

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**

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

PARA CÓPIAS, CONSULTAR A EDIÇÃO REVISADA :

FMP-140

Ed. rev.

**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**

**Área de concentração:
3149 – Engenharia Automotiva**

**Orientador: Professor Doutor
Gilmar Ferreira Batalha**

**SÃO PAULO
2007**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Ivaldi e Orminda (in Memoriam) pela educação a mim atribuída, a minha esposa Cristina e 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 Prof. 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.

Aos amigos da Ferramentaria da General Motors do Brasil.

EPÍGRAFE

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

RESUMO

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 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. Com a finalidade de aprimorar o processo de fabricação de moldes e matrizes através do conceito *High Speed*, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a usinagem HSC/HSM; 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 programas NC que contenham movimentações complexas de ferramenta e funções Spline.

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

ABSTRACT

In last years the number of products containing free-form shapes produced by dies and molds have been growing noticeably. However, the milling process used to manufacture those dies and molds does not meet their requirements. The arrival of the CAD/CAM systems and the High Speed Cutting Technology (HSC) helps to improve this manufacturing process. Although to obtain the surface quality needed to meet the dies and molds requirements, a hand finishing still requires. It involves time, money and decrease the product quality. Technological limitations in the CAD/CAM/CNC chain limit the feed rate when milling free-form shape. It also has a negative effect on the surface roughness. Besides, this kind of milling still lacks scientific knowledge of the cutting process. With the aim to support the dies and moulds process fabrication through of the High Speed 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 free-free tool-paths and Spline function.

Keywords: Milling; Die and mould; Injection; Automobilist Industries.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 - Histórico de ensaios de Usinagem com Altíssima Velocidade.....	8
FIGURA 2.2 - Influencia da velocidade de corte na temperatura por Salomon e McGee.....	9
FIGURA 2.3 - Variação da temperatura com a velocidade de corte.....	10
FIGURA 2.4- Influencia da velocidade de corte no valor da temperatura de corte....	11
FIGURA 2.5- Definição atual de usinagem em altíssima velocidade	14
FIGURA 2.6- Classificação de Fesadoras segundo critérios HSC	15
FIGURA 2.7- Comparativo dos parâmetros Convencionais e HSM	15
FIGURA 2.8 - Fresa de topo com pastilhas reversíveis “T Max”	18
FIGURA 2.9 - Fresa de topo esférico “Ball Nose”	18
FIGURA 2.10 - Propriedades gerais da Usinagem com altíssima velocidade.....	19
FIGURA 2.11 - Inseto de PCD ou CBN.....	19
FIGURA 2.12 - Ferramenta HSC com guias de diamante.....	20
FIGURA 2.13 - Ferramentas de corte e insertos	21
FIGURA 2.14 - Fixação com ajuste excêntrico.....	23
FIGURA 2.15 - Fixadores de ferramentas de alta velocidade de corte	23
FIGURA 2.16 - Movimento causado pela expansão do cone no eixo-árvore provocada pela força centrífuga	24
FIGURA 2.17 - Detalhes que possibilitam maior rigidez na fixação	24
FIGURA 2.18 - Adaptadores para HSC.....	25
FIGURA 2.19 - Sistema de balanceamento automático, chamado de Bala Dyne.....	27
FIGURA 2.20 - Detalhe do acabamento superficial.....	27
FIGURA 2.21 - Porta – ferramentas e adaptadores balanceáveis	28
FIGURA 2.22 - Inseto de cermet.....	29
FIGURA 2.23 - A geometria das ferramentas tem grande influência durante a usinagem HSC	30
FIGURA 2.24 - Geometria quebra cavaco	30
FIGURA 2.25 - Pinças de fixação das ferramentas.....	31
FIGURA 2.26 - Condições de alta rigidez para maiores concentrações de esforços	32
FIGURA 3.1 - Máquina HSC	34

FIGURA 3.2 - Ultra High Speed Linear Motor Drive Vertical Machining Center	35
FIGURA 3.3 - Rolamento com esferas de aço e de cerâmica.....	36
FIGURA 3.4 - Detalhe de guias lineares de uma máquina HSC	37
FIGURA 3.5 - Fuso de esferas com lubrificação HSC e fuso um convencional	37
FIGURA 3.6 - Fixação da ferramenta com lubrificação óleo-ar.....	38
FIGURA 3.7- Sistema para Motores Lineares.....	39
FIGURA 3.8- Fabricante Maho-Deckel - High speed	39
FIGURA 3.9- Configurações Esquemáticas para máquinas hexápodes	42
FIGURA 3.10 - Estrutura hexapode da 6X Hexa.....	42
FIGURA 3.11- Plataforma de Stewart Clássica.....	44
FIGURA 3.12 - Plataforma de Stewart Invertida Vertical cosmo Center PM600	44
FIGURA 3.13 - Junta esférica em corte	46
FIGURA 3.14 - Sistema de eixo linear em máquinas paralelas.....	47
FIGURA 4.1 - Métodos de aplicação de fluido de corte em uma operação de fresamento	50
FIGURA 4.2 - Um exemplo das conseqüências da ruptura de uma pastilha de 0,015kg pode causar.....	51
FIGURA 4.3 - Cabeçote flexível, vantagens em usinagem de vários eixos	52
FIGURA 5.1 - Peça esta representada por uma malha de triângulos.....	58
FIGURA 5.2- Tolerância da trajetória da ferramenta.....	59
FIGURA 5.3 - Trajetória da ferramenta	59
FIGURA 5.4 - A usinagem da ferramenta em cavidade	61
FIGURA 5.5 - Interpolação da trajetória da ferramenta.....	63
FIGURA 6.1 - Identificação das áreas dos elementos de formas.....	66
FIGURA 7.1 - Manipulação de uma curva.....	67
FIGURA 8.1 - Definição matemática de um segmento de superfície	73
FIGURA 10.1 - Representação esquemática para um ciclo de recozimento do aço SAE 4340.....	89
FIGURA 10.2 - Representação esquemática para um ciclo de têmpera e revenimento do aço SAE 4340.....	89
FIGURA 10.3 - Croquis para preparação dos Corpos de Prova.....	90
FIGURA 10.4 - Representação gráfica dos corpos de prova fixados em placa.....	91
FIGURA 10.5 - Foto dos corpos de prova fixados em placa antes da usinagem	91
FIGURA 10.6 - Apalpador eletrônico Renishaw	92

FIGURA 10.7 - Centro de usinagem MAKINO MCD1513	92
FIGURA 10.8 - Copiadora Portal SHIN NIPPON KOK – SNK.....	93
FIGURA 10.9 - Fresa Topo esférico 25mm.....	94
FIGURA 10.10 - Inserto D25mm	94
FIGURA 10.11 - Modelo matemático com os dois lotes de corpos de prova	97
FIGURA 10.12 - Corpos de prova fixos na placa de processo.....	97
FIGURA 10.13 - Modelo matemático do corpo de prova.....	98
FIGURA 10.14 - Corpo de prova.....	98
FIGURA 10.15 - Ensaio de Dureza Brinell	100
FIGURA 10.16 - Comparando Brinell e Vickers	101
FIGURA 12.1 - Redução do tempo de produção na fabricação de moldes.....	104

LISTA DE TABELAS

TABELA 10.1 - Comparação entre dois aços com relação a aspectos técnicos e econômicos.....	84
TABELA 10.2 - Aço 4340 - Aço Kraft	86
TABELA 10.3 - Composição química nominal do aço SAE 4340.....	86
TABELA 10.4 - Aços padrão para moldes de injeção de plástico. Fonte Brasimet ...	87
TABELA 10.5 - Propriedades físicas e mecânicas mais importantes do aço SAE 4340	87
TABELA 10.6 - Propriedades físicas em função de diferentes temperaturas de revenimento.....	88

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 carbeto 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]
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]
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]
Pc – potência de corte [kW]
Pel – 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]
vf – velocidade de avanço [mm/min]
z – número de dentes da ferramenta

Letras Gregas

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]

SUMÁRIO

RESUMO -	v
ABSTRACT -	vi
1. INTRODUÇÃO -	1
1.1. JUSTIFICATIVA -	2
1.2. OBJETIVOS E OBJETO DE ESTUDO -	3
1.3. METODOLOGIA -	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA / ESTADO DA ARTE EM USINAGEM -	6
2.1. HSM-HSC -	6
2.2. ALTA VELOCIDADE -	12
2.3. DEFINIÇÃO DE <i>High Speed Machining / High Speed Cutting</i> -	14
2.4. FERRAMENTAS DE ALTA TECNOLOGIA -	17
2.5. O BALANCEAMENTO É UMA NECESSIDADE -	25
2.6. MATERIAL PARA FERRAMENTAS HSC -	28
2.7. GEOMETRIA DA FERRAMENTA -	29
2.8. GENERALIDADES DO PROJETO DE FERRAMENTA PARA HSC -	30
2.9. SISTEMAS FERRAMENTA x MÁQUINA EM HSC -	31
3. NOVAS CONCEPÇÕES -	33
3.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS GENÉRICAS DE MÁQUINAS HSM -	34
3.2. EIXOS-ÁRVORE, CARROS DE TRANSLAÇÃO, GUIAS E FUSOS -	35
3.3. CINEMÁTICA PARALELA -	40
3.4. MÁQUINAS FERRAMENTA DE CINEMÁTICA PARALELA -	41
3.5. PEÇAS E COMPONENTES PARA CINEMÁTICA PARALELA -	45
3.6. USINAGEM DE MOLDES E MATRIZES -	47
4. SISTEMAS DE CONTROLE CNC EM HSM -	49
4.1. SISTEMAS DE VELOCIDADES DE EXTRAÇÃO DE CAVACOS -	49
4.2. ENCAPSULAMENTO -	50
4.3. CABEÇOTES HSC -	51
4.4. PRECISÃO DA TRAJETÓRIA -	55
5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM HSC NA PROGRAMAÇÃO CNC -	57

5.1. A GEOMETRIA -	57
5.2. INFLUÊNCIA DO NC NO PROCESSO HSC -	60
5.3. TEMPO DE PROCESSAMENTO DE BLOCO -	61
5.4. EXECUÇÃO DE PROGRAMAÇÃO -	62
6. REPRESENTAÇÃO DE CURVAS E SUPERFÍCIES -	65
7. UTILIZAÇÃO DE NURBS NO PROCESSO CAM/CNC -	67
8. GRAU DE INOVAÇÃO -	70
8.1. MÉTODO OTIMIZADO DE SEMI-ACABAMENTO -	71
8.2. OPERAÇÕES DE USINAGEM REALIZADAS POR MEIO DE OBJETOS DE USINAGEM -	72
8.3. IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE FORM FEATURES -	73
8.4. LIGAÇÃO DOS ELEMENTOS DE FORMA IDENTIFICADOS EM OBJETOS DE USINAGEM -	74
8.5. OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO ANTES DA USINAGEM -	75
9. ESTRATÉGIAS DE USINAGEM DE ACABAMENTO NA EMPRESA -	79
9.1. ESTRATÉGIA UTILIZADA ATUALMENTE -	79
9.2. ESTRATÉGIA PROPOSTA -	83
10. TRABALHO EXPERIMENTAL -	84
10.1. DESCRIÇÃO DE PLANEJAMENTO -	84
10.2. MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE DADOS -	97
11. RESULTADOS E DISCUSSÕES -	102
12. CONCLUSÃO E SUGESTÕES -	103
13. REFERÊNCIAS -	106
14. GLOSSÁRIO -	110
15 ANEXO A-	111
15 ANEXO B	115
15 ANEXO C-	118

1. INTRODUÇÃO

A conformação e a injeção de peças automotivas no Brasil tiveram nos últimos anos desde o início da década de noventa, grandes modificações em seu *design*, devido à busca de novas linhas e coeficientes aerodinâmicos de atrito cada vez menores. 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 alteração 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 possível 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.

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.

Como consequência outros resultados inerentes ao processo podem ser alcançados:

- ◇ Otimização da estratégia de usinagem em programas CNC;
- ◇ Otimização 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.

Também é objetivo deste trabalho apresentar um estudo bibliográfico adequado ao entendimento dos principais conceitos da tecnologia HSM/HSC (HSC ou HSM ¹⁾).

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;

(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.

- 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 no *software UNIGRAPHICS*, 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.

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, somente serão fornecidos com índices aproximados os valores da matéria-prima utilizada, próxima às datas pesquisadas.

Independente 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.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA / ESTADO DA ARTE EM USINAGEM

2.1. HSM-HSC

Atualmente considerada o estado-da-arte em termos de usinagem, a tecnologia de usinagem em altíssimas velocidades HSM/HSC foi desenvolvida há mais de 70 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.

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.

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.

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. 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"[29], publicado pela Editora Érica.

No Brasil o crescente o número de usuários, 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 (figura2.1).

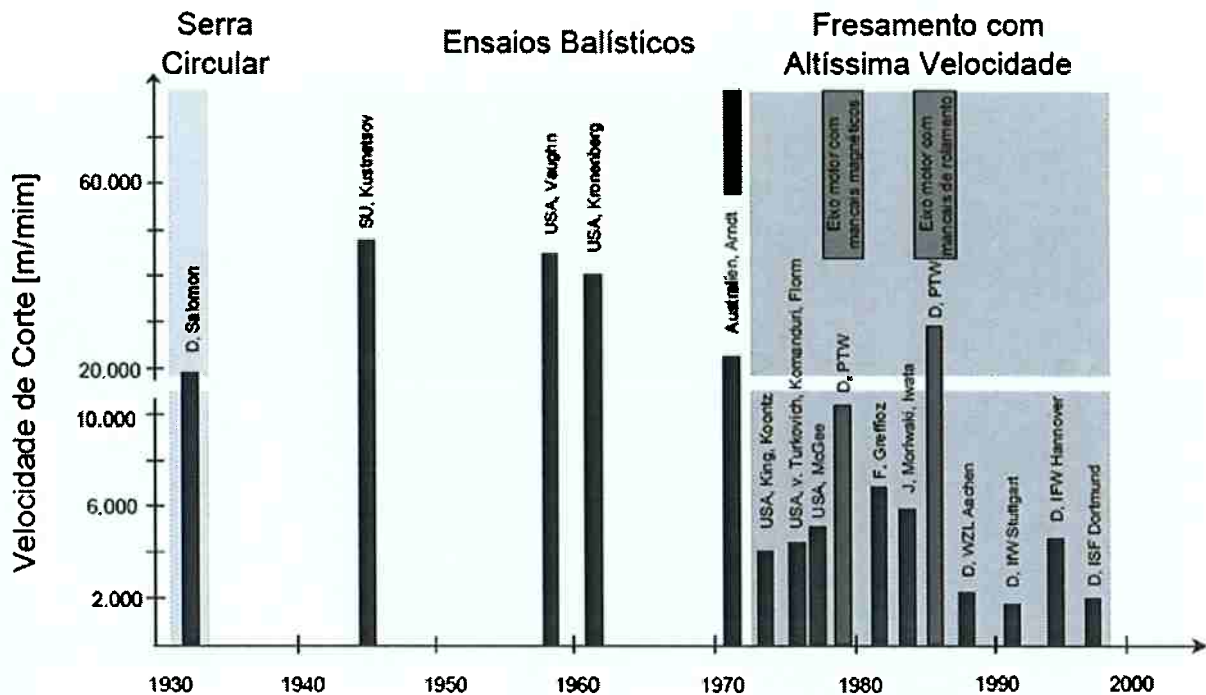


Figura 2.1 – Histórico de ensaios de Usinagem com Altíssima Velocidade.
Fonte Schützer, K. (1999).

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 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.

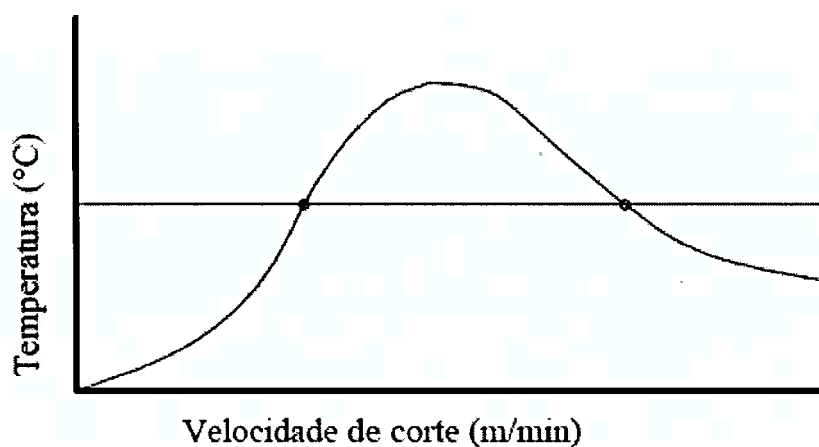
A fórmula da velocidade de corte está a seguir.

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

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

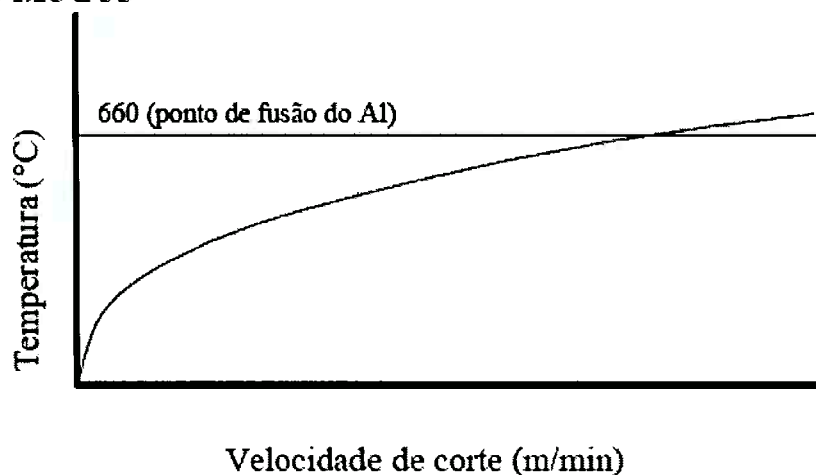


Figura 2.2 – Influência da velocidade de corte na temperatura por Salomon e McGee.
Fonte Dewes, et al. (1999).

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.

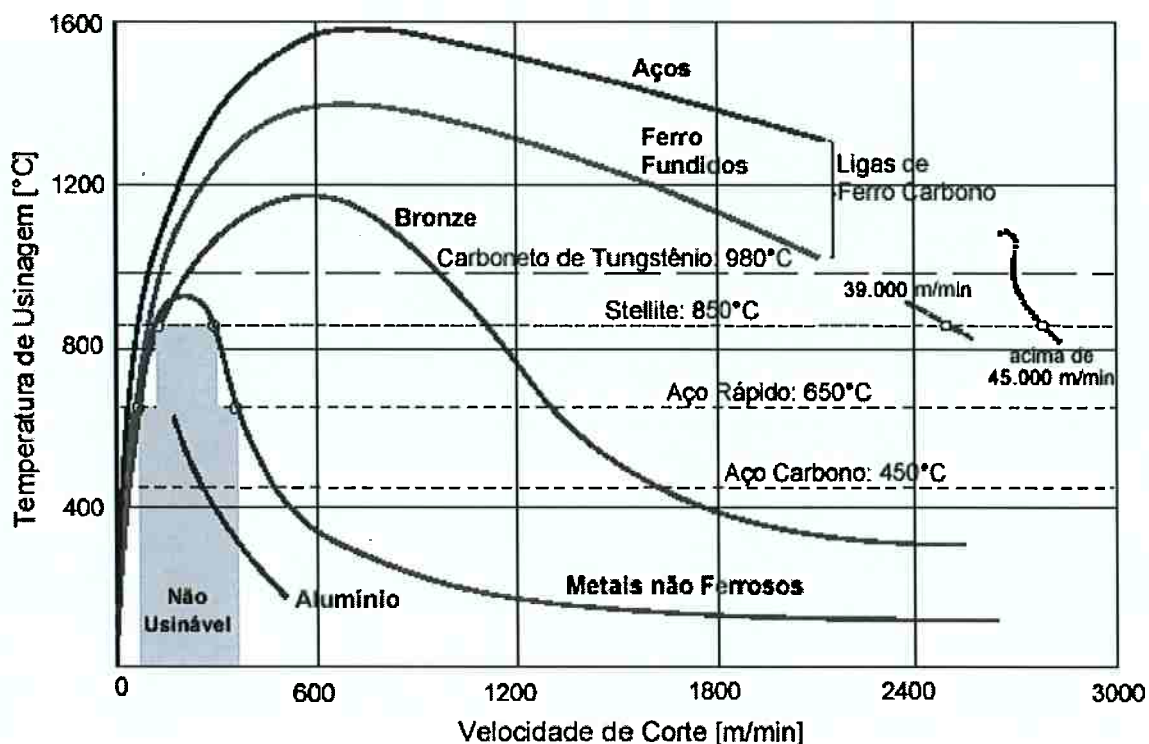


Figura 2.3 – Variação da temperatura com a velocidade de corte.
Fonte Schulz, H. (1997).

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 10.000m/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. Este fenômeno, os autores concluíram que 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..

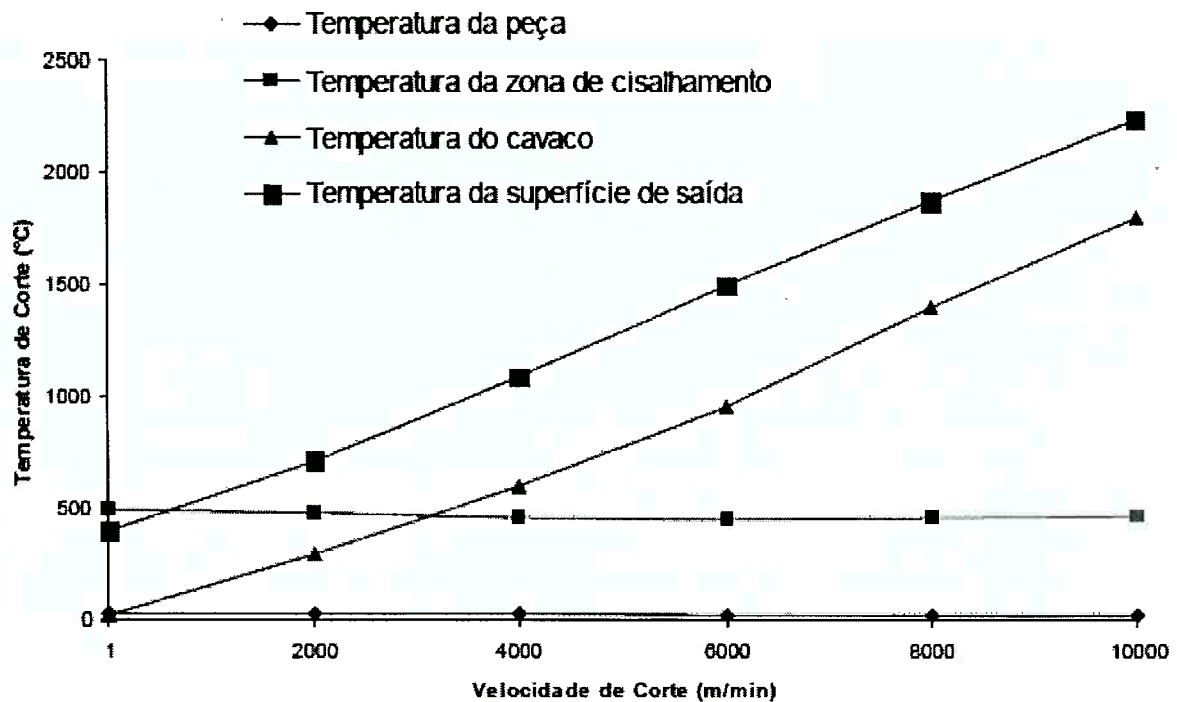


Figura 2.4 – Influência da velocidade de corte no valor da temperatura de corte.
Fonte Dagiloke, et al. (1995).

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 tamanho pequeno no desbaste e acabamento e no acabamento e acabamento fino de peças de todos os tamanhos.
- A HSM crescerá em importância quanto mais próximo do formato final a peça ficar.
- A HSM é hoje principalmente realizada em máquinas cone 40.

2.2. Alta velocidade

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, podemos 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 estamperia. 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. Na figura 2.5 a seguir, apresenta-se a visão atual de usinagem em altíssima velocidade para determinados materiais.

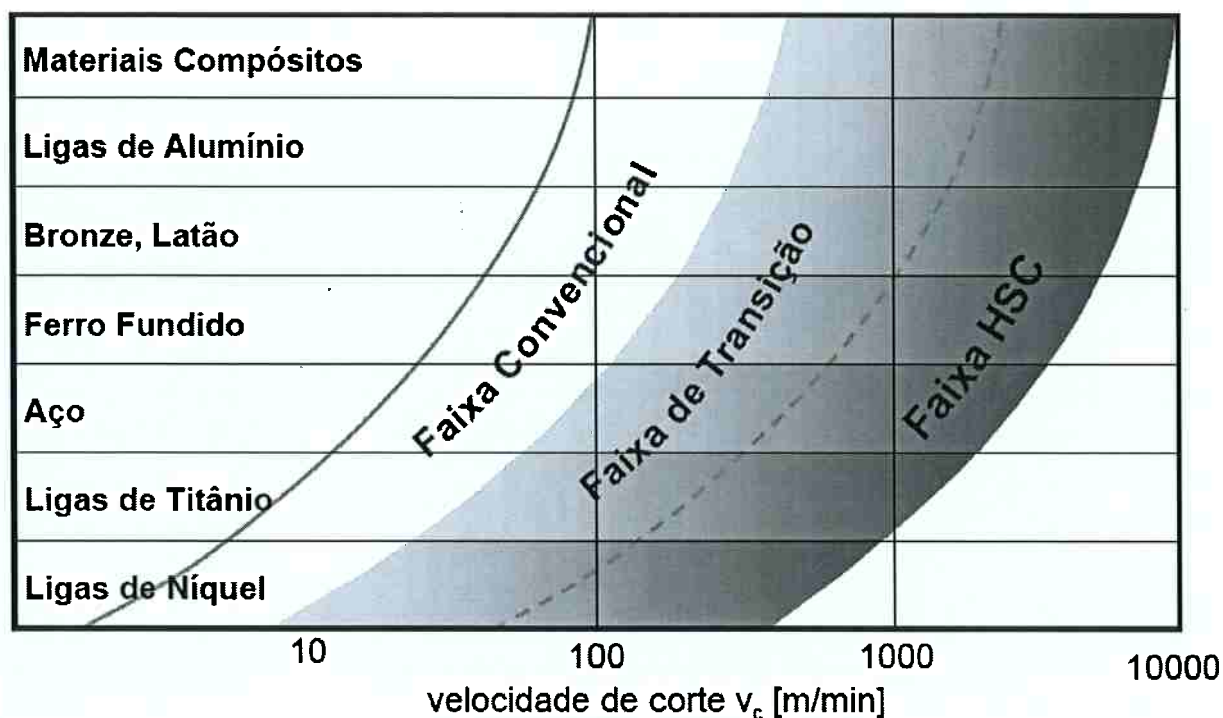


Figura 2.5 – Definição atual de usinagem em altíssima velocidade
Fonte Schützer, K. (1999).

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. E na figura 2.7 um comparativo entre usinagem convencional e HSM.

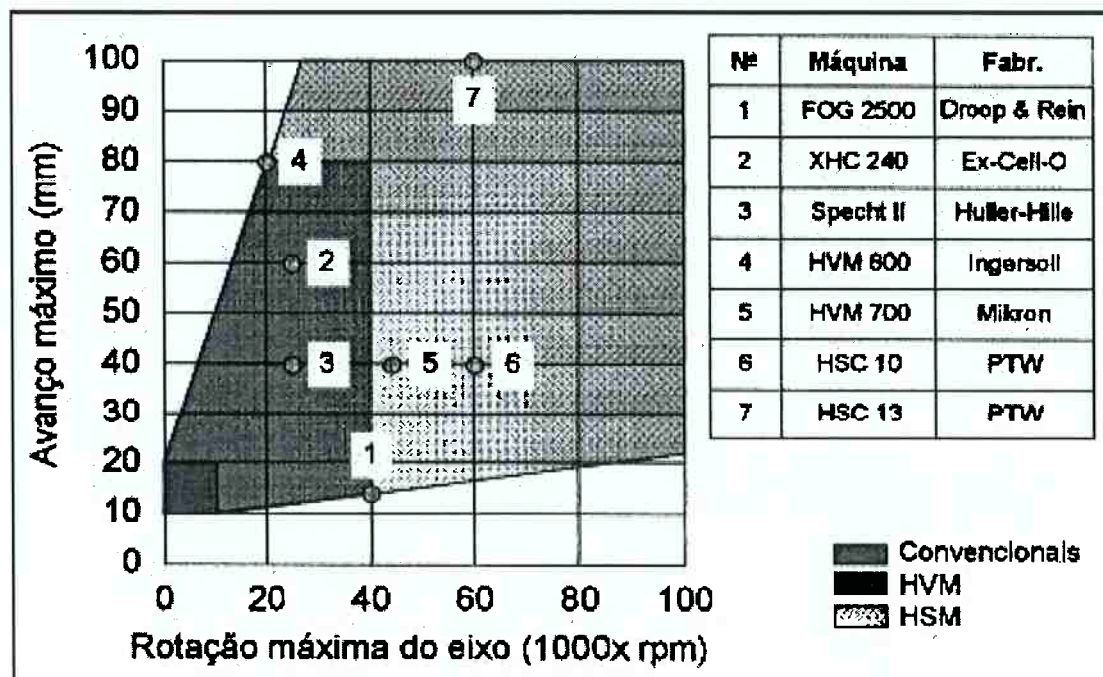


Figura 2.6 – Classificação de fresadoras segundo critérios HSM
SCHMITT – 1996, FINZER – 1997

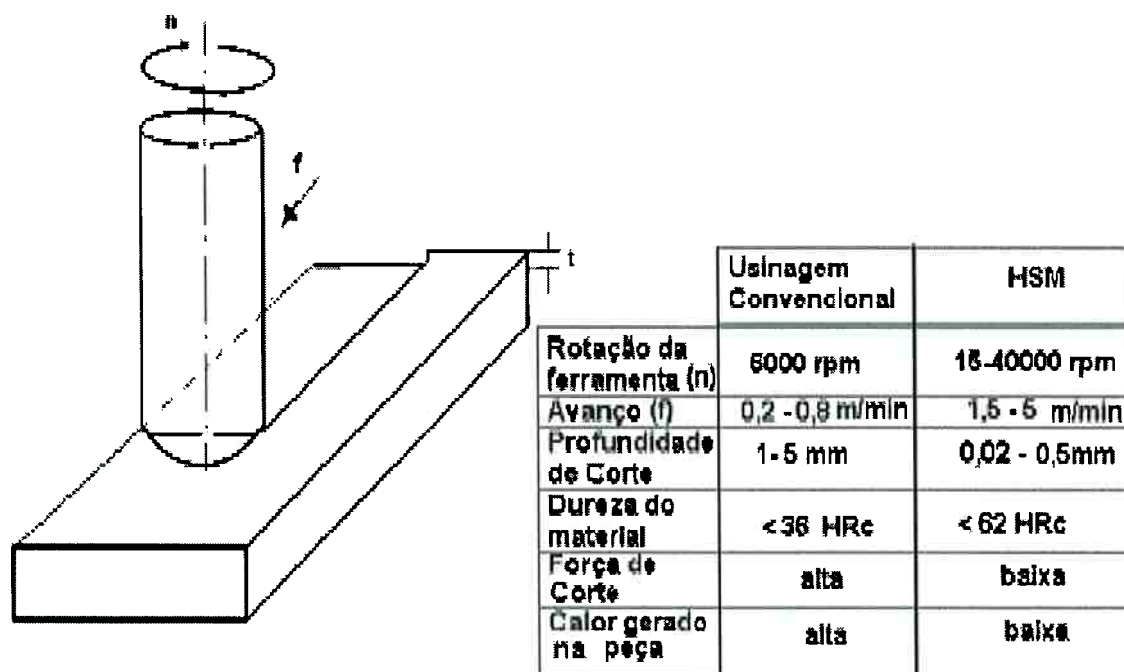


Figura 2.7 – Comparativo dos parâmetros Convencionais e HSM

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.

Uma definição mais atualizada da altíssima velocidade de corte é apresentada abaixo, considerando-se curvas de transição da usinagem convencional para a HSM para diferentes materiais.

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 a 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.

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):
 $1800\text{m/min} < V_c < 300000\text{m/min}$.

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 policristalino.

2.4. FERRAMENTAS DE ALTA TECNOLOGIA

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).

Pode-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 um dos tipos pode ser observadas na Figura 2.8.

No acabamento, em função da necessidade da tolerância de forma e da textura da superfície são utilizadas ferramentas apropriadas, podendo ter a ponta arredondada(figura 2.9), que provocam arrancamento de cavacos menores formando superfícies mais lisas.

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 2.8 - Fresa de topo com pastilhas reversíveis "T Max".



Figura 2.9 - Fresa de topo esférico "Ball Nose"

Conforme o gráfico abaixo (figura 2.10), a baixa vida útil da ferramenta de corte é um fator importante a ser considerado nos processos devido aos custos.

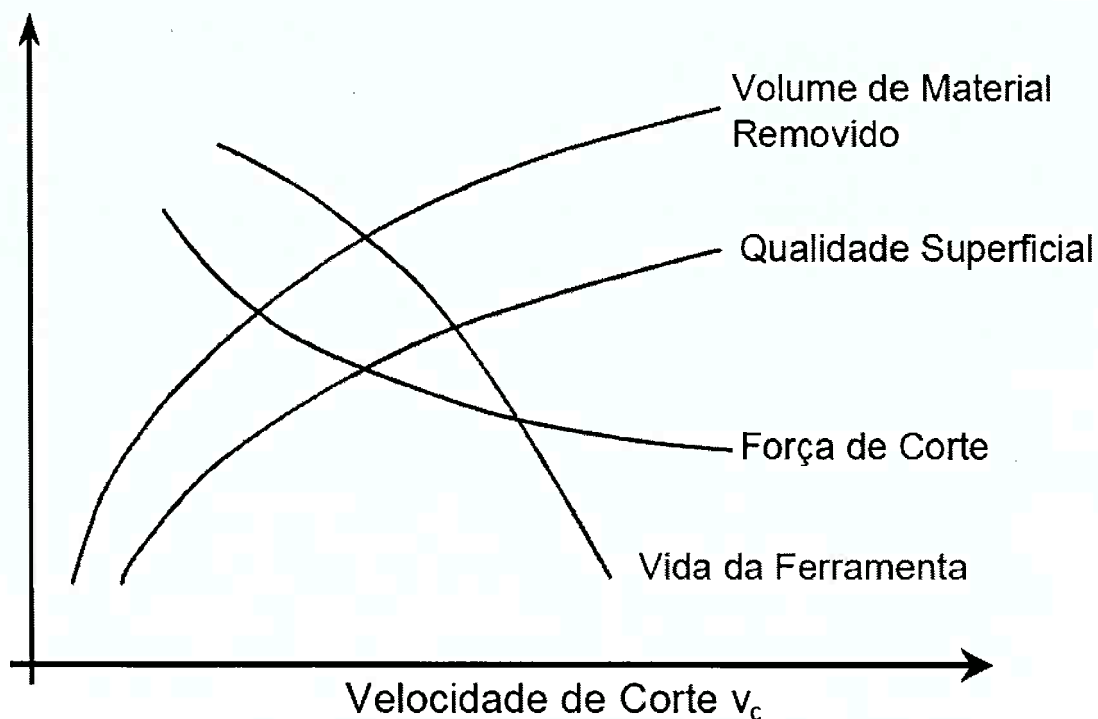


Figura 2.10 – Propriedades gerais da Usinagem com altíssima velocidade [29].

Fonte Usinagem em Altíssimas Velocidades - Ed. Érica

As ferramentas HSC típicas são aquelas que geralmente apresentam as arestas de corte de diamante policristalino (PCD figura 2.11), ou nitreto cúbico de boro (CBN), são firmemente soldadas (fixadas) ao corpo básico, mas podem apresentar também outras configurações.

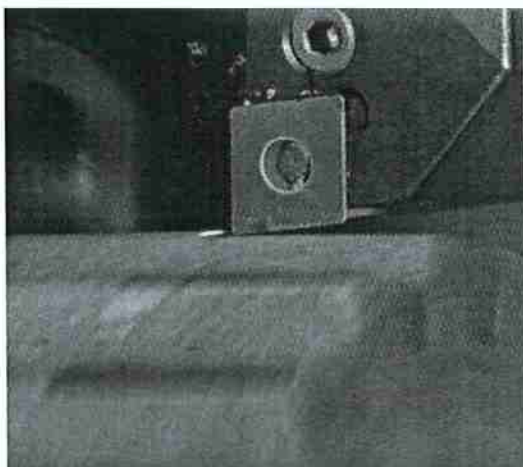


Figura 2.11 - Inserto de PCD ou CBN.

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).

As ferramentas PCD são ideais para a usinagem de materiais não ferrosos (alumínio), atingindo-se vida de ferramenta de dez mil até cem mil peças com níveis muito elevados de qualidade superficial e precisão.

As ferramentas CBN são ideais para a usinagem de materiais ferrosos (aço e ferro cinzento), tais constatações foram pesquisas da Universidade de Birmingham [30].

Os alargadores (figura 2.12), para corte a alta velocidade, definida 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.



Figura 2.12- Ferramenta HSC com guias de diamante.

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, são atingidas qualidades superficiais Ra de 0,2 μm em alumínio, 0,3 μm em aço e 0,8 μm em ferro fundido cinzento.

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 bars. Atualmente ferramentas assim já estão sendo usadas com lubrificação mínima, em desenvolvimento também estão os processos de alargamento HSC com remoção de microcavacos a velocidades de corte e avanços elevados.

Friedrich Stockinger [36] 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 utilizados grandes diâmetros, deve-se recorrer ao que dispõe o projeto "Norma do Segurança CEN TC143/WG7", em caso de quebra ou soltura, durante a alta velocidade, serão produzidas forças de grande intensidade.



Figura 2.13 - Ferramentas de corte e insertos.

Fonte catálogo Mapal.

A Mapal selecionou o alumínio de alta resistência à tração para a sua nova série de fresas HSC (figura 2.13), 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.

⁽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.

Por exemplo, o corpo de alumínio de uma ferramenta protótipo de 200 mm do 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. Assumem-se $27.500: 2,2 = 12.500$ rpm como uma velocidade de rotação operacional segura [35].

Em geral, todos os materiais de corte duros definidos pela DIN/ISO 513 – carbetto - 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 o 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. Enquanto no torneamento a alta velocidade, que é feito com ferramental fixo, não existe tensões mais elevadas na ferramenta (exceto na aresta de corte).

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 [3].

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.

Os acessórios (figura 2.14), e as fixações das ferramentas de corte (figura 2.10), constituem outro elemento chave no desenvolvimento da usinagem HSC, tanto em relação aos materiais das ferramentas e da peça quanto ao projeto deve-se dar atenção especial aos sistemas de fixação da ferramenta nas máquinas, devido aos altos esforços a que elas são submetidas.

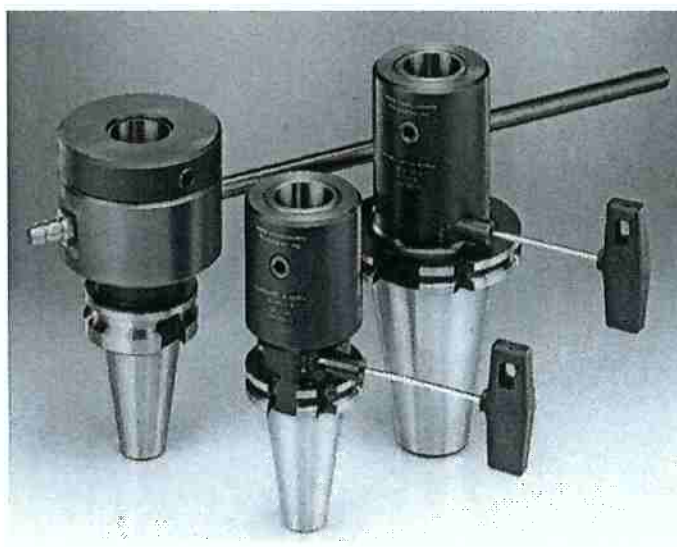


Figura 2.14 - Fixação com ajuste excêntrico.



Figura 2.15 - Fixadores de ferramentas de alta velocidade de corte.

Muitas vezes, estas ferramentas atingem velocidades de corte acima de 8.000 m/min que exige delas características como alta rigidez na fixação (figura 2.16 e 2.17), tenacidade no corte e tolerância a altas temperaturas geradas durante a usinagem.

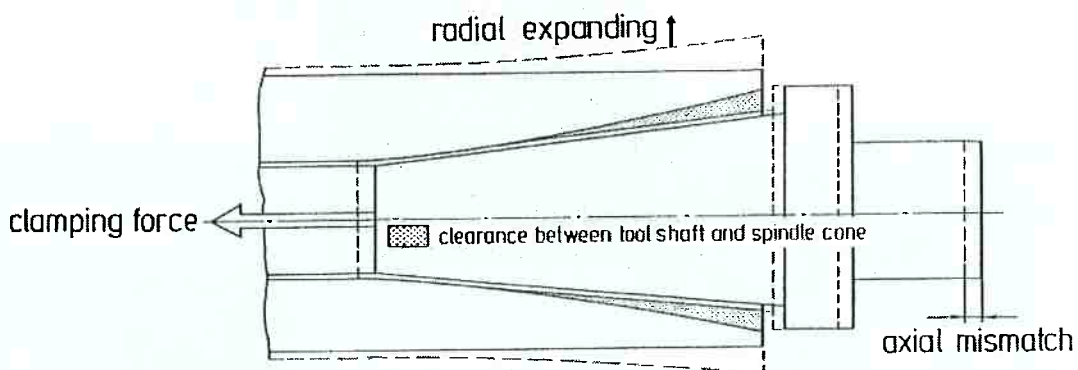


Figura 2.16 - Movimento causado pela expansão do cone no eixo-árvore provocada pela força centrífuga.

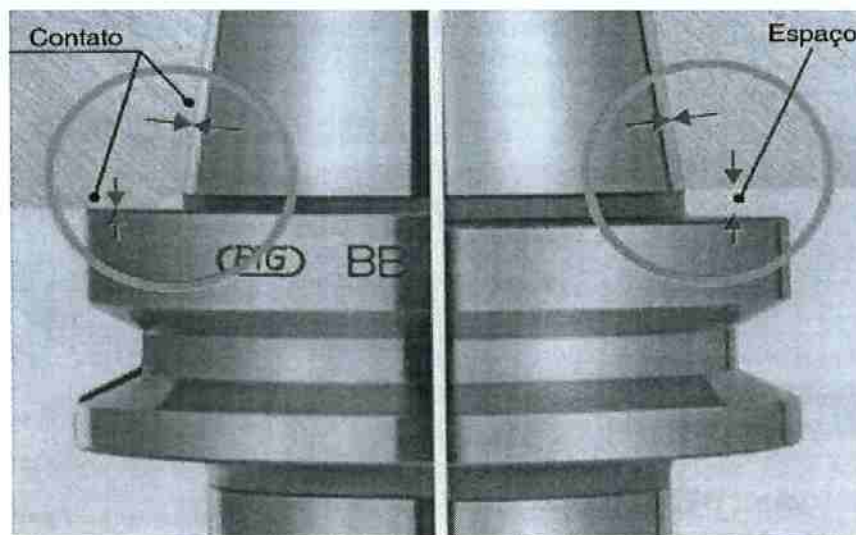


Figura 2.17 - Detalhes que possibilitam maior rigidez na fixação.

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 (figura 2.18).



Figura 2.18 - Adaptadores para HSC.

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

2.5. 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 de 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 [2].

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:

$$U = G \times 9549 \times W/\text{rpm}$$

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 e

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 [18].

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 2.19). O dispositivo não é apenas mais rápido que as abordagens tradicionais para balanceamento, mas também eficaz.



Figura 2.19 - Sistema de balanceamento automático, chamado de Bala Dyne.

Na figura 2.20 abaixo, mostra em uma peça de alumínio o quanto que uma ferramenta balanceada afeta o acabamento superficial. O porta-ferramenta (figura 2.21) 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 2.20 - Detalhe do acabamento superficial.

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 [2].

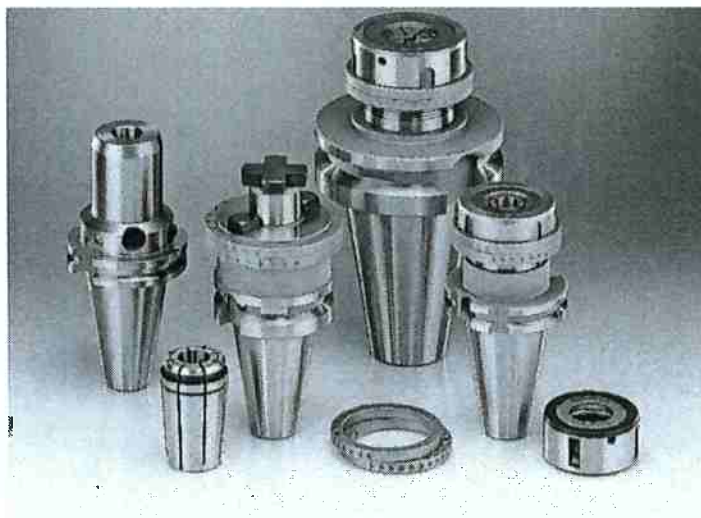


Figura 2.21 - Porta – ferramentas e adaptadores balanceáveis.

2.6. MATERIAL PARA FERRAMENTAS HSC

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 mais apropriados para aplicação em usinagem HSC são os diamantes poli cristalinos (PCD) para materiais não ferrosos (especialmente alumínio) e o nitreto cúbico de boro (CBN) para materiais ferrosos. Estes materiais apresentaram bons resultados nos aspectos vida da ferramenta, rugosidade da peça após a usinagem e custo. Os desgastes apresentados 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 (figura 2.22).

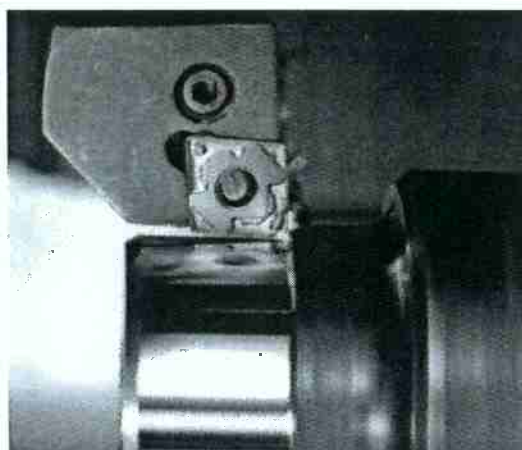


Figura 2.22 - Inserto de cermet.

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.

2.7. 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 [20]. Testes realizados no PTW permitiram chegar a alguns valores recomendáveis de uma forma genérica para otimização de geometrias de ferramentas, apesar de estarem relacionados com operações de fresamento e Fresotorneamento em HSC (figura 2.23).

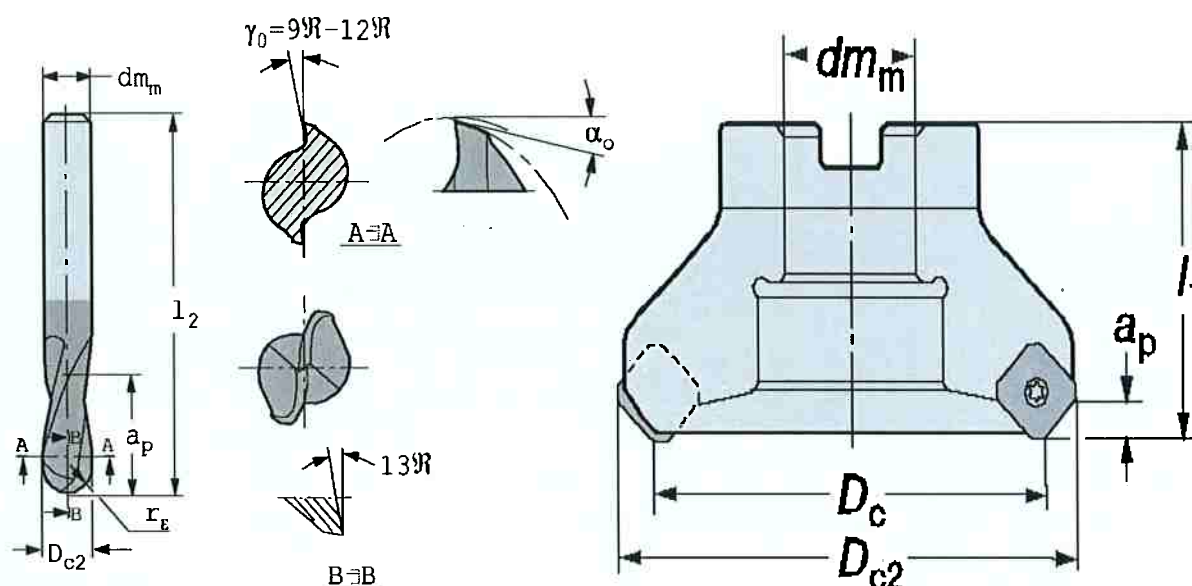


Figura 2.23 – A geometria das ferramentas tem grande influência durante a usinagem HSC.

Fonte Catálogo Sandvik

2.8. 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, é um grande problema em ferramentas para usinagem HSC. Estes bolsões se concentram principalmente na região de fixação das pastilhas, alguns insertos possuem geometria de quebra cavaco conforme a figura 2.24.



Figura 2.24 - Geometria quebra cavaco.

Fonte Catálogo Sandvik

Em função destas observações algumas recomendações genéricas podem ser consideradas no desenvolvimento de projeto de ferramentas para usinagem HSC [18]:

- 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.

2.9. SISTEMAS FERRAMENTA x MÁQUINA EM HSC

Outros fatores de bastante relevância em usinagem HSC são os mecanismos de fixação das ferramentas, (figura 2.25), onde a rigidez deve considerar o alto nível de solicitações [31].



Figura 2.25 - Pinças de fixação das ferramentas.

A interface ferramenta x eixo - árvore é o ponto onde ocorre a maior concentração de esforços entre a peça e a máquina (figura 2.26).



Figura 2.26 - Condições de alta rigidez para maiores concentrações de esforços.

Fonte Catálogo Sandvik

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.

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. Desta maneira, esta atendendo também o quesito segurança [2].

3. 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 deslocamento rápido dos carros de translação sem perdas de potência. 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 [9], 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.

3.1. 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 3.1' - Máquina HSC.

Na figura 3.1, 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 3.2 a seguir, como máquina utilizada para fabricação de peças aeroespaciais e aeronáuticas.



Figura 3.2 – Ultra High Speed Linear Motor Drive Vertical Machining Center.

- 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.

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

Como regra geral, o projeto do eixo-árvore deve considerar um motor integrado, devido á divisão da freqüência do motor pelos rolamentos. Desta maneira, o uso de construções compactas e rígidas permite o alcance de freqüências críticas elevadas, em comparação às máquinas normais. Os motores para máquinas HSM são encontrados mais comumente rolamentos de cerâmica (figura 3.3) [20], mas

também podem ser utilizados rolamentos magnéticos ou a ar. 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.

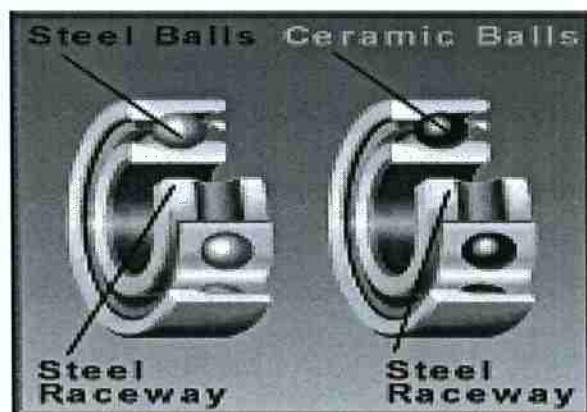


Figura 3.3 - Rolamento com esferas de aço e de cerâmica.

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 [20].

Praticamente todos os componentes móveis das máquinas HSM possuem guias lineares (figura 3.4), porque elas apresentam redução do coeficiente de atrito e garantias de melhor precisão, em virtude da utilização de rolos e esferas.

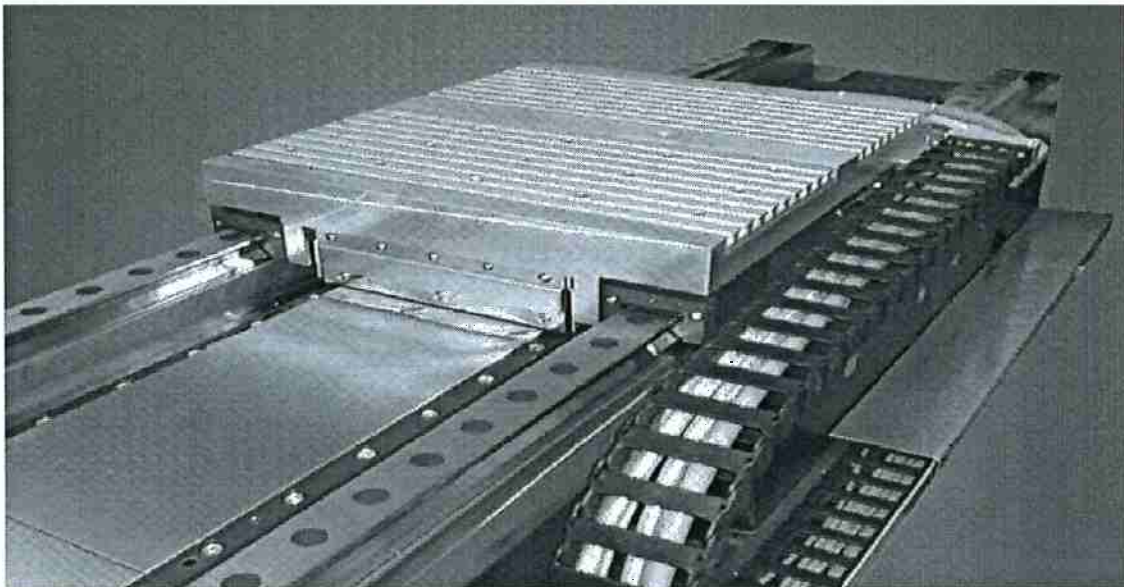


Fig.3.4 - Detalhe de guias lineares de uma máquina HSC.

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 (figura 3.5). 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.

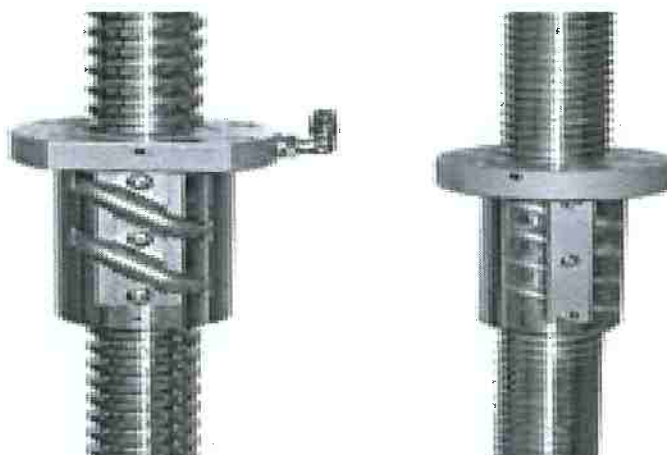


Figura 35 - Fuso de esferas com lubrificação HSC e fuso um convencional.

Para assegurar uma rigidez suficiente do fuso e do sistema de fixação da ferramenta, este sistema não pode ser selecionado arbitrariamente pequeno. 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 3.6).



Figura 3.6 - Fixação da ferramenta com lubrificação óleo-ar.

Principais resultados da aplicação de Motores Lineares (Figura 3.7)

- 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.

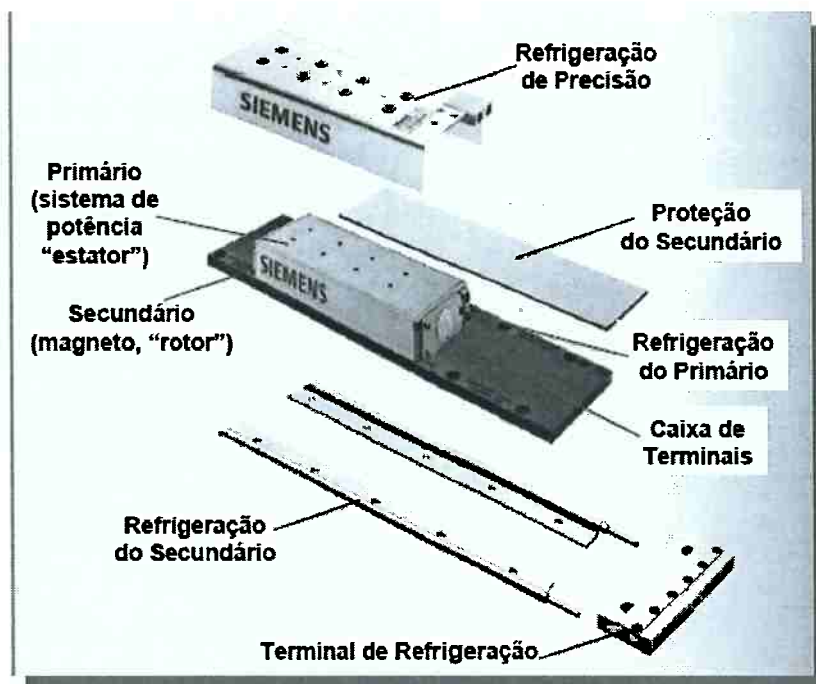


Figura 3.7 – Sistema para Motores Lineares

Fonte Siemens



Figura 3.8 - Fabricante Maho-Deckel - High speed.

A figura 3.8 acima mostra a esquerda um centro de usinagem de altíssima tecnologia, 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.

3.3. 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. [5]

"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, entre eles, Schonflies (1893), Mannheim (1894) e K. Federhoder (1932). Mais recentemente, em 1949, V. Gough usou mecanismo semelhante para o teste de pneus. O objetivo era apoiar os pneus para estudá-los sob várias posições. Em 1965 estes mecanismos foram redescoberto e usados muito amplamente em simuladores de vôo por um engenheiro norte americano chamado D. Stewart. Desde aquele tempo, quaisquer mecanismos paralelos de acoplamento são chamados Plataformas de Stewart, embora V. Gough tenha descoberto este mecanismo antes dele. Em 1966 uma modificação da Plataforma de Stewart foi usada para uma máquina de usinagem. Esta foi a primeiro estudo em uma máquina ferramenta baseada no princípio da Plataforma de Stewart que seria mais tarde conhecida como máquinas ferramentas de cinemática paralela, porém, as dificuldades de controle no uso da plataforma só foram sanadas a partir de 1979 com o desenvolvimento computacional que possibilitou o controle preciso dos mecanismos de cinemática paralela.

Um primeiro dispositivo de mecanismo paralelo foi usado em uma célula de montagem robotizada por H. Mc Callion em 1979. Então, manipuladores paralelos estiveram em desenvolvimento crescente durante as últimas décadas, de forma que eles são na atualidade considerados uma alternativa atraente para substituir os dispositivos de acoplamento consecutivos, como os braços de robôs e máquinas de usinagem convencionais.

Desde aquele tempo foram feitas muitas melhorias e modificações ,para superar seu alcance restritivo de movimentos. Até recentemente, foram criados alguns surpreendentes dispositivos que dão uma gama extensiva de movimento das vantagens da Plataforma de Stewart." [27]

O projeto inicial da plataforma, desde o tempo que foi adotado primeiro,

necessitou de muitas mudanças, porque o tempo atual é o tempo dos dispositivos controlados por computador. Além disso, com o avanço no campo de robótica, foi necessário inventar dispositivos de posicionamento com precisão muito alta, podendo alcançar décimos de micrometros. O projeto antigo era rígido, mas estava limitado aos alcances de movimentos que poderiam ser providos por tal dispositivo. Então, técnicas novas de projeto mecânico; como: FEA, Método de Elementos Finitos, foram introduzidos para obter uma família nova de dispositivos de posicionamento com rigidez e grande gama de movimentos. Em 1982 D.CH. Yang publica trabalho de cinemática paralela inversa para robôs, em 1990 as primeiras operações de manufatura com máquina-ferramenta de conceito de cinemática paralela foram iniciadas por várias empresas [31].

Em 1990 a empresa norte americana Ingersoll anuncia a construção de um protótipo de máquina de usinagem de cinemática paralela de nome Octahedral Hexápode VOH-1000, em 1994 este protótipo é mostrado na feira da mecânica de Chicago"[15]. "Em 1997 um desenvolvimento conjunto do Instituto de Máquinas Operatrizes e Técnicas de Conformação (IWU) de Chemnitz com a empresa Mikromat Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG de Dresden é apresentado na feira da mecânica de Hanover: a Máquina de cinemática paralela de nome 6X Hexa . [16]

Por volta do ano 2000 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.

3.4. MÁQUINAS FERRAMENTA DE CINEMÁTICA PARALELA

Segundo Wilhelm J. Blumlein 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, 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 3.9 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 Werkzeugmaschinen GmbH na hexápode 6X Hexa figura 3.10 e pela empresa Norte Americana Ingersoll na hoh600.[38]

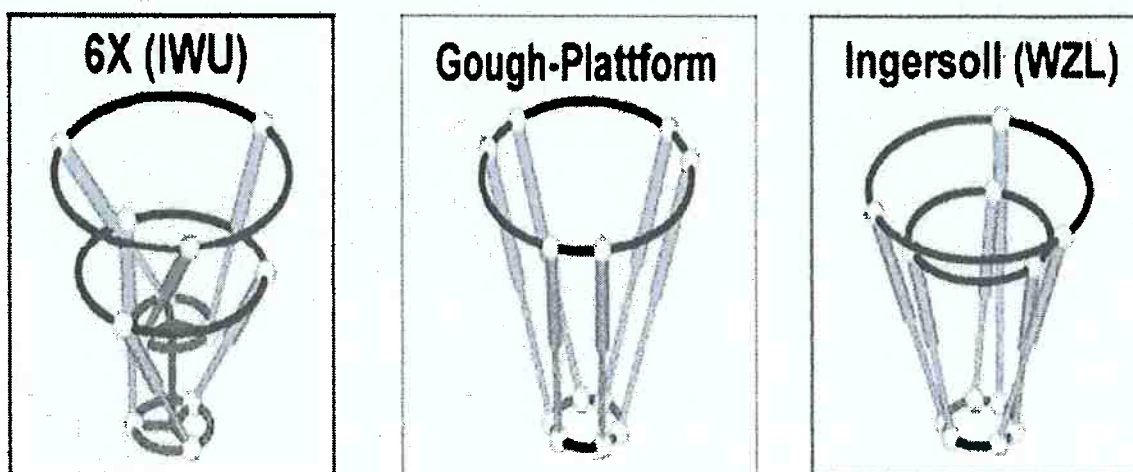


Figura 3.9 - Configurações Esquemáticas para máquinas hexápodes

Fonte: www.andron1.de/pdf/the_hexapod_reprint.pdf

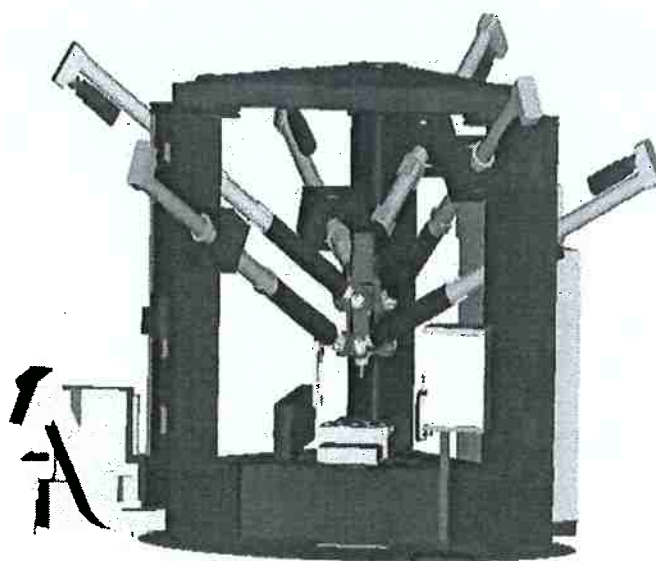


Figura 3.10 - -Estrutura hexápode da 6X Hexa
Fonte: www.andron1.de/pdf/the_hexapod_reprint.pdf

Como uma máquina de multieixos ela não é convencional. Nas máquinas de Cinemática paralela, são habilitados todos os seis graus de liberdade com um arranjo paralelo unificado de atuadores (braços). Para qualquer jogo de comprimentos de braços, há uma única posição rígida para o mecanismo; esta posição muda quando os comprimentos dos braços são variados. Máquinas

convencionais necessitam de mecanismos lineares ou rotativos para executar cada grau de liberdade, isto não é necessário para as máquinas de cinemática paralela, como consequência, temos redução em tempo de “setup” por causa da forma inteligente de alcançar a peça de trabalho.

As máquinas de cinemáticas paralelas oferecem vantagens básicas em geral em rigidez, precisão, velocidade, aceleração. Quando esta máquina estiver carregada, as forças nos braços só agem longitudinalmente ou em tração ou sob compressão. Estes podem ser ajustados mais precisamente e com uma estrutura mais leve do que se apresentam as máquinas ortogonais convencionais. Uma máquina de multieixos convencional tem uma série de acoplamentos móveis conectados e cada um contribui com um pouco de folga, em uma máquina de cinco-eixos haverá um mínimo de seis acoplamentos. Nestas máquinas as ligações agem em paralelo e não consecutivamente eliminando acúmulo de folgas.

A maioria dos erros em máquinas de multieixos convencionais origina-se nas fases rotativas por causa da complicação da caixa de engrenagem. Uma máquina de Cinemática paralela pode girar efetivamente simplesmente alterando comprimentos de atuadores (braços).

Essa máquina pode ser projetada tal que nenhum dos seus motores precisem fazer mais que suaves oscilações. A massa deslocada é então, comparativamente pequena, enquanto minimiza problemas com inércia. Toda a liberdade necessária de movimento é habilitada pelo mecanismo, a peça de trabalho e sua mesa de apoio geralmente pesada podem ser estacionárias.

Os atuadores que levam somente cargas axiais podem ser aumentados economicamente. Dobrando o diâmetro deles permite um aumento quádruplo em comprimento com um aumento dezesseis vezes em volume de trabalho, isto pode ser alcançado com um aumento modesto em peso e custo.

Estas máquinas operatrizes podem aparecer tanto na configuração clássica da Plataforma de Stewart, (Figura 3.11) como na configuração invertida, (Figura 3.12) sendo a configuração invertida a mais comum para máquinas operatrizes.

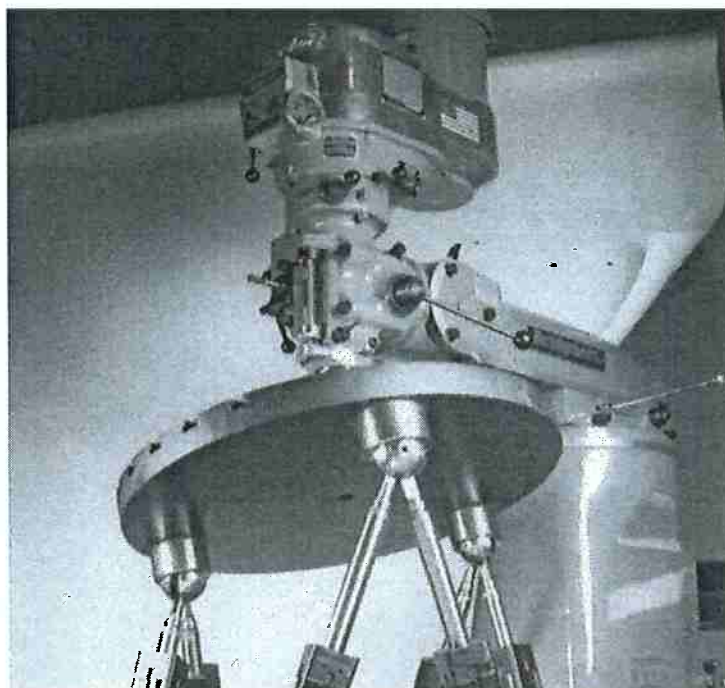


Figura 3.11 - Plataforma de Stewart Clássica

Fonte: www.prso.com/gallery.html



Figura 3.12 - Plataforma de Stewart Invertida Vertical- Cosmo Center PM 600

Fonte: www.ifw.uni-hanover.de

Estas máquinas operatrizes, com suas novas cinemáticas de movimento, têm uso potencial na usinagem a alta velocidade de moldes e matrizes. Outras aplicações estão na indústria aeroespacial e de processamento de madeira.[15]

3.5. 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.”[17]

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 reconheceram o fato há algum tempo com a fabricação dos primeiros componentes. Tudo começou com o desenvolvimento dos elementos articulados, seguidos da construção execução de tirantes telescópicos completos.

Atualmente, os componentes estão sendo testados por engenheiros de aplicação e de desenvolvimento nas universidades e indústrias. Em simultâneo aos testes práticos estão sendo realizados ensaios abrangentes, para assegurar os valores característicos de desempenho. Em virtude dos resultados positivos e em parte já conhecidos da feira da mecânica de Paris em maio de 1999 foram expostos produtos padronizados em série, prontos para a produção, que devem influenciar decisivamente o desenvolvimento das cinemáticas paralelas.

Segundo Durschimied, 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 engrupamento e ausência de desgaste.

De forma geral, o contato esfera-esfera nos rolamentos é desfavorável, em

virtude da pressão exercida na superfície. No entanto, durante o desenvolvimento dos protótipos foram observadas condições favoráveis de sua aplicação nas máquinas de Cinemática paralela.

Estas condições favoráveis só podem ser alcançadas se a precisão de forma das esferas for elevada. Por meio de ensaios, os processos de fabricação puderam ser melhorados até um ponto que tanto em relação a forma quanto a qualidade superficial foi possível obter resultados muito bons.

Em conjunto com uma capacidade de carga muito alta, a rigidez de uma máquina operatriz de usinagem é imprescindível.

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 3.13). A figura 3.14 mostra um sistema de eixo linear com eixos rotacionais para máquinas de cinemática paralela, sendo 1 eixo linear Z e 2 eixos rotacionais.

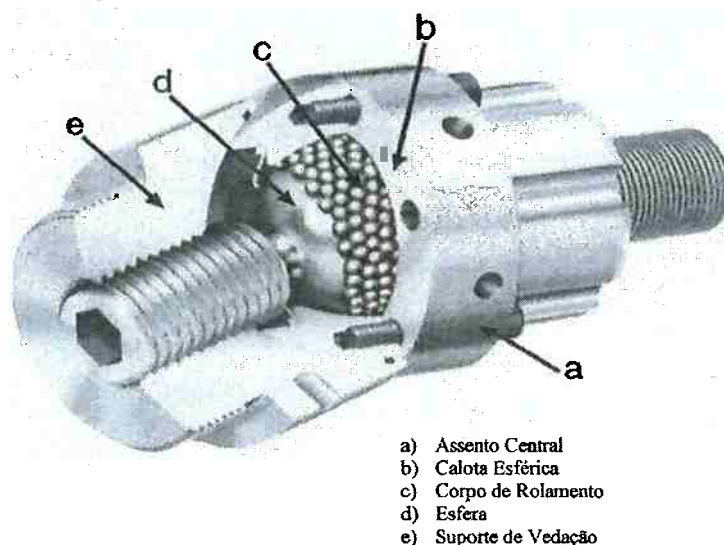


Figura 3.13 - Junta esférica em corte,
Fonte: Revista MM- Máquinas e Metais, dezembro 2000.

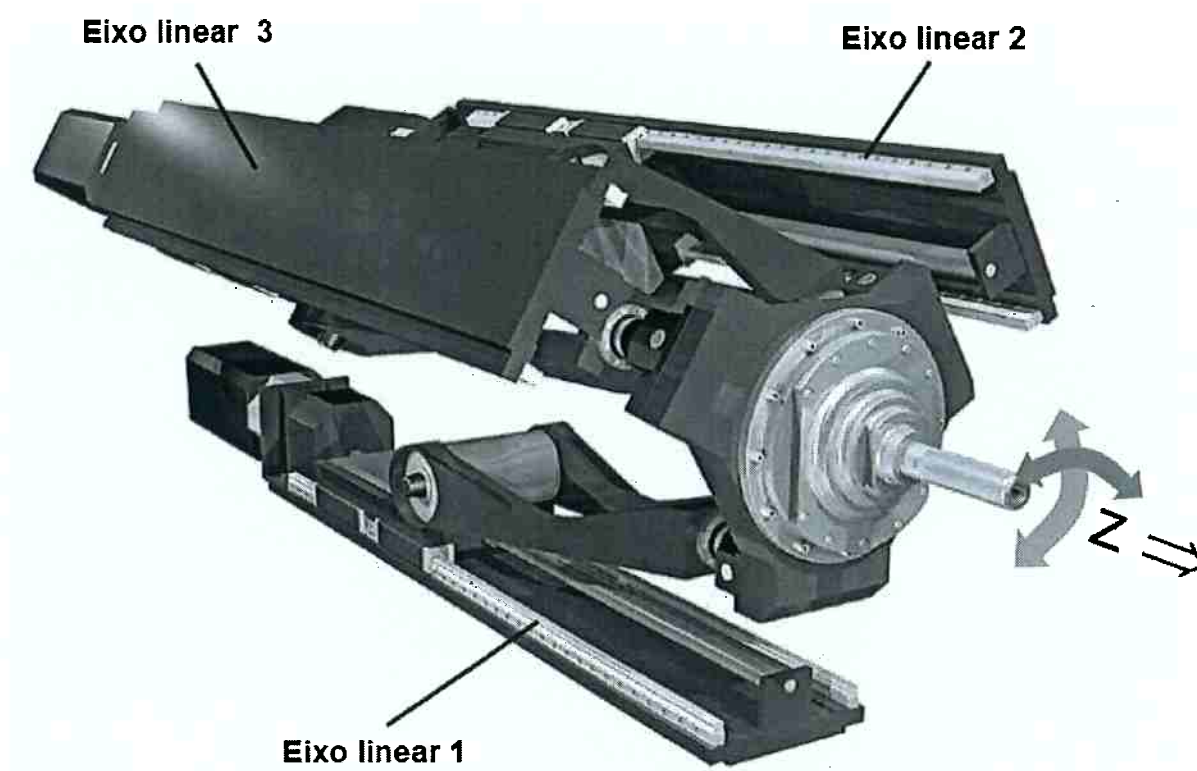


Figura 3.14 – Sistema de eixo linear em máquinas paralelas.

Fonte: Ecospeed, DS Technologie

3.6. USINAGEM DE MOLDES E MATRIZES

Segundo Raimund Neugebauer[16], 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 um metal duro revestido.

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”.

Para uma usinagem eficiente, há uma necessidade da aproximação correta da ferramenta de fresar a 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.

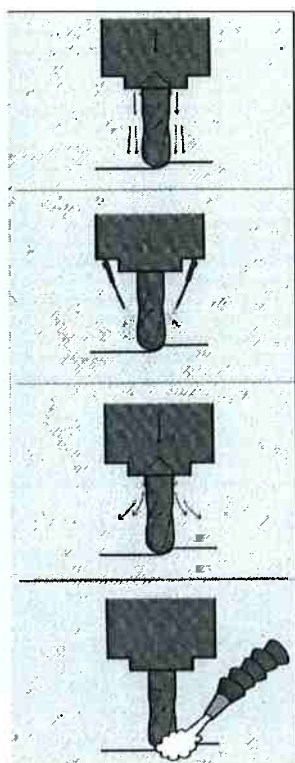
Dentro deste conceito as máquinas de cinemática paralela são as mais conhecidas. Elas dispõem de uma série de vantagens construtivas frente às máquinas convencionais. As maiores vantagens são uma elevada dinâmica e pequenas massas a serem movimentadas, bem como uma grande parte dos componentes construtivos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

4. SISTEMAS DE CONTROLE CNC EM HSM

Devido às elevadas taxas de avanço envolvidas em máquinas HSM, as exigências quanto a 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 [14].

4.1. SISTEMAS DE VELOCIDADES DE EXTRAÇÃO DE CAVACOS REFRIGERAÇÃO E DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA

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 [9], a figura 4.1 a seguir exemplifica alguns tipos de refrigeração.



a) Aplicação de ar comprimido como refrigerante e elemento expulsor de cavacos.

b) Aplicação de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).

c) Aplicação de fluido de corte a alta pressão.

d) Aplicação convencional de fluido de corte.

Figura 4.1 – 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 fluidos 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.

4.2. 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 (figura 4.2). Para evitar problemas, as máquinas-ferramenta devem possuir um sistema de blindagem e proteção, para a máquina.

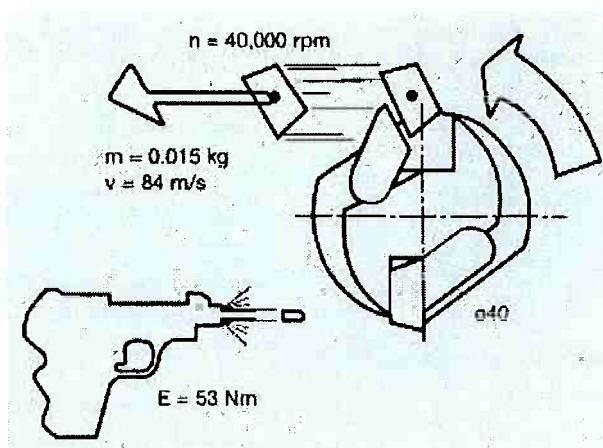


Figura 4.2 - Um exemplo das conseqüências da ruptura de uma pastilha de 0,015kg pode causar. Mesmo impacto de uma arma de fogo.

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 corredeças, com janelas de observação, geralmente uma de cada lado da máquina, em vidro laminado à prova de balas.

4.3. CABEÇOTES HSC

Os cabeçotes HSC podem ser classificados nas seguintes categorias principais.

- Cabeçotes convencionais, com guias deslizantes e uma barra de tração no fuso, que permitem apenas velocidades de rotação limitadas.
- Cabeçote excêntrico HSC de alta capacidade, com barra de tração no fuso.
- Cabeçotes para centros de usinagem (fuso sem barra de tração), acionados, por exemplo, por batente, agente de refrigeração, ar ou por forças centrífugas.

Os cabeçotes convencionais equipados com contraguias apresentam desvantagens consideráveis. Torna-se difícil, por exemplo, obter uma qualidade de balanceamento aceitável para a usinagem em alta velocidade. Além disso, forças que atuam sobre a barra de tração não são aceitáveis na faixa de alta rotação, no que se diz respeito aos mancais do fuso, o princípio dos cabeçotes excêntricos gera

uma alteração do ângulo radial de corte, que, por experiência, tem se mostrado insignificante.

Um cabeçote tipicamente flexível é representado por um sistema de corte desenvolvido para alta capacidade com 6.000 rpm (figura 4.3).

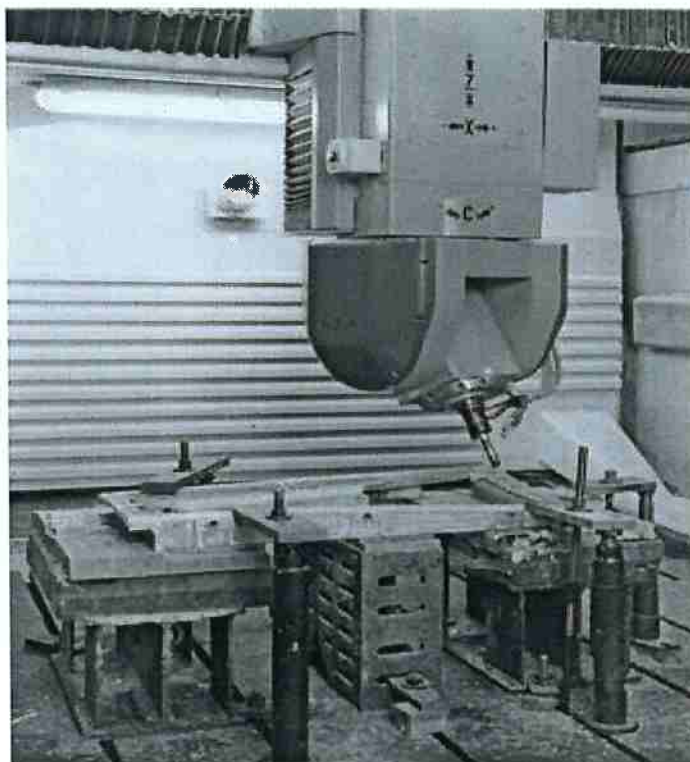


Figura 4.3 - Cabeçote flexível, vantagens em usinagem de vários eixos.

Ele permite usinar carcaças de caixas de transmissão de alumínio com diversos perfis internos, bastando, para isso reprogramar o movimento do eixo NC e, dispensar qualquer troca de ferramenta. Esse novo conceito de cabeçote está sendo aplicado com sucesso há quase um ano em regime industrial [9], obtendo-se uma vida útil de faceamento para 25.000 carcaças de caixa de transmissão. Esse desenvolvimento surgiu em função da necessidade de eliminar o empenamento das finas paredes da carcaça, provocado pelo sistema anterior.

Foi alcançado o objetivo de usinar as carcaças de transmissão automática de alumínio, sem provocar empenamento e sem problema de cavacos. Ambas as arestas de corte de diamante trabalham simultaneamente com velocidade de corte de 4.000 /min, avanço de 0.3 mm por aresta e com profundidades de corte de 1 a 3 mm no raio. O cabeçote é dinamicamente estável, mantendo uma tolerância de 0,05 mm sobre o raio por todo o perfil do diâmetro interno. A amplitude de atuação desse cabeçote situa-se entre 150 e 220 mm no diâmetro [14].

Um processamento extremamente crítico é o faceamento das superfícies internas de uma carcaça de bomba de alumínio. A exigência, nesse caso, é de planicidade e angularidade menores do que 3 μm . Essas tolerâncias extremamente baixas foram mantidas com um cabeçote excêntrico especial girando a 6.000 rpm. Embora o modelo original do cabeçote tenha sido utilizado em uma máquina especial com barra de tração, o mesmo trabalho passará ser executado em um centro de usinagem. Isto é possível utilizando-se um cabeçote de faceamento excêntrico automático comandado centrifugamente [9].

O cabeçote excêntrico destina-se a usinagem de perfis internos complexos em peças de aço, a 5.000 rpm. Ele atua em um centro de usinagem de dois fusos, no lugar de um cabeçote tradicional com guia e contraguia. Nas velocidades de corte mais altas, a ferramenta original apresentava problemas decorrentes das condições de balanceamento e rigidez insuficiente.

O conceito de cabeçote excêntrico, mesmo com uma só guia, é muito superior ao do tipo convencional com guia e contraguia. Esse cabeçote excêntrico permite trocar automaticamente diversas ferramentas HSK em menos de 4 segundos. O movimento da barra de tração e da guia é comandado por um eixo NC, o que permite a usinagem de diversas peças e perfis.

O modelo de acionamento por forças centrífugas das ferramentas de mandrilar de precisão integradas obteve bons resultados. Uma significativa quantidade delas foi na produção.

Utilizando o cabeçote de acionamento automático, foi vencido o desafio de processar sedes e guias de válvulas a 1.000 e 5.000 rpm com o mesmo nível de qualidade de concentricidade tanto em um centro de usinagem quanto em uma máquina especial. A concentricidade obtida entre a guia da válvula e a sede propriamente dita, menor do que 10 μm nesse caso é considerada muito boa. Ainda não estão disponíveis dados definitivos sobre a vida útil, mas espera-se alcançar os tempos médios registrados em máquinas especiais.

As posições externas e internas da ferramenta de mandrilar, para a guia da válvula, podem ser monitoradas com sinais de rádio frequência da ferramenta para o comando da máquina.

Os resultados da fabricação são excelentes, embora o balanceamento do cabeçote e da ferramenta exija atenção especial.

Como primeiro passo, o cabeçote excêntrico é submetido a um

balanceamento fino mediante um padrão balanceador compacto sobre uma máquina de balanceamento, a 1.500 rpm. A seguir, a ferramenta é balanceada em uma máquina de balanceamento também a 1.500 rpm, para então, o cabeçote montado no fuso receber um balanceamento fino com um padrão, a 10.000 rpm.

No passo seguinte, a ferramenta montada no conjunto recebe um balanceamento fino a 10.000 rpm, alcançando-se, finalmente, o nível de balanceamento superior a G2, necessário para o sistema como um todo. A qualidade da superfície obtida para os diâmetros escalonados situa-se em 2 a 3 μm , a concentricidade e a tolerância são menores do que 10 μm . Obtém-se uma vida útil de até 20.000 peças trabalhadas.

Para obter a distância mínima possível entre o mancal principal e a aresta de corte, o cabeçote excêntrico foi integrado ao fuso. O objetivo era atingir 6.000 rpm. A operação inicial da máquina ocorreu a 4.000 rpm. Após pequenas correções do programa NC, obteve-se a concentricidade, o padrão de superfície e a precisão de perfil necessários.

Para usinar o perfil exato, foi desenvolvido um modelo de simulação CAD. Assim, foi possível coordenar, de forma exata, o complexo movimento linear da barra de tração, o movimento da placa giratória e o movimento axial da unidade do fuso.

Utilizando-se uma ferramenta de mandrilar de alto rendimento e uma ferramenta de facear para usinagem de peças de alumínio, é possível executar tanto o mandrilamento de precisão, quanto dois faceamentos, em um só centro de usinagem. Durante o mandrilamento de precisão a 3.000 rpm, as unidades automáticas de faceamento permanecem retraídas por uma mola de gás. Após o mandrilamento, a velocidade da ferramenta sobe para 6.000 rpm e a placa de faceamento passa a facear com auxílio das forças centrífugas. O controle do fluxo de óleo (válvula regulável) garante a uniformidade do avanço. Reduzindo-se a velocidade da ferramenta para 3.000 rpm, as unidades de faceamento automáticas são retraídas pelas molas de pressão de gás, permitindo extrair a ferramenta da peça trabalhada [12].

Os centros de usinagem facilitam a correção automática das arestas de corte, quando o comando da máquina utiliza, para esse ajuste um cabeçote de mandrilamento HSC de regulagem automática por medição para centros de usinagem (8.000 rpm, \varnothing 80 mm). Para evitar a troca da ferramenta para o

instrumento de medição de volta, os sensores de medição foram integrados a própria ferramenta de corte. Após o mandrilamento, o fuso é imobilizado e as arestas de corte são retraídas mediante redução da pressão do agente refrigerante. Verifica-se então medição.

O desgaste da ferramenta é compensado fixando-se o parafuso frontal de ajuste em um perfil denteado do dispositivo, e girando-se o fuso em um ângulo correspondente ao ajuste da aresta de corte [12]. O centro de gravidade do suporte de fixação foi posicionado de tal maneira que o suporte de fixação é pressionado contra o ângulo inclinado da barra de tração, devido às forças da gravidade.

Tendo em vista um nível mundial de produção e a alta flexibilidade, é possível, hoje, produzir também em sistemas de fabricação flexíveis as peças de alta precisão antes produzidas tipicamente em linhas transfer. Para tanto, é necessário recorrer a mais recente tecnologia de ferramentas de corte e aplicar rigorosos conceitos de ferramentas.

As grandes forças centrífugas que ocorrem na usinagem HSC exigem modelos adequados de cabeçotes, para reduzir a um mínimo o esforço nos fusos de alta velocidade, e em contrapartida a alta energia cinética gerada no processamento HSC abre novas possibilidades para esses cabeçotes.

4.4. 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) [20], opera-se a velocidades de corte de até 400 m/min. [9]. 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 [20].

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 $10 \mu\text{m}$, 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.

5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM HSC NA PROGRAMAÇÃO CNC

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.

5.1. A GEOMETRIA

Para iniciar a discussão sobre este tópico, serão apresentados alguns conceitos preliminares, além de alguns experimentos realizados em laboratório.

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.

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 5.1) 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.

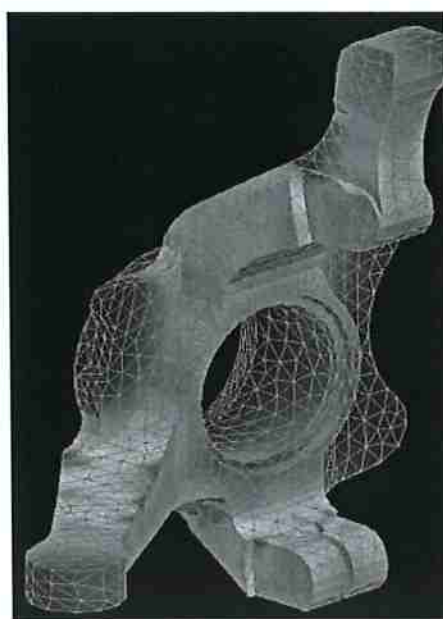


Figura 5.1 - Peça esta representada por uma malha de triângulos.

Fonte GMB

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 5.2.

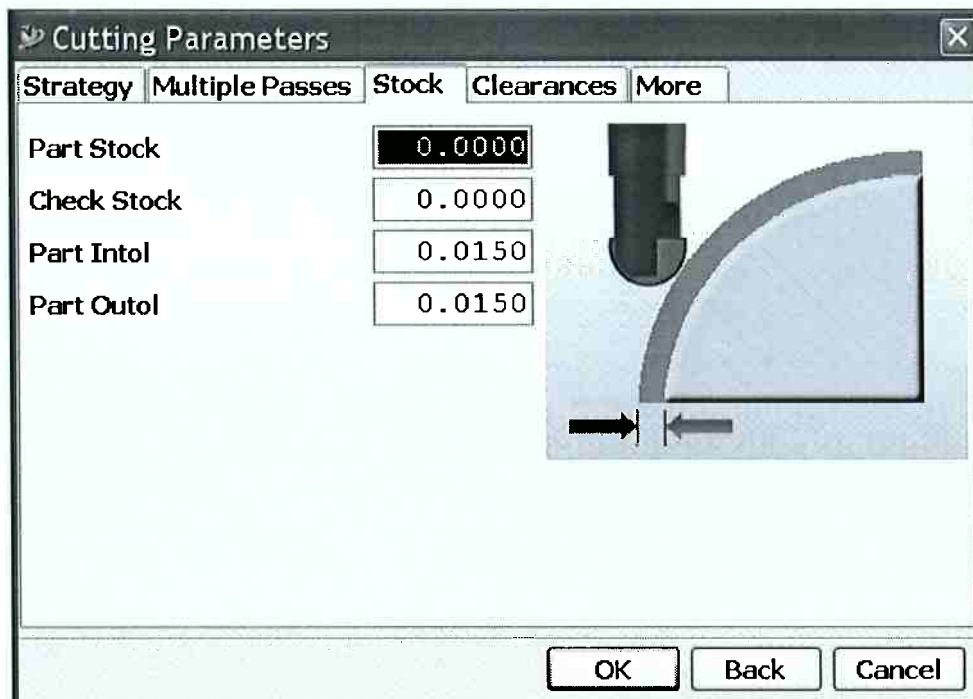


Figura 5.2 – Tolerância da trajetória da ferramenta.

Fonte GMB

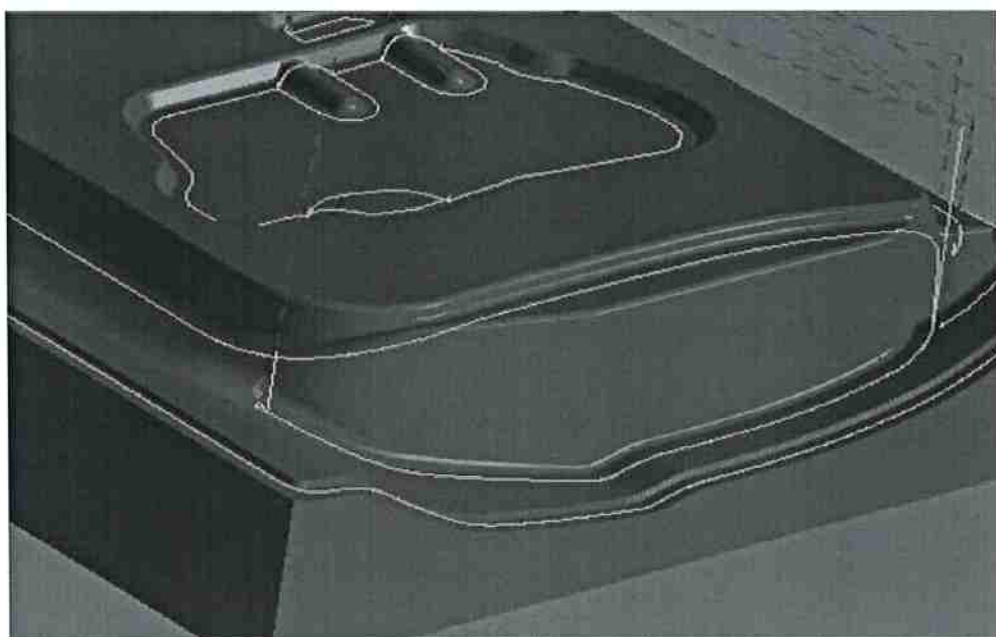


Figura 5.3 – Trajetória da ferramenta.

Fonte GMB

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 5.3) 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[15].

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.

5.2. 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.

5.3. 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 (figura 5.4).



Figura 5.4 - A usinagem da ferramenta em cavidade.

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 = comprimento do segmento reta / TPB (seg);
- Velocidade de avanço = 0,3 mm / 8ms = 2.250 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.

5.4. EXECUÇÃO DE PROGRAMAÇÃO

Os comandos numéricos que não possuem capacidade de memória suficiente para armazenar programas relativamente grandes necessitam 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.

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.

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 para cada bit, 1 start, 2 stop e 1 paridade (figura 5.5).

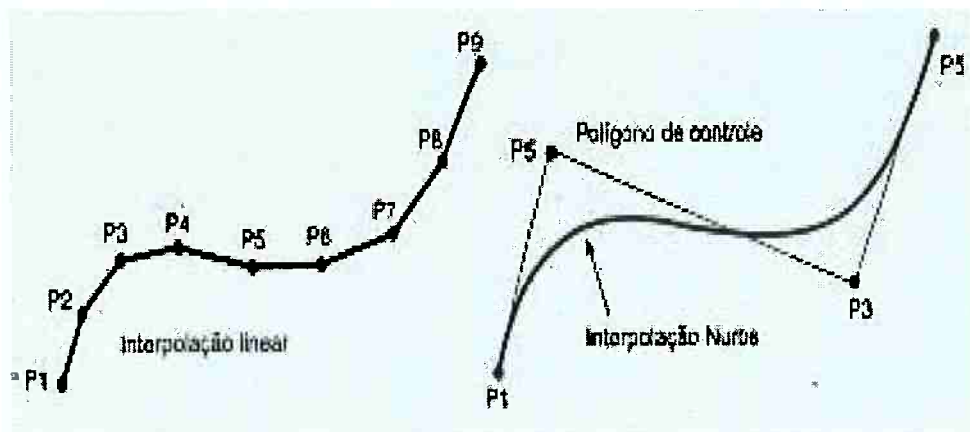


Figura 5.5 - Interpolação da trajetória da ferramenta.

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, como se observa em um corpo de prova [15].

A velocidade de avanço utilizada foi de 3.600 mm/min. O programa foi transferido a 19.200 baud, que foi o máximo permitido pelo CNC e pelo software emissor utilizados. 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;

Baud necessário = (velc. avanço (mm/s) / seg. de reta(mm)) x n de bits/linha

Baud necessário = (60 mm/seg /0,3 mm) x 176 bits = 35.200 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.

6. 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 hipérbolas figura 6.1).

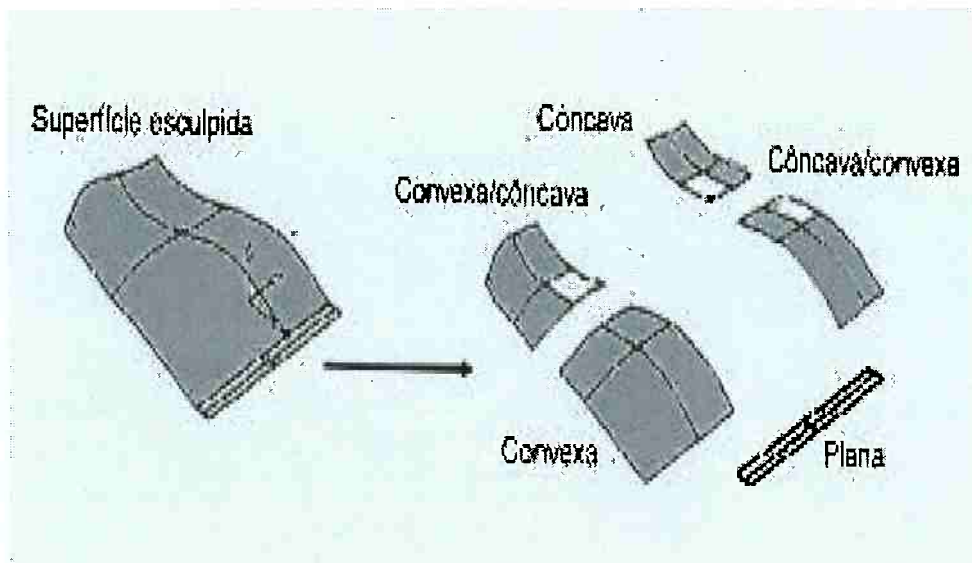


Figura 6.1 - Identificação das áreas dos elementos de formas.

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.

7. 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 7.1).

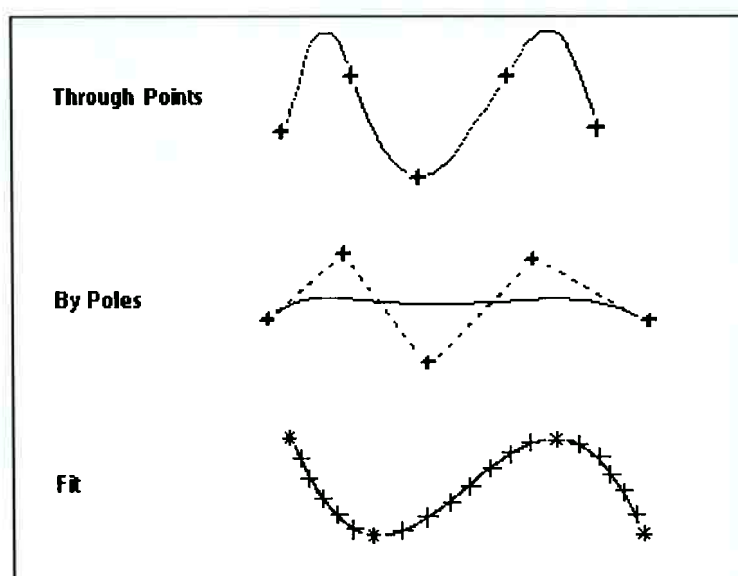


Figura 7.1 – Manipulação de uma curva.

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 [23].

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[15].

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 influencia relacionada ao TPB e

com a qualidade de acabamento. E também para analisar as reais vantagens e desvantagens para programação CNC.

Há também uma influencia 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 (*chatter*), melhor será o acabamento.

8. 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, isto 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. [15].

8.1. 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.

Em primeiro lugar é calculada a compensação real máxima após o desbaste.

Em comparação com o que é tecnologicamente possível, a compensação permitida é determinada ao longo das trajetórias de movimento da ferramenta e da compensação máxima.

A geometria intermediária computada é dividida em áreas de zonas de semi-acabamento idênticas. Como são obtidas condições diferentes de compensação, dependendo do contorno do componente desbastado, áreas de usinagem que apresentam similaridade de contorno são combinadas pela decomposição do componente em seções superficiais que tem configurações geométricas idênticas e, pelo armazenamento de áreas similares em um arranjo (estrutura ordenada contendo elementos acessíveis individualmente, referenciados por números, usada para armazenar tabelas ou conjunto de dados relacionados e do mesmo tipo). Pela marcação da área a ser usinada, as trajetórias de movimento otimizadas de semi-acabamento são derivadas e, podem ser usadas para computar o volume do campo de trabalho da ferramenta.

8.2. OPERAÇÕES DE USINAGEM REALIZADAS POR MEIO DE OBJETOS DE USINAGEM

Para estabelecer objetos de usinagem, é necessário ter disponíveis como parâmetros de entrada, a geometria nominal, (a geometria nominal é uma superfície esculpida topologia), o método de usinagem e o material a ser usinado, ou seja, ela é descrita completamente por segmentos de superfícies unidos, sem quaisquer espaços vazios. Um segmento de superfície é a menor unidade de form feature descrita inequivocamente por vetores U e V , através de sua origem, direção e quantidade. Os métodos de usinagem são constituídos por operações de desbaste, semi-acabamento e acabamento.

A escolha do material da peça inclui tipos para tratamento térmico, aço endurecido para trabalho a frio, ferro fundido, cobre para eletrodos, alumínio e grafite. Após efetuar estas entradas as saídas resultantes são parâmetros de tecnologia, informações relativas à ferramenta é uma recomendação de estratégia. Estes dados são fornecidos como "janelas de informações", por um sistema CAD/CAM com uma interface de aplicação, para fornecer ao programador NC o

suporte necessário na tecnologia e estratégia de fresamento, que normalmente pode compensar apenas por know-how ou testes.

8.3. IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE FORM FEATURES

As superfícies nominais subdivididas em áreas de condições de contato iguais são compostas de elementos de forma. Estes elementos são planos, curvaturas convexas e côncavas, chanfros, canais, furos, etc., e podem ser identificados sobre a superfície inteira do componente como áreas coerentes que tem configuração de características iguais.

Uma superfície esculpida ou áreas parciais desta superfície são, em primeiro lugar, subdivididas automaticamente nos respectivos segmentos de superfície. Por meio disso, um segmento de superfície é a menor unidade da superfície esculpida, que é tratada matematicamente com parâmetros U, V .

No início, é feita uma classificação grosseira da geometria esculpida inteira para limitar a quantidade de pontos. Depois, cada segmento de superfície é selecionado por tamanho e é examinado adequadamente em uma quantidade de pontos definida para suas curvaturas nas direções U, V (figura 8.1).

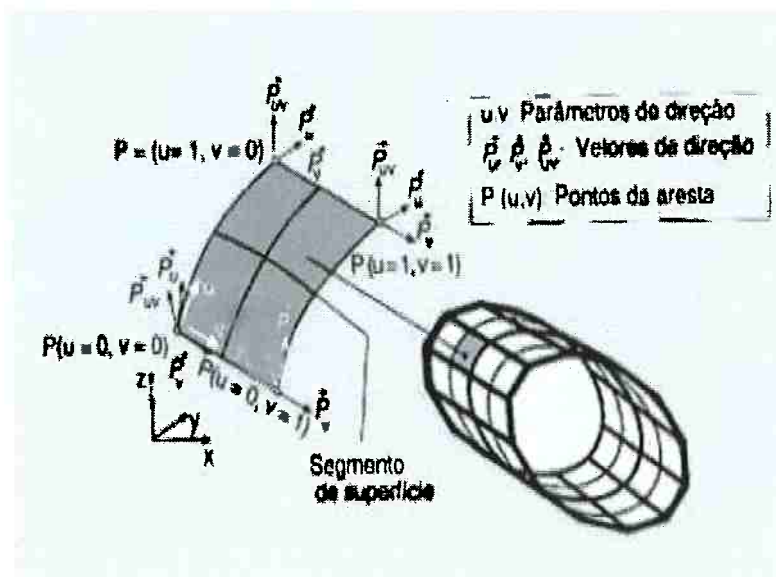


Figura 8.1 – Definição matemática de um segmento de superfície.

Para esta finalidade, um campo de vetores U e V é colocado sobre o segmento de superfície em uma largura de passos constante, para formar uma rede de trabalho. Os nós marcam os pontos, onde o segmento de superfície foi examinado para as quantidades de suas curvaturas e o tamanho da malha representa a distância entre os nós.

Se houver uma mudança de sinais na respectiva direção da curvatura nos nós adjacentes, um ponto da superfície do segmento é armazenado neste local. Isto converte o segmento de superfície original em segmentos menores $m \times n$, de acordo com a quantidade de pontos de superfície m gerados na direção U e a quantidade de pontos de superfície n gerados na direção V . Estes segmentos menores são classificadas subsequente por áreas de características plana, côncava ou convexa através do cálculo das curvaturas nas direções U e V nos pontos de superfícies ($u = 0,5$; $V = 0,5$) dos respectivos segmentos menores.

8.4. LIGAÇÃO DOS ELEMENTOS DE FORMA IDENTIFICADOS EM OBJETOS DE USINAGEM

Assim que for obtida a possibilidade de descrever a operação de usinagem por meio de objetos de usinagem e adicionalmente, de subdividir superfícies esculpidas em áreas de condições de contato idênticas, estes módulos são a seguir processados em conjunto. Portanto, as áreas da superfície com condição plana, com curvatura côncava ou tendo principalmente curvatura convexa são identificadas automaticamente e subsequente, são ligadas com informações sobre geometria, tecnologia e estratégia para formar objetos de usinagem.

A estratégia de usinagem apresentada como resultado disto é dividida em áreas de geometria, tecnologia e estratégia de fresamento. As informações sobre a estratégia de fresamento incluem as propostas de usinagem retiradas do know-how tecnológico existente na PTW. Estas propostas de usinagem podem, nos passos seguintes, ser mais especificadas para o planejamento de produção.

As informações de geometria incluem as dimensões dos elementos de forma (comprimento, largura e altura), o ângulo de inclinação mínimo em relação ao plano X-Y e o raio da superfície mínima. Durante o uso de uma fresa de topo esférica para

o semi-acabamento ou operação de acabamento, uma medida é imediatamente fornecida para o máximo diâmetro possível da ferramenta. Levando em consideração o ângulo de inclinação máximo, qualquer colisão de ferramenta é evitada, pois esta informação define a progressão máxima possível na direção do avanço. As dimensões dos elementos de forma fornecem indicações referentes à escolha adequada da máquina-ferramenta (faixa de trabalho) e uma escolha grosseira das dimensões corretas da ferramenta.

As informações de tecnologia fornecem propostas referentes ao perfil da ferramenta e ao material de corte a ser escolhido, com relação ao tipo de usinagem e do material da peça. Adicionalmente, as informações de usinagem incluem dados sobre a ótima velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de avanço e largura. Finalmente, uma recomendação de estratégia é feita incluindo as informações sobre o ângulo de inclinação ideal, a direção do corte e o processo de usinagem.

8.5. 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:

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

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 á 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.

9. ESTRATÉGIA DE USINAGEM NA EMPRESA PARA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO

9.1 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, utilizam o processos mostrado pela “Folha de Descrição de Processos” a seguir respectivamente, e que foram obtidas 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)

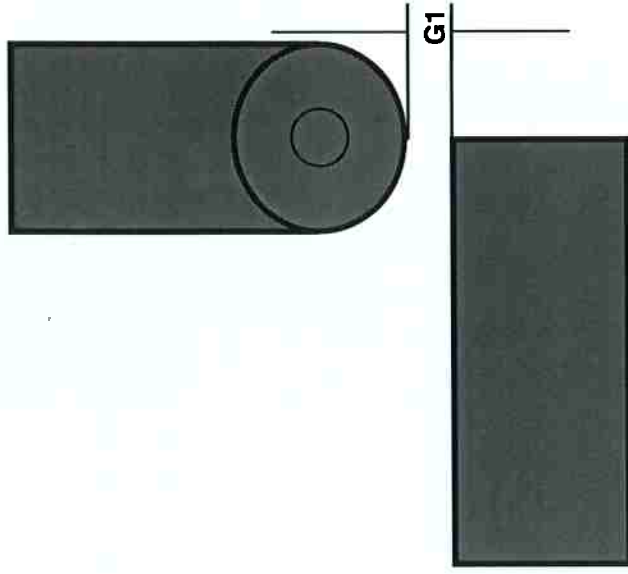
MACHINING PARAMETERS (CUTTING → SPECIFY):

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	Engage 50% Conf.tabela de Avanço
Pré-acab.= 10mm	
Acab. = 10mm	



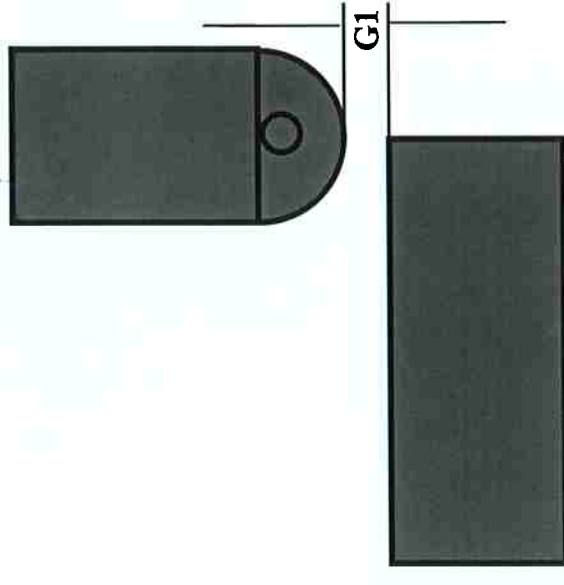
EM FERRAMENTAS DE REPUXO NA REGIÃO DE PRODUTO DAR PASSO DIFERENCIADO FRESA Ø 32 0.6 mm

Diâ 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
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 - ACOS) 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 =0.15
 Pré-Acabam. =0.03
 Acabam. Pnl.Ext.=0.010

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

Engage 50%
 Conf.tabela de Avanço

G1

INTOL
 OUTOL

Diâ 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	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	1000	4000	3600	3800	2800	3000	1300
20.0	Pencil	0.2mm	---	4000	2400	2000	1000	4000	2400	4000	2400	3000	1300
30.0	Pré-Acabam.	0.2mm	2.5	6000	6000	2000	1200	4000	3600	4000	3600	3000	2000
32.0	Acabamento	0.0mm	0.7	6000	6000	2000	1800	4000	5000	4000	4000	3000	2600
16.0	Pencil	0.1mm	---	4000	2200	2000	1000	4000	2200	4000	2200	3000	1300
16.0	Retoque	0.0mm	0.7	4000	3600	2000	1800	4000	3600	4000	3600	3000	2000
10.0	Pencil	0.1mm	---	4000	2800	2000	900	4000	2400	4000	2000	3000	1000
06.0	Pencil	0.1mm	---	4000	2600	2000	900	4000	2200	4000	2000	3000	1000
06.0	Retoque	0.0mm	0.5	4000	2800	2000	1500	4000	2400	4000	2800	3000	2000

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

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.

9.2 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.

10. TRABALHO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais realizados, a partir dos quais foram obtidos os 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.

10.1 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.

A seguir uma breve comparação entre os aços ABNT P20 e SAE 4340 estão apresentados na tabela 10.1.

Tabela – Comparação entre dois aços com relação a aspectos técnicos e econômicos.

	ABNT P20	SAE 4340
Custo do material [R\$ / kg]	17,00	15,00
Custo do Tratamento Térmico [R\$ / kg]	30,00	21,00
Avanço em operações de Torneamento [m / min]	0,12	0,15

Sobre o Material utilizado, o SAE 4340:

Como consequência 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 de baixa liga, o ABNT 4340 (equivalente aos aços AISI 4340, AMS 6359, AMS 6409, AMS 6414, AMS 6415, AMS 6454, ASTM A29 (4340), ASTM A320 (L43), ASTM A322 (4340), ASTM A331 (4340), ASTM A506 (4340), ASTM A519 (4340), ASTM A646 (4340-7), ASTM A711, ASTM A752 (4340), ASTM A829, MIL S-5000, SAE 11397 (4340), SAE J404 (4340), SAE J412 (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 10.2 e 10.3, apresentam a composição química típica para um aço SAE 4340, 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 10.4 apresenta os aços padrão para aplicação em moldes de injeção plástica com equivalência entre fornecedores, características e dureza de fornecimento.

Tabela 10.2 – Aço 4340 - Aço Kraft

Fonte - http://www.acokraft.com.br/produtos/constrmec/ligados/sae_4340.html

Composição Química Conforme Norma SAE - J404								
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
Normas de Equivalências:								
ABNT/SAE/AISI	DIN		JIS	BS	AFNOR			
4340	~ 40 Cr Ni Mo 6		~ SNCM 8	~ 817M40	~ 35 NCD 6			

Tabela 10.3 – 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 10.4 – Aços padrão para moldes de injeção de plástico. Fonte Brasimet.

AÇO	EQUIVALENCIAS	CARACTERISTICAS	DUREZA DE UTILIZAÇÃO
SAE 1020/1045		<ul style="list-style-type: none"> Aço Carbono commm 	Utilizado no estado de fornecimento (recozido)
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	VP20IM (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

Foram utilizadas barras de aço 4340 laminadas e com dureza de fornecimento em 300 HB – 28-32 HRC, as tabelas a seguir apresentam as suas propriedades físicas e mecânicas mais importantes (tabela10.5) e também as propriedades físicas em função de diferentes temperaturas de revenimento (tabela 10.6), conferindo propriedades especiais diretamente ligadas a cada aplicação.

Tabela10.5 – Propriedades físicas e mecânicas mais importantes do aço SAE 4340.

Massa específica	7.840 kg/m ³
Dureza Rockwell C	37
Dureza Vickers	361
Limite de resistência à tração	1.172 MPa
Limite de escoamento	1.103 MPa
Elongação na fratura	16 %
Redução de área	54,8 %
Módulo de elasticidade longitudinal	205 GPa
Módulo de cisalhamento	80 GPa
Resistividade elétrica	2,48 10 ⁻⁵ Ω . cm
Coefficiente de expansão linear (20 °C)	12,3 μm / m . °C
Coefficiente de expansão linear (250 °C)	12,6μm / m . °C
Coefficiente de expansão linear (500 °C)	13,7 μm / m . °C
Capacidade térmica (ambiente)	0,45 J / g . °C
Condutividade térmica (ambiente)	44,5 W / m . K

Tabela 10.6 – Propriedades físicas em função de diferentes temperaturas de revenimento.

Temperatura de Revenimento [°C]	Resistência à Tração [Pa . 10 ⁶]	Limite de Escoamento [Pa . 10 ⁶]	Elongação [%]	Redução na Área [%]
204,4	1.875,4	1.675,4	10,0	38,0
315,6	1.723,7	1.585,8	10,0	40,0
426,7	1.468,6	1.365,2	10,0	44,0
537,8	1.172,1	1.075,6	13,0	51,0
648,9	965,3	855,0	19,0	60,0

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 acompanhada de tratamento térmico.

Os ciclos de tratamentos térmicos estão apresentados pela figura 10.1 e 10.2 e são definidas com base nas dimensões, formas geométricas e principalmente nas propriedades físicas que se exigem do aço SAE 4340 nas suas diversas aplicações. A Normalização por exemplo tem como principal finalidade conseguir a melhoria das condições de usinabilidade do aço. Ela funciona como agente que homogeneiza a estrutura cristalina, eliminando os pontos críticos resultantes de trabalhos anteriores. A normalização também prepara o material para outros tipos de tratamento térmico.

Não se deve analisar apenas a dureza do material para saber se a normalização dará usinagem eficiente. A estrutura do material após normalização é que na verdade possibilita a idéia exata das condições da peça para as operações seguintes. Nos aços normalmente usados (S.A.E. 1020 a

1080,8620,8630,4140,4320,4340, 5130,5135) essa estrutura é constituída de perlita e ferrita, que devem estar:

- Bem distribuídas - homoganeamente repetidas;
- Com grãos de tamanho uniforme;
- Sem intermediários, ou estrutura de Widmastaten;
- Sem alinhamento (o aço S.A.E. 8620 é mais suscetível de apresentar este tipo de estrutura)
- Bem formados com contornos de grão bem definidos.

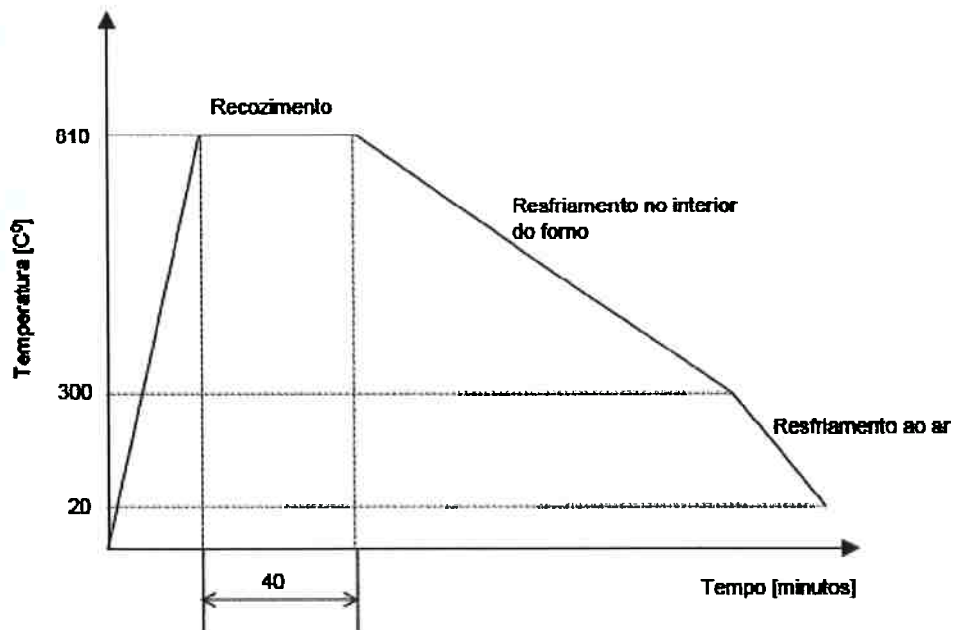


Figura 10.1 - Representação esquemática para um ciclo de recozimento do aço SAE 4340.

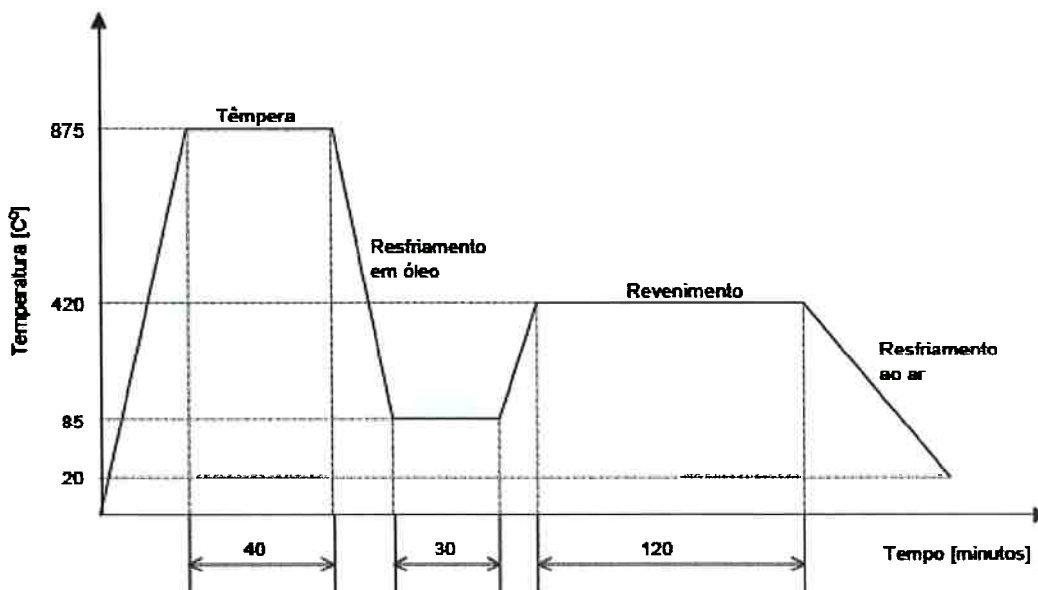


Figura 10.2 - Representação esquemática para um ciclo de têmpera e revenimento do aço SAE 4340.

Foram modelados no *software Unigraphics* os corpos de prova virtuais para 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 65mm x 55mm x 49 mm. Foram efetuados dois furos “cegos”, não passantes(figura 10.3), 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, afim de facilitar os *setups* (operações de processo) na seqüência de usinagem.

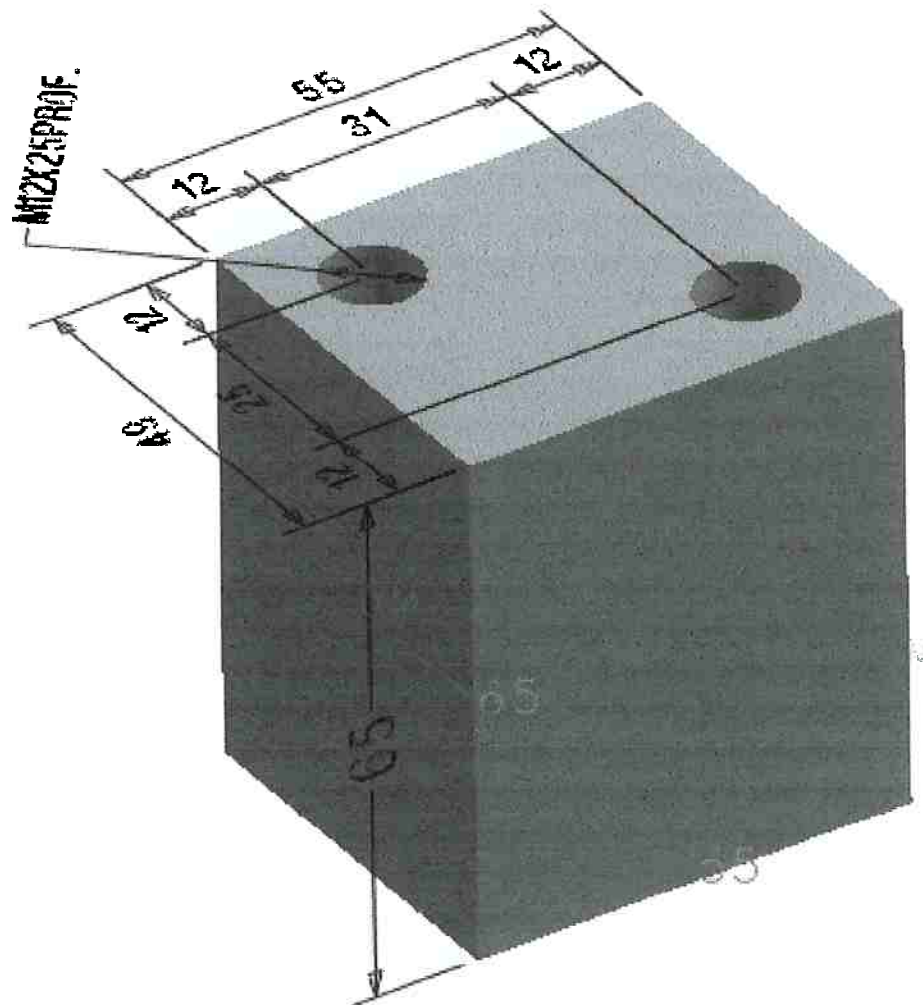


Figura 10.3 – Croquis para preparação dos Corpos de Prova.

Fonte GMB

A fixação em placas de processo mostradas nas figuras 10.4 e 10.5, é uma prática comum na usinagem de itens menores, por facilitar os processos e garantir segurança ao operador.

Utilizando apalpadores eletrônicos Renishaw (figura 10.6) 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.

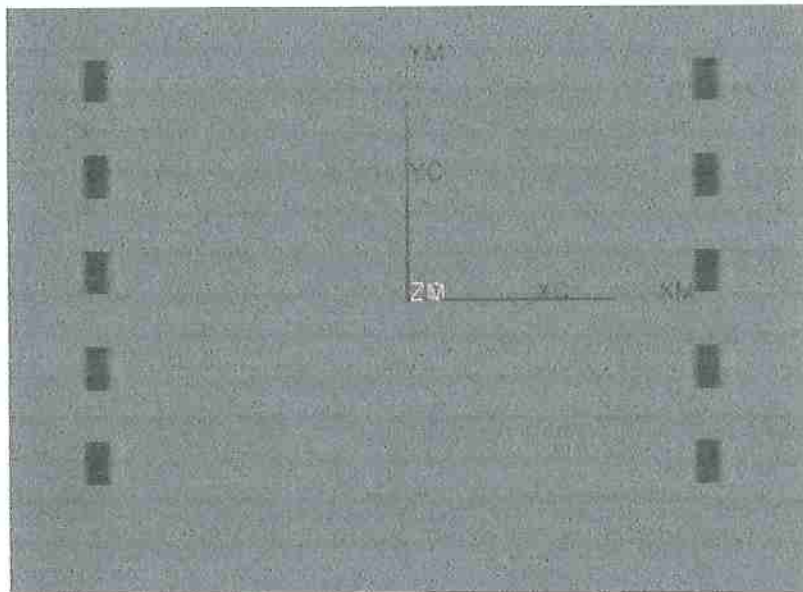


Figura 10.4 - Representação gráfica dos corpos de prova fixados em placa.

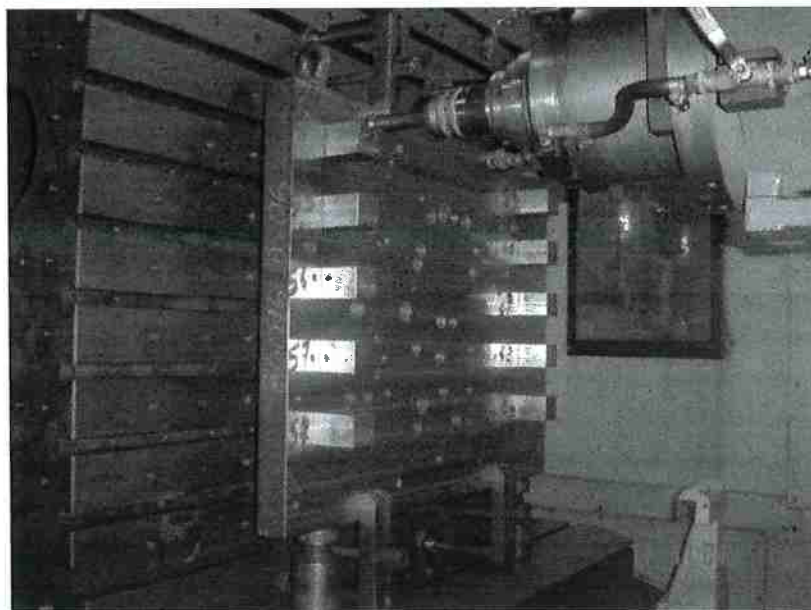


Figura 10.5 - Foto dos corpos de prova fixados em placa antes da usinagem.

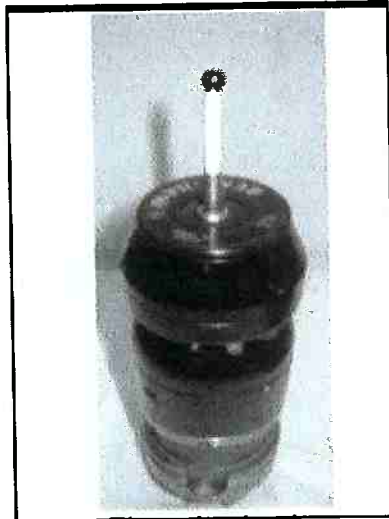


Figura 10.6 – Apalpador eletrônico Renishaw.

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 10.6;
- SNK - rotação máxima 6000rpm e avanço máximo 10000 mm/min, figura 10.7.



Figura 10.6 – Centro de usinagem MAKINO MCD1513.

Fonte GMB



Figura 10.7 – Copiadora Portal SHIN NIPPON KOKI – SNK.

Fonte GMB

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.

Descrição das ferramentas utilizadas para o processo de usinagem.

Nº de troca de ferramenta	Ferramenta	Diâmetro	Comprimento de faca	Raio de topo
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. “Entre as ferramentas de corte para *high speed machining*, a Sandvik levou ao conhecimento do Seminário (abril o 1º Seminário Internacional sobre High Speed Machining (HSM)) toda a sua linha de fresas sólidas em metal duro, com diâmetros desde 0,4 mm até 25 mm, além de fresas com insertos intercambiáveis e cabeçotes para usinar faces. A empresa garante ter nacionalizado mais de 3.000 itens, equivalentes a 70% da demanda por esse tipo de ferramenta no mercado brasileiro” (plástico moderno 2002).

Equipamentos - Ferramenta Topo Esférico para acabamento, diâmetro 25 mm.
Fabricante - Walter do Brasil Ltda. Figura 10.8.

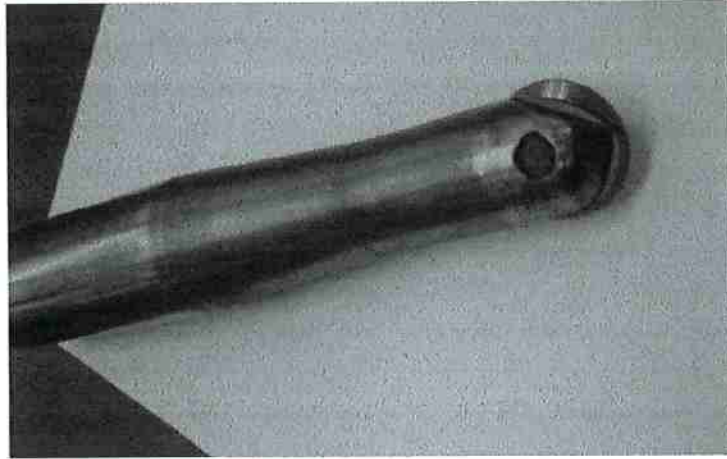


Figura 10.8 – Fresa Topo esférico 25mm.

Descrição - Inserto esférico para acabamento Diâmetro 25mm. Figura 10.9



Figura 10.9 – Inserto D25mm.

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.

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 temos num primeiro momento um acabamento Normal (usual) com os seguintes dados:

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

Para um segundo momento na usinagem HSC temos:

- Fresa inserto cambiável diâm. nominal = 25mm
- 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
- $v_c = 942$ m/min

Instrumentos de inspeção:

Durômetro de bancada

Fabricante Wolpet

Modelo Universal

Microscópio Olympus

Rugosímetro

Fabricante Mitutoyo

Modelo Surf Test 402

Série 178

A análise das velocidades de corte

A escolha da velocidade de corte correta é importantíssima tanto para a obtenção de bons resultados de usinagem quanto para a manutenção da vida útil da ferramenta e para o grau de acabamento.

A velocidade de corte incorreta pode ser maior ou menor que a ideal. Quando isso acontece, alguns problemas ocorrem:

Velocidade Maior

- Superaquecimento da ferramenta, que perde suas características de dureza e tenacidade.
- Superaquecimento da peça, gerando modificação da forma e dimensões da superfície usinada.
- Desgaste prematuro da ferramenta de corte.

Velocidade Menor

- O corte fica sobrecarregado, gerando travamento e posterior quebra da ferramenta, inutilizando-a e também a peça usinada.
- Problemas na máquina-ferramenta, que perde rendimento de trabalho porque está sendo subutilizada.

10.2 MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE DADOS

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.

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;

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 10.10 modelo matemático com os dois lotes de corpo de prova e 10.11 com o real, a figura 10.12 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 10.13 com o modelo real.

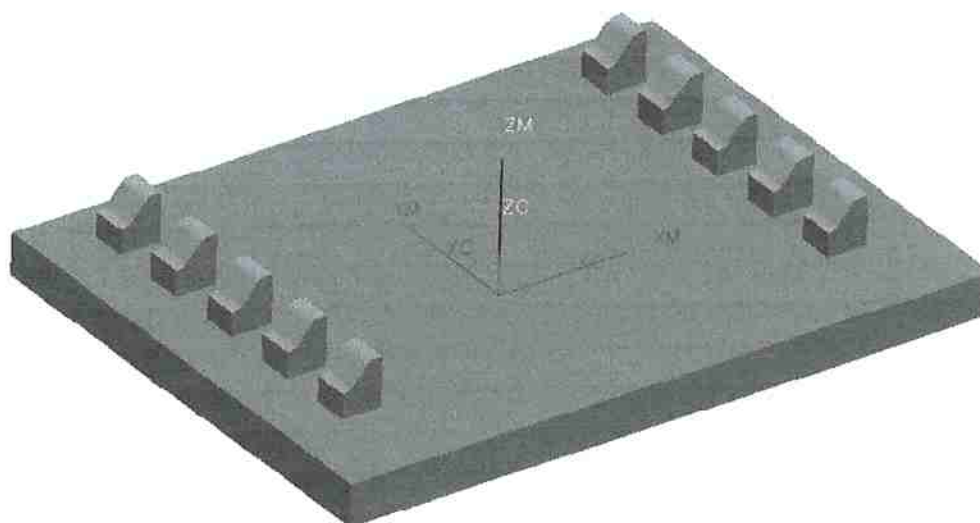


Figura 10.10 – Modelo matemático com os dois lotes de corpo de prova.

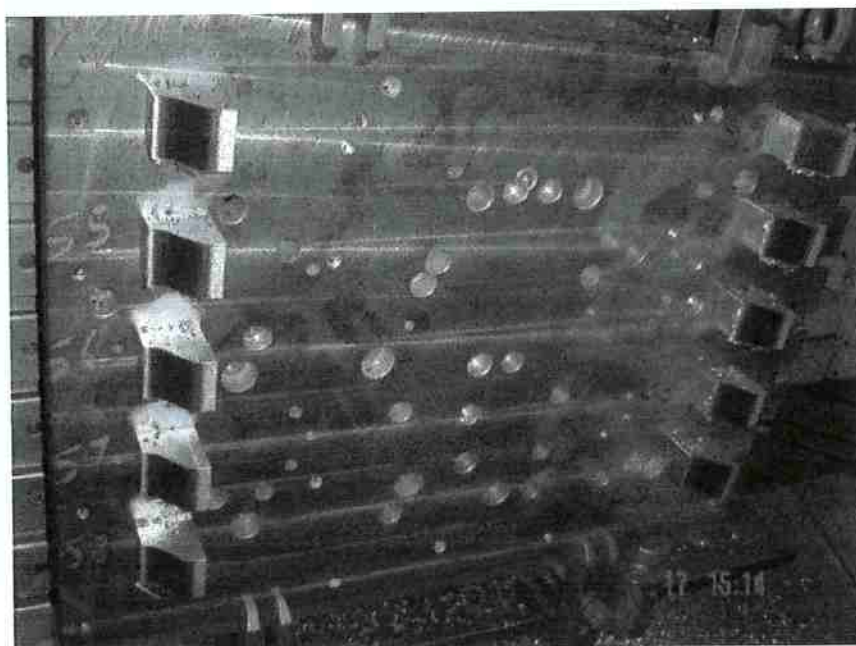


Figura 10.11 – Corpos de prova fixos na placa de processo.

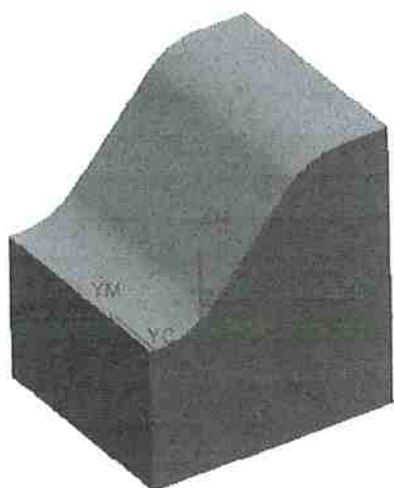


Figura 10.12 – Modelo matemático
do corpo de prova.
Unigraphics

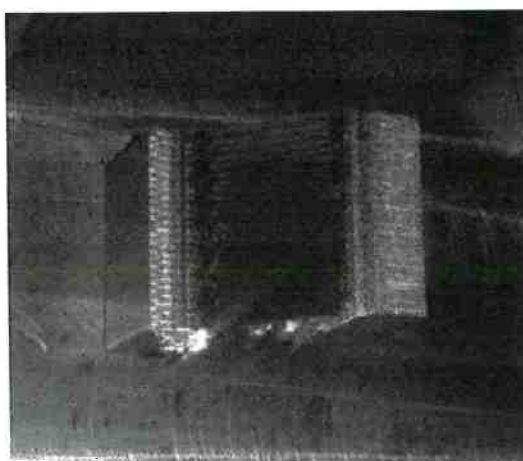


Figura 10.13 – Corpo de prova

Os processos de acabamento apresentaram as seguintes variações nas tomadas de tempo real:

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

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

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

A distribuição da estatística do teste: F

Homocedasticidade: teste de Levene

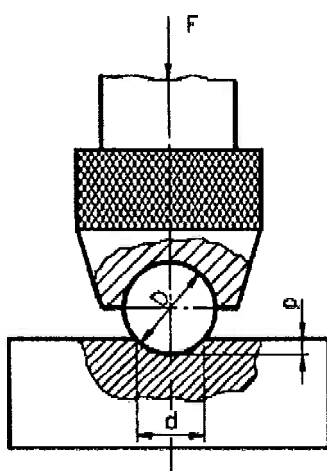
W= 2,912050
 gl= 1;15
 p-valor= 0,108532 HOMOCEASTICIDADE

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

Graus de Liberdade =	8
Desvio padrão agregado =	0,026268
Diferença entre as médias =	1,15
Estatística do teste =	69,46264
p-valor =	1,03E-12

A Análise da qualidade superficial

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de dureza superficial Brinell e serão realizados os ensaios de dureza da camada inferior e Vickers (oportunamente serão divulgados). Tais testes foram realizados nos próprios corpos de prova detalhados anteriormente.



O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço temperado, de diâmetro D , sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga F , durante um tempo t , produzindo uma calota esférica de diâmetro d .

A dureza Brinell é representada pelas letras HB. Esta representação vem do inglês *Hardness Brinell*, que quer dizer "dureza Brinell".

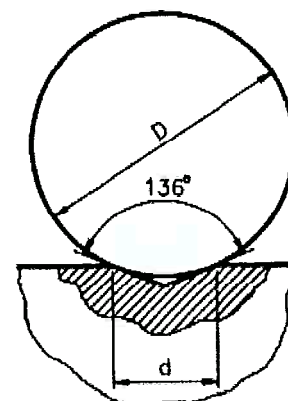
A dureza Brinell (HB) é a relação entre a carga aplicada (F) e a área da calota esférica impressa no material ensaiado (A_c).

$$\text{Em linguagem matemática: } HB = \frac{F}{A_c}$$

Figura 10.10 Ensaio de Dureza Brinell

Brinell, J.A. (1900)

O ensaio Vickers produz valores de impressão semelhantes aos da dureza Brinell. Isso ocorre porque o ângulo de 136° da ponta de diamante produz uma impressão que mantém a relação ideal de 0,375 entre o diâmetro da calota esférica (d) e o diâmetro da esfera do penetrador Brinell (D), seja qual for a carga aplicada. É isso o que mostra o desenho ao lado.



O uso de cargas diferentes é necessário para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível com o visor da máquina.

Figura 10.11 Comparando Brinell e Vickers

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
PONTO 2	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

11. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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.

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, esta tese 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.

12. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

A alta velocidade de corte atua como vantagem competitiva em uma empresa, basicamente em 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.

Observou-se que o processo de usinagem em HSC requer um refinamento na concepção do produto e do meio de produção. Ou seja, etapas do ciclo de desenvolvimento do produto que antes não eram tão importantes, passaram a ser mais significativas, como, por exemplo, a qualidade do modelo gerado no CAD e a fidelidade dos dados geométricos transferidos entre os sistemas CAD/CAM. Não adianta ter uma ferramenta com uma boa qualidade superficial após o acabamento, se em função dos seus defeitos oriundos do modelo ou das variáveis do processo de usinagem, será necessário gastar mais horas de trabalho manual, fato que ocorre com usinagem em ferramentarias, ao contrário das linhas transfer onde é possível agrupar as variáveis em torno de um produto.

A usinagem a alta velocidade resultou em um novo tipo de máquina, foi necessário vencer diversas etapas de desenvolvimento, com efeito, recíproco entre os componentes que contém as máquinas-ferramenta (fixação das ferramentas, cabeçotes, balanceamento e sistemas de controle CNC), para a implantação do HSC será necessário um estudo de viabilidade econômica, pois o investimento para aquisição de máquinas e acessórios destinados a HSC é muito alto.

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, porém está sendo a única 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.

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 seletor time das ferramentarias globais. Na figura 12.1 um gráfico apresentado por Schutzer em uma de suas 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.

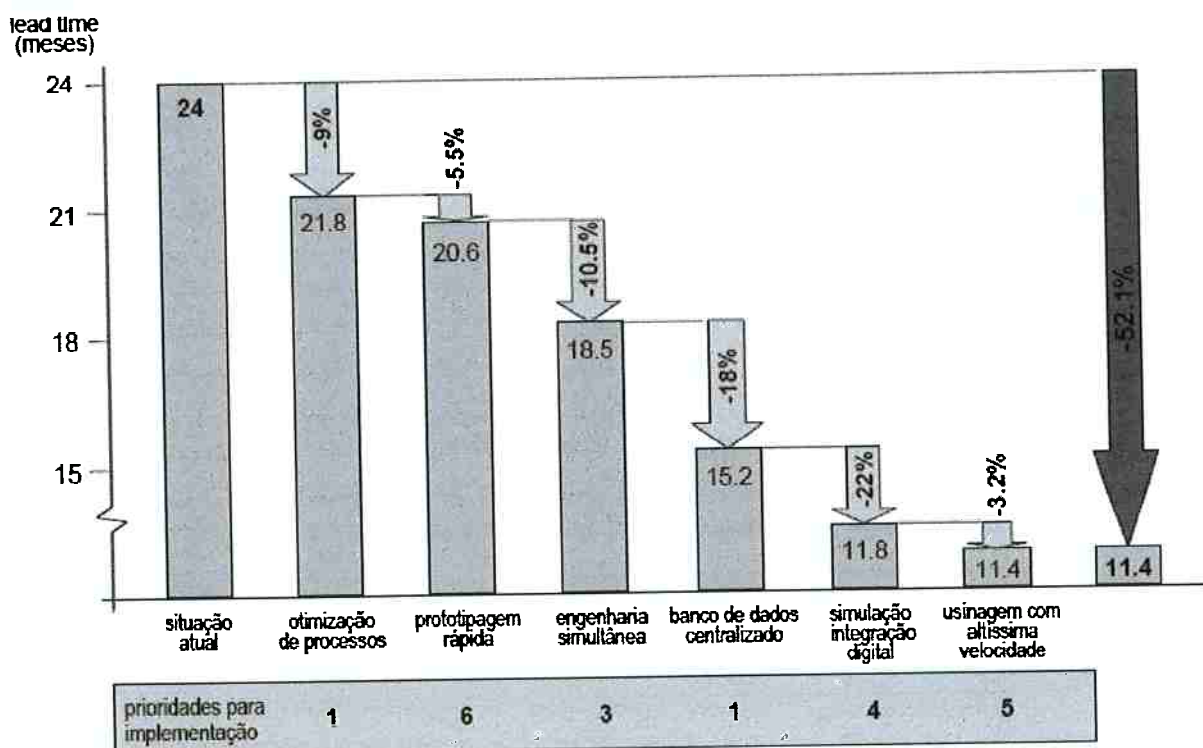


Figura 12.1- Redução do tempo de produção na fabricação de moldes.

Schutzer

Apesar destas questões os tempos de usinagem estão menores mas não foram tão significativos, devido as dimensões dos corpos de prova não permitirem um maior avanço.

Testes mais acurados se fazem necessários para uma melhor análise

As principais conclusões deste trabalho estão apresentadas a seguir: .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.

Entretanto, o sistema CAM ainda gera um grande volume de informações para a máquina processar em tempo hábil, repercutindo ainda na redução do avanço. Pode-se atribuir este fato ao algoritmo utilizado pelo CAM para realizar este cálculo. Desta maneira, esta alternativa minimiza, mas não soluciona o problema.

Com os valores de Ra obtidos no experimento preliminar, conclui-se 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.

Sugere-se:

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 sobremetal deixado em operações de fresamento de semiacabamento;

Utilizar simulações em um sistema CAD para modelar processos de usinagem;

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

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1] Barry, John: - High performance compact. Ameritech Library Services:
<http://reports.gmr.com/reports/sae/1999/0783>
- 2] Beard, T.: - Interpoling curves. Ameritech Library Services:
<http://reports.gmr.com/reports/sae/1999/0420>.
- 3] Beck, H.W. : - Desenvolvimento em ferramentas de corte a alta velocidade. Revista Máquinas e Metais, 388, 1998, p.28 – 39.
- 4] Bryan, Conley: - High reliability cutting. Ameritech Library Services:
<http://reports.gmr.com/reports/sae/1999/0783>
- 5] Cauchy, Aston: - Ecole Polytechnique da França. Disponível em
<http://www.biotsavat.tripod.com/hexapod.html> acesso em 23 agosto 2006.
- 6] 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.
- 7] Deonísio, C. César; Neves, Davi: - Máquinas e ferramentas. Palestra técnica no Congresso Usinagem 2000 / SP, 2000.
- 8] 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.
- 9] 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.

- 10] Diniz, A.E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L.: - Tecnologia da usinagem dos Materiais São Paulo: Artliber Editora 2001– Edição 5 -2006.
- 11] 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;
- 12] Felsky, L. Guilherme; Buss, Loreno.- Tendências Tecnológicas em HSC. Palestra realizada na Universidade de Santa Catarina UFSC, 2000.
- 13] Ferraresi, D. – Fundamentos da Usinagem dos Metais. Volume I, São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1982.
- 14] Finzer, T.: - The HSC technology. Seminário Usinagem com alta velocidade de corte, Universidade de Campinas, 1998.
- 15] 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;
- 16] Geist, Jurgen: Influência dos parâmetros de usinagem HSC. Revista Máquinas e Metais, 411, 2000, p.30-49.
- 17] Gerhard, Schweitzer: - Máquinas para usinagem em alta velocidade. Revista Máquinas e Metais, 410, 2000, p. 54-59.
- 18] Gunninck, W. Jan: - Como acelerar os processos de prototipagem e ferramental com a tecnologia STL. Revista Máquinas e Metais, 414, 2000, p.150 - 169.
- 19] Kukino, Satoru: -Technology for product and process intergration. Ameritech Library Services: <http://reports.gmr.com/reports/sae/1999/981867>

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

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

22] Meador, Russel: - Rapid prototyping of complex shapes for conceptual design. Ameritech Library Services: www.mmsonline.com/articles/hsmdm/

23] Multiplicadores de velocidades Adriática, acesso em Setembro 2006
http://www.adriatica.com.br/cab_mul_vel.asp

24] Novaski, Olívio; Correia, Maurício: – A HSC como vantagem competitiva. Revista Máquinas e Metais, 413, 2000, p. 22-29.

25] Otto, Christian: – Centro de usinagem de três eixos para HSC. Palestra Fabricação de Ferramentas e Moldes, Fórum de Conhecimentos 3D, Dresden (Alemanha), 1999.

26] Página Siemens: Automations & Drives acesso Setembro 2006
<http://www.siemens.com.br/templates/coluna1.aspx?channel=3840>

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

28] Revista Plástico Moderno On-line acesso em Agosto 2006
<http://www.plastico.com.br/plastico.htm>

29] 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.

- 30] Silva, A. L. V. C. e Mei, P. R.; Tecnologia dos Aços. Eletrometal, Universidade Estadual de Campinas, 1988.
- 31] Schmitt, T.: - High speed machines. Revista Sandvik, Divisão Coromant, 1, 1998, p 11-33.
- 32] Schulz, H. : - Usinagem com alta velocidade de corte. Seminário Internacional de Alta Tecnologia. Universidade Metodista de Piracicaba Campus Sta. Bárbara d'Oeste, 1997.
- 33] Schulz, H. : – Usos potenciais da HSC na usinagem de matrizes. Revista Máquinas e Metais, 393, 1998, p 28-33.
- 34] Schutzer, Klaus; Fagali S. Adriano. – A tecnologia HSC. Palestra de Alta Tecnologia Unimep, 1999.
- 35] Schutzer, Klaus: - Introdução do processo HSC na indústria brasileira. Revista Máquinas e Metais, 407, 1999, p. 32 – 45.
- 36] Stockinger, Friedrich: - The HSC technology. Revista EPE – European Production Engineering, 15, 1997, p.56- 67.
- 37] Tabela Brasimet Aços padrão para injeção de plástico setembro 2006
<http://tratamentotermico.com.br/artigos/Plastico.pdf>
- 38] Walz, Tilmann: - Experience in high speed machines. Revista Mundo da Usinagem, Coramant da Sandvik, 2, 1998, p. 7-12.
- 39] WILHELM, J. Blumlein. Máquinas de cinemática paralela. Disponível em <http://www.andron1.de/pdf/thehexapodreprint.pdf> - acesso em 2 novembro 2006.

14. 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.

Família: 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.

15 ANEXOS

ANEXO A

NOTÍCIAS

**SENAI DIFUNDE NOVA
TECNOLOGIA DE MOLDES**

Senai Mário Amato, de São Bernardo do Campo sediou em abril o 1º Seminário Internacional sobre High Speed Machining (HSM), que foi repetido também nos outros dois principais pólos brasileiros de produção de moldes e ferramentas (Caxias do Sul-RS e Joinville-SC). O avanço dessa tecnologia nas indústrias do País, já bastante disseminada nos Estados Unidos, Europa e Ásia, representa um passo à frente na modernização da produção de matrizes e moldes de injeção e sopro, com nova geração de máquinas de usinagem de alta velocidade, que operam ao ritmo de corte de 300 metros/minuto em aços endurecidos, bem como desenvolvimentos mais recentes em ferramentas e softwares.

A iniciativa de difundir a tecnologia HSM, levada também neste ano a vários segmentos produtivos nos EUA, Inglaterra e Alemanha, partiu da Seacam, de São Paulo. A empresa brasileira, parceira da inglesa Delcam, fornecedora de soluções em CAD/CAM, resolveu atender ao interesse crescente por maior conhecimento nessa área, comprovado pelos resultados obtidos na venda de soluções específicas para essas operações.

O evento também contou com a participação de empresas centenárias, como Okuma e Sandivik Coromant, representantes dos setores de máquinas de usinagem e de ferramentas e, ainda, com a colaboração do Senai Mecatrônica, de Caxias do Sul-RS, do Senai Mario Amato, de São Bernardo do Campo-SP, e da Sociesc, de Joinville-SC, que cederam seus auditórios para a realização da programação.

Mais de mil técnicos e engenheiros envolvidos com a usinagem de materiais foram inscritos, revelando o interesse das ferramentarias pela possibilidade de fabricar moldes com maior agilidade e qualidade, incomparável em se tratando principalmente a usinagem de peças delgadas e com paredes mais finas.

Para o promotor do seminário Alexandre Magdalon, diretor da Seacam, o País está retomando o mercado de fabricação de moldes. “Até quatro anos atrás, mais de 85% dos moldes utilizados no País eram importados, mas, a partir da desvalorização do real e da maior abertura do mercado expondo a indústria brasileira a riscos, a situação se inverteu, a ponto de termos, hoje, mais de 50% dos moldes sendo fabricados localmente”, informou.

Segundo levantamento da Seacam, existem hoje mais de 2.000 ferramentarias ligadas às indústrias ou independentes só na Grande São Paulo, somadas às mais de 200 identificadas nas regiões de Caxias do Sul-RS e Joinville-SC.

Pelas observações de Magdalon, o setor resolveu promover uma arrancada em direção à modernização. Num primeiro estágio, as indústrias abandonaram o antigo sistema de usinagem por pantógrafo para aderir ao emprego de máquinas/fresadoras CNC, e agora estão introduzindo sistemas mais avançados e de alta velocidade.

Os investimentos feitos no setor de moldes e matrizes são confirmados pelos resultados de

vendas de softwares da própria Seacam. A empresa faturou em 2001 mais de R\$ 7 milhões, ocupando posição de liderança em vendas como parceira da Delcam, detentora de perto de 10% do mercado mundial de softwares CAM (Computer Aided Machine).

Boa parte desses resultados é creditada à comercialização do software PowerMILL. Destinado à usinagem CNC em múltiplos eixos, esse programa CAM em 3 D é aplicado em HSM, criando desbastes e acabamentos para otimizar a produtividade das máquinas CNC. Além das altas velocidades de cálculo, dispõe de visualizador integrado, que permite ao usuário comparar diferentes estratégias de usinagem, utilizando várias combinações de ferramentas, antes de enviar informações finais à máquina.

Executivos da Okuma Latino Americana, subsidiária da Okuma, com sede em Nagóia, no Japão, sexto produtor mundial de centros de usinagem, com vendas em torno de US\$ 1 bilhão, apresentaram palestras e confirmaram a crescente demanda por soluções de usinagem em alta velocidade no País. Em 2001, a Okuma vendeu 20 máquinas para HSM, correspondente a mais de 15% do total comercializado na América do Sul. “Foi um bom resultado se considerarmos que o novo conceito coexiste com as máquinas de baixa usinagem, formando um parque total de 400 máquinas já colocadas no mercado brasileiro”, afirmou o gerente geral da Okuma Latino-Americana Alcino Junqueira Bastos.

A perspectiva de contar com maior crescimento nas vendas para a América do Sul a partir deste ano, sobretudo para o mercado brasileiro, onde a Okuma se instalou em 1997, baseia-se na experiência e nos resultados colhidos nos EUA, onde a empresa atua há 22 anos e já teria comercializado 35 mil centros de usinagem, importante parcela em relação às mais de 150 mil máquinas já instaladas no mundo.

A Okuma fabrica centros de usinagem com eixos verticais e horizontais, em quinze diferentes modelos básicos e mais de cem configurações. As máquinas de usinagem de alta velocidade dispõem de mesas de 760 mm até 10.000 mm de comprimento, com destaque para o modelo MD-550, centro de usinagem convencional capaz de realizar a High Speed Machining, dotado de um sistema híbrido de guias lineares e barramentos de ferro fundido no mesmo eixo, que proporciona grande absorção de vibrações e reduzido coeficiente de atrito.

“Esse sistema é único no mercado, sendo capaz de fazer grandes reversões de movimento, em alta velocidade e com grande precisão”, explicou Glauco Bremberger, gerente de engenharia da Okuma. A usinagem em alta velocidade beneficia a rápida formação de cavacos e reduz a pressão específica de corte. “Na realidade, quando se utiliza a tecnologia HSM, o material usinado é rompido de maneira diferente. No processo convencional, ao usar-se a ferramenta de corte, gera-se pressão sobre a peça, que provoca uma deformação elástica e, depois, plástica, ocorrendo o rompimento por cisalhamento. Na usinagem rápida, a pressão específica de corte é reduzida, originando-se vários benefícios, como a possibilidade de usinar peças delgadas e reduzir deformações térmicas”, informou.

O novo conceito de usinagem por HSM prevê a operação de centros de usinagem com controle numérico, comandados por softwares especiais, com velocidade de rotação de fuso acima de 10 mil r.p.m., além de altas velocidades de deslocamento.

Na opinião de Fernando Garcia de Oliveira, gerente regional de vendas da Sandvik, a HSM oferece inúmeras vantagens aos fabricantes de moldes, pois permite reduzir o tempo de confecção do molde em até 51%, segundo estudos monitorados pela empresa. “A principal

vantagem em relação à usinagem convencional é que o bloco-base do molde é usinado em aço já temperado endurecido, eliminando-se as etapas de desbaste e semi-acabamento, e reduzindo-se também o tempo de polimento e acabamento manual, em geral de 60 horas, para apenas 15 horas”, calculou Oliveira.

A possibilidade de eliminar o desbaste e o semi-acabamento durante a confecção de um molde traz resultados positivos às ferramentarias, porque essas etapas consomem muito tempo de trabalho e respondem pelos custos mais elevados no processo como um todo.

O processo de usinagem convencional envolve sete etapas, desde a preparação do blank (bloco-base), seguida pelo desbaste do molde, semi-acabamento, tratamento térmico, eletroerosão, até o acabamento e polimento final. Para Glauco Bremberger, os ganhos de produtividade com HSM são bem maiores porque se simplifica o processo e ganha-se em qualidade superficial.

Segundo Oliveira, 30% das ferramentarias brasileiras já produzem de acordo com os novos patamares tecnológicos ditados pela HSM. “Os custos de implantação podem ser considerados relativamente altos, girando entre US\$ 100 mil e US\$ 200 mil, mas quem não tiver fôlego para aderir à nova tecnologia não terá condições de sobreviver no futuro, porque se perde muito nos prazos de entrega e no nível de qualidade dos moldes”, considerou.

Entre as ferramentas de corte para high speed machining, a Sandvik levou ao conhecimento do Seminário toda a sua linha de fresas sólidas em metal duro, com diâmetros desde 0,4 mm até 25 mm, além de fresas com insertos intercambiáveis e cabeçotes para usinar faces. A empresa garante ter nacionalizado mais de 3.000 itens, equivalentes a 70% da demanda por esse tipo de ferramenta no mercado brasileiro.

Entre as fresas desenvolvidas para usinagens em altas velocidades, Oliveira destacou a nova família de produtos Coromill/Plura, com inovações como a fabricação em substrato de metal duro, cujo tamanho do grão é inferior a 1 micron. “Quanto menor for o grão de carboneto de tungstênio da fresa, maior será a qualidade do fresamento, elevando-se a relação dureza-tenacidade do metal duro e, em consequência, a vida útil da ferramenta”, explicou.

Várias indústrias e ferramentarias brasileiras fabricam moldes com os recursos da HSM, entre as quais a Indústria de Matrizes Belga. Instalada em Caxias do Sul-RS há 23 anos, seus moldes de injeção para os setores automobilístico e de linha branca chegam a ter 30 toneladas e são reconhecidos no exterior.

Com os últimos investimentos feitos em HSM, envolvendo máquinas, programas, ferramental e treinamento de pessoal, a empresa iniciou há quatro anos a fabricação de moldes de injeção para lanternas e faróis de automóveis.

“A HSM nos propiciou condições para executar moldes em aço endurecido com altíssimo grau de precisão, possibilitando maior atuação nesse mercado altamente competitivo como é o automobilístico”, afirmou o gerente de engenharia da Matrizes Belga Alberto Vebber.

Para se ter idéia do ganho em produtividade, as máquinas convencionais de usinagem/fresamento CNC operam em velocidades em torno de 6.000 a 8.000 rotações por minuto, enquanto os sistemas por HSM atuam na faixa de 20.000 a 28.000 r.p.m.

“No Brasil, os moldes confeccionados por HSM costumavam vir das matrizes das empresas instaladas na Europa, Japão e EUA, mas, agora, temos a possibilidade de fabricá-los localmente e podemos atuar de maneira ainda mais integrada às necessidades do mercado”, considerou Vebber.

Para o palestrante Steve Hobbs, diretor de desenvolvimentos em CAM da Delcam, e considerado o pai do programa PowerMILL, 70% dos fabricantes mundiais de moldes já estariam utilizando a HSM, mas poucos fariam uso efetivo dessa tecnologia, capaz de não só eliminar processos como eletroerosão, têmpera e polimento, como também reduzir o tempo e o custo de usinagem CNC. Também aprimora a qualidade superficial e reduz acabamentos manuais, pois permite a usinagem de aços endurecidos, com a conseqüente redução nos prazos de entrega dos moldes.

A otimização dos recursos da HSM estaria, segundo Hobbs, diretamente relacionada à escolha do programa de usinagem. Um dos aspectos mais importantes da HSM, além do aumento da r.p.m. do fuso ou dos avanços, é poder alterar as estratégias de usinagem, fazendo-se cortes mais leves e muito mais rápidos e desbastes em altas velocidades, evitando-se mudanças bruscas de direção. Segundo recomendam os especialistas, é necessário planejar os percursos das ferramentas e as estratégias de corte, utilizando-se prolongadores longos e delgados, em combinação com ferramentas de corte mais leves.

A HSM também pode ser considerada um processo de corte muito produtivo para peças de pequenas dimensões, envolvendo a usinagem de moldes com paredes muito finas, com décimos de milímetro de espessura, além da alta precisão geométrica conferida às matrizes e moldes.

Rose de Moraes

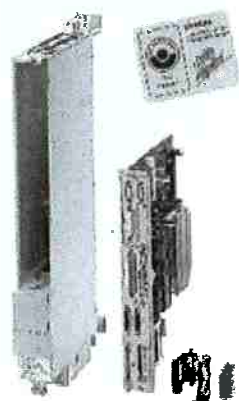
Plástico Moderno

Edição nº 332 de Junho de 2002

ANEXO B



Siemens - Alta tecnologia para HSC



High Speed Machining (HSM), ou ainda *High Speed Cutting* (HSC), é hoje a última palavra em termos de tecnologia para usinagem. Esta tecnologia está em constante desenvolvimento, e por isso, existem muitas dúvidas sobre este assunto. As atuais propostas e fundamentos da HSC estão causando hoje o mesmo impacto que o CNC causou há 40 anos atrás.

Soluções de alto nível tecnológico para HSC só podem ser desenvolvidas por uma empresa que está familiarizada com a alta demanda do setor aeroespacial, que construa plantas industriais perfeitas e avançadas, e que consiga fazer a diferença perante os demais concorrentes. Por isso a maioria das empresas do setor aeroespacial contam com a Siemens como parceira, desde a construção da fábrica até a usinagem dos componentes.

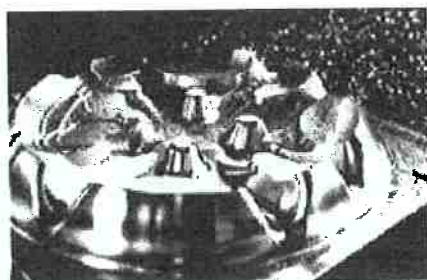
O CNC SINUMERIK[®] 840D em conjunto com a linha SIMODRIVE[®] 611D, a linha de motores lineares 1FN e os equipamentos SIMATIC[®] S7, possuem todos os recursos necessários para a utilização da HSC. Muitas empresas fornecedoras de peças para grandes fabricantes do setor aeroespacial, assim como os próprios fabricantes, utilizam a tecnologia SIEMENS para manter a qualidade de seu produto e a garantia de prazo de entrega.



Indústria Aeroespacial

A HSC está sendo muito utilizada em indústrias que exigem velocidade de produção conciliada com precisão de usinagem. Isto, devido aos diversos benefícios que à acompanham, tais como tempo de produção e custos reduzido, excelente qualidade de acabamento e menor distorção da peça final, menor stress do material, entre outros. A produção orientada em HSC teve início em 1976 com a indústria aeroespacial, e ainda hoje, este é o ramo que mais utiliza esta tecnologia como ferramenta de produção.

O que é necessário ?



A utilização da tecnologia HSC depende tanto da mecânica quanto da eletrônica que a equipa, por isso o conjunto completo que forma a máquina deve ser desenvolvido para tal finalidade. Os itens mais importantes na questão da mecânica são o spindle e o

cabeçote (*toolholder*), pois a ferramenta está diretamente ligada à estes dois componentes (no caso de um centro de usinagem). O balanceamento e a simetria do conjunto spindle+cabeçote é essencial para um bom desempenho da máquina, já que é neste conjunto que são exercidas as forças de usinagem. Devemos também nos preocupar com a formação de cavacos, e dar preferência aos cavacos "quebrados" (em pedaços de 2 à 3 cm) ao invés de cavacos contínuos (ou fita), pois os primeiros geram menos calor e menor desgaste da ferramenta.

A eletrônica utilizada para estas aplicações, além de ser de última geração, deve controlar alguns itens essenciais para a HSC:

- processamento rápido de blocos de movimento (*block cycle time*)
- pré-processamento
- leitura antecipada de blocos de movimento para gerenciamento da velocidade (*look-ahead*)
- transformações (p.ex. transformação para 5 eixos)
- eliminação de erro de contorno
- correções de ferramenta precisas (dimensões, desgaste, etc...)
- compensações para erros mecânicos/induzidos
- máxima segurança de máquina devido à alta velocidade dos eixos

A origem do HSC

O conceito básico da HSC foi desenvolvido pelo Dr. Carl Salomon em 1931, o que resultou em uma patente alemã. A idéia consiste em aumentar a velocidade de usinagem e assim diminuir a temperatura da peça sendo usinada, o que causa um menor enfraquecimento do material. A razão é que a velocidade de corte (*Machining Feed Rate*) é maior do que a velocidade de condução térmica, concentrando a maior parte da dissipação de calor no material removido (cavaco). Não existe uma velocidade que determina se o processo de usinagem está ou não sendo feito em HSC, pois este valor depende de outros fatores como dureza do material a ser usinado, tipo da ferramenta

de spindle variando de 20000 até 60000 rpm, e velocidades de corte entre 2 e 20 m/min. Na tabela abaixo, podemos observar um comparativo de velocidades convencionais e de HSC.

		Tipos de ferramentas			
		Brocas, Fresas para acabamento		Fresas, Fresas de topo	
Material		Convencional (m/min)	HSC (m/min)	Convencional (m/min)	HSC (m/min)
Alumínio		> 305	> 3050	> 610	> 3658
Ferro fundido	Macio	152	366	366	1219
	Dúctil	107	244	244	914
Aço	Liga	76	244	213	366
	Inoxidável	107	152	152	274
	Duro HRC65	24	122	30	46
Titanium		38	61	46	91

Velocidade convencional x Velocidade em HSC



Ao invés de construir um conjunto à partir de diversas peças pequenas, a HSC permite que este seja contruído em um bloco único de material. Isto evita o desperdício de até 60% de tempo de montagem além de melhorar a resistência da peça final. Além disso existe uma redução no número de ferramentas utilizadas para compor o conjunto e o peso da peça final é muito menor. Certas formas de usinagem seriam impossíveis de serem construídas sem a utilização da HSC, como formas complexas, paredes extremamente finas, ou mesmo com fendas muito estreitas.

ANEXO C

ADRIÁTICA MULTIPLICADORES DE VELOCIDADE
HIGH SPEED CUTTING (HSC)
USINAGEM EM ALTAS VELOCIDADES

A USINAGEM em ALTAS VELOCIDADES está cada dia mais difundida na indústria, sendo particularmente usada nos processos de Fresamento, Furação e Retificação. A sua aplicação é principalmente indicada para semi – acabamento e acabamento em materiais não – ferrosos. HSC, como é conhecida, substitui – se processos de **poucos, lentos e pesados** passes de usinagem para **muitos, rápidos e leves** passes. Algumas características que tornam o HSC mais vantajoso são enumeradas a seguir:

- 1 - Tempos de Usinagem muitas vezes menores, garantindo maior produtividade.
- 2 - Uma sensível melhoria obtida na qualidade superficial das peças.
- 3 - baixas forças de Corte resultando em menos força de usinagem, proporcionando ainda as seguintes vantagens :
 - Sistema de fixção de peças não sofre grandes exigências de cargas, apresentando menos vibração durante o processo de usinagem.
 - Quando empregadas elevadas relações “comprimento/diâmetro” da ferramenta, o desvio da haste da ferramenta é menor.
 - Com o desvio da haste da ferramenta menor que o normal, o resultado é um menor erro de forma e um melhor acabamento superficial.
 - As solicitações exercidas no fuso da Máquina – Ferramenta e outros componentes de máquina são menores, resultando em vida útil maior e menores custos de manutenção.

Alguns parâmetros e valores típicos de usinagem HSC são os seguintes:

- 4 - Profundidade de Corte entre 0,01 a 0,5mm
- 5 - Largura de Corte entre 0,05 e 4mm
- 6 - Avanço por Dente até 0,25mm
- 7 - Velocidade de Corte entre 280 e 465m/min para Alumínio e outros materiais não ferrosos equivalentes, tais como Latão, Bronze
- 8 - Velocidade de Corte entre 90 e 110m/min para aços e fundidos

Obviamente, um estudo pormenorizado de Processos de Usinagem deve ser realizado para levar a uma escolha ideal entre estes parâmetros.

Como já dissemos anteriormente, a Usinagem em Altas Velocidades é mais indicada para materiais não – ferrosos; a usinagem de materiais ferrosos, como os aços tratados ou não e o aço inox, por exemplo, apresenta outras características devido a alguns fatores considerados inconvenientes:

- A estrutura abrasiva de ferro cinzento ou nodular
- O aço inox pobre condutividade térmica
- As ligas de Níquel, Cromo e Titânio que tornam o aço mais duro

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

A Usinagem em Altas Velocidades e o seu sucesso dependem basicamente de cinco componentes, interagindo entre si para garantir o resultado desejado. Esses cinco componentes são: o Fuso da Máquina – Ferramenta, o Cone de fixação, o Multiplicador Hi – Speed, a Fixação da Ferramenta de Corte e a Ferramenta de corte em si.

Uma confiável fixação entre o Fuso da máquina e o Cone é de suma importância, pois, a partir desta fixação em maior parte é garantida a estabilidade de usinagem. Os Cones mais utilizados são os manufaturados conforme as normas internacionais DIN, ISO e BT.

Estudos realizados têm demonstrado que a superfície de contato entre o Fuso e o Cone mantem – se a 100% (contato integral) até uma velocidade de aproximadamente 22000 rpm. Acima deste valor há uma perda de contato, chegando a somente 37% (contato parcial) para uma rotação de 25000 ou mais. O mesmo princípio vale para o contato entre o eixo do Multiplicador e a Pinça de Fixação. Esta é uma das razões por qual o Cabeçote Multiplicador Hi – Speed **Adri** foi desenvolvido para atingir 22000rpm. É a sua segurança.

Por sua vez, a fixação de corte é de grande responsabilidade, pois a precisão de Multiplicador, estando dentro de uma concentricidade de 0,05mm, exige uma fixação de ferramenta também com precisão. Para esta finalidade a Pinça tipo ER é a mais utilizada. (Ver Pinças ER Din 6499 B). É a mais flexível das fixações de ferramentas, porém, alguns cuidados devem ser tomados com as Pinças tipo ER :

- 1 - A precisão de seu usinagem vai depender da Classe de Pinça ER que está utilizando.
Analisar bem qual é a classe mais adequada para seu serviço.
- 2 - O maior cuidado deve ser tomado na hora de trocar as Pinças conforme a necessidade de seu serviço, pois a troca e correta fixação **depende da habilidade do operador**. A precisão do seu serviço vai depender desta correta fixação.
- 3 - Certifique – se da procedência das Pinças ER. Compre somente Pinças fabricadas conforme a norma DIN 6499 B.

Outro fator que merece destaque é de que qualquer que seja a rotação, a mesma provoque a chamada “Força Centrifuga”. Esta força tende a jogar radialmente qualquer componente em rotação, incluindo a ferramenta de corte. Esta força aumenta geometricamente em função da rotação. Para tentar manter esta força dentro de parâmetros aceitáveis, o uso de ferramentas inteiriças é recomendado invés das ferramentas com insertos. Em usinagens a altas velocidades, por exemplo, uma ferramenta de corte de 12mm de diâmetro pode girar aproximadamente 15000 rpm, enquanto uma ferramenta de 16mm pode girar a 7500 rpm.

Em resumo, para garantir a boa qualidade dimensional e superficial de uma peça é necessário **OTIMIZAR O SISTEMA DE FIXAÇÃO**.