se recorrer ao que dispõe o projeto “Diretrizes de Segurança CEN TC143/WG7” de 25 de março de 2002 discutido por um grupo de engenharia em Birmingham. Discussão baseada no caso de quebra ou soltura, da ferramenta de corte durante a alta velocidade, serão produzidas forças de grande intensidade. Para prevenção devem se tomar certas precauções quanto aos procedimentos de uso da HSM, quanto à fixação e ao material das ferramentas de corte.



Figura 2.16 - Ferramentas de corte e insertos.

Fonte Mapal, 2006.

A Mapal fabricante de ferramentas selecionou o alumínio de alta resistência à

tração para a sua nova série de fresas HSC (Figura 2.16). Seguindo os resultados dos ensaios realizados no PTW (Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen ²⁾, da Universidade Técnica do Darmstadt (Projeto de Pesquisa Segurança - Requisitos Técnicos Durante as Operações de Fresamento), que mostraram que o alumínio permite rotações mais elevadas que o aço.

Por exemplo, o corpo de alumínio de uma ferramenta protótipo de 200 mm de diâmetro quebrou em quatro pedaços a 27.500 rpm durante um ensaio de ruptura no PTW, mas as cápsulas soldadas ainda estavam firmemente fixadas ao corpo. De acordo com o projeto "Diretrizes de Segurança CEN", não é permitida a ruptura no dobro da velocidade de rotação operacional (mais 10% de segurança = 2,2). Assumem-se $27.500 : 2,2 = 12.500$ rpm como uma velocidade de rotação operacional segura (Stockinger, 1997).

Em geral, todos os materiais de corte duros definidos pela DIN/ISO 513 – carbeto - cerâmica - diamante (DP) o nitreto de boro (BN) são usados em aplicações HSC. O DP é fundamentalmente adequado para o alumínio e o BN para o ferro fundido cinzento ou para o aço. Uma ferramenta HSC consiste não só de aresta de corte e corpo, mas também de interface, ou seja, da conexão entre a ferramenta e a máquina e pode ser muito complexa como, por exemplo, ser equipada com guias deslizantes integradas e ou características similares. São exigidos requisitos mais apertados das ferramentas HSC rotativas, como as fresas, devido às altas velocidades de rotação e forças centrífugas. As operações de fresamento compõem a grande maioria das aplicações HSC.

O calor gerado durante o arranque de cavacos é principalmente eliminado junto com eles, resultando em um alto volume de cavacos que é produzido, e deve ser removido, de maneira que a ferramenta deva ter canais de cavacos adequados. Além disso, a tecnologia HSC exige alta segurança tanto em termos de ferramenta quanto de máquina (Beck, 1998).

(²) Instituto para Gerenciamento da Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramenta da Universidade Técnica de Darmstadt em Darmstadt, Alemanha, é considerado um centro mundial de referência para a pesquisa e desenvolvimento da Tecnologia de Usinagem com Altíssimas Velocidades.

Os acessórios de fixação (Figura 2.17), e os fixadores de ferramentas de corte de alta velocidade (Figura 2.18), constituem outro elemento chave no desenvolvimento da usinagem HSC, tanto em relação aos materiais das ferramentas e da peça quanto ao projeto e deve-se dar atenção especial aos sistemas de fixação da ferramenta nas máquinas, devido aos altos esforços a que elas são submetidas.



Figura 2.17 – Fixação com ajuste excêntrico.

Fonte Z&Y Tool Supply, 2006.



Figura 2.18 - Fixadores de ferramentas de alta velocidade de corte.

Fonte Brait, 2006.

Muitas vezes, estas ferramentas atingem velocidades de corte acima de 8.000 m/min que exige delas características como alta rigidez na fixação, tenacidade no corte e tolerância a altas temperaturas geradas durante a usinagem.

Como citado por Santos et al, uma das características da HSM é a tendência à deformação do fuso da máquina quando submetido a altas rotações – acima de 15.000 rpm. Deformação que consiste na expansão do fuso devido à força centrífuga a que está submetido durante o giro.

No caso dos cones ISO que têm o seu sistema de tração feito pelo centro do fuso da máquina, essa expansão tem efeitos mais acentuados, devido à falta de encosto entre o cone e o nariz da máquina. O que faz com que o cone seja movimentado mais para dentro do fuso, que em sua posição original durante a usinagem (Schulz, 1997), conforme a figura 2.19.

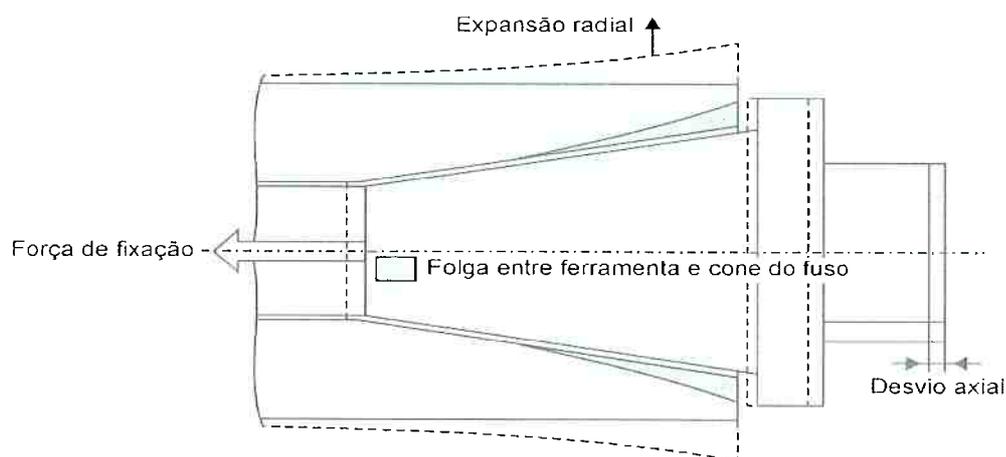


Figura 2.19 - Movimento causado pela expansão do cone no eixo-árvore provocada pela força centrífuga. Fonte Santos, et al – 2003.

Os cones ISO possuem diferentes formas de contato abaixo na figura 2.20 apresenta-se um comparativo entre um cone fabricado sob licença da Big Daishowa, do Japão o Big-Plus que proporciona maior contato com menor espaço de folga do flange e um cone convencional com maior folga.

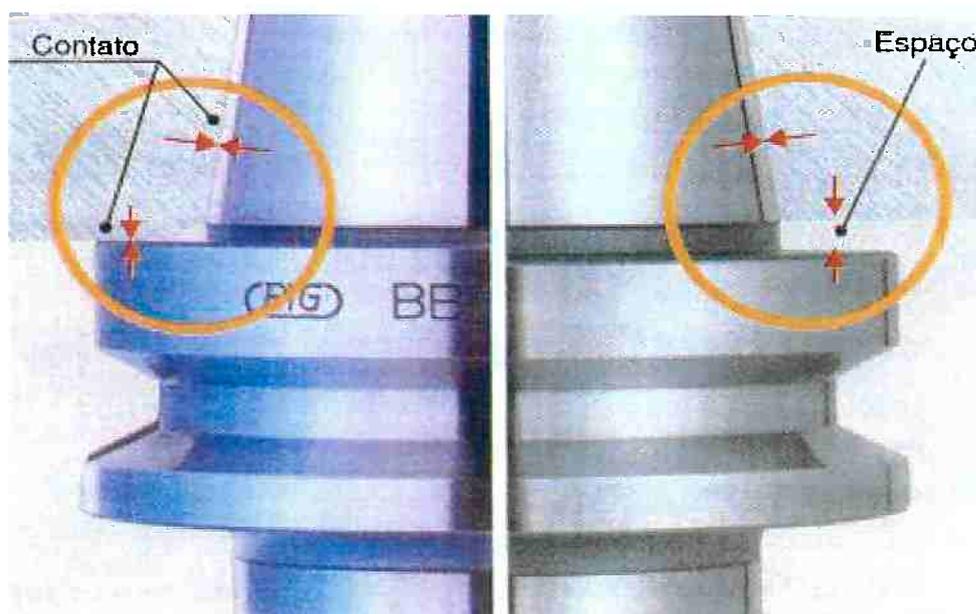


Figura 2.20 - Detalhes que possibilitam maior rigidez na fixação.

Fonte Big-daishowa, 2006.

As ferramentas de corte a serem utilizadas em processos de usinagem HSC, devem ter aspectos de projeto e confecção visando atuar em quatro aspectos: material da ferramenta, geometria de corte, sistema ferramenta-máquina e design da ferramenta.

Os tópicos a seguir definem melhor as características especiais das ferramentas, acessórios e equipamentos para HSC.

2.5. GEOMETRIA DA FERRAMENTA

Na usinagem HSC, os ângulos da ferramenta influenciam de forma significativa a magnitude dos esforços de corte durante a usinagem, à semelhança da usinagem convencional. O resultado da variação do ângulo de saída efetivo na usinagem HSC é similar à variação encontrada na usinagem convencional.

Testes realizados no PTW permitiram chegar a alguns valores recomendáveis de uma forma genérica para otimização de geometrias de ferramentas, para operações de fresamento e freso torneamento em HSC (Figura 2.21). A geometria das ferramentas tem grande influência durante a usinagem HSC (Schulz, 1998).

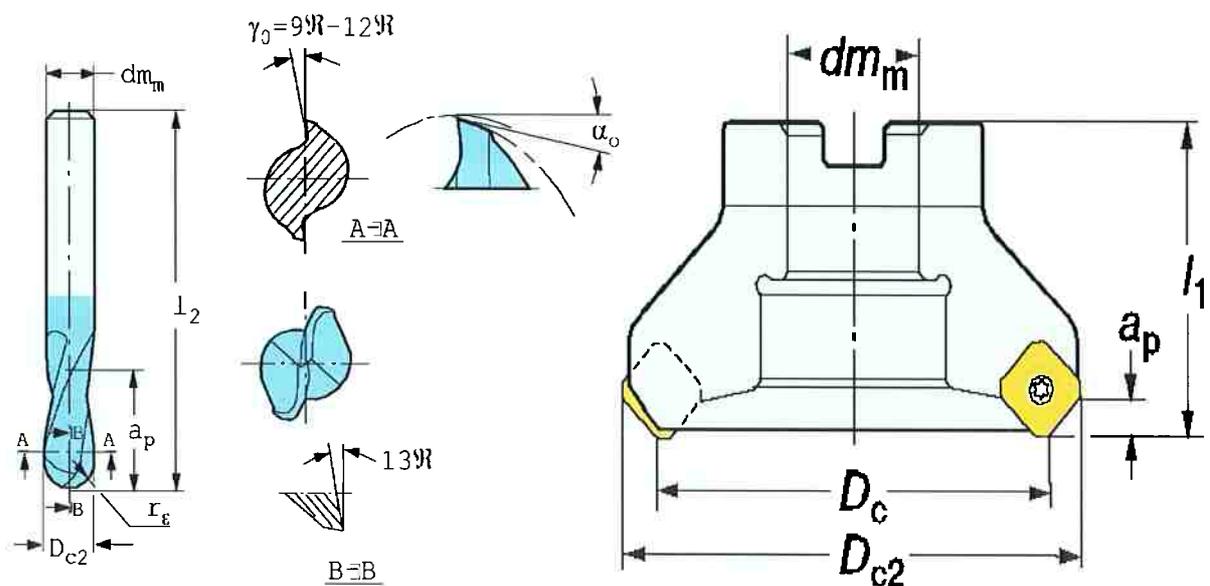


Figura 2.21 – Padronização de valores recomendáveis de forma genérica das ferramentas de corte.

Fonte Sandvik 1998.

2.6. GENERALIDADES DO PROJETO DE FERRAMENTA PARA HSC

O PTW tem pesquisado novas soluções para o projeto de ferramentas de corte para HSC através da utilização de métodos de cálculos de elementos finitos. O instituto também provou que a tensão acumulada nos entalhes das ferramentas, devido aos cavacos armazenados em seus “bolsões” que se concentram principalmente na região de fixação das pastilhas, é um grande problema em ferramentas para usinagem HSC. Alguns insertos possuem geometria de quebra cavaco conforme a figura 2.22.

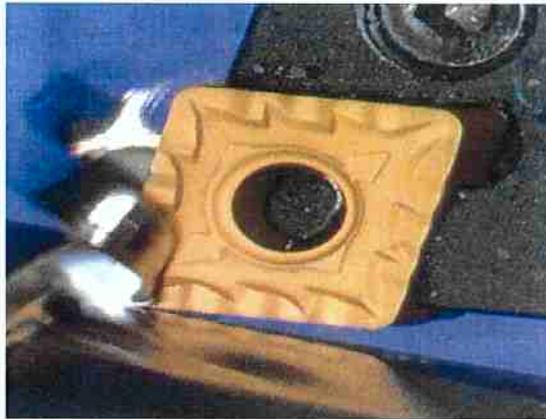


Figura 2.22 - Geometria quebra cavaco da aresta postíça de corte.

Fonte Sandvik, 1998.

Em função destas observações algumas recomendações genéricas podem ser consideradas no desenvolvimento de projeto de ferramentas para usinagem HSC (Kukino, 1999).

- Preferência por materiais dúcteis.
- Redução de bolsões de armazenamento de cavaco.
- Redução dos efeitos causados por entalhes, através do reprojeto de arestas de corte.
- Minimização da massa dos componentes do ferramental.
- Ajustar o centro de massa das ferramentas sobre o menor raio possível.

2.7. SISTEMAS FERRAMENTA x MÁQUINA EM HSC

Outros fatores de bastante relevância em usinagem HSC são os mecanismos de fixação das ferramentas, onde a rigidez deve considerar o alto nível de solicitações (Schulz, 1998).

A interface ferramenta x eixo-árvore é o ponto onde ocorre a maior concentração de esforços entre a peça e a máquina, que por sua vez deve apresentar condições de alta rigidez, conforme figura 2.23, com ferramenta robusta utilizada para desbastes.



Figura 2.23 - Condições de alta rigidez para maiores concentrações de esforços.

Fonte Sandvik, 1998.

Esta interface deve garantir, além das condições usuais de rigidez, requisitos gerais de cortes, com ótimas condições geométricas (batimento, concentricidade) e principalmente possibilitar troca rápida de ferramentas, sem causar qualquer prejuízo na resistência do material às forças centrífugas que atuam sob a mesma, dilatando o eixo mais do que a ferramenta e ocasionando uma deformação axial nesta interface. Daí a importância dos adaptadores especialmente fabricados para atender a necessidade da usinagem HSC, figura 2.24.

Uma possível solução para este fato é o uso de superfícies limitantes como flanges, já contemplados pela norma DIN 69893. Este sistema já provou, em testes,

suportar até quatro vezes o esforço gerado na usinagem como mostrado anteriormente na figura 2.20. Desta maneira, esta atendendo também o quesito segurança (Lung, 2000).



Figura 2.24 - Adaptadores para HSC.
Fonte Lyndex Nikken, 2006.

2.8. O BALANCEAMENTO É UMA NECESSIDADE

O balanceamento das ferramentas HSC é fundamental para a utilização da tecnologia da alta velocidade, o PTW está desenvolvendo um projeto da pesquisa denominado "Balanceamento" para analisar detalhadamente esta questão, especialmente quanto aos seus efeitos sobre a qualidade superficial a vida da ferramenta e a precisão dimensional que podem ser obtidas (Lung, 2000).

As normas ISO 1040/1 e ANSI S2.19 especificam as classes de qualidade de balanceamento para rotores rígidos e os desbalanceamentos residuais máximos que correspondem a estas classes.

A fórmula para calcular o desbalanceamento permissível para a placa usando um cone # 40, operando entre 8.000 e 20.000 rpm, é a seguinte:

$$U = G \times 9549 \times W/\text{rpm} \quad [2]$$

Onde:

U = desbalanceamento permissível em g – mm;

G = padrão para a qualidade de balanceamento de corpos rígidos giratórios (2,5 mm/s é o G para acionamentos de máquinas-ferramenta);

W = o peso em kg do conjunto do suporte de ferramentas;

9549 = uma constante;

rpm = velocidade de rotação do conjunto.

Para calcular as tolerâncias de balanceamento para um conjunto de suporte que pesa 2,75 kg, a qualquer rpm para g 2,5:

$$U = 2,5 \times 9549 \times 2,75/\text{rpm}$$

Ou

$$U_{2,5} = 65.659 \text{ g-mm/rpm.}$$

A solução para 8.000 rpm fornece um desbalanceamento permissível 8,2 g-mm e um desbalanceamento permissível de 3,3 g-mm para 20.000 rpm (Gunninck 2000).

Para ferramentas compactas normalmente é suficiente o balanceamento estático, enquanto para ferramentas com grandes comprimentos em balanço o balanceamento dinâmico é uma necessidade vital. É absolutamente recomendado que cada elemento, ferramenta, adaptador e fuso sejam balanceados individualmente, rebalanceando-se a ferramenta e o adaptador em conjunto, e, eventualmente, também rebalancear a ferramenta juntamente com o fuso. Além disso, recomenda-se o uso de parafusos para um balanceamento refinado das ferramentas HSC.

A empresa Balance Dynamics (EUA) desenvolveu um sistema para balanceamento automático do fuso (Figura 2.25). O dispositivo não é apenas mais rápido que as abordagens tradicionais para balanceamento, mas também eficaz.



Figura 2.25 - Sistema de balanceamento automático, chamado de Bala Dyne.

Fonte Máquinas e Metais, 2000.

A figura 2.26 a seguir, mostra em uma peça de alumínio o quanto que uma ferramenta balanceada afeta o acabamento superficial. O porta-ferramenta (Figura 2.27) balanceável usado para usinar ambas às metades da superfície foi ajustado para os dois valores não balanceados, 100 g-mm e 1,4 g-mm, medidos por uma máquina Hofmann para balanceamento.



Figura 2.26 - Detalhe do acabamento superficial.

Fonte Sandvik, 1999.

Quanto mais balanceada estiver a ferramenta, mais suave é o acabamento superficial produzido. As condições dos dois cortes foram idênticas: 12.000 rpm, faixa de avanço de 5.486 mm/min. Profundidade de 3,5 mm e largura de corte de 19 mm, usando-se ferramenta e porta-ferramenta com massa combinada de 1,49 KG (Gunninck 2000).



Figura 2.27 - Porta – ferramentas e adaptadores balanceáveis.

Fonte Lyndex Nikken, 2006.

2.10. NOVAS CONCEPÇÕES

As solicitações cinemáticas e dinâmicas, que são submetidas às máquinas e ferramentas durante o processo de usinagem a altíssimas velocidades de corte exigem uma nova maneira de construção da máquina-ferramenta, no que se refere ao projeto e características construtivas. São máquinas denominadas *high speed machines* (HSM). Entre as novas concepções empregadas nestas máquinas, os novos eixos-árvore possibilitam avanços com acelerações significativamente maiores do que as máquinas convencionais. Isso requer das máquinas condições extremas de lubrificação e rigidez. Além disso, outra grande modificação empregada nestas máquinas é a utilização de motores lineares, que possibilitam o alcance de deslocamentos muito rápido dos carros de translação. Tais motores constituem o elemento chave de diferenciação de uma máquina HSM e estão intimamente relacionados ao emprego de um novo conceito de projeto de máquinas, onde eixos não cartesianos possibilitam uma grande flexibilidade associada aos recursos da usinagem HSC. Deve-se ainda ressaltar que o emprego destas máquinas impulsionou o desenvolvimento de comandos CNC, especificamente adaptados à usinagem HSC, com alterações conceituais nos algoritmos de software e com alterações profundas de hardware.

Hoje o mercado de máquinas HSM, está em crescimento extremamente

promissor. São poucos os fabricantes atuais, todas as máquinas fabricadas são vendidas e as novas encomendas entram em fila de espera para o atendimento. Até o ano de 1998 no mundo existia por volta de 200 máquinas HSM em uso comercial (Finzer, 1998) a maioria delas concentrada na Europa e Ásia.

Estes equipamentos possuem particularidades de concepção e construção singulares, onde tudo é planejado para a obtenção da máxima performance do processo em HSC específico para cada caso. A seguir estão alguns tópicos sobre as características construtivas e operacionais destas máquinas.

2.10.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS GENÉRICAS DE MÁQUINAS HSM

O conceito que embasa a escolha de uma máquina HSM, deve estar sedimentado no tipo de aplicação em que ela será utilizada e quais serão os requisitos mínimos desta aplicação.



Figura 2.28 - Máquina HSC.

Fonte Mazak, 2006.

A figura 2.28, acima mostra uma máquina HSC, fornecedor Mazak com as seguintes características:

- Modelo Mazak FF-510;
- Aceleração do fuso (0-15.000 rpm) 1,3 s;
- Rotação máxima do fuso 15.000 rpm;

- Deslocamento rápido (eixos X,Y,Z) 60 m/min;
- Tempo de troca de ferramentas 0,45 s;
- Dimensões compactas (1,6 largura X 4,07 comprimento).

Pode-se afirmar que não existem máquinas HSM para aplicações universais. Para cada caso particular de usinagem deverão ocorrer modificações nos componentes da máquina, a fim de adequar o equipamento às novas exigências do processo. Um exemplo está representado pela figura 2.29 a seguir, como máquina utilizada para fabricação de peças aeroespaciais e aeronáuticas.



Figura 2.29 – Ultra High Speed Linear Motor Drive Vertical Machining Center.

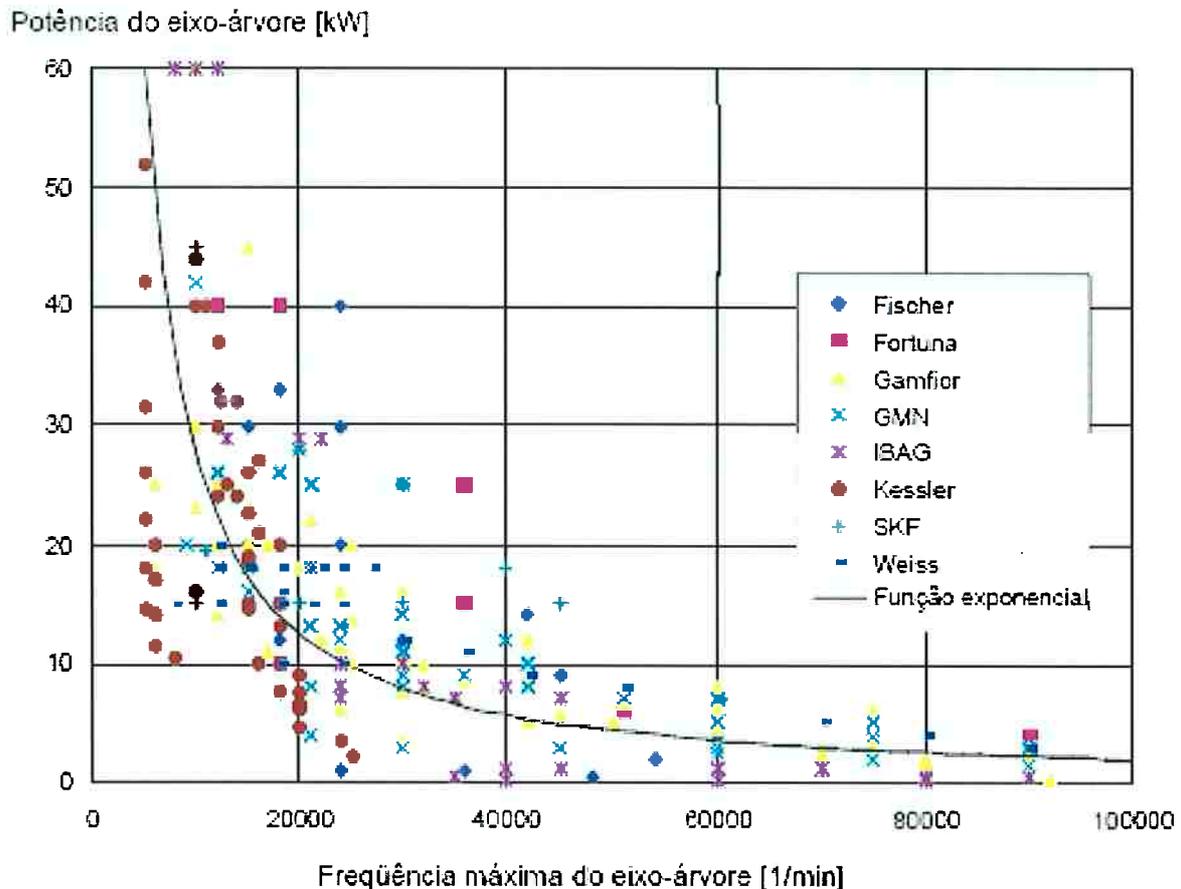
Fonte Mazak, 2006.

- Modelo: HYPERSONIC 1400L
- Mesa: 4000 X 1250 mm
- Percurso X/Y/Z axis: 4200 X 1400 X 585 mm
- Avanço: 120 m/min
- Rotação: 18000 rpm
- Aceleração de 0,7G

Para a obtenção de um bom desempenho dinâmico, em geral a base da máquina deverá ser fabricado em concreto polimérico, o que garantirá um componente de absorção em altas solicitações bastante favorável. Outros fatores importantes na elaboração do projeto de conceito e escolha de um equipamento HSM são os seus eixos - árvore, os carros de translação auxiliares, as guias, os fusos de avanço e os sistemas de controle CNC.

2.10.2. EIXOS-ÁRVORE, CARROS DE TRANSLAÇÃO, GUIAS E FUSOS

O uso de construções compactas e rígidas permite o alcance de frequências críticas elevadas, em comparação às máquinas normais (Figura 2.30).



Melhorias construtivas e tecnológicas dos mancais através de melhoramento do lubrificante (graxa); aumento da capacidade de carga (material); novos conceitos de mancais (mancais híbridos; mancais hidrostáticos com “água”), seguidas por melhorias no motor através de novos materiais para o rotor (Co-chapas); otimização da espessura da chapa; novos conceitos para estator (fluxo de calor) e aumento da frequência de excitação, têm contribuído para o aumento da potência dos eixos-motor ao passar dos anos como, por exemplo, de 1997 até 2002, como mostra a figura 2.31 citada por Schutzer, 2006.

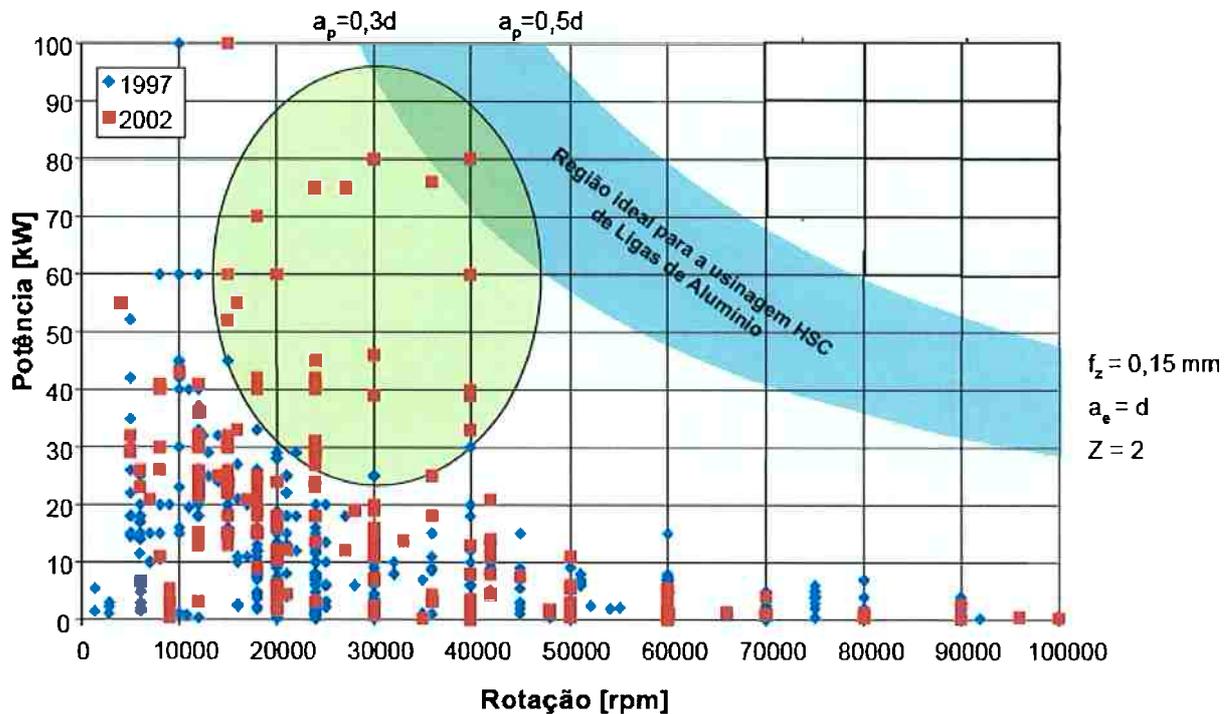


Figura 2.31 – Aumento de potência dos eixos-motor: 1997-2002.

Fonte Schuter, 2006.

Desta maneira, como regra geral, o projeto do eixo-árvore deve considerar um motor integrado, onde há uma divisão da frequência do motor pelos rolamentos. Nos motores para máquinas HSM são encontrados mais comumente rolamentos com esferas cerâmicas conforme figura 2.32, mas também podem ser utilizados rolamentos magnéticos ou a ar (Meador, 2001).

Buscando a maximização do torque, o diâmetro da montagem será limitado principalmente pela velocidade periférica (força centrífuga) e pelas características do material utilizado. Operações contínuas e de grande duração poderão atingir velocidades da ordem de 7.500 m/min, enquanto operações de ciclos curtos poderão utilizar velocidades de 9.000 m/min (Lung, 2000).

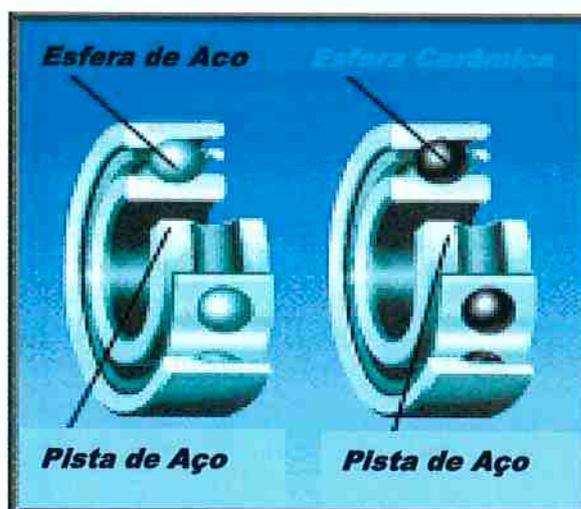


Figura 2.32 - Rolamento com esferas de aço e de cerâmica.

Fonte Máquinas e Metais, 1999.

Além do torque fornecido pelo motor, outras exigências fundamentais para máquinas HSM são as altas acelerações necessárias à manutenção das taxas de avanço constantes, garantindo a precisão dinâmica do conjunto.

Uma das maneiras mais eficientes para se obter estes dois quesitos é através da redução da massa dos componentes móveis. A utilização de construções leves permite aumentos significativos da aceleração, especialmente com a utilização de motores lineares. Visando esta condição, todos os componentes da máquina devem ser produzidos mantendo-se uma relação de peso bastante reduzida, possibilitado por novos materiais como o alumínio, o titânio e plásticos reforçados. Alguns destes materiais proporcionarão uma redução do momento de inércia em torno de 40%. Além do material, outros fatores que podem ser utilizados para este fim são as otimizações da geometria dimensional, as melhorias conceituais do projeto e a busca por melhores sistemas de fixação (Lung, 2000).

Praticamente todos os componentes móveis das máquinas HSM possuem guias lineares (Figura 2.33), porque elas apresentam redução do coeficiente de atrito e garantias de melhor precisão, em virtude da utilização de rolos, esferas e acoplamentos elásticos, com ausência de folga e alta rigidez torcional (Figura 2.33).



Figura 2.33 - Detalhe de guias lineares de uma máquina HSC.

Fonte Modern machine shop on line, 2000.

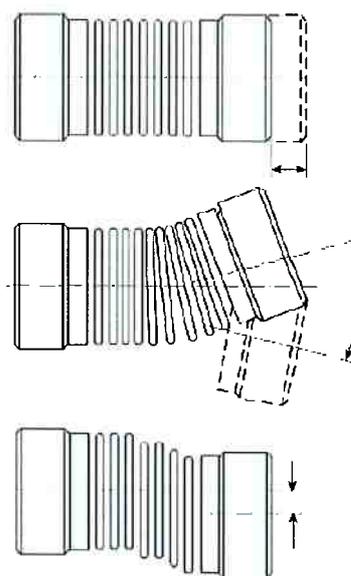


Figura 2.34 - Detalhe do acoplamento elástico.

Fonte USP, 2002.

Por isso, pode-se afirmar que a opção de fusos de esferas recirculantes ocasiona a redução de folgas e do próprio momento de inércia, aumentando o avanço por rotação em até três vezes. Nestes casos, pode se atingir até 100 m/min. As tecnologias dos servo-motores de acionamento conjugado aos fusos de esferas recirculantes apresentam ótimas características dinâmicas. Oferecem controles de reversão com baixas constantes de tempo e, momentos de torque elevados também em curtos espaços de tempo.

O componente essencial de uma fresadora de alta velocidade é o fuso principal (Figuras 2.35 e 2.36). São necessárias rotações acima de 30.000 rpm para serem obtidas as ótimas velocidades de corte com as ferramentas com diâmetros abaixo de 16 mm, que são freqüentemente usadas na fabricação de matrizes.

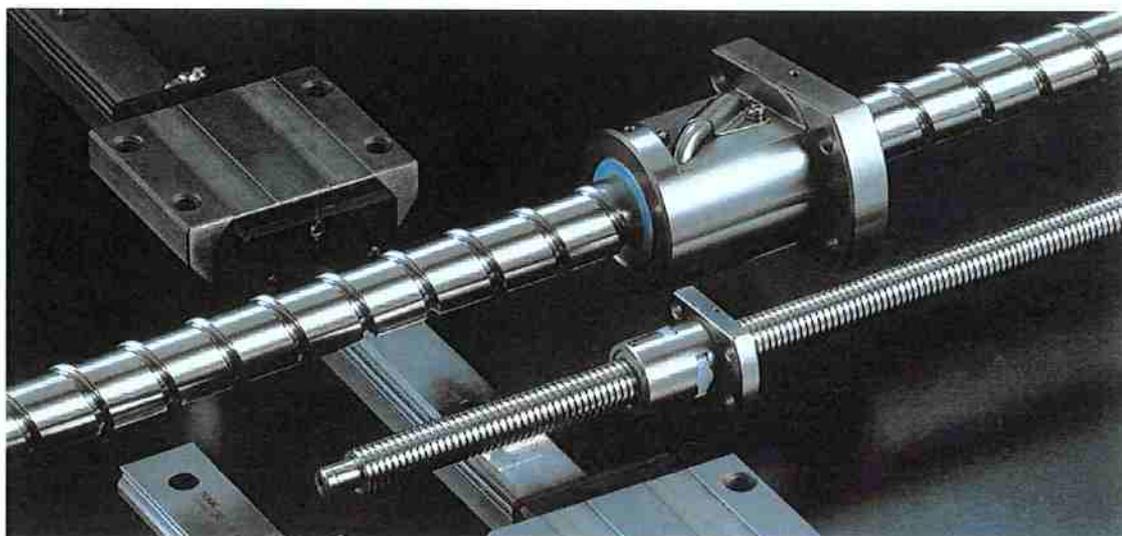


Figura 2.35 - Fuso principal HSC de esferas com lubrificação.

Fonte NSK, 2006.

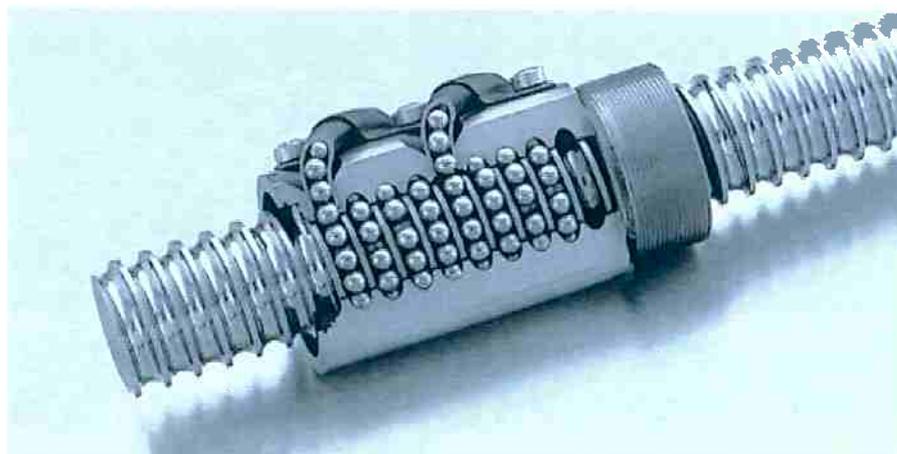


Figura 2.36 - Fuso principal HSC com castanhas de esferas recirculantes.

Fonte USP, 2002.

Para assegurar uma rigidez suficiente do fuso e do sistema de fixação da ferramenta, este sistema não pode ser selecionado arbitrariamente. Com o uso de mancais híbridos e lubrificação óleo-ar, um fuso com um suporte de ferramentas HSK 40 pode obter uma velocidade máxima de cerca de 40.000 rpm (Figura 2.37).



Figura 2.37 - Fixação da ferramenta com lubrificação óleo-ar.

Fonte Braita, 2006.

Principais resultados da aplicação de Motores Lineares mostrado pela figura 2.38(Schützer, 2006).

- Elevada velocidade de avanço e aceleração;
- Excelente característica dinâmica;
- Sistema de acionamento linear ainda é de custo elevado;
- Forte campo magnético, o que exige proteção complexa e custo elevado;
- Força de atração magnética aproximada de 4 a 6 vezes a força nominal do motor diminuindo a vida das guias lineares;
- Calor gerado pelo motor e guias é transferido para estrutura da máquina acarretando aumento dos custos operacionais;
- Acionamento linear para eixos verticais exige compensação de peso;
- Manutenções caras e freqüentes no sistema.

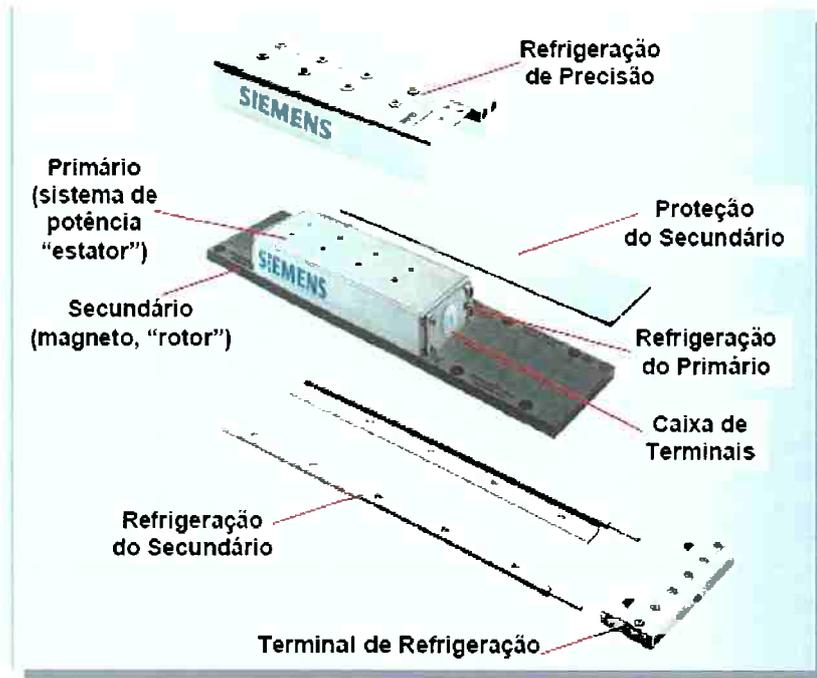


Figura 2.38 – Sistema para Motores Lineares

Fonte Siemens, 2006.



Figura 2.39 - High Speed – Motores lineares.

Fonte Maho-Deckel, 2006.

A figura 2.39 acima mostra a esquerda um centro de usinagem de altíssima tecnologia com motores lineares que proporcionam velocidades incríveis nos movimentos das mesas, chegando a 90 m/min, e a direita está um centro de usinagem suíço, com 43.000 rpm no cabeçote, ambas do fabricante Maho-Deckel.

2.10.3. CINEMÁTICA PARALELA

Este tipo de estrutura é conhecido há muito tempo. O primeiro documento de que se tem registro é de 1813 no qual o matemático A. Cauchy estudou o movimento do denominado octaedro articulado, conforme registro do Jornal da Ecole Polytechnique da França, páginas 87 a 98, de maio de 1813 (CAUCHY, ...).

“A primeira teoria de cinemática paralela foi desenvolvida por Clerk J. Maxwell na Inglaterra em 1890. Mais tarde vários cientistas alemães investigaram este tipo de mecanismo” (Stewart, ...).

Por volta do ano 2004 é conhecida a primeira máquina de cinemática paralela no Brasil. Ela foi apresentada na feira da mecânica de São Paulo pela empresa Traub-Index de origem alemã com sede em Sorocaba, São Paulo, Brasil. (INDEX, 2004).

2.10.4. MÁQUINAS FERRAMENTA DE CINEMÁTICA PARALELA

Para uma usinagem eficiente, há uma necessidade da aproximação correta da ferramenta de fresar e da peça a ser usinada. As máquinas-ferramenta com novas cinemáticas de movimento são as mais adequadas para a realização desta operação. Fazem parte deste tipo de máquinas as denominadas estruturas paralelas, nas quais os eixos de avanço ficam dispostos paralelamente.

Dentro deste conceito as máquinas de cinemática paralela são as mais conhecidas. Elas dispõem de uma série de vantagens construtivas frente às máquinas convencionais. As maiores vantagens são uma elevada dinâmica e pequenas massas a serem movimentadas, bem como uma grande parte dos componentes construtivos padronizados e de uso geral, o que leva a soluções favoráveis de custos.

Segundo Wilhelm J. Blumlein (2006) da empresa Andron GmbH, localizada na cidade de Wasserbug, na Alemanha, “a configuração mais comum para máquinas-ferramenta de cinemática paralela inclui seis tirantes de comprimentos variáveis e duas plataformas, uma externa que é definida como a plataforma móvel e que tem

seis graus de liberdade relativos à outra plataforma que é a base fixa". Com seis graus de liberdade a plataforma móvel é singularmente capaz de mudança em três direções lineares e três direções angulares ou em qualquer combinação. Na figura 2.40 a seguir, se observam três configurações, a do meio corresponde à Plataforma de Stewart Invertida, as outras são variações desta, que são utilizadas pelas empresas Micromat figura 2.41 e pela empresa Norte Americana Ingersoll.

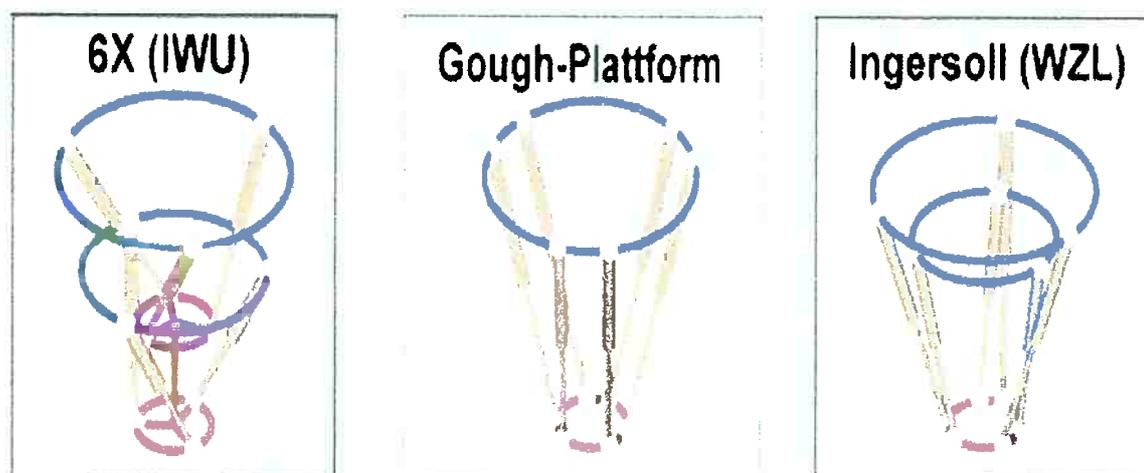


Figura 2.40 - Configurações Esquemáticas para máquinas hexápodes
Fonte Maschine+werkzeug, 2006.

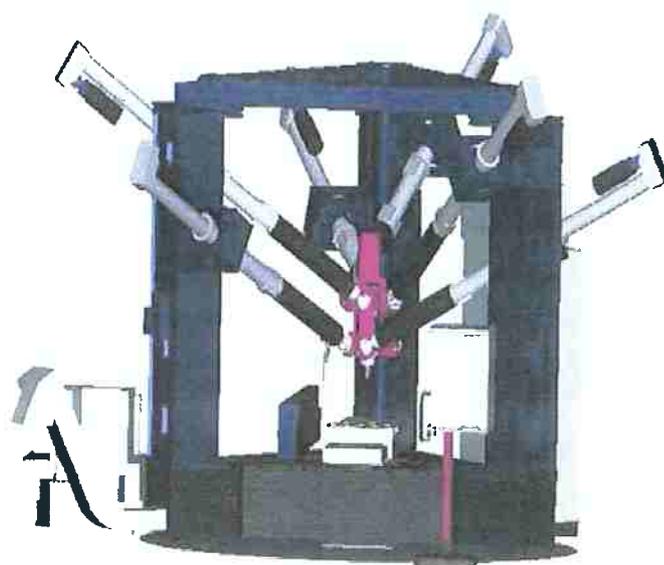


Figura 2.41 - Estrutura hexapode da 6X Hexa
Fonte Maschine+werkzeug, 2006.

2.10.5. PEÇAS E COMPONENTES PARA CINEMÁTICA PARALELA

Frank Durschimied da empresa de rolamentos Schaeffler da Alemanha, disse “entre os subconjuntos para mecanismos de cinemática paralela, os tirantes e articulações são componentes fundamentais. Eles são decisivos para a precisão e capacidade deste tipo de máquina e muitos deles já estão á disposição dos projetistas fabricantes para a nova geração de máquinas-ferramenta” (Durschimied, 2000).

Até 1997, poucas pessoas acreditavam na estrutura de cinemática paralela, agora, parece que ninguém quer ficar para trás. Este desenvolvimento desafia os fabricantes de elementos de máquinas. A indústria de mancais de rolamentos reconheceu o fato há algum tempo com a fabricação dos primeiros componentes. Tudo começou com o desenvolvimento dos elementos articulados, seguidos da construção e execução de tirantes telescópicos completos.

Segundo Durschmied, as articulações representam o estágio mais avançado da técnica na maioria dos equipamentos mecânicos.

As principais exigências feitas para as articulações nas máquinas de Cinemática paralela são: elevada rigidez, elevada capacidade de carga estática, elevada vida útil, ângulos de giro adaptados à construção, massas pequenas, elevada precisão, alojamentos sem folgas, sistemas pré-tensionados, movimentos livres sem engripamento e ausência de desgaste.

A articulação de esferas entre todas as articulações, e a que oferece a melhor relação de capacidade de carga em relação à área construtiva com vedação através do suporte circundante (Figura 2.42).

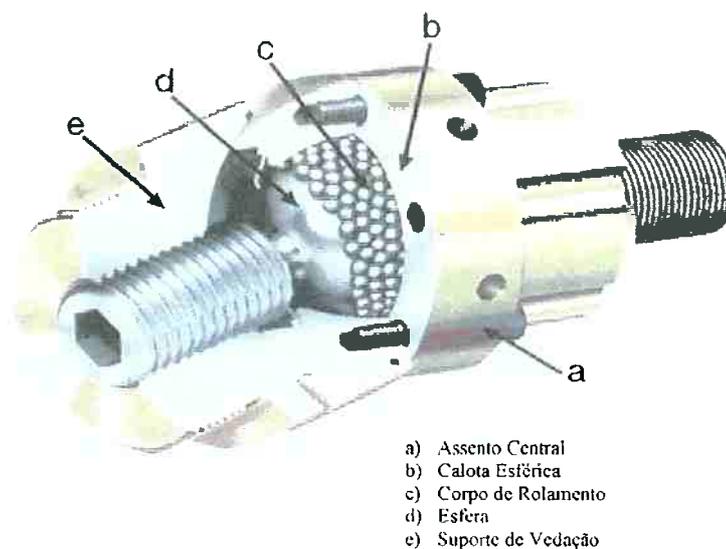


Figura 2.42 - Junta esférica em corte.
 Fonte Modern machine shop on line, 2000.

A figura 2.43 mostra um sistema de eixo linear com eixos rotacionais para máquinas de cinemática paralela, sendo 1 eixo linear Z e 2 eixos rotacionais.

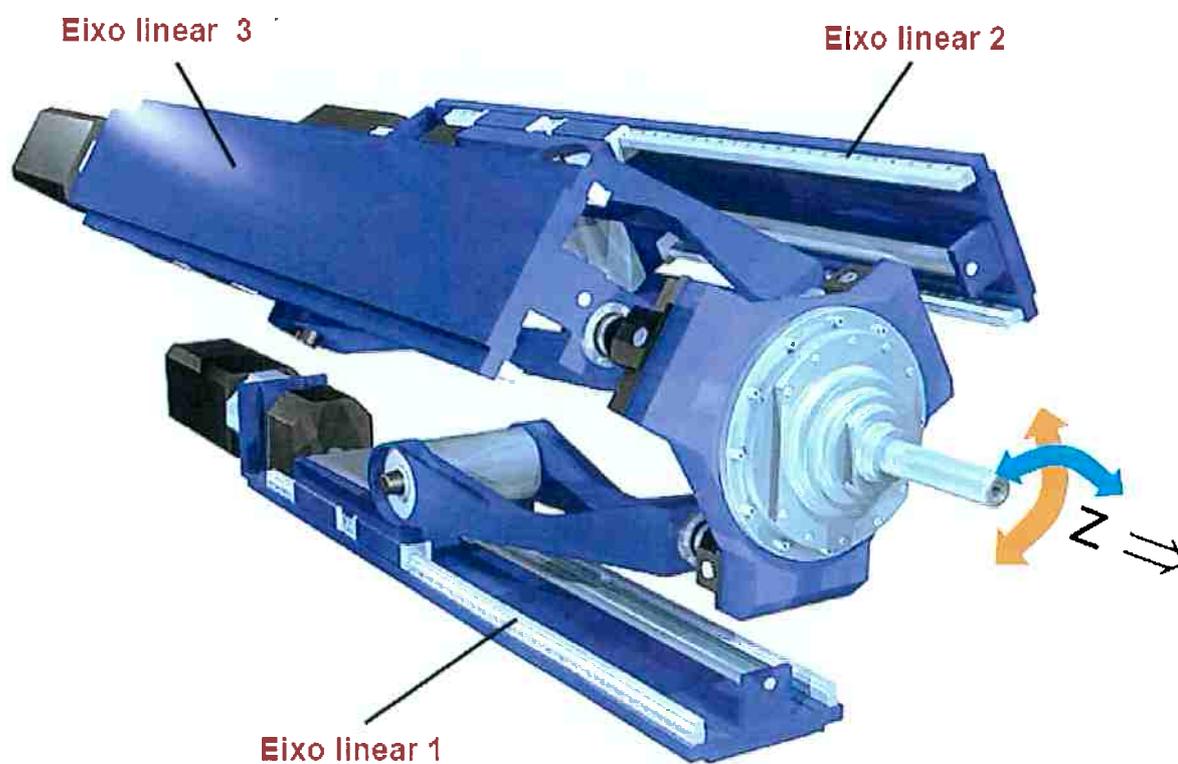


Figura 2.43 – Sistema de eixo linear em máquinas paralelas.
 Fonte: Ecospeed, DS Technologie, 2006.

Segundo Schützer (2006), as principais vantagens de máquinas com cinemática paralela são:

- Alta rigidez;
- Alta velocidade de avanço $\geq 60\text{m/min}$;
- Alta aceleração $\geq 10\text{m/s}^2\text{min}$;
- Simples montagem;
- Simples estrutura da máquina;
- Uso intenso de componentes standard e construção modular;
- Baixo preço;
- 5 eixos sem necessidade de cabeçote giratório;
- Boa capacidade de carga dos montantes (tração/compressão).

E as desvantagens principais são:

- Cinemática e rigidez dependentes do posicionamento;
- Transformação de coordenadas complexa;
- Posicionamento do eixo-árvore limitado a aproximadamente 15°;
- Área de trabalho pequena em comparação com o volume da máquina;
- Projeto complexo das articulações;
- Calibração complexa;
- Vibração transversal dos "fusos" (acionamento linear).

2.10.6. USINAGEM DE MOLDES E MATRIZES

No Brasil, o setor de moldes e matrizes começou seu crescimento extraordinário em 1999, quando a moeda brasileira (Real) sofreu uma desvalorização frente à moeda norte americana (Dólar), o que desencadeou a substituição dos principais fornecedores externos (Espanha, Portugal, Taiwan e Itália) por fornecedores internos e, conseqüentemente, a modernização de sua indústria (Metal Mecânica, 2000).

A tecnologia HSC (High Speed Cutting) surge como uma das soluções na

manufatura de moldes e matrizes, porém sua aplicação na indústria tem encontrado inúmeras dificuldades, uma vez que ela não se limita a um cabeçote de alta rotação, mas é a combinação de altas velocidades de corte, altas velocidades de avanço e um conjunto de novos parâmetros no ambiente de usinagem para criar um novo processo de fabricação baseado nos fatores que influenciam a sua aplicação.

Segundo Raimund Neugebauer (2000), do Instituto de Fraunhofer de máquinas Operatrizes e técnicas de conformação de Chemnitz na Alemanha, a situação da fabricação de moldes e matrizes caracteriza-se por uma multiplicidade crescente de produtos e uma redução dos tempos de ciclo, e ao mesmo tempo em que aumentam as exigências de qualidade devem ser reduzidos os custos de fabricação.

O resultado deste contexto é a necessidade de máquinas ferramentas com maiores velocidades de avanço e que também possam aumentar a produtividade e melhorar a qualidade. Devem ainda permitir a obtenção de maior precisão dimensional e desta forma melhorar a qualidade do acabamento da superfície. A usinagem em acabamento se faz freqüentemente pelo processo de fresamento em máquinas de três eixos de alta velocidade. Em casos especiais é usada a tecnologia de três eixos mais dois eixos, em que os dois últimos são usados como eixos de apoio.

Uma usinagem simultânea em máquinas de cinco eixos à alta velocidade não é possível em máquinas de conceito convencional. As vantagens tecnológicas da trajetória otimizada da ferramenta de fresar na superfície a ser usinada não podem ser desta maneira utilizadas, já que na atualidade parece ter esgotado suas possibilidades dentro do conceito da mecânica convencional.

Na manufatura de moldes e matrizes são produzidas muitas superfícies complexas. Análises realizadas junto a usuários na manufatura de ferramentas mostraram um índice de 65%. Como ferramentas de acabamento são usadas fresas de ponta esférica na faixa de um a dez milímetros de diâmetro. O material de corte usado geralmente nessas ferramentas é metal duro revestido.

Num dos estudos para determinar as vantagens da tecnologia HSC na manufatura de moldes e matrizes, foram fabricadas duas matrizes de estampo, uma pelo processo convencional utilizado pela empresa e a outra aplicando a tecnologia HSC (Santos et al., 2003). A figura 2.44 ilustra os valores obtidos nesse estudo.

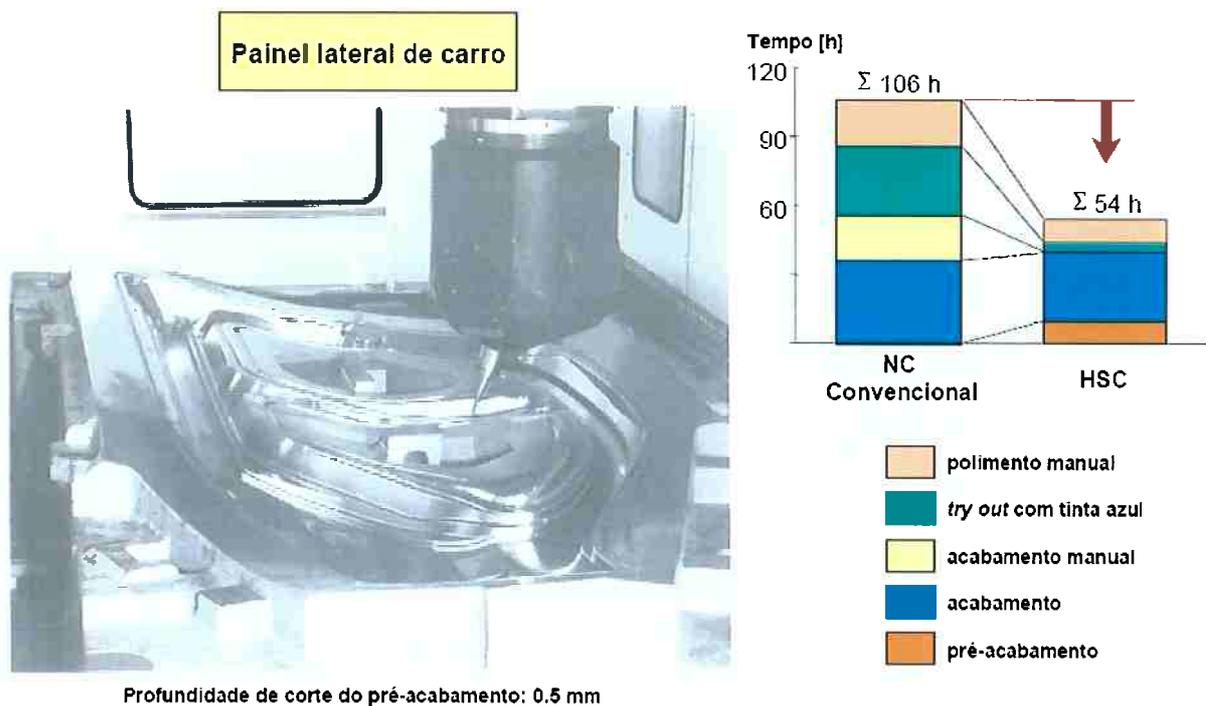


Figura 2.44 – Estudo de redução de tempo de aplicando HSC.

Fonte Finzer, 1998.

Nota-se uma redução próxima de 51% do tempo total de manufatura do processo com tecnologia HSC em relação ao processo convencional. Esta redução não se deu apenas pela diminuição do tempo de usinagem, mas também pela eliminação do acabamento superficial e a redução drástica do polimento manual e da etapa de try out (Helleno, 2003).

A HSC ainda que seja um processo rápido de usinagem, o tempo de usinagem ainda pode ser reduzido se houver um avanço tecnológico associado à vida das ferramentas de corte.

Precisão, repetibilidade dimensional e velocidade são alguns dos eventos que garantem a qualidade, otimizam os custos e viabilizam menores prazos. Para tanto são necessários recursos apropriados, por isso algumas empresas optam por direcionar largos investimentos em máquinas e equipamentos da mais alta tecnologia disponível no mercado mundial, para manter seu parque industrial sempre moderno e atualizado e assim consolidar sua posição no seleto time das ferramentarias globais. Na figura 2.45 um gráfico apresentado por Schutzer (2006) em uma de sua palestras, indicando a redução do tempo de produção na fabricação de moldes, com um escalonamento por prioridades para implementação, com uma diferença de até 52,1 % de redução.

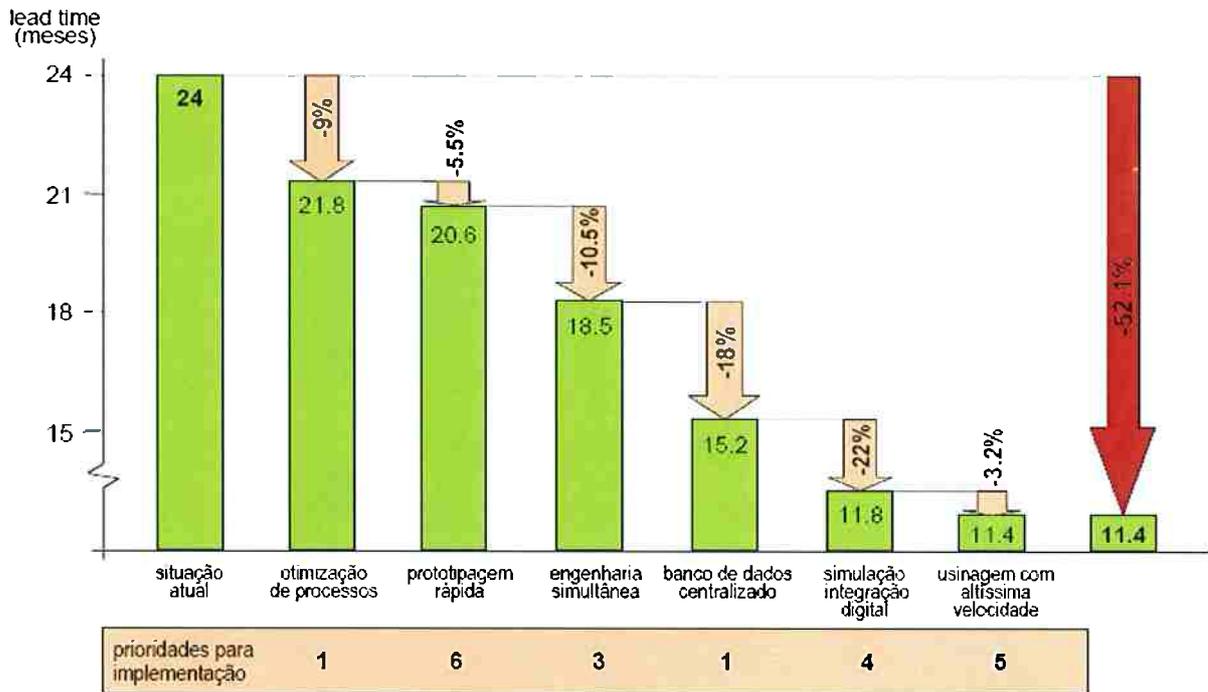


Figura 2.45- Redução do tempo de produção na fabricação de moldes.

Fonte Schutzer, 2006.

2.11. SISTEMAS DE CONTROLE CNC EM HSM

Devido às elevadas taxas de avanço envolvidas em máquinas HSM, as exigências quanto à velocidade de processamento do comando são bastante severas. Os sistemas CNC não podem ser mais lentos do que as taxas de avanço requeridas, uma vez que o tempo de processamento da sentença de comando é mais alto do que o tempo de acesso aos pontos programados para a trajetória de corte. Além disso, os atuais programas CNC utilizam uma elevada quantidade de linhas de comando, o que exige programar muitos pontos de trajetória. A consequência direta desta lentidão dos atuais CNC é a parada das máquinas HSM para a espera do processamento da sentença de comando. Logo, os comandos em máquinas HSM devem possibilitar processamento de muitas sentenças à frente dos movimentos das máquinas. Uma das soluções encontradas para viabilizar a introdução deste novo conceito de CNC é a utilização da interpolação flexível, recurso que agrupa diversas sentenças de interpolação linear em uma única sentença. Assim, é reduzido o tempo de resposta para as acelerações e

desacelerações decorrentes das modificações da trajetória e da alteração das taxas de avanço (Kukino,1999).

2.11.1. SISTEMAS DE VELOCIDADES DE EXTRAÇÃO DE CAVACOS

A eliminação dos cavacos é de grande importância em condições severas de usinagem, como as que ocorrem em máquinas HSM. Para facilitar as remoções dos cavacos, muitas máquinas HSM possuem sistemas que possibilitam fixar a peça verticalmente, facilitando a retirada dos cavacos da área de corte, mesmo que seja por gravidade.

Em relação aos sistemas de refrigeração, a única grande alteração passa a ser a obrigatoriedade de os mesmos serem submetidos de 3 a 5 bar de pressão (Finzer, 1998), a figura 2.46 a seguir exemplifica alguns tipos de refrigeração.

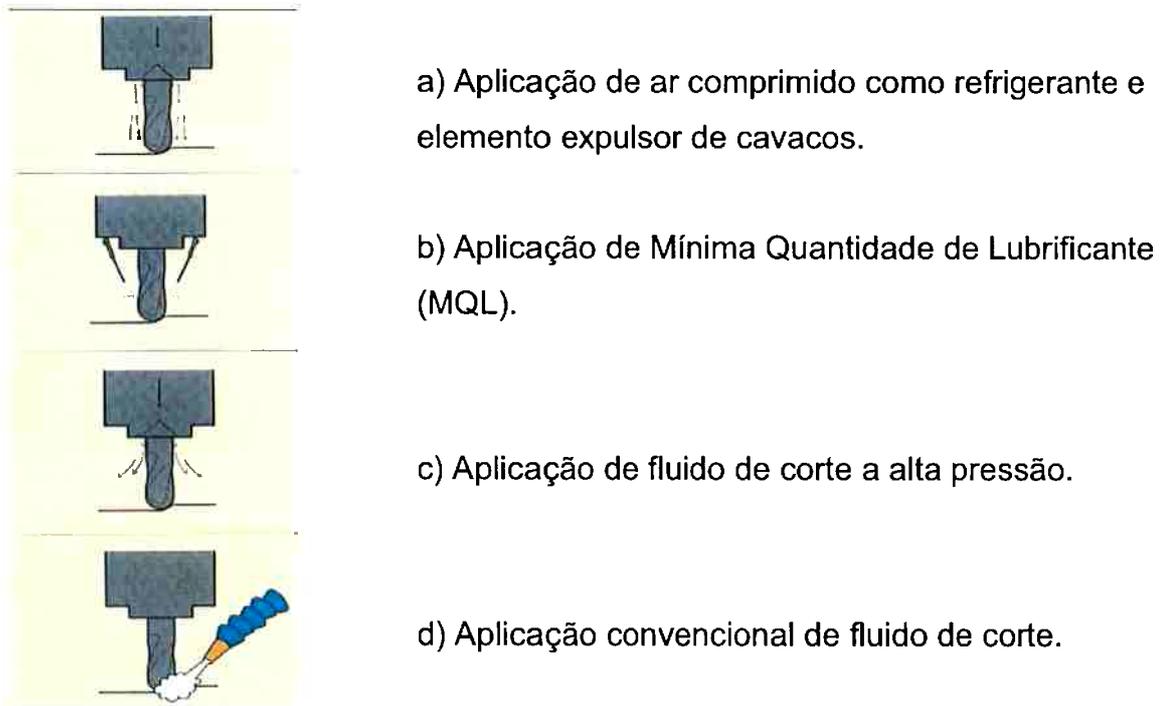


Figura 2.46 – Métodos de aplicação de fluido de corte em uma operação de fresamento.

Fonte SANDVIK, 1999.

Como consequência direta das altas velocidades envolvidas no processo de usinagem HSC, grandes volumes de cavacos são removidos e grande vazão de fluido de refrigeração e de corte ocorrem, o que torna o encapsulamento do local de

trabalho quase obrigatório. Neste aspecto, proteções contra a quebra de ferramentas são de extrema prioridade. As cabines de encapsulamento devem ter resistência suficiente para absorver a energia de impacto, caso exista quebras ou lançamento de componentes em altíssimas velocidades.

2.11.2. ENCAPSULAMENTO

Como consequência da alta rotação, os cavacos atingem altíssimas velocidades.

Outro elemento de risco é a possibilidade de estilhaçamento da ferramenta, o que pode ser comparado ao disparo de uma arma de fogo, como representado na figura 2.47, que trás um exemplo de quebra de ferramenta na usinagem com alta velocidade de corte. Onde a pastilha ou inserto se solta de uma fresa de 40 mm de diâmetro a uma velocidade de fuso de 40.000 rpm. A pastilha ejetada, com uma massa de 0,015 kg, sairá voando a uma velocidade de 84 m/s, o que significa um nível de energia de 53 Nm – equivalente à bala de uma pistola.

Para evitar problemas, as máquinas-ferramenta devem possuir um sistema de blindagem e proteção, para a máquina e operador.

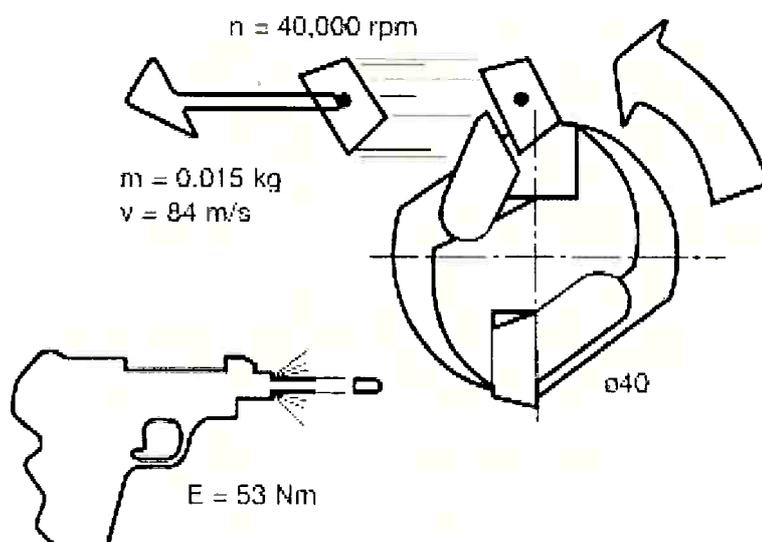


Figura 2.47 - Um exemplo das consequências da ruptura de uma pastilha de 0,015kg.

Fonte Sandvik, 1999.

Desta forma, as laterais da máquina, possuem paredes em chapa de 3 mm de espessura ou mais, e o teto da máquina também possui reforço.

Na linha de ação da ferramenta existem portas corredeiras, com janelas de observação, geralmente uma de cada lado da máquina, em vidro laminado a prova de balas.

2.11.4. PRECISÃO DA TRAJETÓRIA

Na usinagem HSC é requerida uma espessura de corte mínima para a criação de condições de corte favoráveis. Portanto, uma realização tecnológica correta do processo de altas velocidades de corte torna a adaptação do avanço absolutamente necessária. Assim, para uma ferramenta de até cerca de 20 mm de diâmetro, avanços de 0,05 a 0,2 mm/dente devem ser considerados como valores de referência.

Na usinagem HSC de aço temperado (55-56 HRC) (Schulz, 1998), opera-se a velocidades de corte de até 400 m/min (Finzer, 1998). Com uma ferramenta de dois cortes com diâmetro de 6 mm e um avanço de dente de 0,1 mm, isto requer taxas de avanço de cerca de 4,5 m/min. Com o alumínio, sob as mesmas condições, são necessárias velocidades de corte de 1.500 m/min e avanços de mais de 16 m/min.

Para aplicações típicas na manufatura de matrizes, estas taxas de avanço precisam também ser realizadas com alta precisão em contornos difíceis. Na usinagem de aços duros, não deve haver qualquer atraso substancial do movimento de avanço porque, de outra forma, as ferramentas tornam-se sobrecarregadas termicamente. É necessária a mais alta capacidade possível de aceleração do eixo do avanço. Atualmente podem-se obter acelerações acima de 10 m/s^2 de forma econômica (Schulz, 1998).

Os elevados números de aceleração exigem muito dos acionadores, dos módulos de acionamento dos elementos mecânicos atuadores, como acoplamentos e fusos de esferas. Uma aceleração descontínua pode conduzir a tensões mecânicas elevadas na estrutura da máquina, que deve ser adequadamente rígida. As frequências naturais de ressonância da estrutura da máquina devem permanecer

as mais altas possíveis, de modo que nenhuma excitação possa resultar a partir movimento de avanço.

A frequência natural de ressonância mais baixa desta máquina permanece em cerca de 70 Hz. As máquinas projetadas para usinagem a alta velocidade também permitem precisão de contorno ao redor de 10 μm , mesmo com taxas de avanço de até 10 m/min. Entretanto, os sistemas de controle para máquinas HSC não devem apenas ter recursos para o processamento rápido de dados NC e algoritmos de sistemas de controle adaptados para HSC. Devem assegurar também uma comunicação isenta de problemas para os sistemas CAD/CAM existentes. A capacidade de rede e as grandes facilidades para a manipulação de grandes quantidades de dados no sistema de controle, também ajudam a reduzir os tempos não produtivos e a evitar erros na usinagem.

2.12. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM HSC NA PROGRAMAÇÃO CNC

A possibilidade do modelamento tridimensional e de manufatura de superfícies complexas num pequeno espaço de tempo faz com que a tecnologia CAD/CAM se transforme numa grande ferramenta das empresas para alcançar a melhoria da qualidade de seus produtos, o aumento da produtividade, a rapidez na introdução de novos artigos e a diminuição dos custos de manufatura.

Para a máquina CNC executar a manufatura de um molde, ela precisa de um programa NC contendo as trajetórias das ferramentas, gerado pelo CAM. Este, por sua vez, necessita de um modelo geométrico tridimensional da superfície a ser usinada para poder calcular as trajetórias das ferramentas e processar o programa NC (Helleno, 2003).

HSC oferece uma oportunidade das mais apropriadas para redução dos tempos de operação, pois as altas velocidades de corte e as taxas de avanço envolvidas permitem reduzir os tempos de produção e minimizar o retrabalho, em virtude do menor espaçamento entre trajetórias que pode ser obtido. A aplicação da usinagem em alta velocidade tem o seu foco nas áreas de ferramental rápido,

manufatura de eletrodos e fresamento direto de moldes a partir de aço, ferro fundido ou alumínio e suas ligas. O último item é, sem dúvida, o que oferece decididamente o maior potencial. Entretanto, existem dificuldades em converter os resultados tecnológicos em aplicação real, pois os sistemas CAD/CAM existentes estão inadequadamente preparados para a programação HSC, devido às geometrias. As superfícies complexas encontradas nos moldes para injeção plástica principalmente no seguimento de peças automotivas tornam os processos de reconhecimento e leitura dos programas CNC extensos e pesados em bytes.

2.12.1. A GEOMETRIA

Para iniciar a discussão sobre este tópico, serão apresentados alguns conceitos preliminares.

A manufatura de superfícies complexas é caracterizada por programas CNC extensos e tolerâncias envolvendo o processo, que acarretam inconveniências na manufatura e podem se agravar quando se utiliza o processo de usinagem em alta velocidade de corte.

As precisões dimensionais e de forma requerida estão na faixa de 0,02 a 0,05 mm que são consideradas de qualidade de acabamento fina. Os problemas de usinagem são a baixa estabilidade da ferramenta e tempo muito reduzido de vida útil.

Atualmente, os modelos de superfícies são gerados nos sistemas CAD fazendo uso de sofisticadas metodologias matemáticas (como Nurbs, pontos de controles, por exemplo), necessárias para satisfazer às exigências do modelamento de formas geométricas complexas. Finalizado o processo de modelamento no sistema CAD, faz-se à transferência desta geometria para o sistema CAM visando à geração de programas CNC para a manufatura.

Para a transferência de dados do sistema CAD para o sistema CAM, no caso de superfícies esculpidas, freqüentemente se utiliza uma malha de triângulos gerada sobre a geometria original do CAD, que se aproxima da representação geométrica real, através de uma tolerância definida pelo usuário. Esta metodologia permite uma comunicação bastante simples e conveniente entre sistemas CAD e CAM, pois são

transferidas apenas informações de pontos definidos por coordenadas cartesianas. Isso permite uma fácil comunicação entre sistemas CAD/CAM de um mesmo fornecedor ou de fornecedores diferentes que, normalmente, são baseados em diferentes modeladores geométricos. Este processo que triangulariza a superfície (Figura 2.48) ocorre na maioria dos sistemas, embora em alguns deles isto não fique transparente ao usuário.

O inconveniente deste processo está na conversão de uma geometria gerada por um modelo matemático, capaz de representar precisamente qualquer forma geométrica em segmentos de retas. Desta maneira, é induzida a primeira tolerância no processo. Quanto menor a tolerância para a triangularização, melhor descrita será a geometria. Proporcionalmente aumenta-se o tamanho dos arquivos e o tempo para cálculo de programas NC.

Outra tolerância envolvida no processo está relacionada com a exatidão com que a trajetória da ferramenta irá seguir o modelo, agora representada por uma malha de triângulos.

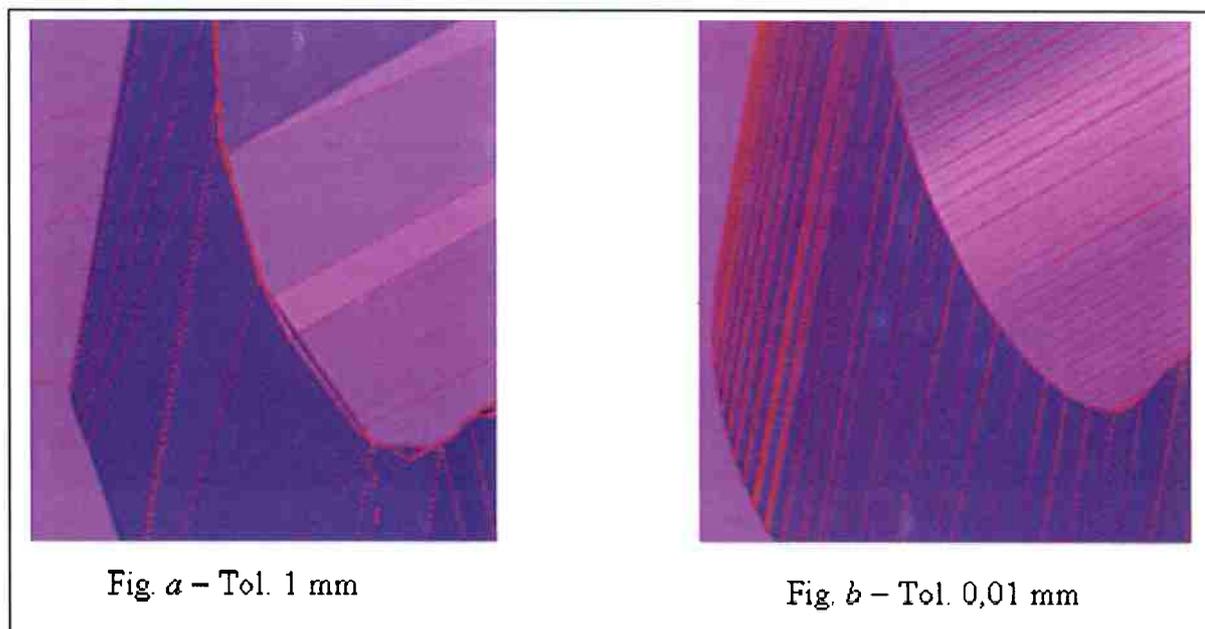


Figura 2.48 - Peça esta representada por uma malha de triângulos.

Fonte Souza,2004.

Através de uma banda de variação, alguns sistemas CAM permitem estabelecer limites de tolerâncias com a possibilidade de desvio da trajetória para dentro e ou para fora da geometria chamados *Intol* e *Outol*, figura 2.49.

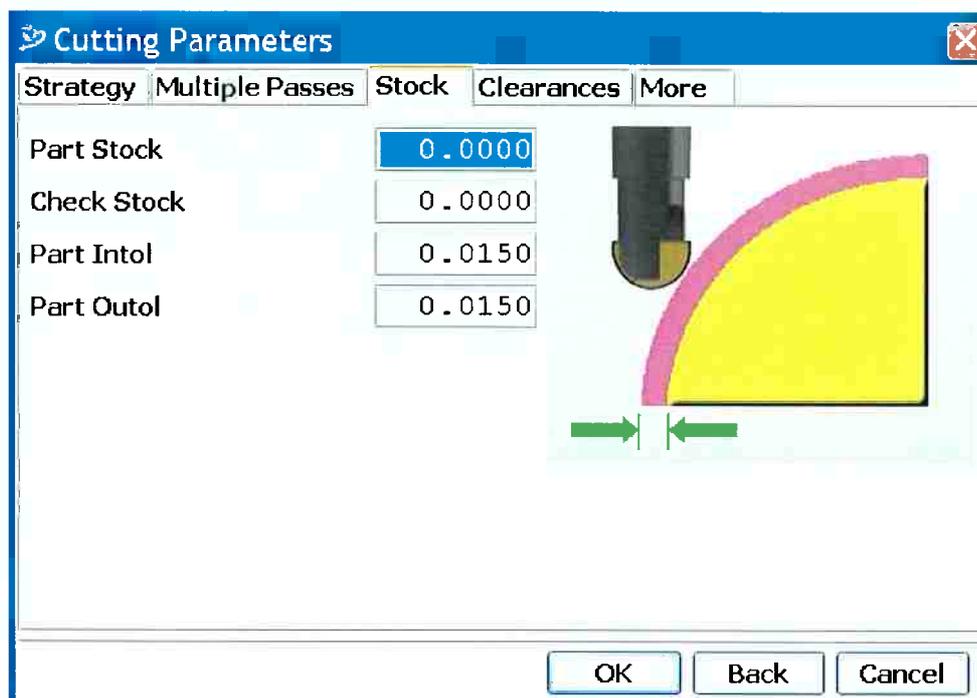


Figura 2.49 – Tolerância da trajetória da ferramenta.

Fonte GMB, 2006.

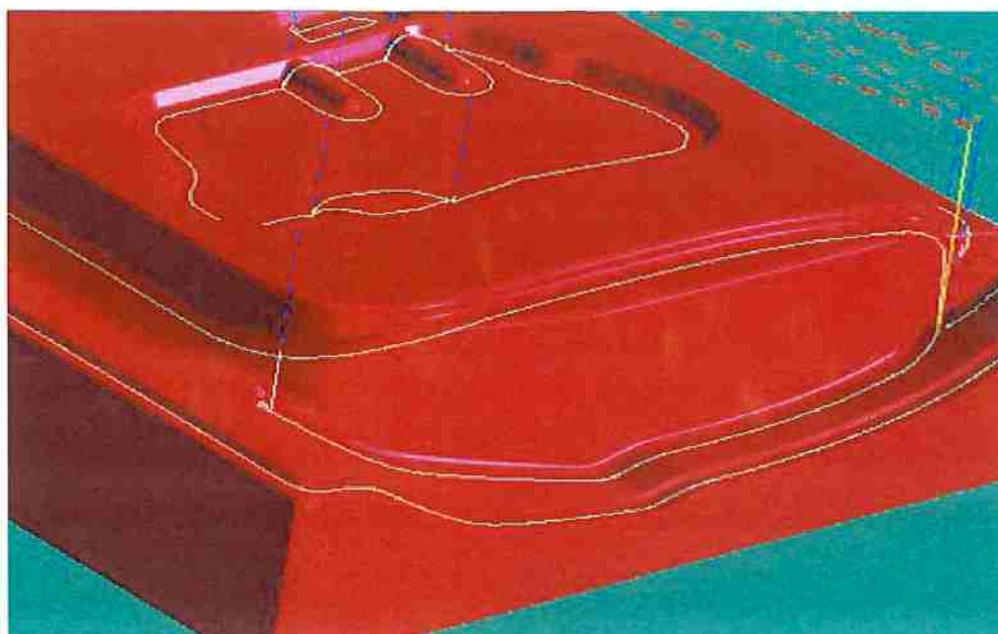


Figura 2.50 – Trajetória da ferramenta.

Fonte GMB, 2006.

O tempo de cálculo envolvido na geração de um mesmo programa NC, diferenciando se apenas os valores das tolerâncias da malha de triângulos e da trajetória da ferramenta (Figura 2.50) para HSC, consomem mais tempo de cálculo

do que os programas NC convencionais, porque os valores entre os passos horizontais e verticais devem ser menores. Programas que exigem algumas horas para cálculos são freqüentemente encontrados. Uma racionalização dos tempos envolvidos para cálculo de programas é uma economia importante.

Conclui-se que é conveniente trabalhar com valores de tolerâncias distintas para os diferentes processos de usinagem. Portanto, utilizar tolerâncias mais apertadas para as operações de acabamento (Lung, 2000).

Desta forma, a trajetória da ferramenta para a usinagem de uma superfície é gerada através de pequenos segmentos de retas, utilizando apenas os comandos G 01, de acordo com a norma DIN 66025. O comprimento mínimo destes segmentos, em geral, não pode ser determinado pelos usuários e está relacionado com as tolerâncias implícitas descritas no programa e com a curvatura ou complexidade da superfície.

2.12.2. INFLUÊNCIA DO NC NO PROCESSO HSC

Quando se trabalha em HSC, tornam-se necessárias também altas velocidades de avanço. Limitações do processo convencional CNC, que até então eram irrelevantes, passam a ter um novo enfoque para HSC. Percebeu-se que o tempo de processamento de bloco do CNC e a velocidade de transferência de programas, para execução on-line são fatores que limitam a velocidade de avanço de corte.

Funções especiais do controle como *look ahead*, por exemplo, também são imprescindíveis para manter boa seqüência de trabalho e as tolerâncias de contorno.

2.12.3. TEMPO DE PROCESSAMENTO DE BLOCO

Tempo de processamento de bloco (TPB) é o tempo médio necessário para o controle numérico processar e enviar informações de comando para o acionamento dos servomotores e é uma característica do CNC. Atualmente, encontram-se

comandos numéricos com TPB a partir de 100 até 0,5 milissegundos para os mais modernos.

O comprimento do segmento de reta utilizado para descrever uma parcela da trajetória da ferramenta, em conjunto com o TPB são fatores que limitam a velocidade de avanço da usinagem.

Quando a velocidade de movimentação da máquina relativa a um bloco de comando, for maior do que a velocidade do comando numérico para enviar novas informações de posicionamento, a máquina chega ao ponto destino e espera os novos comandos para movimentação (Servo Starvation), se não estiver em sintonia pode ocasionar solavancos devido ao TPB, embora isto ocorra em frações de segundos, tem-se uma drástica repercussão no acabamento final. Alguns CNC's são capazes de reduzir o avanço automaticamente, adequando-se ao TPB para evitar problemas de movimentação. Desta forma, reduz-se a velocidade do avanço da usinagem.

O TPB do comando numérico deve ser menor do que o tempo necessário para a ferramenta percorrer o menor incremento da trajetória, descrito por um bloco do comando. Supondo que o menor incremento seja 0,3 mm e que o TPB seja 8 ms, a velocidade de avanço máxima estaria limitada em:

- Velocidade de avanço = $\frac{\text{comprimento do segmento reta}}{\text{TPB (seg)}} \quad [3]$
- Velocidade de avanço = $0,3 \text{ mm} / 8\text{ms} = 2.250 \text{ mm/min.}$

Portanto, a velocidade do avanço é limitada pelo TPB relacionado ao comprimento dos segmentos de retas do programa NC. Este é um dos inconvenientes de só se trabalhar com interpolações lineares de segmentos de retas para a programação NC, agravando-se quando só utiliza comandos impróprios.

Como desvantagem também pode ser citado o tamanho do programa gerado pela interpolação linear, devido ao grande número de segmentos de retas geradas, visando a um bom acabamento.

Com isto, cria-se um dilema para trabalhos em HSC utilizando interpolados lineares. Uma alternativa seria diminuir as tolerâncias para melhor reproduzir a geometria original, gerando programas que envolvem maior tempo para o processamento, e diminuindo os incrementos das retas da trajetória de ferramenta,

com conseqüente limitação da velocidade de avanço em função do TPB. A outra opção seria aumentar a tolerância para gerar programas menores, possíveis de serem armazenados na memória do comando numérico, o que permite maior velocidade de avanço, mas compromete o acabamento superficial e a tolerância do contorno.

2.12.4. EXECUÇÃO DE PROGRAMAÇÃO

Os comandos numéricos que não possuem capacidade de memória suficiente para armazenar programas relativamente grandes necessitam de outros recursos para execução on-line. O CNC é conectado a um computador externo, através de uma interface padrão, como a RS-232 por exemplo, como mostra a figura 2.51.

Com a utilização de um *remote buffer*, o CNC é alimentado pelo computador, executando as linhas de comandos, apagando da memória as linhas já executadas e envia sinais para o recebimento das novas informações, de acordo com as necessidades. Este processo se repete durante toda a operação em frações de segundos.

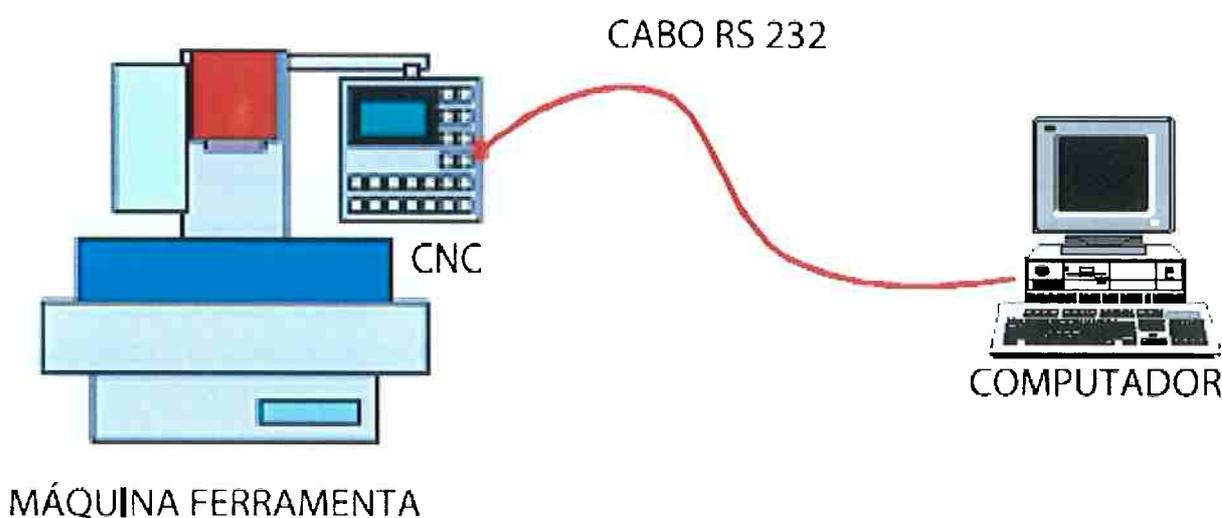


Figura 2.51 – Transmissão de programas NC.

Fonte Helleno, 2003.

Esta velocidade de transferência é quantificada em bits por segundo (baud). Cada linha de programa NC define um dos pontos cartesianos necessários para descrever os vários segmentos de retas que constituem uma trajetória de ferramenta.

Cada linha de comando tem em geral 24 caracteres para usinagens tridimensionais (X590.029Y234.676Z756.098). Cada caractere é descrito por 11 bits: 7 cada bits, 1 start, 2 stop e 1 paridade . Abaixo a figura 2.52 trás a representação de curvas e superfícies complexas, lidas nos programas conforme definição do mesmo.

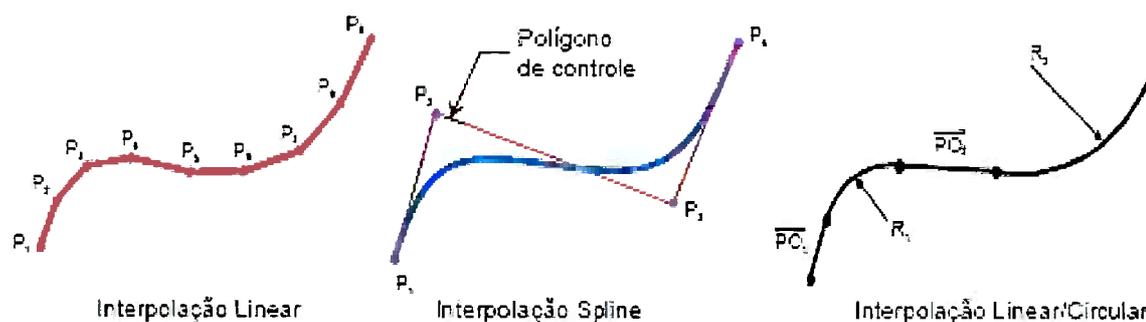


Figura 2.52 - Interpolação da trajetória da ferramenta.

Neste caso, a velocidade de transferência de dados entre o computador e a máquina CNC também é um fator que limita a velocidade de avanço a ser utilizada na operação. Quando se trabalha com velocidade relativamente baixa para o avanço, esta taxa de transferência assim como o TPB - não é representativa. Quando a velocidade de avanço supera a capacidade de transmissão, observa-se a ocorrência de solavancos na máquina, com descontinuidade na movimentação, o resultado é um acabamento de qualidade indesejável, com estrias nas paredes verticais (Lung, 2000), como se observa a figura 2.53 de uma peça.



Figura 2.53 – Estrias nas paredes do Corpo de prova.

Como exemplo para se entender o cálculo tomou-se como base a velocidade de avanço de 3.600 mm/min, por exemplo. O programa transferido a 19.200 baud, máximo permitido pelo CNC e pelo software emissor. Entretanto, a taxa de transmissão necessária é de aproximadamente 35.200 bits/seg.

Os cálculos dos parâmetros estão descritos no exemplo a seguir:

- Média de 16 caracteres por linha (usinagem 2 ½ eixos);
- 11 bits por caractere;
- 176 bits para cada linha de comando;
- Velocidade de avanço: 3.600 mm/min = 60 mm/seg;
- Comprimento médio entre as retas que compõem a trajetória da ferramenta: 0,3 mm;
- Cálculo da velocidade de transmissão necessária, em função da velocidade de avanço e do comprimento dos segmentos de retas;

$$\text{Baud necessário} = \frac{(\text{velc. avanço (mm/s)})}{\text{seg. de reta(mm)}} \times n \text{ de bits/linha} \quad [4]$$

$$\text{Baud necessário} = (60 \text{ mm/seg} / 0,3 \text{ mm}) \times 176 \text{ bits} = 35.200 \text{ bits/s}$$

Alguns CNC's modernos já são capazes de minimizar estes problemas, pelo uso de um disco rígido com grande capacidade de memória incorporado ao CNC, de uma *Block buffer* capaz de armazenar blocos de comandos processados e, de interfaces *Ethernet* para transferência de programas com altas taxas de transmissão.

2.13. REPRESENTAÇÃO DE CURVAS E SUPERFÍCIES

O modelo geométrico em Nurbs (pontos de controle) é um aperfeiçoamento das equações e representação de curvas e superfícies complexas. Os algoritmos Nurbs permitem um controle mais refinado sobre a geometria, além da possibilitar a representação de uma curva complexa utilizando um polinômio de baixo grau.

A seguir, é dado um resumo da evolução das metodologias utilizadas para a representação de curvas:

Spline - A curva é definida por uma série de pontos. Uma vez estabelecidas às coordenadas destes pontos, o computador traça uma curva o mais suavemente possível, passando pelos pontos e obedecendo a vetores tangentes, com este método, é possível fazer apenas modificações globais, pois as modificações ocorrem pela variação da direção e módulo dos vetores tangentes aos pontos que definem a curva.

B-Spline - Utiliza-se um polígono de controle, vetores (knot) e pesos (weight) para traçar a curva. A curva resultante não passa necessariamente pelos pontos do polígono de controle.

Esta curva é "atraída" para o polígono, através dos vetores (knot) e pesos (weight), de maneira uniforme.

Nurbs - A metodologia Nurbs baseia-se na metodologia B-Spline, com o acréscimo de duas funções principais:

- Non Uniform: Isto quer dizer que os vetores (knot) que indicam qual porção da curva é afetada por um ponto de controle individual, não são necessariamente uniformes.

- **Racional:** Isto significa que é possível definir a intensidade (weight) com que cada ponto de controle "atrai" a curva. Também permite a representação de entidades geométricas primárias (arcos, cilindros, cones, linhas e planos), além de curvas cônicas (círculos, elipses, parábolas e hipérboles figura 2.54).

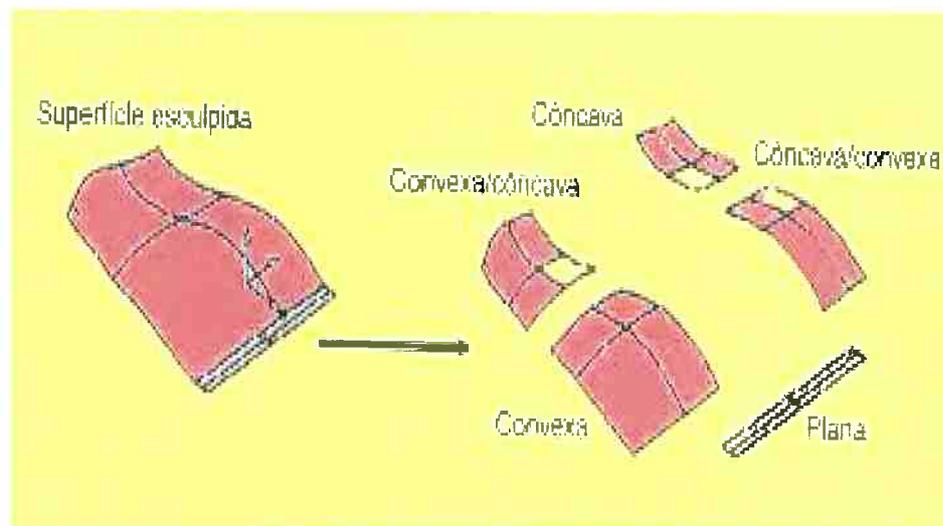


Figura 2.54 - Identificação das áreas dos elementos de formas.

Em síntese, estas características significam que mais fatores de controle podem ser aplicados de curva, de modo que superfícies mais complexas possam ser representadas com um menor número de curvas. Estas razões levaram o Nurbs a se tornar à metodologia "estado da arte", para a representação de curvas e superfícies.

2.14. UTILIZAÇÃO DE NURBS NO PROCESSO CAM/CNC

Atualmente, está em desenvolvimento a utilização da representação matemática utilizando Nurbs também para gerar o percurso da ferramenta, substituindo desta maneira as interpolações lineares e os comandos G01, para os casos de superfícies complexas. Este tipo de representação pode substituir um grande número de segmentos de retas com uma única sentença (figura 2.55).

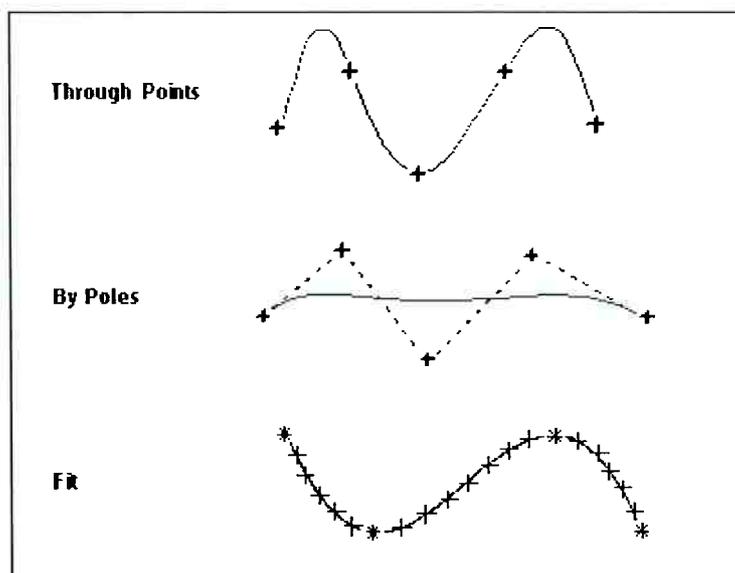


Figura 2.55 – Manipulação de uma curva.

Para completar o ciclo CAD/CAM/CNC utilizando Nurbs, necessita-se de um sistema CAM e de um comando numérico capazes de gerar e interpretar dados em Nurbs. Alguns sistemas CAM já são capazes de gerar programas NC interpolados por Nurbs e existem no mercado comandos numéricos capazes de interpretar estes programas.

Os sistemas CAM capazes de gerar este tipo de interpolação utilizam, em geral, a malha de triângulos gerada pelo sistema CAD como base de informações geométricas para cálculo dos programas NC, conforme já foi mencionado. O sistema CAM gera a trajetória da ferramenta definida por uma interpolação Nurbs sobre esta malha de triângulos. Este processo também inclui uma tolerância para a trajetória gerada.

Para se obter maiores benefícios da utilização desta tecnologia evitando as tolerâncias envolvidas no processo de conversão de um modelo geométrico Nurbs para um modelo triangularidade (CAD) e, novamente para um percurso da ferramenta em Nurbs (CAM) - a transferência de informações entre os sistemas CAD e CAM deverá ser baseada em Nurbs.

Mesmo com programas NC interpolados por Nurbs, gerados à partir de um modelo triangularizado que em geral é o processo utilizado atualmente, podem ser obtidas as seguintes vantagens:

- Redução de até 60% do tamanho dos arquivos NC.
- Redução do problema de tempo de processamento de bloco - fator limitante da velocidade de avanço na usinagem de acordo com o CNC, uma vez que cada linha de comando representa um percurso maior da ferramenta melhorando o acabamento superficial.
- Redução do tempo efetivo de usinagem da ordem de três a quatro vezes, permitindo uma melhor manipulação das acelerações e desacelerações em caminhos complexos.

Desta forma, o avanço real aproxima-se do avanço programável (Schutzer, 1999).

A bibliografia sobre o assunto apresenta opiniões contraditórias ao uso de programas NC interpolados por Nurbs. Entre os argumentos destacam-se as evoluções dos comandos numéricos, com a possibilidade de aumento substancial de memória, além da alta capacidade de processamento de bloco.

Alguns dos comandos numéricos atuais são, capazes de interpretar dados interpolados por Nurbs, mas deve-se destacar que cada um deles tem a sua forma particular de receber as interpolações Nurbs, com variações em relação a sintaxe, ao grau de polinômio da equação, etc. Desta forma, o sistema CAM deve estar apto a pós-processar o programa NC para um específico CNC.

O mercado dispõe de comandos numéricos que geram interpolações Nurbs, a partir dos programas geridos por interpolações lineares. O programa introduzido deve conter comandos G 01 e, o CNC faz automaticamente conversão. Neste caso, introduz-se mais uma tolerância no processo (Lung, 2000).

Poucos estudos práticos sem fins comerciais estão disponíveis para consulta. Há a necessidade de um trabalho de pesquisa apurado, para definir as maneiras mais eficientes de se lidar com as tolerâncias envolvidas neste processo, com os critérios de utilização das interpolações Nurbs e sua influência relacionada ao TPB e com a qualidade de acabamento. E também para analisar as reais vantagens e desvantagens para programação CNC.

Há também uma influência significativa no acabamento da superfície se tratando de aceleração, *jolt* e *chatter*, provocado pelas altas acelerações repentinas, comprimentos de ferramentas e complexidade das superfícies, quanto mais se suavizar os solavancos (*jolt*), diminuir a trepidação ou vibração (*chatter*), melhor será o acabamento.

2.15. GRAU DE INOVAÇÃO

O Instituto de Engenharia de Produção e Máquinas Ferramenta (PTW) da Universidade de Tecnologia de Darmstadt (Alemanha), tem feito pesquisas no campo da usinagem a alta velocidade por mais de 25 anos. Os itens centrais no campo da manufatura de matrizes e moldes são a determinação das estratégias apropriadas para o fresamento HSC para a usinagem HSC de superfícies esculpidas, além da geração de dados tecnológicos de aplicação para diferentes grupos de materiais. Estes resultados estão incluídos, entre outros, em um sistema CAD/CAM para apoiar o programador de CAM.

Os sistemas CAD/CAM usados nas aplicações de manufatura de matrizes e moldes são, na maioria, modeladores de superfícies esculpidas. Eles permitem a descrição matemática de configurações superficiais extremamente complexas em um modelo, tornando-as acessíveis para as finalidades de produção.

Como na maioria dos casos a geometria desejada é descrita por um modelador de superfícies e, a seqüência de geometrias é definida por um modelador de volumes, freqüentemente existem dois modelos de dados diferentes a serem considerados para a usinagem completa de um componente. Disto resulta uma quebra ou incisão na geração de programas entre as operações de desbaste e acabamento. Particularmente na transição do desbaste para acabamento, o programador de CAM somente pode contar com a imaginação dos resultados geométricos intermediários, como também com a experiência de como proceder.

Adicionalmente, os módulos de programação das superfícies esculpidas são baseados em um potencial de definição puramente matemático. Isto deixa todos os pontos de vista tecnológicos completamente fora de consideração na geração de programas NC. À parte, a falta de flexibilidade na escolha de estratégias de corte, resulta em programas NC sendo determinados pelas possibilidades do sistema e parâmetros otimizados de estratégia e de tecnologia.

Sempre que ocorrem erros de programação e erros relacionados ao sistema no programa NC dentro do sistema de controle, a correção somente pode ser feita com esforços consideráveis. O objetivo deveria ser não deixar tais erros ocorrerem no sistema de controle. A meta pode ser atingida por meio de uma descrição otimizada de geometria de forma livre no sistema CAD/CAM, que armazena etapas

individuais de usinagem como objetos de usinagem, assegurando a melhoria do processo na sua totalidade. Os objetos de usinagem incluem as informações referentes a geometria a ser usinada, além da tecnologia e da estratégia.

A vantagem de uma descrição de usinagem modular é o fato de que objetos individuais de usinagem podem ser permutados. Isto permite que uma geometria B seja usinada igual a uma geometria A, pois a descrição completa de usinagem de A é copiada enquanto apenas a geometria permutada (Lung, 2000).

2.14.1. MÉTODO OTIMIZADO DE SEMI-ACABAMENTO

Como um requisito básico para um ótimo acabamento HSC, deve haver uma compensação quase constante, de modo a manter as condições de corte o mais constante possível. Para obter alta qualidade de rugosidade superficial, precisão dimensional e exatidão de forma, as estratégias de corte devem ser usadas, dependendo da geometria da superfície.

Baseado em uma operação de desbaste de 2,5 eixos, o semi-acabamento é feito conduzindo-se a ferramenta paralela ao contorno final e usando vários avanços, até obter uma compensação uniforme. Durante este processo, a ferramenta faz até 1/3 do corte em vazio, especialmente durante os primeiros passos de avanço. Além deste corte em vazio, a ausência de suporte geométrico durante o semi-acabamento constitui o problema principal. Antes do desbaste e do acabamento, o programador NC pode fazer uso de uma geometria de componente conhecida, disponível como uma representação integrada por computador isto é, antes de desbastar por meio do blank definido, antes de acabar por meio do contorno final e da compensação conhecida.

Antes do semi-acabamento, contudo, o programador é obrigado a formatar o seu próprio modelo mental da geometria intermediária, se houver colisões, ocorrerão entre a ferramenta e a geometria semi-acabada, mas raramente entre a ferramenta e o contorno final ou os dispositivos de fixação. Os motivos para isto podem incluir a configuração de plataforma, dependendo da geometria da ferramenta (Schutzer, 2004).

2.14.5. OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO ANTES DA USINAGEM

Os programas NC, freqüentemente usados não tiveram o foco de desenvolvimento concentrado na filosofia de otimização tecnológica e, portanto, na usinagem economicamente eficiente. Ao contrário, desenvolveram-se somente com foco nas possibilidades oferecidas pelo sistema CAM que são determinantes para o movimento da ferramenta. Por isso, o tempo para geração de trajetórias NC são, em parte, muito longo, de modo que, por motivos apenas de tempo, não são feitas variações dos programas NC para encontrar soluções otimizadas. Também, freqüentemente, não há muitas possibilidades ou alternativas na geração de programas NC no âmbito de sistemas CAM que permitiriam que fossem feitas variações.

Por este motivo, as situações de usinagem críticas devem ser localizadas e eliminadas antes da usinagem. Elas são:

- Limites de avanço quando da usinagem de aço ou ferro fundido;
- Correção da curva de corte na escolha do diâmetro da ferramenta;
- Controle do corte de alívio;
- Suporte por condições de compensação visualizadas;
- Análise e eliminação de ângulos de inclinação críticos;
- Identificação automática de elementos em forma de filigrana e a sua usinagem HSC otimizada por meio de longos comprimentos em balanço da ferramenta,
- Análise dos filetes côncavos como uma característica de usinagem crítica.

A identificação automatizada de elementos de forma de filigrana, como cavidades ou furos, e a usinagem HSC otimizada destes, com longos comprimentos em balanço da ferramenta são explicadas a seguir.

Em uma primeira etapa, a informação é derivada sobre a identificação automática de cavidades e furos, através do estudo dos ângulos de inclinação na superfície do componente, especialmente para elementos de forma de filigrana há o perigo de que o menor diâmetro da ferramenta requerida por motivos geométricos resultará em uma razão comprimento/diâmetro inadequado para a ferramenta em conjunto com as condições de revestimento da ferramenta, que ocorrem em tais

aplicações de usinagem, isto pode conduzir a um aumento do desgaste e até mesmo quebra da ferramenta.

Procedimento: uma rede de pontos é distribuída sobre uma superfície esculpida. Pela comparação da coordenada z (correspondente ao eixo da ferramenta) dos pontos vizinhos, podem ser identificadas grandes variações na direção z. As curvas de corte da superfície esculpida com os planos nas direções y-z e x-z fornecem, então, as trajetórias para a rede de pontos. Devido as grandes diferenças entre as coordenadas z, é possível distinguir cavidades e furos de superfícies côncavas fortemente curvadas. A seguinte condição é estabelecida:

$$\Delta x / \Delta z \geq \tan . (\pi / 6) \quad \text{ou} \quad \Delta y / \Delta z \geq \tan . (\pi / 6) \quad [5]$$

A seguir, é feito um exame para avaliar se a cavidade pode ser usinada com a ferramenta escolhida, comparando-se a superfície no conjunto de linhas que descrevem a borda da cavidade ou furo com a face da ferramenta. Se a superfície da cavidade ou furo for menor do que o dobro da face da ferramenta, a usinagem HSC apropriada não pode mais ser garantida. Além disso, a curvatura do conjunto de linhas é comparada com a curvatura da ferramenta. Desta forma, pode ser feita uma verificação sobre a usinagem HSC apropriada com a ferramenta escolhida.

Se a cavidade pode ser usinada com a ferramenta escolhida, são propostas as estratégias HSC apropriadas de ligação e desligamento para longos comprimentos em balanço, para obter estratégias apropriadas de desbaste, semi-acabamento e acabamento HSC para a usinagem de cavidades e furos. As estratégias são oferecidas como aplicações em um sistema CAD/CAM.

O objetivo da otimização para as estratégias de ligação depende das tarefas de usinagem. Para a operação de acabamento, a meta principal é a redução de marcas sobre a superfície em combinação com a redução das vibrações da ferramenta e a realização de movimentos fáceis, com menos trancos, da máquina-ferramenta. Para desbaste e semi-acabamento a meta principal será a redução do desgaste da ferramenta e quebras resultantes dos movimentos de mergulho.

As estratégias para acabamento têm em comum o movimento principal de fechamento que ocorrerá no ar. As marcas resultarão de passagem dos limites da máquina-ferramenta no eixo Z sobre uma superfície perpendicular a ferramenta. Para uma ferramenta inclinável, as marcas não são visíveis. As estratégias de saída

são as principais responsáveis pelas marcas visíveis. Para uma retirada direta da ferramenta na direção z, haverá uma grande projeção entre a superfície fresada e a bruta. A ferramenta será flexionada para o primeiro corte no material e, isto resultará em uma crista de onda na superfície, que pode ser vista a olho nu e será visível como uma marca na superfície.

Além da altura da crista de onda, também a sua inclinação é importante para analisar a marca.

Para um movimento de ligação de rampa ou arco, o primeiro nó, ou o início do corte, é contínuo. Isto resulta em uma pequena deflexão da ferramenta e, portanto, em uma pequena inclinação da crista de onda. Usando um arco como a estratégia de movimento de entrada e saída será produzida a menor marca, que dificilmente pode ser vista. O raio do arco tem um papel menor e pode ser selecionado de acordo com o espaço disponível. A rugosidade superficial quase não é influenciada por esta estratégia. Somente na zona de sobreposição das duas superfícies os picos de rugosidade serão igualados como era esperado.

O requisito fundamental para a estratégia de desbaste é "mergulhar suavemente" no material.

Uma trajetória de aproximação muito adequada que resulta disto é uma linha helicoidal que, devido aos movimentos iniciais circular e de rampa, estará submetendo a ferramenta a um mínimo de carga. A ferramenta mergulha no material em uma linha helicoidal após aproximadamente uma rotação e penetra até a profundidade de corte desejada durante uma rotação adicional. Um alívio de corte de, por exemplo, 0,1 mm, tem que ser acrescentado a linha helicoidal para facilitar a operação de desbaste combinada. O diâmetro da linha helicoidal é escolhido de forma que gere uma sobreposição no centro da hélice, durante cada rotação.

A operação de desbaste combinada é composta da estratégia inicial e da transposição de um plano de forma espiral, se possível de dentro para fora, antes que o próximo plano seja usinado. Como um novo procedimento inicial é requerido para cada plano, sendo uma escolha óbvia combinar as duas estratégias.

A avaliação da operação de semi-acabamento pode ser feita somente após o acabamento. É a qualidade da superfície acabada que permite medir a eficiência da operação de semi-acabamento. É obrigatório obter, antes do acabamento, uma compensação que seja o mais constante possível, com o objetivo de atingir um ótimo resultado de acabamento. As variações da compensação acima de um limite

tolerável, devido às etapas de corte, causando ondulações da superfície acabada.

O investimento em uma operação mais completa e, portanto mais prolongada será, como regra recompensada. Quanto maiores os requisitos feitos do contorno final, maior atenção deve ser dada a operação de semi-acabamento. Por meio da compensação atual conhecida após cada operação de usinagem, será possível executar o semi-acabamento completo com tempos de usinagem que ainda são aceitáveis.

Por causa da forma do componente que possui paredes laterais altas, uma proporção de filetes côncavos relacionados com as áreas de parede plana e com a operação de desbaste ou semi - acabamento em planos constantes em z, com as etapas de plataforma resultantes, os melhores resultados de qualidade superficial são fornecidos, neste caso, por usinagem de forma plana paralela ao contorno. Os resultados do corte reverso ou de mergulho são menos favoráveis, pois provocam grandes variações da profundidade de corte na direção de avanço, devido principalmente ao semi-acabamento inadequado. Outras vantagens a serem mencionadas são o tempo de usinagem mais curto e o movimento de trajetória da ferramenta mais harmonioso, neste caso e com esta estratégia.

3. MATERIAIS E MÉTODOS / ESTRATÉGIA DE USINAGEM NA EMPRESA PARA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO

3.1 ESTRATÉGIA UTILIZADA ATUALMENTE

Breve descrição sobre matéria prima de moldes e matrizes utilizados pela empresa.

O material utilizado, para punções e matrizes de repuxo em ferro fundido é:

GM 338 (D-6510)

Ferro Fundido Nodular Perlítico

PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dureza de fornecimento	200-248HB – 14-24 HRC
Mínima Resistência à tração	585 MPa (85000psi)
Mínimo escoamento	380 MPa (55000psi)
Mínimo alongamento	6%

MICROESTRUTURA

Tipo de nódulos	I & II	% Perlita	70-80
Nº. de nódulos	>100/mm ²	% Ferrita	20-30
% Grafita	10%	% Carbonetos	0,5
% Nodularização	> 90%		

COMPOSIÇÃO (%)

Carbono (C):	3,00-3,70	Silício (Si):	2,00-2,40
Manganês (Mn)	0,30-0,60	Cromo (Cr):	0,15 max
Molibdênio (Mo):	0,35-0,50	Níquel (Ni)	0,50-1,00
Enxofre (S):	0,015 max	Cobre (Cu):	0,40-0,70
Fósforo (P):	0,080 max	Magnésio (Mg)	0,040-0,050

O material normalmente utilizado para as cavidades dos moldes é:

ABNT P20
Aço Laminado

PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dureza de fornecimento 300 HB – 30-32 HRC

COMPOSIÇÃO (%)

Carbono (C):	0,36
Manganês (Mn):	0,60
Cromo (Cr):	1,80
Níquel (Ni):	1,00
Molibdênio (Mo):	0,20

O método de usinagem, para punções e matrizes de repuxo em ferro fundido GMB 338 e o método para ABNT P20 e AISI 4340 dos moldes de injeção, utilizam a seqüência de processos mostrados pela "Folha de Descrição de Processos" a seguir respectivamente. Processos que foram obtidos através do modo empírico, onde partindo de um processo pré-definido, foram usinadas vários moldes e matrizes, contando com a experiência e o aprendizado de programadores, operadores e supervisores, para se consolidar os processos transcritos na folha de processos e utilizados durante muitos anos desde a implementação da programação CNC na empresa. Logicamente houve revisões e alterações de processo, e a busca pela melhoria contínua torna essas revisões necessárias.

FOLHA DE DESCRIÇÃO DE PROCESSO PUNÇÕES E MATRIZES
 FERRAMENTAS TOPO ESFÉRICO (USINAGEM DE CÓPIA)

DADOS DE CORTE - FRESA DE TOPO ESFÉRICO

Tabela : CÓPIA_3D (PAINÉIS EXTERNOS)

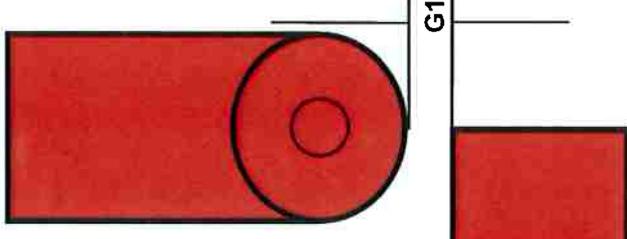
MACHINING PARAMETERS (CUTTING → SPECIFY):
 Desb. → 7m/m Pré-Acab. → 3M/M Acab. → 2m/m

Desbaste = 0.15
 Pré-Acabam. = 0.03
 Acabam. Pnl.Ext. = 0.010

G1

Desbaste = 50mm
 Pré-acab. = 10mm
 Acab. = 10mm

Engage
 50%
 Conf.tabela
 de Avanço



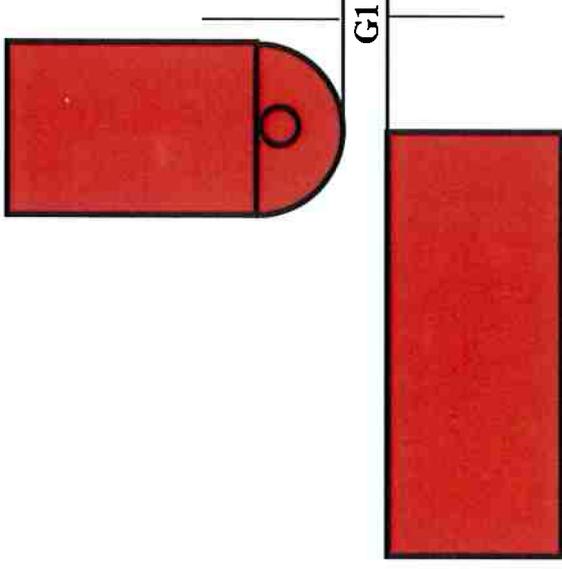
EM FERRAMENTAS DE REPUXO NA REGIÃO DE PRODUTO DAR PASSO DIFERENCIADO FRESA Ø32 0.6 mm

Diã mm	Função	Sobre Metal	Passo	Rotação RPM	Avanço mm/min	SNK Cab. 90°		SNK Cab. 30°		OKUMACab.30°		OKUMA Cab.90°	
						Rot. Avanço	Rot. Avanço	Rot. Avanço	Rot. Avanço	Rot. Avanço	Rot. Avanço	Rot. Avanço	Rot. Avanço
50.0	Faixa verif.	5.0mm	---	1200	400	----	----	----	----	----	----	----	----
50.0	Pencil	0.8mm	---	1200	400	----	----	----	----	----	----	----	----
50.0	Desbaste	1.0mm	6.0	1200	500	---	---	----	----	----	----	----	----
30.0	Pencil	0.2mm	---	3500	1800	2000	1000	3500	1800	3500	1800	3000	1500
20.0	Pencil	0.2mm	---	3500	1500	2000	1000	3500	1500	3500	1500	3000	1300
32.0	Pré-Acabam.	0.2mm	2.0	4000	3500	2000	1200	4000	3500	4000	3500	3000	2000
32.0	Acabamento	0.0mm	0.7	4000	4000	2000	1800	4000	4000	4000	4000	3000	2600
16.0	Retoque	0.0mm	1.0	4000	3500/1800	2000	1800	4000	3500	4000	3500	3000	2000
10.0	Retoque	0.0mm	1.0	3000	1000/500	2000	900	3000	1000	3000	1000	3000	1000
06.0	Retoque	0.0mm	0.9	3500	1000/350	2000	1000	3500	1000	3500	1000	3000	1000

**OBS: TABELA ACIMA SÃO PARA FUNDIDOS EM GERAL, PARA GM190 (INSERTOS - AÇOS) REDUZIR O AVANÇO EM 30%, E PARA OPERAÇÃO DE PENCIL DIMINUIR 50% DO AVANÇO.

FOLHA DE DESCRIÇÃO DE PROCESSO MOLDES
 FERRAMENTAS TOPO ESFÉRICO (USINAGEM DE CÓPIA)
 DADOS DE CORTE - FRESA DE TOPO ESFÉRICO

Tabela : CÓPIA_3D



Desbaste = 50mm
 Pré-acab. = 10mm
 Acab. = 10mm

Engage
 50%
 Conf.tabela
 de Avanço

G1

Desbaste =0.15
 Pré-Acabam. =0.03
 Acabam. Pnl.Ext.=0.010

INTOL
 OUTOL

Diâ mm	Função	Sobre Metal	Passo	Rotação RPM	Avanço mm/min	SNK Cab. 90° Rot. Avanço	SNK Cab. 30° Rot. Avanço	OKUMACab.30° Rot. Avanço	OKUMA Cab.90° avanço
50.0	Faixa verif.	5.0mm	---	1200	600	---	---	---	---
50.0	Pencil	1.0mm	---	1100	400	---	---	---	---
50.0	Desbaste	1.2mm	12.0	1200	600	---	---	---	---
30.0	Pencil	0.2mm	---	3800	2800	2000	4000	3800	3000
20.0	Pencil	0.2mm	---	4000	2400	2000	4000	4000	3000
30.0	Pré-Acabam.	0.2mm	2.5	6000	6000	2000	4000	4000	3000
32.0	Acabamento	0.0mm	0.7	6000	6000	2000	5000	4000	3000
16.0	Pencil	0.1mm	---	4000	2200	2000	4000	4000	3000
16.0	Retoque	0.0mm	0.7	4000	3600	2000	3600	4000	3000
10.0	Pencil	0.1mm	---	4000	2800	2000	4000	4000	3000
06.0	Pencil	0.1mm	---	4000	2600	2000	4000	4000	3000
06.0	Retoque	0.0mm	0.5	4000	2800	2000	2400	4000	3000

OBS: OS VALORES DA TABELA ACIMA SÃO PARA MOLDES EM ABNT P20 E AISI 4340.

*Para o cálculo da velocidade de corte usar

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

Com ênfase nos processos para partes inferior e superior de pré-acabamento (semi-finish) e acabamento (finish), nota-se nas folhas de processos que o maior avanço e rotação são alcançados na operação de acabamento com cabeçote vertical atingindo 4000 X 4000, para matrizes e 6000 X 6000, para moldes.

3.2 ESTRATÉGIA PROPOSTA

Devido ao programa global de redução de custos, a empresa tem postergado vários investimentos na compra de equipamentos. Porém com outra vista está a importância em se buscar as tecnologias de ponta, visando exatamente uma redução de custos, ou seja, investindo para gastar menos.

Uma dessas tecnologias é o processo HSM, e a aquisição de máquinas-ferramenta e acessórios mais modernos, e a utilização de processos compatíveis com tais máquinas.

A proposição é usinar alguns corpos de prova em uma máquina da empresa com características HSM, existente no parque de máquinas da ferramentaria na Planta de São Caetano do Sul. O comparativo se dará em usinar a metade dos corpos-de-prova nos mesmos parâmetros dos processos atuais, e posteriormente usinar os corpos de prova restantes com variações de avanço e rotação, alterando-se a velocidade de corte, buscando a otimização do processo de acabamento superficial.

4. MATERIAIS E MÉTODOS / TRABALHO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais realizados, a partir dos quais foram obtidos alguns resultados práticos que serviram de base para conclusões e finalização deste trabalho. Os resultados obtidos tornaram possível a comparação entre o processo normal na operação de acabamento, utilizado comumente pela empresa em moldes e matrizes, e o desempenho da operação de acabamento com altas velocidades e a influência da estratégia aplicada ao processo.

4.1 DESCRIÇÃO E PLANEJAMENTO

A forma e dimensões definitivas das peças, prescritas nos projetos, resultam de um acabamento a que são submetidas, partindo-se de um elemento primitivo que é, no caso, a matéria-prima obtida por operações de forjamento, laminação ou fundição.

O acabamento da peça é conseguido por operações de usinagem e ajustagem, consistindo em retirar o excesso de material em certas partes, para permitir o contato entre as peças a montar, dentro das tolerâncias estabelecidas e assim melhorar o seu aspecto geral.

Sobre o Material utilizado, o SAE 4340, como conseqüência à necessidade de desenvolverem-se projetos cada vez mais otimizados em termos de custos e desempenho, existe uma crescente utilização de aços com melhores características, adequadas a uma ampla variedade de aplicações. O projeto de experimento desenvolvido para o presente trabalho considera o teste de corpos-de-prova no estado de fornecimento normalizado somente. Optou-se por utilizar o SAE 4340 para os testes, pela proximidade de características com o ABNT P20, e pela disponibilidade para se confeccionar os corpos de prova no momento com objetivo de explorar a utilização do aço SAE 4340, pois encontra sua maior utilização em gavetas e insertos para moldes de injeção plástica. Dentre os diversos modos de

falha em metais, a falha por fadiga tem uma especial importância por ser responsável por 50 a 90% das ocorrências sendo que a maioria destas falhas ocorre de forma inesperada e a efetividade da deposição de nitreto de titânio (temperado / revenido e revestido por TiN) quanto ao aumento da vida em fadiga deste aço revestido obtém excelentes resultados.

O aço selecionado para o estudo que se propõe é um aço especial, o ABNT 4340 (equivalente aos aços AISI 4340 e UNS G43400), escolhido por seu histórico de larga aplicação em construção mecânica, além de representar um potencial custo / benefício interessantíssimo em diversas aplicações para processos produtivos contínuos, substituindo os aços ferramenta até então utilizados na fabricação de conjuntos de compressão. Algumas de suas principais utilizações podem ser citadas como sendo:

- Eixos em geral;
- Conjuntos biela / manivela;
- Caixas de mancais;
- Ferramentas para forjamento;
- Engrenagens;
- Espaçadores; e
- Vasos de pressão.

As tabelas 4.1 e 4.2 para material, apresentam a composição química conforme norma SAE – J404 e equivalentes e composição típica nominal para um aço SAE 4340, pois não foi possível fazer a análise dos corpos de prova utilizados neste estudo, portanto observa-se que os valores possuem ínfimas diferenças.

O aço SAE 4340 além de suas principais aplicações como descrito anteriormente, também encontra sua aplicação em insertos e gavetas de moldes para injeção plástica, onde recebem algum tipo específico de tratamento térmico conforme necessidade para conferir menor desgaste, maior resistência dentre outros benefícios e possibilidades. A tabela 4.3 apresenta os aços padrão para aplicação em moldes de injeção plástica com equivalência entre fornecedores, características de fornecimento e dureza de utilização.

Tabela 4.1 – Composição Química Norma SAE- J404 e Normas de Equivalência. Aço 4340. Fonte - Aço Kraft

ABNT/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
ABNT/SAE/AISI	DIN			JIS	BS	AFNOR		
4340	~ 40 Cr Ni Mo 6			~ SNCM 8	~ 817M40	~ 35 NCD 6		

Tabela 4.2 – Composição química nominal do aço SAE 4340.

Elemento	Porcentagem (em peso)
Carbono	0,37 – 0,43
Cromo	0,70 – 0,90
Ferro	96,0
Manganês	0,60 – 0,80
Molibdênio	0,20 – 0,30
Níquel	1,65 – 2,00
Fósforo	Máx. 0,035
Silício	0,15 – 0,30
Enxofre	Máx. 0,04

Tabela 4.3 – Aços padrão para moldes de injeção de plástico. Fonte Brasimet.

AÇO	EQUIVALENCIAS	CARACTERÍSTICAS	DUREZA DE UTILIZAÇÃO
SAE 1020 1045		<ul style="list-style-type: none"> Aço Carbono comum 	Utilizado no estado de fornecimento (recezido)
AISI 4340	VM40 (Villares) 4340 (Gerdau)	<ul style="list-style-type: none"> Aço Carbono Baixa Liga Fornecido no estado pré beneficiado 	Utilizado no estado de fornecimento pré beneficiado com durezas de 28/32 HRC
AISI P20	VP20DM (Villares) P20 (Gerdau) IMPAX (Uddeholm) M200 (Boehler) THYROPLAST 2311 (Thyssen)	<ul style="list-style-type: none"> Aço ferramenta, específico para moldes plásticos Alta polibilidade Fornecido no estado pré beneficiado 	Utilizado no estado de fornecimento, pré beneficiado com durezas de 28/32 HRC

Para este estudo foram utilizadas barras de aço 4340 laminadas e com dureza de fornecimento em 300 HB – 28-32 HRC verificada nos corpos de prova.

Vale ressaltar que quando é preciso modificar as propriedades dos aços, para atender exigências de utilização e usinagem, deve-se submetê-los a tratamentos, que podem ser térmicos ou termoquímicos.

O tratamento térmico é a aplicação combinada de aquecimento e resfriamento, em determinado período de tempo. Segundo a aplicação, classificam-se em: Normalização, Recozimento, Têmpera e Revenido.

O tratamento termoquímico provoca modificação parcial da composição química, através da absorção de alguns elementos como o carbono, nitrogênio e cianetos normalmente acompanhados de tratamento térmico.

Para planejamento deste estudo foram modelados no *software* de engenharia 3D os corpos de prova virtuais que originaram a confecção dos programas CNC, relatórios de acompanhamento e posicionamento de máquina, relatório de ferramentas e operações que serviram também para a simulação da usinagem e tomada de tempo simulado.

Os corpos de prova foram construídos a partir de dez blocos esquadrejados de matéria prima, com 65 mm x 55 mm x 49 mm. Foram efetuados dois furos “cegos”, não passantes (figura 4.1), com coordenadas opostas em diagonal em cada um dos corpos de prova para confecção de roscas utilizadas para fixação dos mesmos em placa preparada, para receber todos os corpos de prova de uma só vez, a fim de facilitar os *setups* (operações de processo) na seqüência de usinagem.

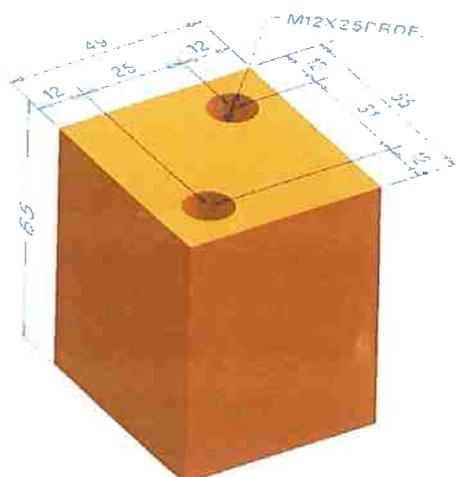


Figura 4.1 – Croquis para preparação dos Corpos de Prova.

Fonte GMB, 2007.

A fixação em placas de processo mostradas nas figuras 4.2 e 4.3, é uma prática comum na usinagem de itens menores, por facilitar os processos e garantir segurança ao operador.

Utilizou-se um presseter de ferramentas, figura 4.4. para a ferramenta de corte e apalpador eletrônico Renishaw (Figura 4.5) para alinhar os programas para cada corpo de prova, os mesmos não necessitam ser pinados e alinhados previamente pois colocando o ângulo de giro para cada peça, nas variáveis da máquina, quando se executar os programas elas estarão alinhadas.

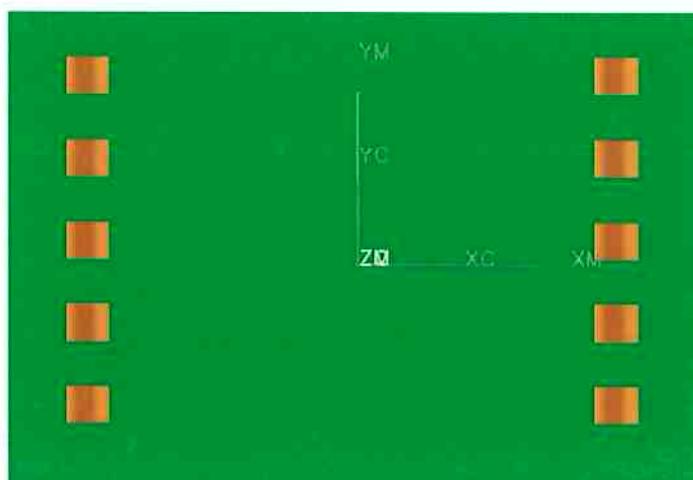


Figura 4.2 - Representação gráfica dos corpos de prova fixados em placa.

Fonte GMB, 2007.

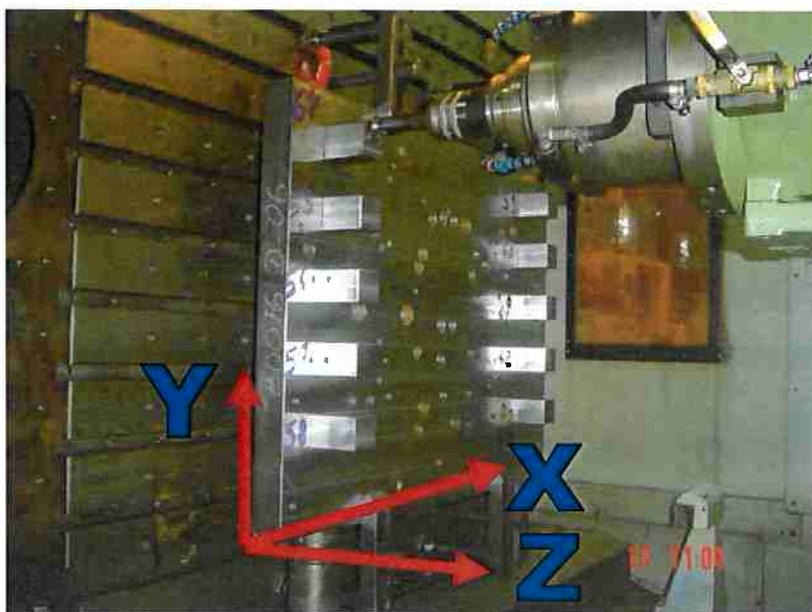


Figura 4.3 - Foto dos corpos de prova fixados em placa antes da usinagem.

Fonte GMB, 2007.



Figura 4.4 - Presetter de ferramenta.

Fonte GMB, 2007.



Figura 4.5 – Apalpador eletrônico Renishaw.

Fonte GMB, 2007.

A escolha da máquina-ferramenta não foi problema pois dentre duas que podem atingir avanços e rotações numa escala um pouco maior, disponíveis no parque de máquinas da ferramentaria da empresa, estão as duas a seguir:

Máquinas:

- MAKINO - rotação máxima 16000rpm e avanço máximo 20000 mm/min, figura 4.6.
- SNK - rotação máxima 6000rpm e avanço máximo 10000 mm/min, figura 4.7



Figura 4.6 – Centro de usinagem MAKINO MCD1513.

Fonte GMB, 2007.



Figura 4.7– Copiadora Portal SHIN NIPPON KOK – SNK.

Fonte GMB, 2007.

Para se obter os corpos de prova em situação de acabamento, se fez necessário um processo de desbaste e um pré-acabamento até que a superfície apresentasse condições para a análise, como mostrado na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Descrição das ferramentas utilizadas para o processo de usinagem.

Nº de troca de ferramenta	Ferramenta	Diâmetro	Comprimento de corte do inserto	Raio do inserto
1	Fresa de desbaste de topo pastilhas reversíveis	32	6	6
2	Fresa p/ desbaste topo esférico	32	16	16
3	Fresa p/ acabamento topo esférico	25	12,5	12,5

Como o foco do trabalho está no acabamento seguem descrições pertinentes ao processo. Que serão descritos como processo normal e processo HSC. Equipamentos - Ferramenta Topo Esférico para acabamento nas duas estratégias normal e HSC, diâmetro 25 mm. Fabricante - Walter do Brasil Ltda. (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Ferramenta Topo esférico para Inserto Diâmetro 25mm.

Fonte GMB, 2007.

Descrição - Inserto esférico para acabamento Diâmetro 25 mm (Figura 4.9), utilizado um para o acabamento normal e outro para acabamento HSC, ambos novos.



Figura 4.9 - Inserto Diâmetro 25mm.

Fonte GMB, 2007.

Código do Produto - P 3201 - D25.

Classe do Inserto - WXM15.

Revestimento do Inserto - Revestimento em PVD multicamada de AlTiCrN
(DUROTIN Exxtral Plus)

SISTEMA DE FIXAÇÃO – Através de PORTA PINÇA.

Tabela 4.5 - Descrição dos parâmetros da ferramenta.

Parâmetros	Nº Arestas	Diâm. Ponta	Diâm. Haste	Raio Ponta	Comprim. Total	Prof. Corte	Compr. Aresta	Ângulo saída	Ângulo hélice	Gamma 0
Nomenclatura fabricante	Zn	Dc ²	dmm	re	l2	ap	l3	α_0	-	γ
Valor	2	25	22	12,5	150	30	30	14	35,5	1,5

Equipamentos:

Hardware: MAKINO - FANUC PROFESSIONAL III

SNK - FANUC 15B

Software: SOFTWARE e PÓS-PROCESSADOR UNIGRAPHICS

Para as operações de acabamento Normal e HSC foram utilizadas insertos novos para cada um dos processos.

Utilizando os parâmetros de usinagem atuais da empresa tem-se num primeiro momento um acabamento Normal (usual) com os seguintes dados:

- Fresa inserto cambiável diâmetro nominal = 25 mm
- Diâm. Efetivo = 6,3 mm
- Sobremetal = SM = 0,4
- Spindle = S = 4000 rpm
- Feed = F = 4000 mm/min
- Passo = P 0,6 mm
- Velocidade de corte = 314 m/min

Para um segundo momento na usinagem HSC tem-se:

- Fresa inserto cambiável diâmetro nominal = 25 mm
- Diâm. Efetivo = 6,3 mm
- Sobremetal = SM = 0,4
- Spindle = S = 12000 rpm <= Variação
- Feed = F = 10000 mm/min <= Variação
- Passo = P 0,6 mm
- Velocidade de corte = 942 m/min

Instrumentos de inspeção:

Durômetro de bancada

Fabricante Wolpet

Modelo Universal

Rugosímetro

Fabricante Mitutoyo

Modelo Surf Test 402

Série 178

4.2 MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE DADOS

Usinagem dos lotes de corpo de prova em número de dez, sendo cinco peças do primeiro lote, usinadas com conceito HSC, e as outras cinco peças usinadas com parâmetros usuais da empresa (Figura 4.10), modelo matemático com os dois lotes de corpo de prova fixados em placa .

Nos programas gerados no *software* Unigraphics, o simulador do *tool path* (caminho da ferramenta) simula também o tempo virtual de usinagem, proporcionando os valores em minutos.

Foram cronometrados os tempos de usinagem real para os dois lotes de corpos de prova. Depois de usinados foi medida a rugosidade das peças.

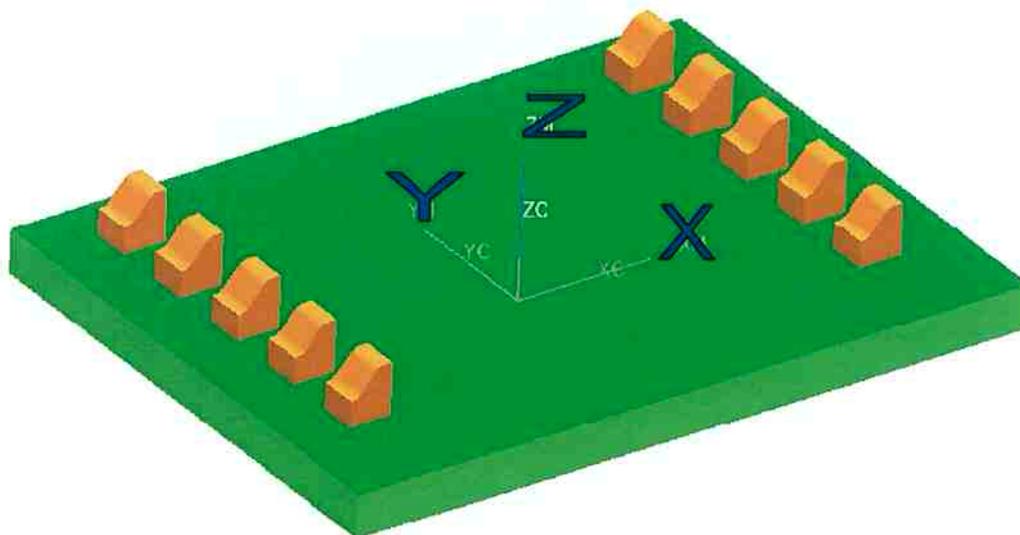


Figura 4.10 – Modelo matemático com os dois lotes de corpo de prova.

Fonte GMB, 2007.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Abaixo se apresenta na figura 4.11 os lotes reais fixados e já usinados, a seguir a figura 4.12 com o modelo matemático de um dos corpos de prova mostrando a superfície com certo grau de complexidade para verificação da simulação de usinagem próxima ao real e a figura 4.13 com a visualização do caminho da ferramenta em Lace ou zig - zag sobre a geometria da peça sentido de corte.

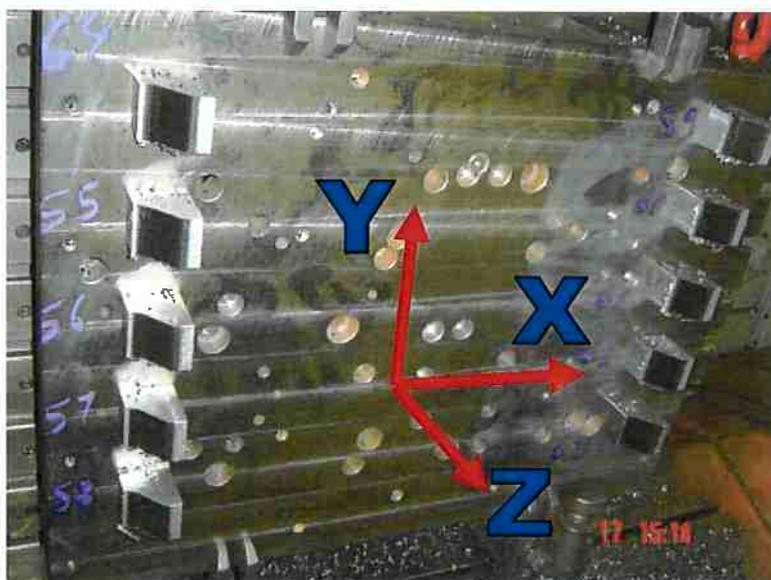


Figura 4.11– Corpos de prova fixos na placa de processo.

Fonte GMB, 2007.

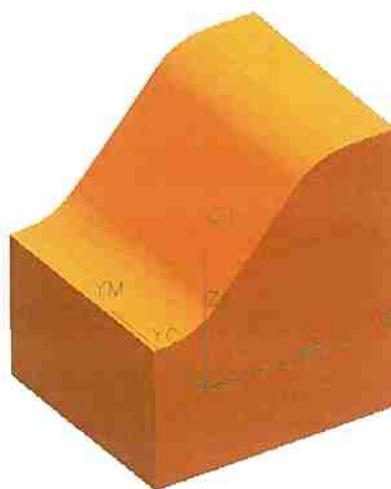


Figura 4.12– Modelo matemático do corpo de prova.

Fonte GMB, 2007

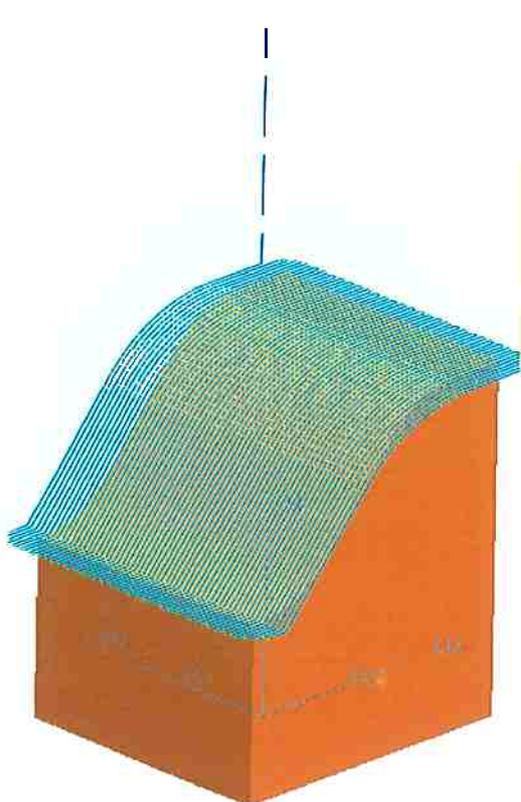


Figura 4.13 – Visualização do caminho da ferramenta.

Fonte GMB, 2007.

Figura 4.14 mostrando o sentido de corte da estratégia utilizada para os corpos de prova.

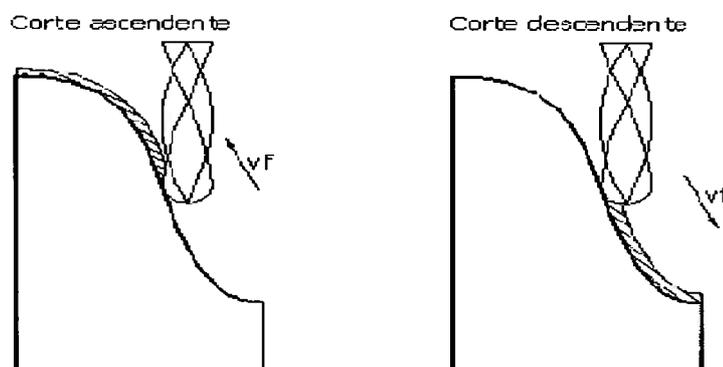


Figura 4.14– Ponto de contato geometria / peça em função do sentido de corte.

Fonte GMB, 2007.

Figura 4.15 mostrando o corpo de prova com semi-acabamento e a figura 4.16 com o corpo de prova já acabado.



Figura 4.15 – Corpo de prova semi acabado.
Fonte GMB, 2007.



Figura 4.16 – Corpo de prova acabado.
Fonte GMB, 2007.

Tomada de tempo simulado:

Para o programa usual o tempo simulado foi de 2,14 minutos X peça;

Para o programa HSC o tempo simulado foi de 1,5 minutos X peça;

Tomada de tempo cronometrado pela máquina:

Para o programa usual o tempo simulado foi de 2,14 minutos X peça;

Para o programa HSC o tempo simulado foi de 1,34 minutos X peça;

A tabela 4.6 mostra os processos de acabamento apresentaram as seguintes variações nas tomadas de tempo real:

Tabela 4.6 – Resumo das operações de fresamento.

Pç	HS	Tempo(minutos)
1	sim	1,38
2	sim	1,35
3	sim	1,36
4	sim	1,4
5	sim	1,44
6	não	2,55
7	não	2,53
8	não	2,54
9	não	2,53
10	não	2,55

Tabela 4.7 - Avaliação estatística dos tempos

Evidências Descritivas:

HSC	n	média	variância	desvio padrão	min	max
Sim	5	1,39	0,00	0,04	1,35	1,44
Não	5	2,54	0,00	0,01	2,53	2,55

Distribuição t- Student

A distribuição t é uma distribuição de probabilidade teórica. É simétrica, campaniforme, e semelhante à curva normal *standard*. Difere pois tem um parâmetro adicional, os chamados graus de liberdade que mudam sua forma.

Avaliação da igualdade de variâncias (homocedasticidade)

Para cada categoria tem-se:

\bar{x}_1 = média da variável X na categoria 1
 \bar{x}_2 = média da variável X na categoria 2
 n_1 = número de elementos na categoria 1
 n_2 = número de elementos na categoria 2
 s_1^2 = variância de X na categoria 1
 s_2^2 = variância de X na categoria 2
 gl = graus de liberdade da estatística do teste

média amostral:

$$\bar{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x_i}{n_1}$$

variância amostral:

$$s_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2}{(n_1 - 1)}$$

RESTRIÇÃO:

SE (A variável X tiver Distribuição Normal nas categorias da variável QL)

ENTÃO Teste F - a estatística do teste é dada por:

graus de liberdade: $(n_1-1);(n_2-1)$

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

SENÃO Teste de Levene - a estatística do teste é dada por:

graus de liberdade: $(k-1);(n-k)$

$$W = \frac{(n-k) \sum_{i=1}^k n_i (\bar{z}_i - \bar{z}_{ij})^2}{(k-1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (z_{ij} - \bar{z}_{ij})^2}$$

onde

$$z_{ij} = | x_{ij} - \bar{x}_i |$$

\bar{x}_i = média da i-ésima categoria

[6]

Graus de Liberdade

Graus de liberdade, normalmente simbolizados por gl, são um parâmetro da distribuição t que pode ser qualquer número real maior que zero. Fixando o valor de gl definimos uma situação particular da família de distribuições t. Uma distribuição t com um gl menor tem mais área nas caudas da distribuição que uma distribuição com um gl maior.

O efeito dos gl na distribuição de t está ilustrado nas três distribuições t mostradas na figura 4.17.

Note-se que quanto menor o número de gl, mais aplainada (platocurtica) é a forma da distribuição, resultando em maior área nas caudas da distribuição.

Relação com a Curva Normal

Pode-se observar ainda que a distribuição t é muito semelhante à curva normal. À medida que aumentam os gl, a distribuição t aproxima-se da distribuição normal padronizada (média = 0, desvio-padrão = 1). A curva normal padronizada é um caso particular da distribuição t quando gl tende ao infinito. Para os propósitos práticos, os valores distribuição t aproximam-se dos valores da distribuição normal padronizada relativamente depressa, tal que quando gl = 30 esses valores são quase idênticos.

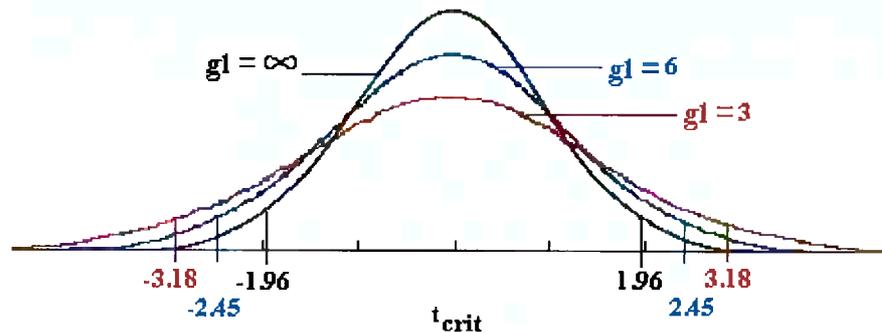


Figura 4.17 – Curvas de distribuição t – Student.

Teste de significância utilizando o Teste t - Student (com a variância agregada):

Graus de Liberdade =	10
Desvio padrão agregado =	0,023495
Diferença entre as médias =	1,15
Estatística do teste =	77,66159
p-valor =	1,53E-15

Numa amostragem de dez peças, com desvio padrão agregado e diferença de médias de 1,15 apresentou-se o resultado com 77,66% de confiança (ou uma chance de erro de 22,34%) que a usinagem contribuiu para a diminuição do tempo médio dos processos de acabamento.

A Análise da qualidade superficial

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de dureza superficial Brinell e estão em processo os ensaios de dureza Vickers (oportunamente serão incluídos). Tais testes foram realizados nos próprios corpos de prova detalhados anteriormente e apresentaram os dados da dureza Brinell HB e rugosidade superficial Ra que estão mostrados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Dados coletados de Dureza e Rugosidade dos corpos de prova.

Peças	1N	2N	3N	4N	5N	1HSC	2HSC	3HSC	4HSC	5HSC
PONTO 1	187HB	187HB	195HB	174HB	202HB	187HB	174HB	187HB	167HB	200HB
PONTO2	187HB	187HB	195HB	174HB	202HB	187HB	174HB	187HB	167HB	200HB
Rugosidade Ra	1,8 μm	1,6 μm	1,9 μm	1,9 μm	2,4 μm	3,0 μm	2,9 μm	2,8 μm	2,9 μm	2,4 μm

Como pode se observar a rugosidade medida no lote usinado no conceito HSC ficou maior que o da usinagem normal.

A exatidão na etapa de usinagem envolve vários fatores, dentre estes: rigidez da ferramenta e sistemas de fixação; rigidez da máquina; transdutores de posicionamento utilizados pela máquina; algoritmos e malha de controle do CNC; e as próprias características do processo de remoção de material.

Neste caso percebe-se que devido a alta rotação e avanço os efeitos da vibração foram notados na operação de acabamento, com os efeitos das diferentes orientações do caminho, condições de corte, sobremetal do processo, causando o efeito *chatter*. Também se pôde constatar que devido ao tamanho, dimensões reduzidas das peças o efeito do solavanco da aceleração e desaceleração no avanço prejudicou a análise.

Para realizar uma análise rigorosa do desvio de forma entre um modelo CAD e a peça usinada, estes fatores de exatidão e tolerância deverão ser cautelosamente considerados. Devido ao grande volume de trabalho necessário para realizar esta análise rigorosa sobre o desvio de forma, e para não perder o foco dos objetivos propostos inicialmente, este estudo se ateve a documentar as possíveis fontes de erro geométrico, entre o projeto CAD e o produto final, envolvendo a cadeia CAD/CAM/CNC, usinagem e a inspeção final.

a-) No processo de usinagem, foi referenciado inicialmente o processo com a folha de processo existente, com usinagem do mesmo material utilizado normalmente através de um equipamento disponível no parque de usinagem. Este equipamento possui elevada precisão. Contudo, não foram comparadas usinagens com diferentes ferramentas e fixações. Nem foram usados dinamômetros ou sensores. Isto implica na necessidade de repetir o processo de base com outros tipos de ferramentas, aumentando a possibilidade de diferenças na definição do melhor acabamento.

b-) A matéria-prima deve ser dimensionada de forma a não restringir o avanço estabelecido no programa pois o dimensionamento dos corpos de prova influenciaram muito no avanço com aceleração e desaceleração da máquina em função das dimensões das peças e em função do custo para a empresa da aquisição da matéria-prima.

c-) Após usinado, o corpos de prova foram levados ao laboratório da empresa para coleta de dados e coletamos poucas informações, porém teríamos que medir vários pontos das superfícies de referência. O que não permitiu maior precisão na análise.

d) Falta análise de dureza Vickers que não foi concluída pelo laboratório da empresa e também uma análise das camadas inferiores da superfície de referência.

Com isso, a aplicação plena da tecnologia HSC, assim como seus benefícios, somente serão atingidos quando os fatores que a influenciam, tornando-se limitações tecnológicas, forem compreendidos e, a partir disso, se reestruturar o processo produtivo de manufatura dos moldes e matrizes.

Os três fatores que alicerçam a sua posição favorável aos concorrentes: Possibilita uma significativa redução de custo e do tempo de resposta, o que equivale à entrega da ferramenta ao cliente em menor tempo, alta flexibilidade na produção, aliados da qualidade do produto.

6. CONCLUSÃO

Apesar de a tecnologia HSC surgir como uma das soluções na usinagem de moldes e matrizes, sua aplicação encontra grandes restrições na indústria, uma vez que não se baseia somente em um eixo árvore (spindle) de rotação mais elevada, mas na união de altas velocidades de cortes e avanço para criar um novo processo de usinagem por completo. Ou seja, sua aplicação requer uma reestruturação do processo produtivo, baseada em todos os fatores que influenciam no processo de usinagem. Além disso, muitas características do processo produtivo até então despercebidas ganham nova importância, tornando-se, inclusive, limitações tecnológicas na tecnologia HSC, como: metodologias utilizadas pelos sistemas CAD/CAM para modelamento do produto e geração dos programas NC; transferência dos programas NC para o CNC da máquina ferramenta; capacidade de aceleração e desaceleração da máquina ferramenta; e capacidade e funções especiais de processamento do CNC.

Com os valores de Ra obtidos no experimento preliminarmente, conclui-se que a qualidade superficial é fortemente prejudicada pela a significativa oscilação no avanço e não apenas pela interpolação linear.

A tolerância para cálculo dos programas NC e a curvatura da superfície influenciam no comprimento dos seguimentos de retas do programa NC, repercutindo diretamente na velocidade real de avanço.

A velocidade de avanço de usinagem foi reduzida pelo CNC, em função do método utilizado para descrever as trajetórias de ferramenta e não apenas pela dinâmica da máquina em executar movimentações não-retilíneas.

No centro de usinagem utilizado neste trabalho, o Tempo de Processamento de Bloco do CNC (TPB) é menor que o Tempo de Resposta da Máquina (TRM). Com isso, a velocidade de avanço foi reduzida, não pelo TPB, mas pelo tempo de resposta da máquina (TRM). Conclui-se, portanto, que apenas o TPB do CNC não pode ser utilizado para avaliação da máquina CNC, que é um procedimento comumente aplicado.

7. SUGESTÕES

O campo de ferramentas de corte, a tecnologia de corte a alta velocidade apresenta definições diferentes, de acordo com a variação de materiais aplicados na construção das peças a serem usinadas.

Observou-se que ferramentas de corte são fatores importantes na usinagem a alta velocidade para peças de grande porte, pois o desgaste é uma desvantagem da HSC, devido à redução da vida da ferramenta de corte causada pelo aumento da velocidade de corte.

A HSC ainda que seja um processo rápido de usinagem, o tempo de usinagem ainda pode ser reduzido se houver um avanço tecnológico associado à vida das ferramentas de corte.

Sugere-se para trabalhos futuros:

Testes mais acurados se fazem necessários para uma melhor análise.

Aprimorar a análise do desvio de forma em função da flexão da ferramenta de corte;

Comparar diferentes estratégias em termos de vida de ferramenta, acabamento da superfície usinada e uniformidade do sobre metal deixado em operações de fresamento de semi-acabamento;

Desenvolver um método eficiente para se determinar criteriosamente o aspecto tempo de processos de usinagem;

8.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aço Kraft: Composição química Aço 4340. Norma SAE- J404. Disponível em <http://www.acokraft.com.br/produtos/constrmec/ligados/sae_4340.html> acesso em junho de 2006.

Beard, T.: - Interpoling curves. Ameritech Library Services. Disponível em <<http://reports.gmr.com/reports/sae/1999/0420>> acesso em julho de 2005.

Beck, H.W. : - Desenvolvimento em ferramentas de corte a alta velocidade. Revista Máquinas e Metais, 388, 1998, p.28 – 39.

Big Daishowa. Total Tooling Services. Disponível em <http://www.big-daishowa.com/E_products/pro_index.html> acesso em agosto 2006.

Braita Equipamentos Industriais Ltda. Disponível em <<http://www.braita.com.br/>> acesso em julho de 2006.

Brasimet Bodycote. Disponível em <<http://www.brasimet.com.br/eng/durotin/tipos.asp>> acesso em março de 2007.

Cauchy, Aston: - Ecole Polytechnique da França. Disponível em <<http://www.biotsavat.tripod.com/hexapod.html> > acesso em agosto 2006.

Costa, Alex Ribeiro: - Otimização do processo de fresamento de cavidades com fresas de insertos intercambiáveis. (Dissertação Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica / SP, 2003.

Dagiloke, I. F., Kaldos, A., Douglas, S. e Mills B., *High-speed machining: an approach to process analysis*, Journal of Materials Processing Technology, n.54, p.82-87, 1995.

DEPO Tools. Disponível em

<<http://www.depo.de/>> acesso em setembro 2006.

Dewes, R. C., NG, E., Chua, K. S., Newton, P. G. e Aspinwall, D. K., *Temperature Measurement when High Speed Machining Hardened Mould/Die Steel*, Journal of Materials Processing Technology, n.92-93, p.293-301, 1999.

Diniz, A.E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L.: - Tecnologia da usinagem dos Materiais São Paulo: Artliber Editora 2001– Edição 5 -2006.

Diretrizes de Segurança CEN TC143/WG7. Disponível em

<http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/sectors/cactus/5_02_55.pdf> acesso em setembro 2006.

Durschimied, Frank: Peças e Componentes para Máquinas de Cinemática Paralela. Revista MM – Máquinas e Metais, 2000.

Ecospeed, DS Technologie. Disponível em <<http://www.ds-technologie.de/v3/products/>>. Acesso em outubro 2006.

Faccio, Ian – Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo / SP, 2002.

Fagali S. A.: – Contribuições ao fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades. Dissertação de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo / SP, 2002;

Felsky, L. Guilherme; Buss, Loreno.- Tendências Tecnológicas em HSC. Palestra realizada na Universidade de Santa Catarina UFSC, 2000.

Ferraresi, D. – Fundamentos da Usinagem dos Metais. Volume I, São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1982.

Finzer, T.: - The HSC technology. Seminário Usinagem com alta velocidade de corte, Universidade de Campinas, 1998.

Galoppi, Gustavo de Siqueira – Torneamento de Aço100Cr6 temperado com insertos de CBN com e sem cobertura. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo / SP, 2002;

Geist, Jurgen: Influência dos parâmetros de usinagem HSC. Revista Máquinas e Metais, 411, 2000, p.30-49.

Gerhard, Schweitzer: - Máquinas para usinagem em alta velocidade. Revista Máquinas e Metais, 410, 2000, p. 54-59.

Gunninck, W. Jan: - Como acelerar os processos de prototipagem e ferramental com a tecnologia STL. Revista Máquinas e Metais, 414, 2000, p.150 - 169.

Helleno, A. L. & KLAUS SCHÜTZER – Fatores que influenciaram a usinagem de moldes e matrizes com altas velocidades de corte. UNIMEP/SP,2003.

INDEX Ind. e Com. Ltda., Máquinas de cinemáticas paralela no Brasil_INDEX V 100. Catálogo, 2004.

Kaminski, P. C.: - Desenvolvendo produtos planejamento, criatividade e qualidade. Livros Técnicos e Científicos Editora S/A. 2000, p. 44 - 45.

Kukino, Satoru: -Technology for product and process intergration. Ameritech Library Services. Disponível em <<http://reports.qmr.com/reports/sae/1999/981867>> acesso em julho de 2006.

Lyndex Nikken Tool Holders. Disponível em <<http://www.lyndexnikken.com/>> acesso em julho de 2006.

Lung, Marak: - Suportes porta-ferramentas balanceados. Revista Máquinas e Metais, 414, 2000, p. 74 – 80.

Mapal do Brasil ferramentas de Precisão Ltda. Disponível em
<http://www.mapal.de/englisch/produkte_anwendung.php> acesso em agosto de 2006.

Maschine + werkzeug Andron. Disponível em
<http://www.andron1.de/pdf/the_hexapod_reprint.pdf> acesso em agosto de 2006

Mazak Corporation. Mazak Online. Disponível em
<<http://www.mazak.com/english/index.html>> acesso em agosto de 2006

MCGEE, F. J., *High speed Machining – study: methods for aluminium workpieces*, *Am.Machinist*, p. 121-126, 1979.

Meador, Russel: - Rapid prototyping of complex shapes for conceptual design. Ameritech Library Services. Disponível em
<<http://www.mmsonline.com/articles/hsmdm/>> acesso em agosto de 2006.

Modern machine shop on line. High Speed Machining. MMS Online. Disponível em
<<http://www.mmsonline.com/hsm>> acesso em agosto de 2006

Moraes, R., – Revista Plástico Moderno, Ed. 332 On-line. Disponível em
<<http://www.plastico.com.br/plastico.htm>> acesso em agosto 2002

Multiplicadores de velocidades Adriática. Disponível em
<http://www.adriatica.com.br/cab_mul_vel.asp> acesso em setembro 2006.

Neugeubaner, Raimund. Usinagem de moldes e matrizes. Revista MM – Máquinas e Metais, 2000.

NSK Portal de Treinamentos. Disponível em

< http://www1.br.nsk.com/etreinar/imagens/cursos_upload/foto03.jpg> acesso em novembro 2006.

Peroni, R. e G. Martinelli: – Experiences in High Speed Milling of Forging Dies. Anais da III Conferência Internacional de Forjamento (XIX SENAFOR), Porto Alegre, 1999, p. 283-288.

Rauter, R. O.; Aços Ferramentas; Seleção, Tratamentos Térmicos, Pesquisa de Defeitos. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro 1974.

Revista Sandvik: - High speed machines. Sandvik, Divisão Coromant, 1, 1998.

Revista Plástico Moderno On-line. Disponível em

<<http://www.plastico.com.br/plastico.htm>> acesso em agosto 2006

SANDVIK: – Fabricação de Moldes e Matrizes: Guia de Aplicações. São Paulo, 1999.

SANDVIK: – High Speed Machining and Conventional Die and Mould Machining. Disponível em <<http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/products/>> acesso em setembro 2002.

Santos, A. V. et al.: - Usinagem em Altíssimas Velocidades. Como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. Sandvik, Divisão Coromant. São Paulo: Érica 2003 – Edição 8 -2006.

Siemens: Automations & Drives. Disponível em

<<http://www.siemens.com.br/templates/coluna1.aspx?channel=3840>> acesso setembro 2006

Silva, A. L. V. C. e Mei, P. R.; Tecnologia dos Aços. Eletrometal, Universidade Estadual de Campinas, 1988.

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-13032007-234237/>

Schmitt, T.: - High speed machines. Revista Sandvik, Divisão Coromant, 1, 1998, p 11-33.

Schulz, H. : - Usinagem com alta velocidade de corte. Seminário Internacional de Alta Tecnologia. Universidade Metodista de Piracicaba Campus Sta. Bárbara d'Oeste, 1997.

Schulz, H. : – Usos potenciais da HSC na usinagem de matrizes. Revista Máquinas e Metais, 393, 1998, p 28-33.

Schulz, H. : – Revista Ciência & Tecnologia Volume 7, Artigo 9. A História da Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte. Universidade Metodista de Piracicaba, 1999, p 28-33.

Schützer, Klaus; Fagali S. Adriano. – A tecnologia HSC. Palestra de Alta Tecnologia Unimep, 1999.

Schützer, Klaus: - Introdução do processo HSC na indústria brasileira. Revista Máquinas e Metais, 407, 1999, p. 32 – 45.

Schützer, Klaus; Tecnologia HSC (Usinagem com Altíssima Velocidade) na Cadeia de Desenvolvimento de Produtos CAD/CAM/CNC. Palestra de Alta Tecnologia Unimep, 2004.

Schützer, Klaus; Tecnologia HSC (Usinagem com Altíssima Velocidade) na Cadeia de Desenvolvimento de Produtos CAD/CAM/CNC. Palestra de Alta Tecnologia Unimep, 2006.

Stockinger, Friedrich: - The HSC technology. Revista EPE – European Production Engineering, 15, 1997, p.56- 67.

Stewart, D. A primeira teoria de cinemática paralela. Disponível em <<http://www.inria.fr/prisme/personnel/merleteng.html>> acesso em: 23 agosto 2005.

Tabela Brasimet Aços padrão para injeção de plástico. Disponível em <<http://tratamentotermico.com.br/artigos/Plastico.pdf>>acesso>

Tool Flo. Ball Nose Tools. Disponível em<<http://www.toolflo.com/ballnose.htm>> em agosto 2006.

USP Material didático do Curso PMR2450 – Projeto de Máquinas. J. C. Adamowski, T. H. Coelho, G. F. M. Souza, 2002.

Walz, Tilmann: - Experience in high speed machines. Revista Mundo da Usinagem, Coromant da Sandvik, 2, 1998, p. 7-12.

Weinert, K. & Guntermann, G. Usinagem de superfícies complexas, *Máquinas e Metais*, São Paulo, 36 (411): 50-60, 2000.

Wilhelm, J.Blumlein. Máquinas de cinemática paralela. Disponível em <<http://www.andron1.de/pdf/thehexapodreprint.pdf> > acesso em outubro de 2006.

Z&Y Tool Supply Co., Ltd. Disponível em http://zytools.en.alibaba.com/product/50078014/50358275/Machine_Accessories/Tool_Holders_Tool_Posts.html> acesso em julho 2006.

Yang,D.Ch.Cinemática Paralela Inversa para robôs. Disponível em <<http://www.ifw.uni-hanover.de/robos> > acesso em: 2 setembro 2005.

9. GLOSSÁRIO

Block Buffer: Disco Armazenador de blocos.

B-Spline: Curva definida por uma serie de pontos, utilizando-se um polígono de controle vetores e pesos.

Chatter: Trepidação.

Design: Desenho

Ethernet: placa de ligação interface para transferência de dados.

Familia: no texto se refere ao número de ferramental dividido em etapas do processo(operação e balanceamento da peça) que são necessárias para se conformar ou estampar um determinado produto.

Filigrana: Malha delicadamente entrelaçadas por fios.

Form feature: Forma estruturada através de cada uma das partes da face.

Intol: Limite de tolerância com a possibilidade de desvio da trajetória para dentro da superfície a ser copiada pelo programa CNC.

Jolt: Solavanco, andar aos trancos.

Know-how: Conhecimento de uma determinada área.

Knot: Vetores da curva.

Lead time: Período compreendido entre o inicio e o final de um processo.

Look ahead: Função dos comandos CNC que ler os parâmetros adiante.

Non Uniform: Isto quer dizer que os vetores (knot) que indicam qual porção da curva são afetados por um ponto de controle individual não são necessariamente uniformes.

Outol: Limite de tolerância com a possibilidade de desvio da trajetória para fora da superfície a ser copiada pelo programa CNC.

Racional: Isto significa que é possível definir a intensidade (weight) com que cada ponto de controle "atrai" a curva. Também permite a representação de entidades geométricas primárias (arcos, cilindros, cones, linhas e planos), além de curvas cônicas (círculos, elipses, parábolas).

Remote buffer: disco ou servidor de armazenamento remoto.

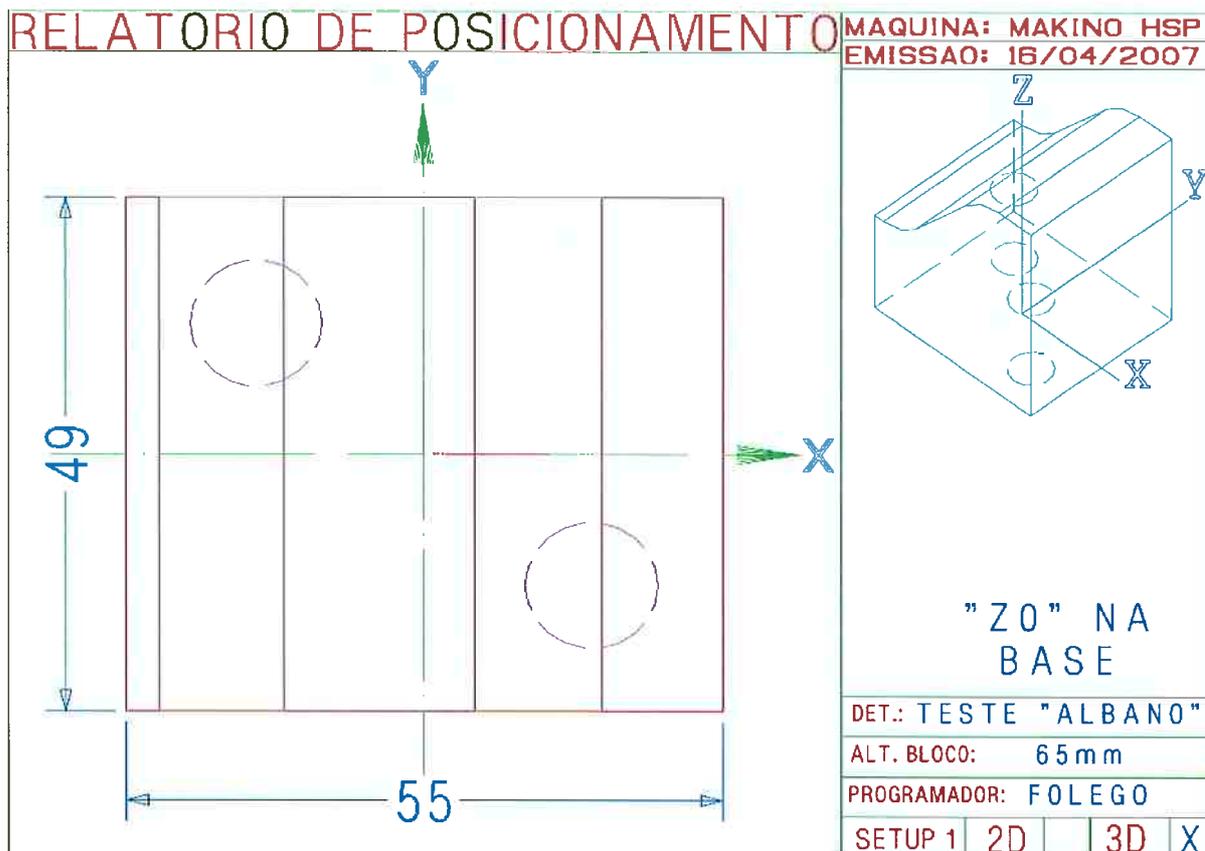
Sandvik: Empresa fabricante de ferremantas e suportes para usinagens em geral.

Spline: Curva definida por uma serie de pontos.

Weight: Intensidade da curva através de pontos.

10. APÊNDICES

APÊNDICE A - Relatório de posicionamento das peças, padrão da empresa.



10. APÊNDICE D - Programa NC normal

%

O0001(CFA070AC)

N1G54G17G90

N2(PROGRAMA PELO CENTRO)

N3M251

N4(FERRAMENTA T2 - D25.00 - R12.50)

N5(T02M06)

N6M11B0.0

N7M10

N8S4000M03

N9G43H02Z177.6000

N10X0.Y0.

/M21X0.

N11G05P10000

N12G00X27.5030Y29.5000

N13Z140.1000

N14G01Z127.0800F6000.

N15Z77.0800F4000.

N16X17.1890Z77.0560

N17X15.4710Z77.0310

N18X14.6110Z76.9910

N19X13.7520Z76.9200

N20X12.0330Z76.7010

N21X10.3140Z76.3650

N22X8.5950Z75.9080

N23X7.7350Z75.6390

N24X6.8760Z75.3290

N25X6.0160Z74.9950

N26X5.1570Z74.6220

N27X3.4380Z73.7670

N28X2.5780Z73.2780

N29X1.7190Z72.7440
N30X.8590Z72.1720
N31X.0000Z71.5480
N32X-.8590Z70.8630
N33X-1.7190Z70.1230
N34X-2.5780Z69.3220
N35X-3.4380Z68.4480
N36X-4.2970Z67.4920
N37X-20.6270Z48.1560
N38X-22.3460Z46.1340
N39X-22.7760Z45.7370
N40X-23.2060Z45.4680
N41X-23.6360Z45.2920
N42X-24.0650Z45.1900
N43X-24.4950Z45.1470
N44X-24.9250Z45.1350
N45X-25.7840Z45.1320
N46X-27.5030Z45.1270
N47X-27.9460Y29.4800Z45.1250
N48X-28.3860Y29.4210Z45.1230
N49X-28.8190Y29.3230Z45.1220
N50X-29.2410Y29.1870Z45.1200
N51X-29.6500Y29.0140Z45.1180
N52X-30.0420Y28.8060Z45.1160
N53X-26.2860Z45.1290
N54X-25.3480Z45.1330
N55X-24.4090Z45.1500
N56X-23.9390Z45.2110
N57X-23.4700Z45.3470
N58X-23.0010Z45.5800
N59X-22.7660Z45.7410
N60X-22.5310Z45.9420
N61X-22.0620Z46.4530
N62X-5.6330Z65.9110

N63X-3.7550Z68.0990
N64X-2.8160Z69.0850
N65X-1.8780Z69.9820
N66X-.9390Z70.8020
N67X.0000Z71.5510
N68X.9390Z72.2320
N69X1.8780Z72.8490
N70X2.8160Z73.4170
N71X3.7550Z73.9390
N72X4.6940Z74.4090
N73X5.6330Z74.8310
N74X6.5720Z75.2190
N75X7.5100Z75.5650
N76X8.4490Z75.8650
N77X9.3880Z76.1360
N78X10.3270Z76.3700
N79X11.2660Z76.5620
N80X12.2040Z76.7290
N81X13.1430Z76.8580
N82X15.0210Z77.0180
N83X16.8980Z77.0580
N84X30.0420Z77.0890
N85X30.5200Y28.4850Z77.0910
N86X30.9580Y28.1120Z77.0930
N87 REPEAT INICIO P10
N88 Z200
N89 M30

10. APÊNDICE E - Programa NC HSC

%

O0001(CFA070AD)

N1G54G17G90

N2(PROGRAMA PELO CENTRO)

N3M251

N4(FERRAMENTA T2 - D25.00 - R12.50)

N5(T02M06)

N6M11B0.0

N7M10

N8S10000M03

N9G43H02Z177.6000

N10X0.Y0.

/M21X0.

N11G05P10000

N12G00X27.5030Y29.5000

N13Z140.1000

N14G01Z127.0800F6000.

N15Z77.0800F4000.

N16X17.1890Z77.0560F10000.

N17X15.4710Z77.0310

N18X14.6110Z76.9910

N19X13.7520Z76.9200

N20X12.0330Z76.7010

N21X10.3140Z76.3650

N22X8.5950Z75.9080

N23X7.7350Z75.6390

N24X6.8760Z75.3290

N25X6.0160Z74.9950

N26X5.1570Z74.6220

N27X3.4380Z73.7670

N28X2.5780Z73.2780

N29X1.7190Z72.7440

N30X.8590Z72.1720

N31X-0000Z71.5480
N32X-.8590Z70.8630
N33X-1.7190Z70.1230
N34X-2.5780Z69.3220
N35X-3.4380Z68.4480
N36X-4.2970Z67.4920
N37X-20.6270Z48.1560
N38X-22.3460Z46.1340
N39X-22.7760Z45.7370
N40X-23.2060Z45.4680
N41X-23.6360Z45.2920
N42X-24.0650Z45.1900
N43X-24.4950Z45.1470
N44X-24.9250Z45.1350
N45X-25.7840Z45.1320
N46X-27.5030Z45.1270
N47X-27.9460Y29.4800Z45.1250
N48X-28.3860Y29.4210Z45.1230
N49X-28.8190Y29.3230Z45.1220
N50X-29.2410Y29.1870Z45.1200
N51X-29.6500Y29.0140Z45.1180
N52X-30.0420Y28.8060Z45.1160
N53X-26.2860Z45.1290
N54X-25.3480Z45.1330
N55X-24.4090Z45.1500
N56X-23.9390Z45.2110
N57X-23.4700Z45.3470
N58X-23.0010Z45.5800
N59X-22.7660Z45.7410
N60X-22.5310Z45.9420
N61X-22.0620Z46.4530
N62X-5.6330Z65.9110
N63X-3.7550Z68.0990
N64X-2.8160Z69.0850

N65X-1.8780Z69.9820
N66X-.9390Z70.8020
N67X.0000Z71.5510
N68X.9390Z72.2320
N69X1.8780Z72.8490
N70X2.8160Z73.4170
N71X3.7550Z73.9390
N72X4.6940Z74.4090
N73X5.6330Z74.8310
N74X6.5720Z75.2190
N75X7.5100Z75.5650
N76X8.4490Z75.8650
N77X9.3880Z76.1360
N78X10.3270Z76.3700
N79X11.2660Z76.5620
N80X12.2040Z76.7290
N81X13.1430Z76.8580
N82X15.0210Z77.0180
N83X16.8980Z77.0580
N84X30.0420Z77.0890
N85X30.5200Y28.4850Z77.0910
N86X30.9580Y28.1120Z77.0930
N87 REPEAT INICIO P10
N88 Z200
N89 M30