UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de São Carlos

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

“CONTRIBUIÇÕES AO FRESAMENTO DE GEOMETRIAS COMPLEXAS APLICANDO A TECNOLOGIA DE USINAGEM COM ALTAS VELOCIDADES”

ADRIANO FAGALI DE SOUZA

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

São Carlos, novembro de 2004

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ADRIANO FAGALI DE SOUZA**

Tese defendida e julgada em 22-11-2004 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

Prof. Dr. **RENATO GOULART JASINEVICIUS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

Prof. Dr. **AMAURI HASSUI**
(Escola Politécnica/USP) aprovado

Prof. Dr. **JEFFERSON DE OLIVEIRA GOMES**
(Instituto Tecnológico de Aeronáutica/ITA) aprovado

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais (em memória)
Às famílias Fagali, Souza e Matheus
Aos tios Jorge e José Fagali

Agradecimentos

Ao Professor Dr. Reginaldo Teixeira Coelho da Escola de Engenharia de São Carlos, pela coordenação, auxílio e apoio durante a execução deste trabalho.

A todos os colegas do Laboratório OPF e da EESC, pela ajuda, incentivo e companheirismo.

Aos professores que colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho.

À FAPESP pela concessão da Bolsa de Pesquisa.

À empresa Delcam International plc. e sua representante SeaCam Ltda., pelas oportunidades de aprendizado e pelo sistema CAD/CAM utilizado neste trabalho.

À empresa Villares pelo fornecimento da matéria-prima utilizada nos experimentos de usinagem.

À empresa Siemens, pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Unigraphics Solutions Ltda., pelos treinamentos, troca de informações técnicas e pelo sistema CAD/CAM utilizado.

À empresa Sandvik do Brasil S.A. divisão Coromant pelo fornecimento das ferramentas de corte utilizadas nos experimentos de usinagem.

À todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	IX
LISTA DAS NOTAÇÕES E SÍMBOLOS.....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XV
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS	5
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
2 REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 PROCESSO DE USINAGEM COM ALTAS VELOCIDADES (HSC)	7
2.2 MÁQUINAS-FERRAMENTA PARA TRABALHO EM ALTAS VELOCIDADES	16
2.2.1 Eixo-árvore para trabalho em HSC.....	17
2.2.2 Interface entre porta-ferramenta e o eixo-árvore.....	18
2.2.3 Interface entre o porta-ferramenta e a ferramenta de corte.....	20
2.2.4 Tipos de acionamento.....	21
2.2.5 Transdutores de precisão para posicionamento.....	24
2.2.6 Desempenho de máquinas/CNC para trabalho em alta velocidade de avanço.....	25
2.2.7 Funções especiais do CNC para trabalho em alta velocidade de avanço.....	26
2.3 TECNOLOGIA CAD/CAM	29
2.3.1 Sistemas CAD	32
2.3.2 Sistemas CAM.....	33
2.4 COMANDOS DE INTERPOLAÇÃO E MOVIMENTAÇÃO EM MÁQUINAS CNC.....	39
2.5 REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DE CURVAS COMPLEXAS – FUNÇÕES <i>SPLINE</i>	45
2.5.1 Curvas de Hermite.....	47
2.5.2 Curvas de Bézier.....	50
2.6 USINAGEM DE FORMAS COMPLEXAS EM MOLDES E MATRIZES.....	52
2.7 CONCEITOS DE USINAGEM RELEVANTES A ESTE TRABALHO	59
2.7.1 Aspectos básicos em Usinagem	59
2.7.2 Considerações sobre a força de usinagem no processo de fresamento	62
2.7.3 Considerações sobre o cavaco gerado durante o fresamento	70
3 TRABALHO EXPERIMENTAL	72
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	72
3.1.1 Máquina-ferramenta e acessórios	72
3.1.2 Dinamômetro.....	73
3.1.3 Software.....	74
3.1.4 Hardware.....	74
3.1.5 Equipamentos de inspeção	75
3.2 DESCRIÇÃO E PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	76
3.2.1 Influência do programa NC na velocidade de avanço em usinagens complexas	76
3.2.1.1 Análise preliminar.....	76
3.2.1.2 Análise definitiva	78
3.2.2 Análise da flexão da ferramenta de corte devido à variação do sobremetal deixado para a usinagem de acabamento.....	82

3.2.3	<i>Estudo simplificado da força de usinagem em formas complexas.....</i>	85
3.3	MÉTODOS PARA A OBTENÇÃO DE DADOS E EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	88
3.3.1	<i>Aquisição da posição da ferramenta e da velocidade de avanço instantânea.....</i>	88
3.3.2	<i>Aquisição das componentes da força de usinagem.....</i>	89
3.3.3	<i>Desenvolvimento do pós-processador dos programas NC contendo funções Spline .....</i>	91
3.3.4	<i>Execução dos experimentos de usinagem .....</i>	95
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4.1	INFLUÊNCIA DO PROGRAMA NC NA VELOCIDADE DE AVANÇO EM USINAGENS COMPLEXAS	97
4.1.1	<i>Análise preliminar .....</i>	97
4.1.2	<i>Análise definitiva .....</i>	100
4.1.2.1	<i>Análise da velocidade de avanço .....</i>	100
4.1.2.2	<i>Análise da qualidade superficial .....</i>	102
4.1.2.3	<i>Análise do desvio entre os três métodos de trajetória.....</i>	105
4.1.2.4	<i>Análise da força de usinagem.....</i>	107
4.2	ANÁLISE DA FLEXÃO DA FERRAMENTA DE CORTE DEVIDO À VARIAÇÃO DO SOBREMETAL DEIXADO PARA A USINAGEM DE ACABAMENTO	108
4.2.1	<i>Estudo das características geométricas do processo .....</i>	109
4.2.2	<i>Análise da força de usinagem.....</i>	110
4.2.3	<i>Análise do desvio de forma e da flexão da ferramenta.....</i>	114
4.2.4	<i>Análise da qualidade superficial .....</i>	121
4.3	ESTUDO SIMPLIFICADO DA FORÇA DE USINAGEM EM FORMAS COMPLEXAS	123
4.3.1	<i>Análise do contato ferramenta/peça e do diâmetro efetivo de corte.....</i>	127
4.3.2	<i>Análise experimental da força de usinagem .....</i>	131
4.3.3	<i>Análise da força de corte experimental .....</i>	133
4.3.4	<i>Estimativa teórica da força de corte.....</i>	138
4.3.5	<i>Análise da qualidade superficial .....</i>	140
4.3.6	<i>Análise simplificada do cavaco gerado .....</i>	142
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	145
6	REFERÊNCIAS.....	150
7	APÊNDICES	164

RESUMO

SOUZA, A. F. (2004). “Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades”. São Carlos: SEM, EESC-USP. Faculdade de Engenharia Mecânica, Escola de engenharia de São Carlos.

Atualmente, nota-se um crescimento na fabricação de produtos utilizando moldes e matrizes contendo formas geométricas complexas. 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 (HSC) influenciaram positivamente a fabricação de superfícies complexas. Contudo, nota-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 a fabricação de moldes e matrizes, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a usinagem HSC; um estudo sobre as força de usinagem para 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. Análises práticas foram realizadas em um centro de usinagem HSC, e os resultados indicam que as limitações tecnológicas atuais na cadeia CAD/CAM/CNC limitam a usinagem de formas complexas com altas velocidades, reduzindo a velocidade de avanço programada e que as características intrínsecas deste processo de remoção de material demonstrou ser bastante complexo, acarretando em constantes alterações na força de usinagem.

Palavras-chave: Usinagem em altas velocidades (HSC); Moldes e Matrizes; Trajetórias de Ferramenta; Funções *Spline*; Força de Usinagem.

ABSTRACT

SOUZA, A. F. (2004). *“A contribution for the free form milling applying the High Speed Cutting technology”*. São Carlos: SEM, USP, 2004. Faculdade de Engenharia Mecânica, Escola de engenharia de São Carlos - USP, 2004.

In recent 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 fabrication, this work presents an overview about HSC Technology; the cutting forces in a non-planar milling; the cutting tool deflection; a detailed 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. Free-form milling experiments applying the HSC Technology were made to study the behavior of this process, and the outcomes are presented.

Keywords: High Speed Milling (HSM); High Speed Cutting (HSC); *Spline* Functions; Cutting Forces; Die and Moulds; Tool Paths.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Análise de custo de um produto de polímero injetado.....	1
Figura 2.1: Variação da temperatura com a velocidade de corte	8
Figura 2.2: Resultados obtidos por Mc Gee	9
Figura 2.3: Etapas históricas do processo HSC.....	11
Figura 2.4: Comportamento do processo HSC	12
Figura 2.5: Faixas de velocidades de corte para diferentes materiais.....	13
Figura 2.6: Velocidades de corte convencional e HSC	13
Figura 2.7: Processo de usinagem convencional X HSC	14
Figura 2.8: Manufatura de eletrodos de grafite	15
Figura 2.9: Classificação de fresadoras	17
Figura 2.10: Eixos-árvore disponíveis para comércio	18
Figura 2.11: Problemas da utilização de um cone ISO em alta rotação	19
Figura 2.12: Cone HSK para usinagem em alta velocidade e cone ISO convencional.....	19
Figura 2.13: Fixação por interferência térmica e fixação hidro-mecânica	21
Figura 2.14: Acionamento por um fuso de esferas recirculantes.....	22
Figura 2.15: Comparação entre motores angulares e lineares.....	23
Figura 2.16: Montagem da régua óptica na máquina.....	25
Figura 2.17: Comando G64 para inibir a desaceleração	27
Figura 2.18: Formas de aceleração da máquina CNC.....	28
Figura 2.19: Comunicação entre sistemas de auxílio às etapas produtivas.....	30
Figura 2.20: Integração de sistemas de apoio à fabricação de moldes e matrizes	31
Figura 2.21: Malha gerada com diferentes tolerâncias	33
Figura 2.22: Principais trajetórias de ferramenta para operações de acabamento	35
Figura 2.23: Comparação entre estratégias de corte.....	36
Figura 2.24: Corpo de prova desenvolvido durante o projeto HIDAM	37
Figura 2.25: Etapas para pós-processamento de programas NC.....	39
Figura 2.26: Movimentação linear angular	40

Figura 2.27: Interpolações da trajetória de ferramenta	41
Figura 2.28: Tolerância de cálculo dos programas NC	42
Figura 2.29: Linha de programa Spline para o comando FANUC	44
Figura 2.30: Curva de Hermite	48
Figura 2.31: Desenvolvimento da curva de Bézier.....	51
Figura 2.32: Modificação global da curva.....	52
Figura 2.33: Desbaste por ferramentas de topo plana e esférica	54
Figura 2.34: Sobremetal proveniente da usinagem de desbaste em formas complexas	55
Figura 2.35: Pontos de contato de uma ferramenta esférica	57
Figura 2.36: Ponto de contato geometria/peça em função do sentido de corte	58
Figura 2.37: Diâmetro efetivo de corte em uma superfície plana	59
Figura 2.38 - Diagrama da cunha cortante.....	60
Figura 2.39: Ângulo de penetração de corte (ϕ)	66
Figura 2.40: Forças radial e axial atuantes na posição (ϕ) do processo de corte	67
Figura 2.41: Representação simplificada das forças de corte	68
Figura 2.42: Características de um processo de usinagem estável	70
Figura 2.43: Características de um processo de usinagem não-estável	71
Figura 3.1: Principais equipamentos utilizados	72
Figura 3.2: Sistemas de fixação de ferramentas.....	73
Figura 3.3: Dinamômetro utilizado.....	73
Figura 3.4: Placa de comunicação CP 5611	74
Figura 3.5: Geometria do corpo de prova utilizado para as análises preliminares	76
Figura 3.6: Perfil do corpo de prova utilizado para o experimento.....	78
Figura 3.7: Trajetórias de ferramenta e disposição do corpo de prova.....	80
Figura 3.8: Geometria do corpo de prova utilizado para o Estudo B	82
Figura 3.9: Regiões do corpo de prova após o desbaste	83
Figura 3.10: Posição do corpo de prova B em relação ao dinamômetro	84
Figura 3.11: Corpo de prova utilizado e esboço das trajetórias de usinagem	86

Figura 3.12: Comunicação com o CNC via Ethernet e ProfiBus.....	89
Figura 3.13: Gráfico da componente Fz da força de usinagem	90
Figura 3.14: Ciclo de desenvolvimento de pós-processador	92
Figura 3.15: Debug do ciclo de pós-processamento.....	94
Figura 3.16: Programa NC para interpolação polinomial Spline	95
Figura 4.1: Corpo de prova usinado.....	97
Figura 4.2: Velocidade de avanço: Semicírculo 1 – Interpolação linear; v_f 3500 mm/min.....	98
Figura 4.3: Velocidade de avanço: Semicírculo 2 – Interpolação circular; v_f 3500 mm/min	98
Figura 4.4: Velocidade de avanço: Semicírculo 3 – Interpolação linear; v_f 1000 mm/min.....	99
Figura 4.5: Corpo de prova usinado.....	100
Figura 4.6: Comportamento da usinagem utilizando a interpolação linear	101
Figura 4.7: Comportamento da usinagem utilizando equações polinomiais Spline.....	101
Figura 4.8: Comportamento da usinagem utilizando a interpolações circular/linear	102
Figura 4.9: Componentes do erro de forma de uma peça usinada por uma máquina CNC.....	105
Figura 4.10: Trajetórias obtidas do CNC durante a usinagem.....	106
Figura 4.11: Força de usinagem - Programa interpolação linear	107
Figura 4.12: Força de usinagem - Programa interpolação circular/linear	107
Figura 4.13: Força de usinagem - Programa Spline	108
Figura 4.14: Corpo de prova usinado.....	109
Figura 4.15: Características de corte na região b do corpo de prova.....	109
Figura 4.16: Gráfico da força de usinagem para a ferramenta de 6 mm de diâmetro	111
Figura 4.17: Gráfico da força de usinagem para a ferramenta de 12 mm de diâmetro	111
Figura 4.18: Vibração do dinamômetro/peça e a ação de cada aresta de corte	112
Figura 4.19: Componentes da força de usinagem para ferramenta de 6 mm de diâmetro	112
Figura 4.20: Componentes da força de usinagem para ferramenta de 12 mm de diâmetro	113
Figura 4.21: Comportamento da força ativa referente às três posições de usinagem	114
Figura 4.22: Flexão de uma viga mono-engastada.....	115
Figura 4.23: Desvio de forma em função da inclinação da superfície e flexão da ferramenta	116

Figura 4.24: Flexão da ferramenta obtida de forma experimental	117
Figura 4.25: Possíveis fontes de erro no processo de fabricação	119
Figura 4.26: Fotos da textura superficial após a usinagem.	123
Figura 4.27: Corpo de prova usinado	124
Figura 4.28: Componentes da força de usinagem obtidas neste experimento.....	125
Figura 4.29: Posição de contato da ferramenta com o corpo de prova	126
Figura 4.30: Atuação da ferramenta e vibração natural do sistema peça/dinamômetro	127
Figura 4.31: Formato do contato ferramenta/peça.....	128
Figura 4.32: Posição do centro da ferramenta de corte no decorrer da usinagem.....	130
Figura 4.33: Componentes cartesianas da força de usinagem para $V_c=220$ m/min	131
Figura 4.34: Direção do vetor força de usinagem em relação à posição da ferramenta	132
Figura 4.35: Força de usinagem em função da velocidade de corte e posição.....	133
Figura 4.36: Ângulos de contato durante a atuação da ferramenta.....	136
Figura 4.37: Características intrínsecas do processo em um momento específico do corte.....	137
Figura 4.38: Força de corte obtida experimentalmente em função da velocidade de corte	138
Figura 4.39: Características geométricas do processo	139
Figura 4.40: Qualidade superficial em função da velocidade de corte	141
Figura 4.41: Esboço do cavaco formado pela ferramenta esférica em uma superfície plana.....	142
Figura 4.42: Cavaco coletado no início da usinagem	143
Figura 4.43: Cavaco coletado ao final da usinagem	143

LISTA DAS NOTAÇÕES E SÍMBOLOS

A_c	Altura de crista [mm]
f_z	Avanço por aresta [mm/aresta]
$D_{g \max}$	Diâmetro efetivo de corte (ferramenta de ponta esférica) [mm]
a_e	Passo radial [mm]
a_p	Profundidade de corte [mm]
V_c	Velocidade de corte [m/min]
v_f	Velocidade de avanço [mm/min]
Δx	Comprimento de um segmento de reta de um programa NC [mm]
E	Módulo de elasticidade
e	Diferença dimensional – superfícies planas
e'	Diferença dimensional – superfícies inclinadas
I	Momento de inércia
h	Espessura do cavaco não deformado
h'	Espessura do cavaco deformado
h_m	Espessura média do cavaco
D_e	Diâmetro efetivo
D_n	Diâmetro nominal
F_u	Força de usinagem
F_c	Força de corte
F_r	Força radial
F_n	Força normal
F_t	Força tangencial
F_{at}	Força ativa
F_T	Força de atrito na superfície de saída da ferramenta
$F_{T'}$	Força de atrito na superfície de folga da ferramenta
F_f	Força de avanço
F_e	Força efetiva
F_{ap}	Força de apoio
F_p	Força passiva
F_a	Força axial
R_F	Raio da ferramenta
R	Raio da ferramenta

RP	Raio da peça
R_{ef}	Raio efetivo de corte
δ	Flexão da ferramenta
α'	Ângulo de posição da ferramenta em relação à peça
φ	Ângulo formado entre os pontos extremos de contato da ferramenta em relação ao centro da peça
ξ	Ângulo formado entre os pontos extremos de contato da ferramenta em relação ao centro da ferramenta
Φ	Ângulo de atuação da aresta em um ponto específico do corte
Φ_t	Ângulo de atuação da aresta no corte
γ	Ângulo de saída da ferramenta
μ	Coefficiente de atrito
Rc	Grau de recalque
Ks	Pressão específica
x	Ângulo de penetração da aresta no sentido axial
$K_{c1.1}$	Força específica de corte - Kienzle
Pc	Potência de corte
A_r	Área de material remanescente
θ	Inclinação da superfície
Dc	Diâmetro da ferramenta
L	Comprimento de balanço da ferramenta

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CIM	Computer Integrated Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAI	Computer Aided Inspection
CLF	Cutter location file
CNC	Comando numérico computadorizado
NC	Numerical control
ASCII	American national standard code for information
MMC	Measure Machine Coordinate
MMC	Man Machine Communication
HSC	High Speed Cutting
HSM	High Speed Machining
HVM	High Velocity Machining
EDM	Electrical discharge machining
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
STEP	Standard for exchange of product model data
NURBS	Non-uniform rational B-Spline
TRM	Tempo de resposta da máquina
TPB	Tempo de processamento de bloco
Cetim	Centro Técnico das Indústrias Mecânicas - França
PTW	Instituto de Técnicas de Produção e Máquinas Ferramentas da Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha)
OPF	Laboratório para Otimização de Processos de Fabricação. Escola de Engenharia de São Carlos

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, nota-se em todo mundo, um crescimento acentuado na fabricação de produtos envolvendo a injeção de termoplásticos e processos de conformação, NOTAS MÁQUINAS E METAIS (2000). A utilização de produtos de plástico tem crescido vertiginosamente nos últimos anos, sendo responsável por cerca de 35% do consumo de polímeros produzidos no país (DARÉ 2000). Em uma pesquisa realizada por FALLBÖHMER (1996), na Alemanha, constatou-se que a indústria automobilística é a maior cliente dos fabricantes de moldes e matrizes, seguidas pela indústria eletrônica e a de eletro-domésticos. A pesquisa demonstra também, que mais de 60% do tempo de fabricação de um molde ou uma matriz é consumido na fabricação das partes funcionais, as quais, em geral, incluem superfícies complexas.

De acordo com BOUJELBENE et al (2004), 30% do custo de um produto fabricado pela injeção de plástico é relativo à manufatura do molde, e apenas 5% do custo deste produto é relativo ao aço utilizado, como detalha a Figura 1.1.

Figura 1.1: Análise de custo de um produto de polímero injetado

Fonte: BOUJELBENE et al (2004)

O trabalho de pesquisa realizado por GREGOLIN e ANTUNES (2002), demonstra a necessidade de aprimorar a fabricação de moldes e matrizes no Brasil. O estudo constatou que a indústria brasileira de moldes é tecnologicamente heterogênea na fabricação destes ferramentais e para aumentar a competitividade, deverá se igualar tecnologicamente aos países considerados desenvolvidos, nesta área de fabricação. O trabalho demonstrou o potencial de expansão desta indústria no Brasil, decorrente da retomada de crescimento, substituição de importações e inserção internacional. Observa-se também, a importância deste segmento para as inúmeras cadeias produtivas, extrapolando para a competitividade da indústria brasileira como um todo.

De modo geral, atualmente encontram-se várias ineficiências durante a fabricação de moldes e matrizes contendo formas complexas (GUZEL e LAZOGLU, 2003), mesmo em empresas que possuem a vanguarda deste processo de fabricação. Normalmente, a manufatura destes ferramentais demanda longo tempo, com grandes dificuldades em se garantir a precisão e a qualidade requerida. Isto porque a rugosidade da superfície do molde, após o processo de usinagem, não é satisfatória para ser diretamente utilizado na produção (BOUJELBENE et al 2004). Neste caso, envolvem-se etapas de acabamento manual, realizadas por “artesãos”, que visam obter o acabamento superficial necessário para o ferramental começar a produzir. Por mais hábil que seja este profissional, a precisão dimensional do molde fica comprometida, além disso, muito tempo de trabalho é necessário nesta etapa de acabamento, representando uma considerável parcela no custo final do molde, além de aumentar o tempo de fabricação.

Na pesquisa realizada por RIGBY (1993), durante a avaliação de custos em uma indústria automobilística, constatou-se que o processo de acabamento manual em moldes e matrizes consome 38% dos custos totais de trabalho. Isto demonstra que as tecnologias que auxiliem a fabricação destes ferramentais, reduzindo as etapas manuais de acabamento, terão um futuro promissor.

Uma das possibilidades mais atrativas é a utilização da tecnologia de usinagem com alta velocidade de corte, também conhecida como *High Speed Cutting* – HSC, neste segmento (MARCONDES e SANTOS, 2003). Para o emprego desta tecnologia, utilizam-se máquinas-ferramenta com grande capacidade de aceleração/desaceleração associada à alta velocidade de deslocamento assim como alta rotação do eixo-árvore. Esta tecnologia tem atraído cada vez mais a atenção de vários setores industriais no Brasil e no exterior. Atualmente, sua principal utilização é a operação de fresamento, envolvendo desbaste e acabamento de materiais não ferrosos e acabamento de alta qualidade em aços endurecidos. Embora aplicada com grande êxito no fresamento, pesquisas demonstram que a tecnologia HSC pode ser aplicada também para outras operações de usinagem (SCHULZ, 1999). Observa-se no cenário mundial o desenvolvimento desta tecnologia, por empresas relacionadas à área, dentre elas: fabricantes de máquinas-ferramenta, fabricantes de comandos numéricos, fabricantes de ferramentas de corte, empresas que desenvolvem sistemas CAD/CAM específicos para a programação de usinagem em HSC, além de investimentos em projetos de pesquisas, financiados por entidades de fomento à pesquisa e empresas privadas, em todo mundo. Contudo, existem ainda carências tecnológicas para utilização da usinagem HSC com alto desempenho, agravando-se na usinagem de formas complexas. As influências dos fenômenos de corte no processo de usinagem em alta velocidade ainda não são completamente conhecidas.

O aumento das exigências de projeto industrial, buscando cada vez mais formas harmônicas para a apresentação de um produto, fez com que o uso de objetos e produtos contendo formas geométricas complexas se intensificasse (LAZOGLU, 2003). Hoje elas podem ser encontradas tanto em um simples *mouse* de microcomputador, num telefone, frascos de embalagens, brinquedos, como nos vários componentes de um automóvel. Todavia, a fabricação destes ferramentais tem demonstrado ser bastante problemática, agravando-se com a sua complexidade geométrica (CHU et al 1997).

As dificuldades encontradas envolvem a usinagem de formas geométricas complexas contendo: pequenos raios entre superfícies adjacentes; paredes verticais; áreas com elevada profundidade de corte e difícil acesso; variação de volume de material a ser removido; e a constante alteração do ponto de contato entre a ferramenta de corte e a peça, devido às diversas alterações de curvatura da superfície. Estas características geométricas tornam a fabricação de moldes e matrizes uma tarefa árdua, com grandes ineficiências, pois é difícil se obter a qualidade superficial requerida nesta aplicação, utilizando operações de usinagem.

Segundo FINZER (1998), o advento da tecnologia de usinagem em alta velocidade de corte, aplicada ao setor de moldes e matrizes, torna sua utilização altamente atrativa, pois é possível obter alta qualidade de acabamento superficial, permitindo reduções dos tempos envolvidos nas operações manuais de acabamento da ordem de 80% e economia de custos da ordem de 30%. Segundo GAMARRA (2003), a aplicação da tecnologia HSC pode representar reduções das operações de acabamento manual entre 60% a 100%, repercutindo em uma redução de até 50% do tempo total de fabricação destes ferramentais.

Além dos fatores econômicos, deve-se considerar a garantia de precisão na superfície usinada; o que não é possível quando se utilizam operações manuais de acabamento.

O desenvolvimento da tecnologia HSC pelas indústrias, isoladamente, se torna inviável, pois não se trata apenas de um eixo-árvore e servo-motores trabalhando em alta velocidade, mas trata-se de uma nova concepção do processo de fabricação. Isto envolve todas as tecnologias relacionadas ao processo de usinagem, como: a máquina-ferramenta; o comando numérico; a ferramenta de corte; os sistemas de fixação; a utilização de sistemas CAD/CAM; a programação NC; as estratégias de usinagem, entre outros. Todos os fatores que influenciam o processo de usinagem devem ser cuidadosamente estudados para se obter uma aplicação eficiente e segura da tecnologia de usinagem em altas velocidades. Diante das dificuldades descritas acima, este trabalho tem por finalidade estudar os

aspectos relevantes na fabricação de formas complexas utilizando operações de fresamento em altas velocidades, visando contribuir com o setor de moldes e matrizes, almejando ampliar o conhecimento sobre este processo de fabricação.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivos específicos:

- ♦ Analisar a influência de programas NC gerados por sistemas CAD/CAM e suas limitações quanto ao fresamento de superfícies complexas, envolvendo as limitações da velocidade de avanço. São estudados três diferentes métodos para descrever trajetórias complexas de ferramenta;
- ♦ Analisar a influência, na operação de acabamento, das alterações do volume de sobremetal deixado após as operações de desbaste;
- ♦ Analisar as forças atuantes na usinagem de geometrias não planas, utilizando uma fresa de topo de ponta esférica.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos, os quais estão brevemente descritos a seguir.

Capítulo 1 – Introdução — Este capítulo apresenta a contextualização deste trabalho de pesquisa.

Capítulo 2 – Revisão da literatura – Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os principais temas estudados neste trabalho, envolvendo a tecnologia de usinagem em alta velocidade; principais fenômenos de corte; fabricação de moldes e matrizes; sistemas CAD/CAM para manufatura de superfícies complexas; metodologias para a representação de curvas em sistemas

computacionais (curvas *Spline*); e as principais características que uma máquina-ferramenta deve possuir para trabalhar em alta velocidade com precisão.

Capítulo 3 – Trabalho Experimental – Neste capítulo estão descritos os procedimentos e as análises realizadas neste trabalho. Para atingir os objetivos propostos, o procedimento experimental é composto por três estudos, como segue:

- ♦ Influência do programa NC na velocidade de avanço em usinagens complexas;
- ♦ Análise da flexão da ferramenta de corte devido à variação do sobremetal deixado para a usinagem de acabamento;
- ♦ Estudo simplificado da força de usinagem em formas complexas.

Capítulo 4 – Resultados e discussões – Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com os estudos de usinagem em alta velocidade realizados para os três estudos.

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para futuros trabalhos – Neste capítulo estão descritas as conclusões finais obtidas durante este trabalho, apontando seus aspectos mais relevantes, além de conter sugestões para futuros trabalhos e temas de estudo que poderão ser investigados nesta área do conhecimento.

Capítulo 6 – Referências – Este capítulo contém, em ordem alfabética, todas as referências deste trabalho.

Capítulo 7 – Apêndice – Ao final deste trabalho, encontram-se os apêndices, contendo tabelas, gráficos e as informações mais importantes para esclarecimento e documentação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo de usinagem com altas velocidades (HSC)

O trabalho realizado por Cal J. Salomon, com a patente registrada em 1931 (*DEUTSCHE PATENTSCHRIFT* NR. 523594), e mais tarde vendida à empresa alemã Friedrich Krupp AG, é reconhecido como início dos trabalhos do que hoje se denomina “Usinagem em Alta Velocidade de Corte” (*High Speed Cutting* – HSC) (BLACK, 1989). Observa-se na literatura, autores utilizando também a terminologia *High Speed Machining* - HSM, para expressar assuntos da mesma natureza (OLIVEIRA, 2003).

No estudo realizado por Salomon, foi utilizada uma ferramenta de grande diâmetro para a usinagem de materiais ferrosos e não-ferrosos. Na usinagem de alumínio, aplicaram-se três diferentes velocidades de corte: 440 m/min, 2.100 m/min e 16.700 m/min, consumindo entre 6,16 a 17,6 hp de potência (ASHBURN, 1979). A patente foi baseada em curvas de velocidade de corte contra temperatura, como ilustra a Figura 1.1.

Figura 2.1: Variação da temperatura com a velocidade de corte

Fonte: SCHULZ, H. (1999).

Este estudo revela que após uma determinada velocidade de corte, as temperaturas de usinagem decrescem. De acordo com KING e VAUGHN, 1984, este fato veio a se tornar uma das principais características do processo de usinagem em alta velocidade. Quanto à ferramenta de corte utilizada por Salomon, divergências na literatura foram encontradas. BLACK (1989) e ASHBURN (1979) relatam que as ferramentas utilizadas neste trabalho foram fresas helicoidais de grande diâmetro, contendo de 8 a 20 arestas de corte. Entretanto, SCHULZ (1996) afirma que a ferramenta utilizada por Salomon foi uma serra circular de grande diâmetro, com a finalidade de se obter as elevadas velocidades de corte.

Em meados da década de 50, a empresa aeronáutica americana Lockheed CO, através de seu engenheiro de processos, Robert L. Vaught retomou os estudos inicialmente desenvolvidos por Salomon. Vaught utilizou mecanismos balísticos para atingir as velocidades de corte desejadas neste estudo, que chegavam a 54.800 m/min. Como principal resultado, obteve elevada qualidade superficial nos corpos usinados. Entretanto, a aplicação prática de usinagem com estas velocidades, não era uma realidade (ASHBURN, 1979).

Contrapondo aos resultados obtidos por Salomon em 1932, MCGEE (1979) realizou experimentos de usinagem em operações de torneamento de alumínio (2014-T652), utilizando ferramentas de metal duro com diferentes ângulos de corte e velocidades variando entre 30 e 1.432 m/min. A temperatura se elevou rapidamente entre as velocidades de 0 e 76 m/min; de forma moderada entre 76 e 300 m/min; e mais amena entre 300 e 1.400 m/min. A Figura 2.2 ilustra os resultados obtidos por MCGEE em 1979.

Figura 2.2: Resultados obtidos por Mc Gee

Fonte: MC GEE, (1979). Modificado

Em outro trabalho realizado NING et al (2001), verificou-se o comportamento da usinagem em alta velocidade de material endurecido (H13 – 55 HRC) através dos cavacos gerados durante os experimentos. O autor conclui que, nestes experimentos, a temperatura de usinagem não reduz com o aumento da velocidade de corte.

De acordo com BLACK (1989), vários estudos realizados na década de 60 e 70 nos Estados Unidos, por VAUGHN, QUACKENBUSH e COLWELL (1962); VAUGHN e

QUACKENBUSH (1966); KING e McDONALD (1976), mostraram que a produtividade aumenta significativamente e o custo de produção pode ser reduzido se os problemas com o intenso desgaste das ferramentas e as vibrações nas máquinas-ferramenta trabalhando em alta velocidade pudessem ser solucionados.

Somente ao final de década de 70, iniciaram-se estudos para aplicações práticas da tecnologia de usinagem em alta velocidade de corte. Em pesquisa realizada por KAHLES et al (1979), com a finalidade de conhecer as grandezas de corte utilizadas por empresas americanas de vanguarda, constatou-se que velocidades de corte até 900 m/min eram empregadas na usinagem de alumínio, e que a principal limitação da velocidade de corte não envolvia o processo de remoção de material, mas sim, limitações tecnológicas, como a máquina-ferramenta e os sistemas de fixação da ferramenta e da peça.

No início dos anos 80, com o desenvolvimento de eixos motores de alta rotação para aplicação em máquinas-ferramenta, continuaram os estudos nesta área, realizando-se as primeiras aplicações na usinagem de superfícies complexas. A Figura 2.3 ilustra as etapas cronológicas de desenvolvimento da tecnologia de usinagem em altas velocidades.

Figura 2.3: Etapas históricas do processo HSC

Fonte: SCHULZ, H. (1996).

Embora ainda existam restrições tecnológicas, a usinagem em altas velocidades tem sido, recentemente, alvo de atenção na Europa, Japão e EUA. Mesmo não sendo uma tecnologia completamente madura, segundo pesquisa realizada por TÖNSHOFF e MEYERHOFF (1996), 60% da indústria alemã e 95% das indústrias japonesas pretendiam investir em HSC em médio prazo.

Segundo SCHULZ (1996) as principais características do processo de usinagem em alta velocidade de corte podem ser analisadas pela Figura 2.4.

Figura 2.4: Comportamento do processo HSC

Fonte: SCHULZ, H. (1996).

Diversos trabalhos mencionam reduções da força de usinagem quando se trabalha com alta velocidade de corte. Entretanto, segundo SINHOFF et al (1999), do ponto de vista físico, não podem ser esperadas mudanças drásticas no processo de corte. Em condições de corte extremamente elevadas, ocorrem mudanças nas propriedades plásticas do material, com redução considerável da resistência à formação do cavaco. Mas estas condições ainda estão muito distantes das condições reais de aplicação. Ainda, segundo o autor, a redução observada nas forças de corte, deve-se simplesmente à redução do avanço por aresta, em função das altas rotações permitidas atualmente pela utilização de eixos-àrvore de alta frequência. Conforme estudo realizado por CHEVRIER (2003), os mecanismos de desgaste das ferramentas de corte são alterados quando se trabalha em HSC.

Embora o conceito de alta velocidade seja bastante relativo, há algum consenso, entre os autores, sobre a definição do que seja “alta”. Observa-se na Figura 2.5, a faixa de valores que define a alta velocidade de corte para cada material específico, segundo este autor, bastante aceito.

Figura 2.5: Faixas de velocidades de corte para diferentes materiais

Fonte: SCHULZ, H. (1996).

A velocidade de corte para HSC em operações de fresamento está na faixa de 10 vezes superior às velocidades convencionais de usinagem, de acordo com o material a ser usinado (SCHULZ, 1999). Segundo MÜLLER e SOTO (1999), a faixa de velocidade de corte também está relacionada à aplicação específica. A Figura 2.6 ilustra as faixas de velocidade em função da operação de usinagem.

Figura 2.6: Velocidades de corte convencional e HSC

Fonte: MÜLLER, P. e SOTO, M. (1999)

A Tabela 2.1 indica os principais campos de aplicações e exemplos de corte em que a HSC fornece vantagens específicas.

Tabela 2.1: Áreas de aplicação da usinagem HSC

Fonte: SCHULZ, H. (1997)

Vantagens HSC	Áreas de aplicação	Exemplos
Grande remoção de material	Ligas leves de metal Ferro fundido	Indústria aeroespacial Indústria de moldes
Alta qualidade de acabamento	Usinagens de precisão Peças especiais	Indústria óptica e Mecânica fina
Baixas forças de corte	Peças com espessuras finas de parede	Indústria aeroespacial Indústria automobilística
Alta frequência de excitação	Usinagens sem vibração em peças de difícil manufatura	Mecânica de precisão Indústria óptica
Dissipação de calor com o cavaco	Usinagem com baixas temperaturas de processo	Mecanismos de precisão Ligas de magnésio

Utilizando-se a matriz ilustrada na Figura 2.7 como modelo, foram fabricadas duas destas ferramentas, uma pelo processo convencional utilizado pela empresa e a outra aplicando-se a tecnologia HSC.

Figura 2.7: Processo de usinagem convencional X HSC

Fonte: FINZER, T. (1998).

Observou-se uma redução de 52 horas do processo de manufatura convencional para o HSC. Esta redução não se deu pelo tempo de usinagem propriamente, mas pela eliminação do polimento manual e as etapas de *try-out*, propiciando com isto, a redução do tempo de manufatura citado. A Figura 2.8 compara também os dois processos de usinagem, envolvendo agora, a manufatura de um eletrodo de grafite. Devido às características favoráveis de usinagem deste material, reduz-se drasticamente o tempo de fabricação, como indica o gráfico (FINZER, 1998).

Figura 2.8: Manufatura de eletrodos de grafite

Fonte: FINZER, T. (1998).

No trabalho realizado por EBERLEIN (1999), o autor fabricou um molde para injeção de plásticos para a confecção de isoladores elétricos, utilizando-se a usinagem HSC em material endurecido, com 52 HRc. O ciclo total de manufatura de um componente pelo método tradicional utilizando operações de eletro-erosão é de 51 horas. Utilizando a tecnologia HSC, a fabricação deste componente é reduzida para 8 horas. Neste caso, a rugosidade superficial após a usinagem HSC de acabamento, resultou em valores de R_a em torno de $0,5 \mu\text{m}$, eliminando com isto, as operações manuais de acabamento. Substituindo a eletro-erosão pela HSC,

elimina-se também tempos e custos envolvidos na geração do eletrodo necessário para eletro-erosão.

Segundo uma análise comparativa entre a usinagem convencional e a usinagem HSC, realizada pelo Cetim (*Centre Technique des Industries Mecaniques*, França), para manufatura de uma matriz de repuxo, foi constatado um ganho de 26% sobre o tempo direto e 35% sobre os custos diretos de produção desta matriz (CHÉLY, 2000).

2.2 Máquinas-ferramenta para trabalho em altas velocidades

Segundo SCHMITT (1996), as máquinas HSC distinguem-se das convencionais, por algumas características, tais como, velocidade de avanço e rotação do eixo-árvore. Nesta classificação, pode-se distinguir três grupos de máquinas para fresamento:

- ♦ Máquinas para usinagem convencional: Não atingem nem as velocidades de corte HSC nem as taxas de avanços HSC;
- ♦ Máquinas para usinagem "rápida": Estas máquinas atingem as velocidades de corte na faixa inferior da zona HSC (Figura 2.5), em combinação com altas velocidades de avanço. A maioria das máquinas HSC comerciais são encontradas neste segmento;
- ♦ A área de aplicação HSC: os valores máximos de avanço e de velocidades de corte do gráfico são utilizados, visando a remoção de médio a pequeno volume de material. Estas máquinas podem ser encontradas na fabricação de pequenos moldes (nas operações de acabamento), ou em laboratórios de pesquisas, representando o estado da arte em máquinas HSC.

A Figura 2.9 apresenta a classificação de fresadoras em função de sua velocidade de avanço e rotação do eixo-árvore segundo SCHMITT (1996).

Figura 2.9: Classificação de fresadoras

Fonte: SCHMITT, T. (1996)

As máquinas-ferramenta tecnologicamente atualizadas podem trabalhar com acelerações da ordem de 30m/s^2 , utilizando-se de motores lineares; eixos-árvore com frequência de rotação de até 100.000 rpm, embora seja mais comum a faixa de 15.000 a 40.000 rpm. A seguir são apresentados os conceitos principais dos componentes que uma máquina-ferramenta deve possuir para trabalhar em HSC.

2.2.1 Eixo-árvore para trabalho em HSC

O eixo-árvore é um dos principais componentes de uma máquina HSC. Por limitações tecnológicas, a potência do eixo-árvore é inversamente proporcional à rotação, como ilustra a Figura 2.10.

Eixos-árvore atuais podem fornecer alta rotação, mas com baixa potência. O desenvolvimento deste componente deve conciliar alta rotação e alta capacidade de torque.

Figura 2.10: Eixos-árvore disponíveis para comércio

Fonte: SCHMITT, T. (1996)

Na usinagem HSC, a interface entre o eixo-árvore da máquina, o porta-ferramenta e a fixação da ferramenta de corte, tem elevada importância para manter um processo de usinagem estável.

2.2.2 Interface entre porta-ferramenta e o eixo-árvore

O porta-ferramenta faz a interface entre a ferramenta de corte e a máquina-ferramenta, tendo grande efeito sobre a concentricidade e equilíbrio do sistema, pois ocorre uma grande concentração de esforços nesta conexão. Para o processo de fresamento convencional, é amplamente utilizado o sistema de fixação tipo ISO. Entretanto, quando se utiliza alta rotação, o eixo-árvore tende a sofrer deformações devido às forças de inércia provocadas pelo giro. Quando se utiliza um cone ISO, cujo sistema de tração é realizado pelo centro do eixo-árvore da máquina, estas

deformações tem efeitos acentuados devido à falta de contato entre o cone ISO e a face do eixo-árvore da máquina, fazendo com que o cone seja 'sugado' para dentro do eixo-árvore (CAVICHIOILLI, 2003), como ilustra a Figura 2.11.

Figura 2.11: Problemas da utilização de um cone ISO em alta rotação

Fonte: CAVICHIOILLI, F. A. (2003)

Este fato resulta em problemas durante a usinagem, envolvendo a qualidade superficial, desvio de forma da peça usinada, redução da vida da ferramenta além de dificultar a extração do porta-ferramenta. Visando a usinagem com alta velocidade de rotação, o cone de haste vazada e com face de apoio HSK (*Hohlschaftkegel*) foi projetado (Figura 2.12), obedecendo à norma DIN 69893 (FIEDLER e WÜRZ, 2001).

Figura 2.12: Cone HSK para usinagem em alta velocidade e cone ISO convencional

Existem diferentes versões para este acoplamento, dependendo do tipo de aplicação, como por exemplo: sistema de refrigeração interna e/ou externa; troca

automática ou manual; etc. O apoio de face evita que o eixo-árvore ‘sugue’ o cone em altas rotações.

2.2.3 Interface entre o porta-ferramenta e a ferramenta de corte

Esta interface realiza a fixação da ferramenta de corte pelo porta-ferramenta. Os métodos tradicionais para fixação de ferramentas são os porta-pinças, e os adaptadores de hastes *Weldon* e *Whitle Notch*. A fixação por porta-pinça demonstra alguns problemas quanto à precisão de fixação e baixa resistência quanto a forças radiais (SANDVIK, 1999). Os sistemas *Weldon* e *Whitle Notch*, embora apresentem excelente resistência à transmissão de torque, não permitem um balanceamento seguro, devido aos parafusos de fixação da haste da ferramenta e aos rebaixos existentes neste tipo de haste. Para operações de alta precisão e de alta rotação, dois sistemas de fixação foram desenvolvidos (CAVICHIOILLI, 2003):

- ♦ Na fixação por interferência térmica, o mandril é aquecido e depois de dilatado, a ferramenta é posicionada fixando-se ao mandril após o resfriamento. Este sistema demonstra grande precisão e balanceamento. Em contra partida, representa um alto investimento, pois não possibilita a utilização de pinças e, portanto, para cada diâmetro de ferramenta deverá haver um respectivo mandril.
- ♦ Na fixação hidro-mecânica, fixa-se a ferramenta através da contração de sua parede interna, provocada pelo movimento de um mecanismo mecânico existente dentro do mandril, que por sua vez, é acionado hidráulicamente.

A Figura 2.13 ilustra estes dois mecanismos de fixação de ferramentas adequados para usinagem em alta velocidade e alta precisão.

Fig.a: Fixação térmica

Fig.b: Fixação Hidro-mecânica

Figura 2.13: Fixação por interferência térmica e fixação hidro-mecânica

Fonte: CHRISTOFFEL, K. (2001)

O desbalanceamento da ferramenta de corte pode prejudicar o acabamento superficial e a máquina, em consequência da solicitação dinâmica nos mancais do eixo-árvore. As forças ocasionadas pelo desbalanceamento dependem da classe de balanceamento da ferramenta, de acordo com a equação abaixo.

$$F_{Desbal.} = G \times massa \times \frac{n}{9549} \quad (2.1)$$

onde:

G = classe de balanceamento da ferramenta [mm/s]

$Massa$ = massa da ferramenta em [kg]

n = rotação da ferramenta [RPM]

2.2.4 Tipos de acionamento

Tradicionalmente, o acionamento primário para a movimentação de uma parte da máquina, como a mesa por exemplo, é dado por um servo-motor conectado a um fuso de esferas recirculantes (CHANG et al, 1998), como ilustra a Figura 2.14.

Figura 2.14: Acionamento por um fuso de esferas recirculantes

Desta forma, em máquinas-ferramenta, o movimento rotacional do eixo do servo-motor é transformado em movimento linear da parte móvel da máquina. Este é o método mais aplicado para o acionamento de máquinas CNC, fazendo uso de motores elétricos de corrente alternada. Os sistemas convencionais de movimentação são os atuais fatores limitantes para o sistema de acionamento no que se refere à velocidade, rigidez sob carga, distância de deslocamento e dinâmica (WECK et al, 1999). As folgas do fuso de esferas do redutor e do acoplamento afetam a resposta do sistema (SOGABE, 1996). Desta maneira, necessita-se transformar movimentações angular (servo-motor) em movimentações lineares para a movimentação da mesa da máquina.

A aplicação de motores lineares se distingue completamente do sistema de transmissão de movimento atual por não haver a necessidade desta transformação. A estrutura do motor é constituída de duas partes principais: a parte móvel, onde a bobina está instalada, e a placa magnética fixa, como ilustra a Figura 2.15. Um magneto permanente de alto desempenho é usado para a obtenção da máxima força por unidade de área. Mecanismos de resfriamento ficam fixos na parte móvel para a remoção do calor gerado.

Figura 2.15: Comparação entre motores angulares e lineares

Fonte: MODERN MACHINE SHOP ON LINE (2002).

As vantagens do sistema de motor linear sobre o sistema de motor rotativo, segundo SOGABE (1996), são:

- ♦ Maior velocidade e aceleração;
- ♦ Maior exatidão com maior rigidez;
- ♦ Livre de manutenção;
- ♦ Curso ilimitado;
- ♦ Operação silenciosa;
- ♦ Menor quantidade de peças.

Entretanto, de acordo com ARNONE (1998) as principais desvantagens da utilização de motores lineares são:

- ♦ Estrutura magnética aberta propiciando alta atração magnética;
- ♦ Geração de grande quantidade de calor que deve ser removido do motor e seu elevado custo.

Para a usinagem de alta precisão em alta velocidade, observam-se grandes investimentos pelos fabricantes de máquinas-ferramenta para implantar este sistema de movimentação. Atualmente, alguns centros de usinagem contendo motores lineares encontram-se disponíveis no mercado (MAZAK modelo FF660; Mitsui Seiki modelo VL 50).

2.2.5 Transdutores de precisão para posicionamento

Os transdutores de posição são utilizados para se obter resposta de posicionamento do sistema a cada momento (*feedback* de posicionamento). Existem diferentes tipos de transdutores de posicionamento. Os *encoders* angulares e lineares são os mais utilizados por máquinas CNC (CHANG et al, 1998). Os *encoders* angulares medem a posição angular de um determinado motor, que neste caso, é o servo-motor acoplado ao fuso da mesa da máquina-ferramenta. A mecânica do *encoder* consiste em uma fonte de luz, um disco de vidro com faixas pintadas em distância intercalada e um sensor foto-elétrico.

O encoder linear é utilizado por máquinas-ferramenta para obter grande precisão de posicionamento em alta velocidade. O controle de posicionamento por um encoder linear é dado por régua óptica fixa na parte estática da máquina-ferramenta, e um dispositivo de luz que é fixo na parte móvel da máquina (dependendo da geometria da máquina, os movimentos nas direções X, Y, Z, podem ser realizados pela mesa e/ou pelo eixo árvore). O esquema de montagem deste sistema está ilustrado na Figura 2.16.

Figura 2.16: Montagem da régua óptica na máquina

Por sua montagem estar associada às partes móveis da máquina (neste exemplo a mesa), permite maior precisão de posicionamento. As imprecisões provenientes do fuso de esferas poderão ser conhecidas e corrigidas pelo CNC. Este método é empregado nas máquinas-ferramenta que exigem maior precisão.

2.2.6 Desempenho de máquinas/CNC para trabalho em alta velocidade de avanço

ELBESTAWI (1997), FALLBÖHMER et al (2000) mencionam que com altas rotações do eixo árvore, é possível reduzir o tempo de usinagem, pois mantendo o avanço por aresta constante, poder-se-ia elevar proporcionalmente a velocidade de avanço. Entretanto, na usinagem de formas complexas, a velocidade de avanço programada muitas vezes não é atingida, sofrendo grandes oscilações, como foi constatado neste trabalho. Isto ocorre por limitações tecnológicas do binômio máquina/CNC. Em Apêndice 01 (vídeo 1) encontra-se um vídeo documentando a limitação da velocidade de avanço durante a usinagem de formas complexas.

Uma característica importante do equipamento máquina/CNC para trabalhar em altas velocidades na fabricação de moldes e matrizes é a capacidade que o conjunto possui em manter alta velocidade de avanço em áreas complexas. Devido ao grande volume de informações necessárias para a usinagem em áreas

complexas, a máquina reduz a velocidade de avanço programada (ARNONE, 1998; SOUZA, 2001). Esta redução pode estar associada às características de rigidez na máquina bem como à capacidade de processamento do CNC.

O tempo de processamento de bloco (TPB) é o tempo necessário para o CNC interpretar uma linha de programa NC (dados ASCII: comandos G, M, etc.) e converter estas informações em acionamento dos eixos da máquina. Atualmente, encontram-se comandos numéricos com TPB de 2 a 0,5 milissegundos.

Segundo KIRSCHNIK (1997) uma das maneiras mais utilizadas para se analisar e comparar os comandos numéricos de máquinas-ferramenta é verificar o tempo de processamento de bloco (TPB), que é uma característica do CNC.

Entretanto, segundo ARNONE (1998), além do TPB outros fatores contribuem para a performance geral do sistema máquina/CNC. Observa-se no mercado atual, muitos fabricantes referindo-se à performance do sistema de acionamento da máquina-ferramenta como sendo apenas o tempo de processamento de bloco do CNC. O tempo necessário para a resposta da malha de controle da máquina/CNC (*feedback*) deverá ser considerado, pois este poderá ter maior influência na velocidade de avanço do que o próprio TPB.

Programas para a usinagem de superfícies complexas contendo interpolações lineares agravam este problema, devido ao grande volume de informações geradas por este tipo de interpolação (MONREAL e RODRIGUES, 2003).

2.2.7 Funções especiais do CNC para trabalho em alta velocidade de avanço

Na usinagem convencional de formas complexas, um comando “G” deve ser utilizado para inibir as desacelerações ao final de cada bloco de programa, como ilustrado na Figura 2.17. Para o CNC utilizado neste trabalho (Siemens 840D), este comando é executado pela sintaxe G64 (que ativa também a função *Look Ahead*).

Figura 2.17: Comando G64 para inibir a desaceleração

Para se trabalhar em HSC de forma mais eficiente, novos recursos estão sendo desenvolvidos e implementados nos CNC modernos para permitir maior velocidade de avanço em superfícies complexas. As principais funções especiais são:

- ♦ *Look ahead*: Este comando tem a finalidade de pré-processar blocos do programa NC, antes de sua execução, permitindo assim atingir maior velocidade de avanço.
- ♦ *Feed Forward*: Este comando reduz as imprecisões causadas pelas velocidades de deslocamento dos eixos e suas acelerações, quando se trabalha em alta velocidade.
- ♦ Comando Soft/Brisk: Este comando define a forma de aceleração da máquina (suave/brusca), como ilustra a Figura 2.18. O modo Brisk de aceleração permite menor tempo de usinagem, entretanto as movimentações ocorrem de maneira brusca, podendo comprometer os mecanismos de acionamento da máquina-ferramenta.

Figura 2.18: Formas de aceleração da máquina CNC

Fonte: SIEMENS User Manual (2000)

♦ Transformação polinomial Spline: Este comando transforma em tempo real, várias linhas de comandos G01 de um programa NC tradicional, em um polinômio de 5º grau, da forma proposta por YAU e KUO (2001) (discutido no Item 2.4). Um valor de tolerância é utilizado para aproximar o programa linear em uma equação polinomial, e deve ser definido em dados de máquina. Este recurso substitui a geração de programas Spline via software CAM. Entretanto, isto implica em outro processamento no CNC, podendo aumentar o TPB, além de requerer um outro valor de tolerância, necessário para esta transformação.

♦ Arredondamento de cantos: Esta função ajusta em tempo real, pequenos raios nas conexões dos segmentos de retas de um programa NC, permitindo uma movimentação mais suave da máquina. A dimensão destes raios está relacionada com um valor de tolerância e também deve ser definida em dados de máquina.

Todos estes comandos estão sendo desenvolvidos para minimizar o problema do Tempo de Resposta da Máquina/CNC (TRM), e com isso permitir que a máquina atinja maior velocidade de avanço em áreas complexas. Entretanto, como verificado nos experimentos práticos deste trabalho (Capítulo 3), atualmente ainda existem grandes lacunas para se atingir alta velocidade de avanço em áreas complexas.

2.3 Tecnologia CAD/CAM

As primeiras aplicações de computadores para auxiliar as etapas de engenharia tiveram início na década de 50, quando o Instituto Tecnológico de *Massachusetts* (MIT) iniciou a discussão sobre a tecnologia CAD/CAM. Os sistemas CAD desta geração se limitavam à descrição de entidades geométricas em duas dimensões, à criação e manipulação de desenhos em terminais gráficos monocromáticos, BÉZIER (1993). A utilização de sistemas CAD/CAM foi, por anos, limitada a aplicação em grandes empresas, como aeroespacial e automobilística. Isto ocorria, direta ou indiretamente, pelos custos envolvidos, desde software/hardware até a qualificação da mão de obra, requerendo usuários com maior grau de instrução.

Ao final da década de 90, com o desenvolvimento de um sistema operacional robusto para aplicação em PCs (Windows NT), houve uma migração das empresas que desenvolviam seus sistemas CAD/CAM baseados em sistema operacional UNIX. Este fato, além de reduzir o custo de hardware, reduziu também a necessidade de usuários extremamente especializados (KONG et al, 2003). A interface padrão Windows é bastante interativa, tornando mais intuitiva a utilização destes sistemas. Por sua vez, os custos relacionados diretamente aos softwares CAD/CAM também estão bastante acessíveis atualmente, tornando sua utilização viável mesmo para pequenas empresas.

A década de 70 marcou uma nova geração dos sistemas CAD: o desenvolvimento de técnicas computacionais para a representação de objetos tridimensionais. Os sistemas CAD atuais não se restringem apenas à geração e manipulação de desenhos em duas dimensões. Este recurso é considerado somente uma funcionalidade destes sistemas e representa apenas uma pequena parcela dos possíveis benefícios a serem obtidos com a utilização desta tecnologia.

As primeiras empresas fabricantes de moldes a utilizarem sistemas CAD/CAM no início da década de 80 não obtiveram bons resultados, pois a comunicação entre diferentes sistemas CAD/CAM era ineficiente, e estes sistemas não permitiam a geração de programas NC eficientes (VOLPATO, 1995).

Atualmente, a tecnologia CAD/CAM está exercendo uma influência cada vez mais decisiva na competição industrial, propiciando um aprimoramento na qualidade dos produtos, aumento de produtividade, rapidez na introdução de novos produtos e diminuição considerável de custos. Com o desenvolvimento desta tecnologia, tornou-se viável a fabricação de produtos contendo formas geométricas complexas. Anteriormente, estes tipos de geometrias eram apenas utilizados em casos especiais. Para este tipo de fabricação, o sistema CAM necessita de um modelo geométrico tridimensional da superfície a ser usinada. O modelo geométrico do produto a ser fabricado deve ser criado em um sistema CAD que seja capaz de representar objetos em três dimensões, através de um modelo sólido ou de superfícies. Este modelo é utilizado para os cálculos das trajetórias de ferramenta (SOUZA, 2001). A Figura 2.19 ilustra, de forma genérica, alguns softwares de auxílio às etapas de planejamento, manufatura, cálculo e inspeção. Observa-se que o CAD é responsável pela integração desta cadeia.

Figura 2.19: Comunicação entre sistemas de auxílio às etapas produtivas

Conforme apresentado por SOUZA e COELHO (2003), para a indústria de moldes e matrizes atualmente alguns sistemas computacionais podem ser integrados de forma eficiente para auxiliar esta manufatura, como ilustra a Figura 2.20.

Figura 2.20: Integração de sistemas de apoio à fabricação de moldes e matrizes

Fonte. SOUZA, A. F.; COELHO, R.T. (2003)

No início do desenvolvimento de um produto, os sistemas CAD podem ser utilizados para o modelamento de sua forma geométrica, realizado pela equipe de *Design*. Posteriormente, o CAD ainda é empregado para a construção geométrica do molde ou matriz, necessários para a fabricação do produto. No passo seguinte, a geometria do ferramental, definida no CAD, poderá ser transferida para um sistema CAE (*Computer Aided Engineering*) para a realização de análises mecânicas de funcionamento, como a definição dos pontos de injeção do plástico, refrigeração do molde, linhas de fechamento, análises de estampo, entre outras. Após as análises realizadas pelo CAE, a geometria do ferramental poderá ser transferida para o sistema CAM, com a finalidade de se gerar os programas NC para a usinagem. Como etapa final deste processo, um sistema CAI (*Computer Aided Inspection*) é utilizado para verificar as imprecisões geométricas entre o modelo projetado no

CAD, e a peça final, utilizando a nuvem de pontos gerados na máquina de medir por coordenadas.

Como observado na Figura 2.20, as geometrias construídas com o software CAD representam um elo de ligação entre os outros sistemas computacionais de auxílio à engenharia. São as informações geométricas provenientes do CAD que estes sistemas utilizam como base de cálculo. Portanto, a correta escolha do software CAD, a ser implantado em um ambiente de trabalho, tem uma importância significativa, não apenas para as etapas de desenho e projeto, mas também para as etapas que se sucedem. Existe atualmente uma grande variedade de softwares CAD disponíveis no comércio. Cada sistema CAD pode ser mais conveniente para determinada aplicação, o que torna importante o conhecimento desta tecnologia antes de definir um investimento.

2.3.1 Sistemas CAD

Entre os sistemas CAD capazes de construir objetos tridimensionais, há diferentes métodos empregados para representação gráfica de objetos. A forma de representar objetos está relacionada com o modelador geométrico (*Kernel*), que é o núcleo do software. Este núcleo pode ser caracterizado como softwares CAD modeladores de Sólidos ou Superfícies, com características distintas entre eles, como descrito a seguir. As geometrias tridimensionais criadas com um sistema CAD modelador de sólidos são entidades sólidas, contendo informações volumétricas, superficiais e físicas, como por exemplo, massa, centro de gravidade e inércia (HENRIQUES, 1999).

Os softwares modeladores de superfícies, por sua vez, fazem uso de formulações matemáticas tipo *Spline*. Esta metodologia permite o modelamento tridimensional de formas geométricas complexas, que é a característica principal desta classe de sistemas CAD (CHANG, 1998). Devido à necessidade de se criar produtos com formas complexas, sistemas CAD modeladores de superfícies são os mais empregados no setor de moldes e matrizes.

2.3.2 Sistemas CAM

A utilização de sistemas CAM propiciou uma melhora significativa no processo de fabricação de moldes e matrizes contendo formas geométricas complexas. Para o cálculo dos programas NC em um software CAM, inicialmente é necessário um modelo CAD. Para esta transferência de dados geométricos do CAD para o CAM em softwares desenvolvidos pela mesma empresa, a maioria dos sistemas utiliza-se de uma malha de triângulos gerada sobre a geometria original gerada no CAD, e é esta malha que será utilizada como modelo geométrico para a geração de programas NC (SCHÜTZER e SOUZA, 2000). Este processo de triangularização da superfície ocorre na maioria dos sistemas, embora em alguns isto não fique transparente ao usuário (DÜRR e SCHÜNEMMAN, 2000; KNOPPERS e GUNNINK, 2000). Esta malha de triângulos se aproxima da representação geométrica modelada no CAD através de um valor de tolerância definido pelo usuário, como mostra a Figura 2.21.

Figura 2.21: Malha gerada com diferentes tolerâncias

Esta metodologia tem por objetivo facilitar a transferência de dados geométricos entre os sistemas CAD e CAM. O inconveniente deste processo está na conversão para segmentos de retas (triângulos), de uma geometria gerada por um modelo matemático complexo, capaz de representar precisamente qualquer forma

geométrica. Desta maneira, é introduzida a primeira tolerância no processo de fabricação. Quanto menor a tolerância para a triangularização, melhor descrita será a geometria, mas proporcionalmente, aumenta-se o tamanho dos arquivos de transferência, podendo causar inconveniências durante as etapas de geração dos programas NC e fabricação.

Para a comunicação entre sistemas CAD/CAM de fornecedores diferentes, foi desenvolvido no início da década de 80, um padrão neutro de comunicação em formato ASCII ou binário, denominado IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) (BHANDARKAR et al, 2000). Outros padrões foram desenvolvidos, como o VDA-FS criado pela indústria alemã e o padrão STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*). Entretanto, estes padrões ainda apresentam vários problemas de comunicação.

Atualmente, com o desenvolvimento dos softwares CAM, diferentes possibilidades de trajetórias de ferramenta (principalmente para operações de acabamento), vêm sendo implementadas. Isto permite flexibilidade ao usuário para definir a estratégia de corte mais adequada para determinada aplicação. O trabalho realizado por CAVALHEIROS (1998) detalha as diferentes possibilidades de trajetória calculadas por um software CAM. Entretanto, com as diversas atividades de usinagem realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, verificou-se que embora as estratégias de corte estejam bastante evoluídas, algumas melhorias deveriam ser implementadas para aprimorar a usinagem de formas complexas. Dentre as principais trajetórias de usinagem para acabamento disponíveis em sistemas CAM pode-se citar: trajetórias em passes verticais paralelos; trajetórias em passes horizontais paralelos e trajetórias em *Offset* seguindo um perfil, como mostra a Figura 2.22.

Fig a: Passes verticais

Fig b: Passes horizontais

Fig c: Passes em offset

Figura 2.22: Principais trajetórias de ferramenta para operações de acabamento

Fonte: Software Powermill - Delcam

Usuários com bons conhecimentos ainda são necessários para realizar um processo eficiente. Cada estratégia de usinagem pode ser mais adequada para uma específica geometria (como áreas planas, inclinadas, côncavas e convexas). A escolha dentre as diferentes trajetórias de ferramenta pode representar uma grande influência sobre o tempo necessário para a usinagem, desgaste de ferramentas de corte e qualidade superficial (WEINERT e GUNTERMANN, 2000). Isto se agrava na usinagem de superfícies complexas, onde a qualidade do processo não é influenciada apenas pelo par ferramenta/peça, como é o caso do fresamento comum, mas depende fortemente da utilização adequada da estratégia de corte para um determinado grau de curvatura da superfície e a sua associação com as superfícies adjacentes.

A pesquisa realizada por WEINERT e GUNTERMANN (2000) constatou uma grande diferença nos resultados obtidos por dois processos de usinagem, que se distinguiram apenas pelas estratégias de corte utilizadas para o acabamento de uma matriz de estampo, ilustrada na Figura 2.23.

Figura 2.23: Comparação entre estratégias de corte

Fonte: G. Weinert e Gutermann (2000). Modificada

Para a usinagem da primeira matriz foram utilizadas trajetórias de fresamento em passes paralelos, conhecidas como *Raster*. No segundo caso, utilizou-se uma estratégia otimizada, composta por fresamento em curvas de nível nos setores mais íngremes e usinagem em *offset* nos setores planos. O tempo de usinagem necessário para o primeiro caso foi de 33,28 minutos, enquanto que o segundo caso foram necessários 26,61 minutos. Embora tenha ocorrido redução do tempo de usinagem, a maior vantagem da estratégia otimizada é a baixa rugosidade superficial obtida. Um estudo realizado por SILVA FILHO (2000) também sugere, como alternativa para otimizar a usinagem de moldes e matrizes, utilizar diferentes estratégias de corte em função da região a ser usinada.

O projeto de pesquisa denominado HIDAM/BRPR980753 (*High Speed Milling in Die and Mould Making*) realizado no Instituto *Für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen* (PTW), da Universidade Técnica de Darmstadt, Alemanha, teve a finalidade de avaliar a metodologia de usinagem de moldes e matrizes entre empresas europeias. Constataram-se grandes divergências em seus processos produtivos (SCHÜTZER; SOUZA e STANIK, 2000). Para este projeto foi

desenvolvido um modelo geométrico contendo formas geométricas complexas para o processo de usinagem (Figura 2.24). Este modelo foi utilizado como corpo de prova neste estudo e fabricado por várias empresas. Cada empresa fez uso de seus conhecimentos práticos para definir as estratégias de usinagem. Observaram-se grandes diferenças entre as metodologias de trabalho empregadas por cada empresa, influenciando diretamente os resultados finais.

Figura 2.24: Corpo de prova desenvolvido durante o projeto HIDAM

Para demonstrar este fato, a Tabela 2.2 apresenta os principais parâmetros de processo utilizados por duas empresas envolvidas. Observa-se uma drástica diferença dos tempos de fabricação e das ferramentas utilizadas para usinagem dos corpos de prova.

Tabela 2.2: Resultados obtidos com a usinagem do corpo de prova

Empresa A				Empresa B		
	Diâmetro da Ferramenta	Profundidade corte	Tempo de usinagem [h]	Diâmetro da Ferramenta	Profundidade corte	Tempo de usinagem [h]
Pré acabamento	25	2	0:36	16	3	2:16
	12	1	0:26	5	2	1:23
Acabamento	12	0,4	3:02	16	1	16:56
	6	0,3	0:45	5	1	4:48
	4	0,15	0:04	-	-	-
Tempo Total			4:53	Tempo Total		25:20

Mesmo a empresa **A** tendo consumido menor tempo de usinagem, a qualidade superficial obtida foi compatível ao corpo usinado pela empresa **B**.

Para geração de programas NC utilizando um sistema CAM, o usuário deverá possuir inicialmente o modelo geométrico a ser usinado, definir as dimensões do bloco de matéria-prima, definir os parâmetros tecnológicos, e por fim, definir e calcular as trajetórias da ferramenta. Após o cálculo do percurso da ferramenta realizado pelo software CAM, este deverá ser codificado em comandos, os quais possam ser interpretados e transformados pelo CNC da máquina em movimentações e acionamentos (ZELINSKI, 2001). Entretanto, cada sistema máquina/CNC possui características distintas, baseadas nas configurações da estrutura da máquina-ferramenta, envolvendo diferentes possibilidades para movimentações de seus eixos, troca de ferramentas, entre outras. O cálculo inicial no sistema CAM gera um arquivo genérico, sem estas especificações. Este arquivo é conhecido como *Cutter Location File* (CLF). Após esta etapa, o programa genérico deverá ser formatado de acordo com as características específicas do equipamento a ser utilizado. O pós-processador é o software que realiza esta conversão, transformando o arquivo CLF em um programa NC específico para uma dada comunicação máquina/CNC (SCHULTZ, 1999). Portanto, dois elementos são necessários para o pós-processamento (UG/POST MANUAL, 2001):

- ♦ Trajetória de ferramenta calculada pelo CAM em formato computacional;
- ♦ Pós-processador – programa computacional que lê o arquivo CLF e o converte em um programa para ser executado em uma dada combinação máquina/CNC.

Desta forma, o pós-processador possibilita a utilização de qualquer arquivo CLF para qualquer configuração de equipamento (máquina/CNC), desde que a configuração dos eixos da máquina e do arquivo CLF seja compatível. A Figura 2.25 demonstra um fluxograma da criação de um pós-processador específico para geração de programas NC.

Figura 2.25: Etapas para pós-processamento de programas NC

Para os trabalhos experimentais, desenvolveu-se um pós-processador adequado para a geração de programas NC que contenham trajetórias de ferramenta descritas por equações polinomiais tipo *Spline*, e possíveis de serem executados pelo comando Siemens 840D, que equipa o centro de usinagem HSC utilizado. O desenvolvimento deste pós-processador específico está apresentado no capítulo 3.

2.4 Comandos de interpolação e movimentação em máquinas CNC

O interpolador é o dispositivo lógico do comando numérico responsável pela interpolação entre dois pontos: $A(x_A, y_A, z_A)$ e $B(x_B, y_B, z_B)$, dividindo a trajetória em n segmentos (WITTE, 1998). Desta maneira, o interpolador dividirá também a

trajetória em n intervalos de movimentação para cada eixo individualmente. Quanto maior o número de impulsos por unidade de tempo, menor será a unidade de incremento e , portanto, maior será a precisão de movimentação (LYNCH, 1994). Além de discretizar os pontos da trajetória, o interpolador deverá também decompor as componentes da velocidade em cada eixo. A Figura 2.26 ilustra uma trajetória retilínea com inclinação de 45° , no plano XY. Para que ocorra este movimento, os motores, relativos ao acionamento da máquina na direção X e Y, deverão ser acionados na mesma velocidade. A combinação dos movimentos de translação em X e em Y, resultará na movimentação angular. Alterando-se o ângulo da trajetória, a velocidade de translação dos eixos deverá ser alterada. As componentes V_x e V_y da velocidade de avanço (v_f) são obtidas pelo teorema de Pitágoras. De forma análoga, este modelo pode ser extrapolado para uma movimentação angular tridimensional (KOREN, 1989). Embora se consiga obter alta precisão em movimentações que exijam mais de um eixo para se realizar, não há garantia que a trajetória real será exatamente a específica de projeto. Isto ocorre devido à deficiência de sincronia entre a movimentação dos eixos (CHANG et al, 1998 e LYNCH, 1992).

Figura 2.26: Movimentação linear angular

No exemplo da Figura 2.26, a movimentação linear AB é realizada por uma onda de sincronismo entre os servo-motores de acionamento dos eixos X e Y. A máquina-ferramenta garante precisão nos pontos discretos do programa (FAROUKI et al, 1999).

Soluções analíticas para descrever trajetórias de ferramenta são amplamente utilizadas por CNC para movimentações lineares ou circulares (LO, 1998). Para a

descrição de trajetórias curvas, o método mais utilizado é a discretização em segmentos de retas (EBERLEIN, 1999). Para tornar possível a usinagem de formas complexas, a trajetória da ferramenta é dividida em pequenos segmentos de retas. Os sistemas CAM utilizam algoritmos para a geração destas trajetórias que não possuem continuidade (continuidade C^0) (BOUJELBENE et al, 2004). Algumas limitações do processo de usinagem são atribuídas a esta metodologia, e foram estudadas neste trabalho. A associação de interpolações circular/linear aplicada a superfícies complexas, é uma das alternativas, entretanto a maior parte dos comandos numéricos permite executar a interpolação circular apenas em um plano, impossibilitando a usinagem tridimensional.

Outras opções em desenvolvimento utilizam funções polinomiais tipo *Spline*, para descrever as trajetórias de ferramenta (MOREIRA, 2003). As funções matemáticas utilizadas por esta metodologia estão detalhas no item 2.5. Por serem recentes, ainda existe carência de material científico sobre a aplicação prática destas metodologias alternativas. A Figura 2.27 ilustra as três técnicas para descrever trajetórias de ferramenta.

Figura 2.27: Interpolações da trajetória de ferramenta

Fonte: SHÜTZER, K. e SOUZA, A. F. (2000a)

Os três métodos citados acima estão detalhados a seguir.

a-) Interpolação linear de segmento de retas

A interpolação linear é o método geralmente utilizado para representar uma trajetória de ferramenta sobre uma superfície complexa, a qual é descrita por

pequenos segmentos de retas, utilizando apenas os comandos G01, de acordo com a norma DIN 66025 (DÜRR e SCHÜNNEMMAN, 1999). A Figura 2.27a ilustra uma trajetória de ferramenta descrita por segmentos de retas. Os pontos cartesianos representam início e fim dos segmentos de retas. O comprimento dos segmentos de retas utilizados no programa NC está relacionado com a tolerância de cálculo, definida pelo usuário no software CAM, associado com a curvatura da superfície, como demonstra a Figura 2.28. A tolerância utilizada pelos sistemas CAM está relacionada com a exatidão com que o caminho da ferramenta deverá seguir o modelo geométrico.

Figura 2.28: Tolerância de cálculo dos programas NC

Fonte: SOUZA, A. F. e COELHO, R. T. (2003)

Ao se trabalhar com tolerâncias menores, melhora-se a exatidão de reprodução do contorno e, conseqüentemente, aumenta-se o tamanho do programa NC gerado. A Tabela 2.3 demonstra a influência desta tolerância no tamanho dos programas NC gerados.

Tabela 2.3: Tolerância para a geração dos arquivos

Fonte: SOUZA, A. F. (2001)

	Tolerância	Tamanho de programas NC (kB)
Cálculo 1	0,5 mm	158 KB
Cálculo 2	0,01 mm	963 KB

Quanto mais complexos forem os programas, maior será a influência da tolerância de cálculo no tamanho dos arquivos NC. Esta metodologia, embora tenha a

vantagem de possuir uma codificação simples e universal para representar uma trajetória de ferramenta, acarreta em algumas inconveniências para a manufatura de superfícies complexas, agravando-se quando se trabalha com altas velocidades.

b-) Interpolação circular/linear

O método de interpolação linear/circular consiste na associação de ambos métodos para a representação de uma trajetória complexa de ferramenta. Isto acarreta a geração de programas NC contendo comandos G01, G02 e G03. A Figura 2.27b ilustra os segmentos de retas $PO1$ e $PO2$, associados aos arcos de circunferência R_1 e R_2 , utilizados para descrever a mesma trajetória de ferramenta. Em geral, esta técnica pode ser utilizada apenas para trajetórias em duas dimensões. Alguns sistemas CAM são capazes de gerar estes programas NC e a grande maioria dos CNC estão aptos a interpretá-los.

c-) Polinômio *Spline*

O método de interpolações polinomiais do tipo *Splines* faz uso dos modelos matemáticos utilizados por sistemas CAD atuais para a representação de curvas complexas. Estes modelos são conhecidos como funções *Spline*. Através deles é possível representar uma trajetória complexa de ferramenta, portanto, o programa NC gerado não irá conter os comandos tradicionais (G01, G02 ou G03), mas uma nova sintaxe que representará uma trajetória complexa. A Figura 2.27c ilustra a trajetória de ferramenta em azul e, o polígono de controle que define a curva, em vermelho. Os pontos cartesianos são utilizados para definir o polígono. Existem diferentes sintaxes para as entradas de dados *Spline*. Esta variação se dá de acordo com o comando numérico utilizado. A Figura 2.29 demonstra um exemplo de uma linha de comando *Spline*, gerado de acordo com a nomenclatura do comando FANUC (GE FANUC, 2000).

N500 G6.2 P K X Y Z R

Onde:

G6.2 - Sintaxe para interpolação NURBS

[P] - grau da equação polinomial

[K] - vetor no ponto de controle (*knot*)

[X, Y, Z] - coordenadas do ponto de controle

[R] - peso do ponto de controle (*weight*)

Figura 2.29: Linha de programa *Spline* para o comando FANUC

Para a geração de programas NC utilizando polinômios *Spline*, os sistemas CAM que permitem este recurso, não os geram diretamente. Os programas NC contendo funções *Spline* são gerados partindo de um programa NC linear de segmentos de retas. Com isto, é utilizada a tolerância inicial para cálculo do programa linear adicionada à tolerância de cálculo do programa *Spline*. Para se ter um processo adequado, o usuário deverá ter plena ciência da maneira mais eficiente para se trabalhar com estas tolerâncias. Nas pesquisas bibliográficas realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho, poucas análises práticas destas metodologias foram encontradas. Inicialmente, tem-se o foco no desenvolvimento de interpoladores para trabalhar com propostos e específicos polinômios tipo *Spline*.

FAROUKI et al, (1999) desenvolveu um interpolador para interpretar polinômios conhecidos como Hidrógrafos de Pitágoras. Segundo este autor, esta metodologia matemática é similar às equações de Bézier/B-*Spline* utilizada por sistemas CAD. No entanto, este trabalho foi desenvolvido apenas para situações planares de usinagem. Além disso, o autor não obteve resultados seguros em seus testes práticos devido à imprecisão (*backlash*) da máquina-ferramenta utilizada, que segundo o autor era de 0,1 mm. Outro fator pouco estudado foi o acabamento superficial obtido.

LARTIGUE et al (2001) desenvolveu um interpolador utilizando uma função B-*Spline* acrescentando o cálculo da crista deixado por uma ferramenta esférica (*Scallop height*). Neste trabalho, também não houve uma análise comparativa entre

diferentes metodologias de interpolação, envolvendo a qualidade superficial, velocidade de avanço e outros fatores de processo.

YAU e KUO (2001) desenvolveram um aplicativo que converte tradicionais programas NC gerados por interpolações lineares em programas NC com formato *Spline*. Este método de trabalho tem sido implementado em comandos numéricos sofisticados. Neste caso, o dado de entrada é um programa NC contendo comandos G01 e, internamente, o CNC converte estas trajetórias retilíneas em equações *Spline*, propiciando um desempenho melhor que o método tradicional de segmento de retas, entretanto, nesta conversão deve-se atribuir um outro valor de tolerância.

No trabalho desenvolvido por BOUJELBENE et al (2004), os autores realizaram um estudo comparativo entre programas NC utilizando interpolações lineares (comando G01) e programas contendo interpolações linear/circular (comandos G01, G02, G03). Este estudo demonstra que a melhor qualidade superficial é obtida utilizando o segundo método. Entretanto, o autor não considerou o comportamento da velocidade de avanço durante as usinagens, que é um fator relevante para o processo. Outro fato importante desconsiderado é a possibilidade de gerar programas NC via software CAM com interpolações linear/circular tridimensionais.

2.5 Representação matemática de curvas complexas – funções *Spline*

Tendo em vista as limitações da interpolação linear de segmentos de retas para descrever trajetórias complexas de ferramenta, atualmente tem-se almejado utilizar as representações matemáticas, utilizadas já há alguns anos por sistemas CAD para a representação de curvas, agora para representar trajetórias de ferramenta. No passado, construtores de embarcações, construíam modelos reais ou próximos das dimensões reais, utilizando longas e estreitas ripas flexíveis de madeira, permitindo a flexão para se atingir a forma geométrica desejada. Estas ripas eram chamadas *Spline*. Os artesões deformavam esta *Spline* amarrando pesos, chamados por eles de *ducks*, em pontos específicos. A forma geométrica obtida por

este processo, resultava em uma curvatura suave, obedecendo ao posicionamento e ao peso dos *ducks*.

De acordo com VOISINET (1988), *Spline* é uma curva não-concêntrica, não-reta e desenhada suavemente através de uma série de pontos, conhecida também como curva francesa. Com o advento computacional e o objetivo de realizar desenhos destas geometrias, com recursos de software, houve a necessidade de transportar este método de trabalho manual, para uma representação matemática. Com isto, as propriedades físicas de uma *Spline* deveriam ser modeladas matematicamente. A representação de geometrias pela matemática clássica envolve equações explícitas e implícitas para descrever um segmento de reta e equações para descrever uma seção cônica, respectivamente demonstradas a seguir:

$$y = mx + c \quad 2.2$$

$$ax + by + c = 0 \quad 2.3$$

$$ax^2 + by^2 + 2kxy + 2fx + 2gy + d = 0 \quad 2.4$$

Dentre as limitações da matemática tradicional para a representação de curvas e superfícies em sistemas gráficos, destacam-se:

- ♦ Estas equações representam geometrias ilimitadas;
- ♦ As curvas cônicas representadas por equações similares podem possuir valores múltiplos para uma mesma coordenada;
- ♦ Para curvas cônicas, observa-se uma descontinuidade de pontos obtidos na curva, por um incremento uniforme de pontos em uma das coordenadas.

A solução conveniente adotada para suprir estas carências foi a representação paramétrica de uma geometria. Com base nestas necessidades, as funções matemáticas conhecidas atualmente como funções *Spline* foram desenvolvidas. Estas funções permitem a criação, computacionalmente precisa, de uma curva complexa, utilizando pontos de controle e pesos associados a estes, análogo ao método artesanal, utilizando os *ducks* (BATES, 1997). Na representação

paramétrica de uma geometria, as variáveis cartesianas, x , y e z , ficam independentes umas das outras, variando apenas pelo parâmetro u :

$$x=x(u); y=y(u); z=z(u)$$

Para a representação de uma curva em um plano, utiliza-se convencionalmente o parâmetro u . Para a representação de uma superfície plana, utilizam-se os parâmetros u e v , e sucessivamente, para a representação de elementos tridimensionais, utilizam-se u , v e w como parâmetros. Estes parâmetros variam, comumente, entre 0 e 1.

Estes modelos matemáticos foram desenvolvidos inicialmente pelo francês Pierre Bézier, que baseado nas formulações inicialmente proposta por Hermite, implementou o software *Unisurf*, em 1972. O objetivo de Bézier era auxiliar a fabricação de painéis de automóvel, produzido pela empresa na qual trabalhava, a *Renault* (LAURENT e SABLONNIÈRE, 2001). Esta foi a primeira utilização de sistemas computacionais para modelamento de superfícies em projetos mecânicos. Atualmente, a formulação proposta por Bézier sofreu algumas alterações, surgindo os modelos *B-Spline* e a mais recente *NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline)*, permitindo maior manipulação e controle da curva ou superfície gerada, e conseqüentemente, maior versatilidade na representação de formas complexas.

2.5.1 Curvas de Hermite

Sendo uma das primeiras representações matemáticas de curvas não-planares finitas, o matemático francês Charles Hermite, que desenvolveu seus trabalhos no final do século XVII, definiu a curva utilizando uma equação polinomial, dois pontos e dois vetores que determinam sua forma, como ilustra Figura 2.30.

Figura 2.30: Curva de Hermite

A geometria proposta por Hermite utiliza um interpolador controlado por 4 fatores, a cada intervalo de 2 pontos, representados pelos próprios pontos de início e final da curva (P_0 , P_1), e os vetores tangentes à curva nestes pontos, definidos como (P_0' , P_1'). Estes fatores representam as condições de contorno da curva, através um polinômio de terceiro grau. Para solução de polinômios cúbicos, tem-se:

$$x = a_1 + b_1u + c_1u^2 + d_1u^3 \quad 2.5$$

$$y = a_2 + b_2u + c_2u^2 + d_2u^3 \quad 2.6$$

$$z = a_3 + b_3u + c_3u^2 + d_3u^3 \quad 2.7$$

Re-escrevendo:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}(u) = \mathbf{k}_0 + \mathbf{k}_1u + \mathbf{k}_2u^2 + \mathbf{k}_3u^3 \quad 2.8$$

$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix}$$

ou,

$$p(a) = \sum_{i=0}^3 K_i \times u^i; \quad 2.9$$

onde K_0 , K_1 , K_2 , K_3 , são vetores desconhecidos. Aplicando a metodologia proposta por Hermite, tem-se a derivada:

$$p' = p(u)' = k_1 + 2k_2u + 3k_3u^2 \quad 2.10$$

Utilizando os pontos externos (P_0 e P_1) com suas derivadas (P_0' e P_1'), pode-se determinar as incógnitas. Variando o parâmetro u entre 0 e 1, tem-se:

$$\text{para } u=0, p_0 = k_0 \quad 2.11$$

$$\text{para } u=1, p_1 = k_0 + k_1 + k_2 + k_3 \quad 2.12$$

Para a equação 2.10:

$$\text{para } u=0, p_0' = k_1 \quad 2.13$$

$$\text{para } u=1, p_1' = k_1 + 2k_2 + 3k_3 \quad 2.14$$

Resolvendo o polinômio em função de p_0 , p_1 , p_0' e p_1' , tem-se um sistema de duas equações e duas incógnitas (k_2 e k_3):

$$p_1 = p_0 + p_0' + k_2 + k_3 \quad 2.15$$

$$p_1' = p_0' + 2k_2 + 3k_3 \quad 2.16$$

Resultando em:

$$K_0 = p_0 \quad 2.17$$

$$K_1 = p_0' \quad 2.18$$

$$K_2 = 3(p_1 - p_0) - 2p_0' - p_1' \quad 2.19$$

$$K_3 = 2(p_0 - p_1) + p_0' + p_1' \quad 2.20$$

Substituindo os vetores na Equação 2.10, obtém-se o polinômio desenvolvido por Hermite:

$$p(u) = p_0(1 - 3u^2 + 2u^3) + p_1(3u^2 - 2u^3) + p_0'(u - 2u^2 + u^3) + p_1'(-u^2 + u^3) \quad 2.21$$

O controle preciso das tangentes de entrada e de saída da curva é essencial para a "suavização" da curva total. Para manter a continuidade de uma curva, suas respectivas tangentes de saída e entrada devem possuir a mesma direção. A utilização e edição dos pontos e dos vetores tangentes são úteis para o modelamento de formas complexas. No entanto, utilizando a metodologia de Hermite, os valores dos pontos e de suas derivadas dificultam a utilização prática desta técnica.

2.5.2 Curvas de Bézier

Para suprir as carências da metodologia de Hermite, Bézier utilizou um polígono de controle em substituição às condições de contorno (P_0 , P_1 , P_0' e P_1') utilizadas por Hermite. O polígono é aproximado por um polinômio cujo grau é o número dos vértices do polígono (pontos de controle) menos 1. A Figura 2.31 ilustra, a curva de Bézier em azul e o polígono de controle de quatro pontos que a descreve. A curva é gerada por um polinômio cúbico, o qual P_0 e P_3 são equivalentes ao P_0 e P_1 do polinômio de Hermite. Os vértices centrais do polígono são definidos como sendo $1/3$ dos vetores tangentes em P_0 e P_3 , respectivamente (Figura 2.31b).

Figura 2.31: Desenvolvimento da curva de Bézier

Desta forma, Bézier substituiu na base de Hermite:

$$p_0' = 3(p_1 - p_0) \text{ e } p_1' = 3(p_3 - p_2); \quad 2.22$$

Obtendo, para o caso de um polinômio cúbico (polígono de quatro vértices):

$$p(u) = p_0(1 - 3u + 3u^2 - u^3) + p_1(3u - 6u^2 + 3u^3) + p_2(3u^2 - 3u^3) + p_3(u^3) \quad 2.23$$

O polígono de controle de Bézier propicia melhor controle da curva gerada, se comparado ao método desenvolvido por Hermite. Alterações na curva são realizadas pela edição dos pontos que definem o polígono de controle. A curva passa pelo primeiro e último ponto e são tangentes ao primeiro e ao último segmento do polígono de controle. Um dos inconvenientes das metodologias desenvolvidas por Hermite e Bézier, é que apenas modificações globais na curva são possíveis de se realizar, como ilustra a Figura 2.32.

Figura 2.32: Modificação global da curva

Movendo-se o ponto P_2 do polígono de controle para a posição P_2' , a curva inteira se modifica. Outro inconveniente do método de Bézier é o fato do grau do polinômio estar atrelado ao número de pontos de controle. Um polinômio de grau elevado representa maior esforço computacional. Outras formulações matemáticas baseadas no método de Bézier vêm sendo desenvolvidas para a representação de curvas e superfícies em sistemas computacionais. O método NURBS – *Non Uniform Rational B-Spline* representa o estado da arte desta ferramenta, propiciando melhor controle da curva, permitindo edições locais, além de permitir maior eficiência de cálculo.

Em Apêndice 01 (vídeo 2) encontra-se um vídeo contendo uma apresentação animada sobre o método empregado para construção de uma curva *Spline* em sistemas computacionais. O vídeo mostra a construção de uma *Spline* utilizando-se da formulação proposta por Bézier em 1972. Empregando o software Excel, este polinômio paramétrico foi utilizado para gerar uma curva hipotética, ilustrando seu respectivo polígono de controle e como são realizadas edições na curva.

2.6 Usinagem de formas complexas em moldes e matrizes

Normalmente, o ciclo de desenvolvimento de um componente gerado por um molde ou matriz é bastante longo e requer a aplicação de várias áreas do conhecimento

técnico. Este ciclo pode ser dividido em três grandes fases distintas: Projeto do produto, projeto do molde e fabricação (DARÉ et al, 2000). Dentro da fase de fabricação está a usinagem da geometria do produto, a qual é o foco deste trabalho. O processo tradicional para manufatura de moldes e matrizes, normalmente, envolve as seguintes etapas:

- ♦ **Desbaste:** Operações de fresamento CNC partindo de um material em bruto. Esta operação é executada em 2½ eixos, pois a ferramenta é posicionada em uma determinada altura em Z e depois executa movimentos em dois eixos para remoção de material deste nível. Quando a remoção de material deste nível é finalizada, a ferramenta se posiciona em uma nova altura em Z (definida pela profundidade de corte), remove o material deste plano, repetindo este processo até a conclusão do desbaste. Normalmente, deixa-se um sobremetal para a operação final de acabamento.

- ♦ **Alívio de cantos e pré-acabamento:** estas operações de fresamento têm a finalidade de eliminar grandes volumes de material deixados pelo desbaste. Pode ser realizado devido à ineficiência do processo ou remover material em áreas onde a ferramenta de desbaste é incapaz de alcançar devido à limitações geométricas.

- ♦ **Acabamento por fresamento:** Esta é uma operação de fresamento CNC tridimensional, utilizando 3, 4, ou 5 eixos de liberdade, conforme a disposição da máquina-ferramenta. Esta operação visa remover todo material excedente das operações anteriores e obter a melhor qualidade superficial possível no fresamento.

- ♦ **Operações manuais de acabamento** (polimento e retificação): após as operações de usinagem esta etapa é realizada por um "artesão". Utilizam-se instrumentos tais como: lixas, pedras, esmerilhadeiras manuais, etc. Este processo tem a finalidade de eliminar as imperfeições deixadas pelas operações de usinagem, influenciando de forma determinante nos custos e tempos de produção, acarretando em imprecisões (FINZER, 1998; RIGBY, 1993).

Dependendo do projeto, operações de eletro-erosão são necessárias entre as etapas apresentadas.

Para realizar uma análise sobre as operações de fresamento de formas complexas, é conveniente estudar as condições de contato ferramenta-peça e as implicações, dificuldades e aproximações realizadas, para se modelar este processo de usinagem. A Figura 2.33a demonstra o contorno de uma peça não planar, com diferentes graus de curvatura, e o bloco prismático de matéria-prima, para sua confecção. A Figura 2.33b ilustra o material restante da operação de desbaste utilizando uma fresa de topo plana, segundo uma estratégia de desbaste com incremento vertical constante. A Figura 2.33c mostra o desbaste nas mesmas condições de usinagem, utilizando-se de uma ferramenta de ponta esférica, com a mesma estratégia.

Figura 2.33: Desbaste por ferramentas de topo plana e esférica

Observa-se que a ferramenta esférica permite se aproximar mais da geometria final da peça, deixando um sobremetal mais uniforme para o acabamento, no entanto requer maior tempo para desbaste. Ferramentas de topo planas com raio na extremidade estão sendo cada vez mais empregadas nesta aplicação.

De acordo com SCHULZ e FINZER (1999); BAUCO (2003), para se ter um processo HSC eficiente, a ferramenta de corte deve permanecer em carregamento constante, mantendo tão estável quanto possível, a força de usinagem. Para isto a seção de corte deve se manter a mais constante possível, durante todo o percurso da ferramenta.

A Figura 2.34 ilustra o sobremetal remanescente após a operação de desbaste por $2\frac{1}{2}$ eixos em uma superfície plana, com inclinação θ .

Figura 2.34: Sobremetal proveniente da usinagem de desbaste em formas complexas

A Figura 2.34a ilustra a operação realizada por uma ferramenta de topo plana e a Figura 2.34b a mesma operação realizada por uma ferramenta esférica. Com as simulações realizadas em um software CAD observou-se que o volume de material remanescente após a usinagem com a ferramenta esférica é 80% menor, se comparado ao volume deixado pela ferramenta plana. Entretanto, o desbaste utilizando a ferramenta esférica exigirá maior tempo de usinagem, pois o avanço radial de corte (a_e) deve ser reduzido, por questões geométricas, se comparado a uma ferramenta plana.

Para o caso da Figura 2.34a, utilizando-se da trigonometria básica, a área de material remanescente (A_R) e a comprimento máximo da seção transversal de corte (H) podem ser obtidas pelas equações abaixo, em função da profundidade de corte (a_p) e da inclinação da superfície (θ):

$$A_R = \frac{a_p^2}{2.Tg\theta} \quad [mm^2] \quad 2.24$$

$$H = ap \times sen\theta \quad [mm] \quad 2.25$$

No exemplo demonstrado pela Figura 2.34, foi considerado um caso onde a superfície usinada possui uma inclinação constante, definida pelo ângulo θ . No caso de moldes e matrizes as inclinações das superfícies se alteram constantemente. Considerando que a profundidade de usinagem (a_p) se mantém constante para o desgaste, o volume de material remanescente, além do sobremetal teórico, estará em função da curvatura da superfície. Segundo BEARD (2001); GOMES et al (2003), esta quantidade não uniforme de material para ser removida na operação de acabamento é prejudicial ao processo, principalmente quando se aplica a usinagem em altas velocidades. Grandes alterações no volume de material a ser removido durante a usinagem, em virtude destas transições topográficas, podem acarretar em instabilidades no processo. Segundo FRIEDHOFF (2002), as velocidades de avanço nestas circunstâncias deverão ser reduzidas para não reduzir a vida útil da ferramenta de corte.

Nas operações de usinagem de moldes e matrizes, o acabamento é realizado por uma ferramenta de ponta esférica, onde ocorrem características peculiares entre a ferramenta de corte e peça, variando o ponto de contato e seu diâmetro efetivo de corte. Estas características de processo têm fundamental influência no sucesso da usinagem. No acabamento, usando-se uma estratégia de corte tipo *haster* (passes paralelos), por exemplo, a forma do cavaco se altera constantemente com a variação do sentido de avanço e a posição do ponto de contato da ferramenta, com a peça. A Figura 2.35 ilustra estas variações para uma forma hipotética em uma passagem da ferramenta pela peça.

Figura 2.35: Pontos de contato de uma ferramenta esférica

A ferramenta na posição **A** pode ter longo contato com a peça incluindo-se o centro, com velocidade de corte zero. Acompanhando o sentido de usinagem até a posição **D**, a ferramenta oscila entre sentido de corte ascendente, de **A** para **B** e sentido descendente de **B** a **D**. No ponto **C**, a ferramenta está em contato com a peça apenas no centro, e na posição **B** a ferramenta utiliza sua periferia para o corte, com o diâmetro efetivo de usinagem sendo igual ao diâmetro nominal da ferramenta. Nesta posição, a ferramenta atinge a sua maior velocidade de corte.

A Figura 2.36 mostra, de forma ilustrativa, a área de contato da ferramenta com a seção de corte do material, caso o volume de remoção seja uniforme, numa operação de acabamento final. No sentido ascendente, a ferramenta corta com o diâmetro nominal, e no sentido descendente, utiliza a parte esférica, podendo utilizar o centro da ferramenta, com velocidade de corte zero, dependendo da relação entre o sobremetal e o raio da fresa.

Figura 2.36: Ponto de contato geometria/peça em função do sentido de corte

Sistemas CAD/CAM atuais geram os programas NC sem considerar estas características de contato ferramenta/peça, tendo como consequência, vibrações e deflexões da ferramenta. No ambiente industrial, os operadores das máquinas reduzem manualmente as velocidades avanço e/ou rotação da ferramenta, para evitar situações indesejadas (CHU et al, 1997).

No fresamento de superfícies complexas, utilizando uma ferramenta de ponta esférica, em poucas ocasiões a ferramenta utiliza seu diâmetro nominal para corte. Isto ocorrerá na usinagem de superfícies paralelas a seu eixo. Na maior parte dos casos, a região de contato entre a ferramenta e a peça varia, de seu centro (diâmetro zero), a um valor que dependerá da profundidade de corte e da inclinação da superfície (CHIANG et al 1995; SANDVIK, 2000). Tendo como base a Figura 2.37, utilizando relações trigonométricas, é possível determinar o raio efetivo de corte para uma superfície plana, como apresentado de forma aproximada pela equação 2.26).

Figura 2.37: Diâmetro efetivo de corte em uma superfície plana

$$R_{ef} = \sqrt{R^2 - (R - a_p)^2} \quad 2.26$$

Onde:

R_{ef} = Raio efetivo de corte [mm]

a_p = profundidade de corte [mm]

R = Raio da ferramenta [mm]

Desta forma, a velocidade de corte máxima deverá ser calculada considerando o diâmetro efetivo máximo da ferramenta. Entretanto, na fabricação de moldes e matrizes a curvatura da superfície se altera constantemente, variando assim, o diâmetro efetivo de corte. Com isto, fica alterada a correta definição dos parâmetros que necessitem do diâmetro da ferramenta. Um estudo sobre a variação do diâmetro efetivo de corte para a usinagem de uma geometria não planar encontra-se no Capítulo 3.

2.7 Conceitos de usinagem relevantes a este trabalho

2.7.1 Aspectos básicos em Usinagem

Neste item são abordados apenas alguns aspectos básicos da usinagem dos metais interessantes a este trabalho. Mais informações podem ser encontradas em literaturas especializadas (GORCZYCA, 1987; FERRARESI, 1977; MACHADO e SILVA, 1999; DOYLE, 1953; KRONENBERG, 1966; etc.)

A formação do cavaco pode ser descrita como um processo periódico, com cada ciclo dividido em 4 etapas distintas: (recalque ou deformação elástica, deformação

plástica, ruptura e escorregamento sobre a superfície de saída da ferramenta). Em geral o mecanismo da deformação do cavaco pode ser explicado considerando o volume de metal do cavaco não deformado, movendo-se em direção à cunha cortante (FERRARESI, 1977), como ilustra a Figura 2.38.

Figura 2.38 - Diagrama da cunha cortante

Fonte: Adaptado de FERRARESI, D. (1977)

O grau de recalque (R_c) é a relação entre a espessura do cavaco não deformado (h) e a espessura do cavaco gerado pelo processo de corte (h'), segundo a Equação 2.27:

$$R_c = \frac{h'}{h}$$

2.27

Durante o processo de remoção de material, o limite de escoamento é vencido e o material passa a se deformar plasticamente. Deformações plásticas continuam acontecendo até que as tensões não sejam mais suficientes para manter este regime. Assim fica definida uma zona de cisalhamento primária, sendo que, para facilitar o estudo, ela é representada por apenas um plano.

Após o material entrar em regime plástico, o avanço da ferramenta faz com que as tensões ultrapassem o limite de resistência do material, ainda dentro da zona de cisalhamento primária, promovendo a ruptura, que se inicia com a abertura de uma trinca no ponto "O" (Figura 2.38). A extensão de propagação da trinca, que depende principalmente da ductilidade ou fragilidade do material da peça, vai determinar a classe de cavaco (MACHADO e SILVA, 1999).

Segundo ANDRAE (1999) apud BEZERRA (2003), aumentando-se a velocidade de corte, o ângulo de cisalhamento aumenta, entretanto a espessura do cavaco diminui e conseqüentemente a relação de espessura do cavaco (h'/h) é reduzida. Ao mesmo tempo a força de usinagem decresce, segundo esse modelo simplificado.

De acordo com SILVA (2002), vários trabalhos sobre a usinagem em altas velocidades destacam dois tipos de formação de cavaco nestas circunstâncias, dependendo do tipo de material da peça a ser usinada e das condições metalúrgicas. Eles podem ser cavacos do tipo contínuo ou segmentado.

a-) Cavacos contínuos são mais prováveis de ocorrer na usinagem com alta velocidade de metais ou ligas com arranjo celular de corpo centrado, estrutura cúbica de face centrada, alta difusividade térmica e baixa dureza, tais como ligas de alumínio e aço de baixo carbono.

b-) Cavacos segmentados ocorrem em materiais de elevada dureza, especialmente em ligas de titânio, superligas de níquel e aços endurecidos, caracterizados pela baixa difusão térmica.

A força de corte, segundo o modelo mais tradicional, é resultante do produto entre a área da seção transversal do cavaco não deformado pela pressão específica de corte (K_s), característica do processo de corte. Segundo FERRARESI (1977), o fator K_s pode ser expresso por:

$$K_s \cong \tau_r \times R_c \times K \quad 2.28$$

onde:

τ_r : Tensão de resistência à ruptura do material

R_c: Grau de recalque

K: Constante

Portanto, quanto menor o grau de recalque, menor será a pressão específica de corte, e conseqüentemente, haverá uma redução na força de corte. Isto pode explicar a redução da força de corte com o aumento da velocidade de corte.

Durante a remoção de material pelo processo de usinagem, a maior parte da energia mecânica necessária durante a operação é convertida em energia térmica, com a formação do cavaco; ocasionando um aumento de temperatura na região de corte. Este fato ocorre inicialmente, devido à energia necessária para deformação do cavaco, e posteriormente, devido ao atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta (DINIZ et al, 1999).

O custo de usinagem está diretamente relacionado com a taxa de remoção de material. Este custo pode ser minimizado pelo aumento da velocidade de corte e/ou do avanço. Contudo, isto pode reduzir a vida útil da ferramenta, pois aumentando a velocidade de corte e/ou de avanço, a temperatura do processo aumenta significativamente (BRAGHINI, 2002). Segundo SINHOFF et al (1999), dobrando a velocidade de corte pode-se reduzir a vida da ferramenta para até um décimo, dependendo da combinação do material da peça e material da ferramenta de corte na operação específica.

2.7.2 Considerações sobre a força de usinagem no processo de fresamento

Especificamente, a força de corte é utilizada para estimar a maior parcela da potência requerida na usinagem, de acordo com a Equação 2.29:

$$P_c = F_c \times v_c \frac{1}{60} [\text{W}] \quad 2.29$$

onde:

P_c = potência de corte (W)

F_c = força de corte (N)

v_c = velocidade de corte (m/min)

A outra parcela da potência de usinagem, oriunda da velocidade de avanço, não é normalmente considerada, devido à sua pequena magnitude, se comparada à de corte. Portanto, a força de corte representa a parcela mais significativa que influencia na potência de usinagem. A força de usinagem, por sua vez é a soma vetorial de três parcelas principais, a saber: a força de corte a de avanço e a força passiva (FERRARESI, 1977).

Para se estimar a força de usinagem, devem ser considerados fatores geométricos, metalúrgicos, químicos e térmicos, envolvidos no processo de remoção de material MICHELETTI (1977). Os principais fatores geométricos são: os ângulos da ferramenta de corte; a posição da ferramenta em relação à peça; a seção transversal do cavaco e sua magnitude. Os fatores metalúrgicos estão relacionados à dureza do material, que determinam diretamente as forças atuantes na ferramenta de corte e o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça. Entre os fatores químicos, devem ser considerados a adesão molecular e o fenômeno de difusão, responsáveis pela formação de arestas postiças e o desgaste da ferramenta. Os fatores térmicos estão associados ao atrito e diretamente relacionados com o processo de deformação plástica do material a ser removido. Estudos sobre a formação de cavaco em metais se iniciaram ao final do século XIX (COELHO et al 2003). Contudo, as teorias e os modelos matemáticos utilizados para representar tal fenômeno surgiram em meados do século XX. O estudo da força de usinagem realizado por KOENIGSBERGER e SABBIRWAL (1961) foi o provável início das análises relacionadas com força de corte (ZHENG et al, 1996). Os trabalhos pesquisados não apresentam as forças de atrito graficamente e são baseados na norma DIN 6584. A força de atrito ocorre em três circunstâncias:

- a-) força de atrito atuante no plano atômico de cisalhamento do cavaco;
- b-) força de atrito que ocorre entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta de corte;
- c-) força de atrito entre a superfície de folga da ferramenta de corte e a peça.

Estima-se que a força de corte corresponda a 75% da força de usinagem e 25% são atribuídas às forças de atrito, e que a força de atrito no plano atômico de cisalhamento e a força de atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, possam ser desprezíveis BLACK (1989).

De acordo com DINIZ et al (1999) e FERRARESI (1977), as forças atuantes no processo de usinagem podem ser classificadas em Força Ativa (F_t) e força passiva (F_p).

a-) A força ativa (F_t): É a componente de F_u atuando no plano de trabalho, e que contribui para a potência de usinagem. A força ativa pode ser decomposta ainda nas seguintes componentes:

- ♦ F_T : Força de atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta
- ♦ F_T : Força de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta
- ♦ F_f : Força de avanço. É a projeção de F_u sobre a direção de avanço;
- ♦ F_c : Força de corte. É a projeção de F_u sobre a direção de corte;
- ♦ F_{ap} : Força de apoio. É a projeção de F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho;
- ♦ F_e : Força efetiva. É a projeção de F_u sobre a direção efetiva de corte;
- ♦ F_n : Força de compressão. É a projeção da F_u sobre a direção perpendicular à superfície principal de corte.

b-) A força passiva (F_p): É a componente de F_u atuando em um plano perpendicular ao plano de trabalho, e não contribui para a potência de usinagem, apenas para a flexão da ferramenta de corte, ou da peça, prejudicando assim a exatidão dimensional Diniz et al (1999).

Desta forma, a força de usinagem pode ser expressa pela equação abaixo:

$$Fu = \sqrt{Fp^2 + Ft^2} \quad 2.30$$

A força de usinagem corresponde também ao vetor formado pelas componentes de força obtidas pelo dinamômetro (F_x , F_y , F_z), de acordo com a equação abaixo, LIMA et al (2003):

$$Fu = \sqrt{Fx^2 + Fy^2 + Fz^2} \quad 2.31$$

Por diferentes modelos, pode-se estimar o valor da força de corte utilizando à pressão específica e a área da seção de corte. O método de Kienzle é bastante utilizado para esta estimativa. Este método permite a aplicação em diferentes processos de usinagem. Para isso, é necessário considerar a correlação entre a pressão específica e a área da seção transversal do cavaco, conforme a Equação (2.32).

$$F_c = K_s \times A \quad 2.32$$

onde:

K_s - pressão específica de corte

A - área da seção transversal do cavaco não deformado

O valor do parâmetro K_s depende do material da peça a ser usinada, da geometria e do material da ferramenta de corte. O K_s também pode ser entendido como sendo a energia necessária para remover uma unidade volumétrica de cavaco da peça. Tabelas com valores de K_s podem ser encontradas na literatura, baseadas em diferentes teorias para a determinação deste parâmetro. A principal teoria para a determinação do K_s foi proposta Kienzle, conforme a Equação (2.33).

$$K_s = K_{s1} \times h^{-z} \quad 2.33$$

onde:

K_{s1} e $-z$ são constantes que dependem do material da peça e da ferramenta

O modelo utilizado por GOMES (2001) para definir a força de corte (F_c) em operações de fresamento com ferramentas de topo plana, envolve grandezas

experimentais, como força específica de corte definida por Kienzle ($K_{c1.1}$) e o coeficiente de Kienzle ($1-mc$), além da profundidade de corte (a_p), do número de arestas atuantes no corte (Z) e a espessura média do cavaco (h_m), de acordo com a Equação 2.34.

$$F_c = ap \times Z \times h_m^{(1-mc)} \times K_{c1-1} \quad 2.34$$

A espessura média do cavaco (h_m) é definida em função do ângulo de penetração no corte (Φ), do avanço por aresta (f_z), da espessura de corte (a_e) e do diâmetro da ferramenta (D), conforme ilustra a Figura 2.39.

Figura 2.39: Ângulo de penetração de corte (ϕ)

A espessura média do cavaco (h_m) pode ser calculada pela equação 2.35:

$$h_m = f_z \times a_e \times \frac{360^\circ}{(\phi \times \pi \times D)} \quad 2.35$$

Na análise realizada por LIMA et al (2003), ainda considerando uma ferramenta de topo plana, o modelo para estimar a força de corte envolve as componentes radiais (F_r), tangenciais (F_t) e axiais (F_A) da força de usinagem (Figura 2.40), em função da espessura média do cavaco (h_m), profundidade de corte (a_p), dos coeficientes de força de corte que contribuem para a ação do corte (K_{tc} , K_{rc} , K_{ac}) e a constante para forças residuais (K_{te} , K_{re} , K_{ae}) nas direções tangenciais, radiais e axiais. Segundo o

autor, estes coeficientes foram obtidos experimentalmente para um determinado par ferramenta-peça.

Figura 2.40: Forças radial e axial atuantes na posição (ϕ) do processo de corte

$$F_t(\phi) = K_{tc} \times ap \times h_m(\phi) + K_{te}(\phi) \quad 2.36$$

$$F_r(\phi) = K_{rc} \times ap \times h_m(\phi) + K_{re}(\phi) \quad 2.37$$

$$F_A(\phi) = K_{ac} \times ap \times h_m(\phi) + K_{ae}(\phi) \quad 2.38$$

Utilizando a Figura 2.40, as componentes da força de corte nas direções X, Y, Z, podem ser determinadas. Desta forma, pode-se obter:

$$F_x(\phi) = -F_t \cdot \cos(\phi) - F_r \cdot \sin(\phi) \quad 2.39$$

$$F_y(\phi) = F_t \cdot \sin(\phi) - F_r \cdot \cos(\phi) \quad 2.40$$

$$F_z(\phi) = F_a \quad 2.41$$

Neste trabalho realizado por LIMA et al (2003) as forças de atrito foram consideradas através dos coeficientes obtidos de forma empírica.

DINIZ e NEVES (2003) realizaram uma análise sobre as forças nas operações de fresamento em uma superfície plana, utilizando ferramentas de ponta esférica. Um modelo matemático simplificado das forças atuantes na aresta de corte foi empregado, considerando o sentido concordante de usinagem, como ilustra a Figura 2.41.

Figura 2.41: Representação simplificada das forças de corte

Fonte: DINIZ, A. e NEVES, D. (2003)

A Figura 2.41(b) mostra um corte feito num plano paralelo ao de trabalho, no diâmetro efetivo. Nesta vista, notam-se as componentes radial (F_R) e tangencial (F_T) atuando na aresta de corte da ferramenta. Neste modelo, a força de atrito F_a entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada foi considerada, e está representada como uma força que se opõe à rotação e, segundo os autores deste trabalho, o erro desta aproximação não é representativo. A força instantânea F_Y no sentido concordante, obtida pelo dinamômetro, é a soma das projeções sobre o eixo Y das componentes radial, tangencial mais a força de atrito. A força de atrito pode ser determinada em função da força radial e do coeficiente de atrito μ (DINIZ e NEVES, 2003). Portanto a força F_Y pode ser expressa pela equação a seguir:

$$F_y = -F_t \sin \phi - F_r (\cos \phi + \mu \sin \phi) \quad 2.42$$

Considerando a força de avanço para a obtenção da componente F_x , a mesma análise pode ser feita:

$$F_x = -F_t \cos \phi + F_r (\sin \phi + \mu \cos \phi) \quad 2.43$$

Entretanto, DINIZ e NEVES (2003) consideraram apenas a força de atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta de corte. Segundo BLACK (1989), esta componente da força de atrito não é representativa, frente ao atrito causado pela superfície de saída da ferramenta e o cavaco. Outro fato observado é que embora tenha sido considerada nesta análise, uma ferramenta de ponta esférica, com a

aproximação realizada pelos autores para definir o ponto de contato da ferramenta com a peça, o modelo passa a ter características de uma fresa de topo reto, reduzindo-se apenas o diâmetro nominal da ferramenta.

Na literatura pesquisada sobre o estudo da força de usinagem no fresamento, observam-se simplificações nos modelos propostos. Em geral, estas simplificações podem ocorrer quanto às características intrínsecas do processo, e/ou quanto ao próprio processo de usinagem. Em operações de fresamento são atribuídas simplificações geométricas na ferramenta de corte além de manter sempre constante a interface entre o par ferramenta/peça. Observam-se poucos trabalhos envolvendo forças de corte, para operações de fresamento com ferramentas de ponta esférica.

Para o caso de uma ferramenta com múltiplas arestas de corte, ponta esférica e ângulo de hélice as condições de entrada e saída das arestas no processo de corte, requerem expressões de força que considerem os diferentes pontos de contato de cada aresta, e sua posição no momento do corte, o que torna o estudo mais complexo. Com a velocidade de corte e o diâmetro efetivo da ferramenta variando ao longo da aresta, a força de corte e todos os outros parâmetros tecnológicos variam por consequência. Portanto, a análise das forças de corte se distinguem drasticamente entre operações de fresamento com ferramentas de topo ou faceamento, onde as forças ocorrem na periferia cilíndrica da ferramenta e operações de fresamento com ferramentas de pontas esféricas, onde as variações das forças estão relacionadas com a posição e contato da aresta de corte.

Um modelo matemático que possa representar o processo de usinagem de formas complexas considerando as condições reais de trabalho, embora seja de vital necessidade, ainda é uma meta que exigirá bastante esforço.

2.7.3 Considerações sobre o cavaco gerado durante o fresamento

As características físicas dos cavacos gerados durante as operações de usinagem, sua forma, volume e cor refletem diretamente nas características do processo de usinagem que os gerou, como apresentado por diversas fontes (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO e SILVA, 1999; KRONENBERG, 1966). Pequenas modificações observadas nos cavacos podem refletir a qualidade superficial gerada pela usinagem, assim como alterações na vida da ferramenta de corte e desvio dimensional. Este fato tem maior ênfase quando se trabalha em altas velocidades de usinagem, onde pequenas distorções do cavaco ideal tem maior relevância na estabilidade do processo, devido às altas velocidades de corte. Nos estudos realizados NING et al (2001), verificou-se o comportamento da usinagem em alta velocidade através dos cavacos gerados durante os experimentos. Utilizou-se material endurecido (H13 – 55 HRC) empregando uma ferramenta de ponta esférica para a usinagem. Entretanto, este estudo foi realizado apenas para usinagem planar, considerando o eixo da ferramenta de corte perpendicular a superfície usinada. Entre os resultados, o autor apresentou diferentes formas de cavaco, que estão relacionadas à estabilidade da usinagem. A Figura 2.42a apresenta a foto de um cavaco gerado por uma usinagem considerada estável pelo autor, devido à qualidade superficial obtida. O cavaco é enrolado possuindo forma próxima a um cone. A Figura 2.42b apresenta um esboço de atuação da ferramenta durante o corte estável.

Fig. a: Cavaco cônico

Fig. b: Processo de corte estável

Figura 2.42: Características de um processo de usinagem estável

Fonte: NING, Y.; RAHMAN, M.; WONG, Y.S. (2001).

Atribuindo parâmetros de corte mais severos, o autor obteve um processo de corte considerado não-estável, resultando em uma qualidade superficial de baixa qualidade e alterações no mecanismo de geração dos cavacos. Nesta condição de usinagem verificaram-se acentuadas vibrações auto-excitadas (vibrações tipo *chatter*), repercutindo na forma do cavaco, como ilustrado pela Figura 2.43a. O cavaco é do tipo agulha, proveniente da vibração da ferramenta (e/ou da peça) durante a atuação de uma aresta de corte (Figura 2.43). Neste caso, mais de um cavaco é gerado durante a atuação de cada aresta. Este fato ocorre devido às oscilações entre a ferramenta e a peça.

Fig. a: Cavaco agulha

Fig. b: Processo de corte não-estável

Figura 2.43: Características de um processo de usinagem não-estável

Fonte: NING, Y.; RAHMAN, M.; WONG, Y.S. (2001).

No corte estável, a atuação de cada aresta gera um único cavaco.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 Equipamentos utilizados

3.1.1 Máquina-ferramenta e acessórios

A parte experimental de usinagem em alta velocidade foi realizada em um centro de usinagem vertical HERMLE, modelo C800U (Figura 3.1a), com três eixos de movimentação, possuindo capacidade de deslocamento de 800 mm na direção X, 600 mm na direção Y, e 500 mm na direção Z. A potência fornecida pelo eixo-árvore é de 18 kW com a rotação máxima de 24.000 rpm. A máquina é equipada com o CNC Siemens 840D com alta capacidade de processamento, 1,8 MBytes de memória disponível para programas e possui um disco rígido de 40 GBytes, para armazenamento e execução de programas. O centro de usinagem possui *Pre-setter* para determinar o comprimento de ferramenta de corte (Figura 3.1b) e para referenciamento da matéria-prima na mesa da máquina (Figura 3.1c).

Figura 3.1: Principais equipamentos utilizados

Foi utilizado o sistema hidro-mecânico CoroGrip SANDVIK (Figura 3.2), para fixar a ferramenta de corte.

Figura 3.2: Sistemas de fixação de ferramentas

3.1.2 Dinamômetro

Para a aquisição das forças decorrentes do processo de usinagem, foi utilizado um dinamômetro KISTLER, modelo 9272, ilustrado na Figura 3.3a. Foi utilizado o amplificador de carga multicanal modelo 5019 também fornecido pela KISTLER (Figura 3.3b), que permite o ajuste de parâmetros individuais para cada um dos quatro canais disponíveis, trabalhando com uma faixa de tensão para os sinais de -10 a +10 Volts.

Fig. a

Fig. b

Figura 3.3: Dinamômetro utilizado

3.1.3 Software

Para a geração dos programas NC e modelamento dos corpos de prova necessários para o desenvolvimento deste projeto, foram utilizados dois sistemas CAD/CAM de grande porte, disponíveis no Lab. OPF; o Unigraphics NX Versão 1.0.0.21, e os softwares Powershape Versão 4.232 e Powermill Versão 4.003. A geração do pós-processador utilizado foi realizada com o software POST-BUILDER Versão 2.0.1, desenvolvido pela EDS.

Para a aquisição das variáveis de resposta provenientes do CNC e do dinamômetro, foi elaborado um programa de aquisição de sinais utilizando o software Labview Versão 6.0. O aplicativo Excel foi utilizado para o tratamento dos dados obtidos e geração de resultados gráficos.

3.1.4 Hardware

Os softwares CAD/CAM foram instalados em uma estação de trabalho Silicon Graphics, modelo SGI 230, com alta capacidade gráfica e de cálculo, disponível no Lab. OPF. Os outros aplicativos de software foram instalados em PCs convencionais, tecnologicamente atualizados. Para realizar a comunicação com o CNC de forma eficiente, foi adquirida uma placa de comunicação CP 5611, desenvolvida pela Siemens (Figura 3.4).

Figura 3.4: Placa de comunicação CP 5611

Esta placa é equipada com protocolo *ProfiBus/MPI* permitindo taxas de comunicação de até 12M *Baud*; foi instalada em um PC pela interface PCI 32 bits e conectada ao CNC. Este sistema de aquisição possibilitou a aquisição de variáveis de máquina, tais como posicionamento, aceleração, velocidade dos eixos, entre outras.

3.1.5 Equipamentos de inspeção

A qualidade superficial das análises foi obtida por um rugosímetro portátil Taylor-Hobson, modelo Surtronic 3P. As análises de desvio de forma foram realizadas na escola SENAI de São Carlos e na Universidade Metodista de Piracicaba, utilizando respectivamente a máquina de medir por coordenadas Mitutoyo Bright – modelo BRT – M 507 e a máquina Starret modelo Varguard Plus. Um microscópio ótico Axiotech da Zeiss, equipado com câmera digital colorida AxioCam MRc, disponível no Lab. OPF foi utilizado para verificar a qualidade superficial dos corpos de prova. Os cavacos foram fotografados em um microscópio eletrônico de varredura modelo Stereocan 440 fabricado pela Leica.

3.2 Descrição e planejamento dos experimentos

A seguir estão detalhados os três experimentos propostos inicialmente.

3.2.1 Influência do programa NC na velocidade de avanço em usinagens complexas

3.2.1.1 Análise preliminar

Inicialmente, utilizou-se uma geometria simples para o corpo de prova com a finalidade de verificar a influência dos programas NC gerados tradicionalmente por sistemas CAM na velocidade de avanço (v_f). O corpo de prova elaborado contém três formas semicirculares com raio de 20 mm e profundidade de 5 mm (Figura 3.5), possuindo 300 mm de comprimento, 120 mm de largura e 70 mm de altura, fabricado em aço AISI P20 com dureza de 30 HRc. Foram analisadas as operações de acabamento, com as trajetórias executadas no plano horizontal, perpendicular ao eixo da ferramenta, como ilustrado na Figura 3.5. Como resposta foram obtidos gráficos do comportamento real da velocidade de avanço ao longo da usinagem de acabamento e observada a rugosidade superficial em cada caso.

Figura 3.5: Geometria do corpo de prova utilizado para as análises preliminares

Observaram-se vibrações na máquina quando esta executa trajetórias complexas com elevada velocidade de avanço programada (Apêndice 01). Com isso, para um dos semicírculos, decidiu-se reduzir a velocidade de avanço, utilizando-se um valor no qual o efeito desaparece, mantendo o avanço constante. Este valor foi definido experimentalmente. Com isso, foram utilizados dois valores diferentes de v_f . Desta forma, foram definidos dois níveis de velocidade no programa NC, usando-se a interpolação linear (G1). Estes resultados foram comparados também com a usinagem de um semicírculo utilizando a interpolação circular (G02), empregando o maior valor de v_f . Neste experimento o corpo de prova foi desbastado previamente para se obter as geometrias circulares, conforme os dados da Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros atribuídos ao desbaste

Velocidades	Ferramenta	Sobre metal	a_e	a_p	Estratégia
$v_f = 1000 \text{ mm/min}$ $v_c = 188 \text{ m/min}$	Fresa de topo plana 20mm, 8 arestas - Sandvik R216.32-20030-ac32n 1020	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	Passe em Offset

Para a usinagem de acabamento do semicírculo 1 foi gerado um programa NC através do software CAM, utilizando a interpolação linear, o qual resultou em aproximadamente 3300 linhas de programa. Para o semicírculo 2 do corpo de prova foi utilizado um programa contendo apenas interpolação circular, com comando G02. Isto propiciou uma redução significativa do número de linhas necessárias para realizar a trajetória circular (apenas 4 linhas). Neste dois casos foi empregado o valor mais elevado da velocidade de avanço.

O semicírculo 3 foi usinado com o mesmo programa NC utilizado no caso 1, reduzindo apenas a velocidade de avanço para um valor máximo, onde o CNC mantivesse constante. A rotação da ferramenta foi reduzida também, visando manter o mesmo avanço por dente. Os parâmetros para a usinagem de acabamento dos três casos estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros de processo atribuídos ao acabamento

Velocidades	$v_f = 3500 \text{ mm/min}$ $vc = 585 \text{ m/min}$	$v_f = 3500 \text{ mm/min}$ $vc = 585 \text{ m/min}$	$v_f = 1000 \text{ mm/min}$ $vc = 180 \text{ m/min}$
Nível	Comando G01 Interpolação linear	Comando G02 Interpolação circular	Comando G01 Interpolação linear
Semicírculo	1	2	3
Ferramenta	Fresa de topo plana 20mm, 8 arestas Sandvik R216.32-20030-ac32n 1020		
Sobremetal (a_e)	0.2 mm		
a_p	3 mm		

Este estudo preliminar auxiliou a elaboração dos experimentos definitivos.

3.2.1.2 Análise definitiva

Aprofundando-se a análise do comportamento da velocidade de avanço na usinagem de formas complexas, decidiu-se por elaborar um corpo de prova mais completo, com a intenção de se avaliar a fabricação de moldes e matrizes. O corpo de prova é composto por formas geométricas definidas (retas e semicírculos), e formas complexas (curvas *Spline*). Todas as formas conciliam entre sentido ascendente e descendente de corte, em áreas côncavas e convexas (Figura 3.6).

Figura 3.6: Perfil do corpo de prova utilizado para o experimento

Em função da qualidade superficial observada visualmente, foram selecionadas as áreas mais representativas para esta análise, e estão demarcadas na Figura 3.6 (áreas de 1 à 4). Foi obtido o parâmetro R_a , e uma análise visual da textura superficial após a usinagem foi realizada, utilizando-se uma câmera CCD acoplada ao microscópio ótico Axiotech.

Embora possua um perfil plano, o corpo de prova foi posicionado na mesa do centro de usinagem a 45° de rotação, em torno do eixo vertical Z. Desta maneira, mesmo a ferramenta seguindo uma trajetória longitudinal ao corpo, a máquina deve movimentar os três eixos, enfatizando desta maneira, as características de interpolação do centro de usinagem. O material do corpo de prova possui 300 mm comprimento, 120 mm de largura e 70 mm de altura, fabricado em aço AISI P20 com dureza de 30 HRc.

Neste estudo, diferentes metodologias para descrever as trajetórias de ferramenta foram analisadas, dentre estas: A interpolação linear de segmento de retas (comando G01), interpolação circular/linear (comando G01 associados a comandos G02/03), e funções *Spline* para descrever as trajetórias da ferramenta (sintaxe específica). O corpo de prova foi dividido em três áreas transversais (denominadas de **A**, **B**, **C**); cada qual utilizada para uma análise de usinagem. A Figura 3.7 ilustra as trajetórias de ferramenta calculadas pelo software CAM para a usinagem da área transversal **A**; as superfícies de referência; e a disposição entre as coordenadas do dinamômetro e o corpo de prova.

Figura 3.7: Trajetórias de ferramenta e disposição do corpo de prova

Como variáveis de resposta, foram obtidos gráficos da velocidade de avanço e do sentido das componentes da força de usinagem contra a posição da ferramenta ao longo da usinagem, além da rugosidade superficial e do desvio de forma. Apenas os sentidos das componentes da força de usinagem foram tomados, devido à baixa frequência de aquisição dos sinais de força, por limitações da placa de comunicação CP-5611 usada para a aquisição da posição da ferramenta durante a usinagem. Desta forma, os valores de força são apenas indicativos e foram obtidos a fim de enriquecer o estudo.

Considerando que interpolações circulares (G02, G03) sejam possíveis de se realizar apenas em situações planares de movimentação, neste caso, embora exigisse a movimentação tridimensional, foi possível a execução dos programas contendo interpolações circular/linear, pois as trajetórias de usinagem definidas constituem-se em passes paralelos e estão em um plano a 45° da mesa da máquina. Através de um recurso disponível no CNC, que possibilita a rotação do plano de trabalho, tornou-se viável a execução destes programas contendo interpolações circulares. Os dados de desbaste do corpo de prova estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Parâmetros atribuídos ao desbaste

Velocidades	Ferramenta	Sobre metal	a_e	a_p	Estratégia
$v_f = 1600$ mm/min $v_c = 300$ m/min	Fer. de topo plana 12mm, 2 arestas – Sandvik R216.32-20030-ac32n 1020	0,2 mm	0,5 mm	0,2 mm	Passe em <i>Offset</i>

Foi feito também um pré-acabamento rigoroso para deixar o corpo de prova próximo à forma geométrica final, permanecendo um sobremetal uniforme. Os parâmetros utilizado no pré-acabamento estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros atribuídos ao pré-acabamento

Velocidades	Ferramenta	Sobre metal	a_e	a_p	Estratégia
$v_f = 1600$ mm/min $v_c = 300$ m/min	Fer. esférica, 6 mm, 2 arestas Sandvik R216.42-06030- AK07H 1610	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	Passe em paralelo (<i>raster</i>)

Durante as etapas iniciais, verificou-se experimentalmente que a rotação de 21.000 RPM do eixo árvore propiciou melhor resultado de qualidade superficial. Desta maneira, os experimentos definitivos foram executados com esta frequência de rotação. As usinagens foram realizadas apenas no sentido concordante. Os dados de corte estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Parâmetros de processo atribuídos ao acabamento

Velocidades		$v_f = 4500$ mm/min $v_{c\max} = 395$ m/min	
Nível	Comando G01 Interpolação linear	Comando G01/G02 Interpolação cir./linear	Comando <i>SPLINE</i>
Área do corpo de prova	A	B	C
Ferramenta	Esférica, 6 mm, 2 arestas Sandvik: R216.42-06030-AK07H 1610		
Sobremetal (a_p)	0.2 mm		
a_e	0.2 mm		

Os programas utilizando os três métodos para descrever as trajetórias de ferramenta foram gerados pelo sistema CAD/CAM, utilizando a tolerância de cálculo final de 0,005 mm para todos os casos. Para a geração de programas NC contendo funções *Spline*, de acordo com a sintaxe necessária para a execução no CNC Siemens 840D, desenvolveu-se um pós-processador específico (item 3.3.3).

3.2.2 Análise da flexão da ferramenta de corte devido à variação do sobremetal deixado para a usinagem de acabamento

Este experimento analisa a influência dos volumes inconstantes de material remanescente após a operação de desbaste, para a usinagem posterior de acabamento, em função da inclinação da superfície. Foram analisados o desvio de forma da peça usinada e a qualidade superficial. O corpo de prova desenvolvido está ilustrado na Figura 3.8. As regiões (**a**, **b** e **c**) possuem 75°, 45° e 7° de inclinação, respectivamente, em relação ao eixo horizontal Y. As faces planas das regiões possuem 25 mm de comprimento.

Figura 3.8: Geometria do corpo de prova utilizado para o Estudo B

Foi utilizado um bloco de matéria-prima, possuindo 80 mm x 50 mm x 50 mm, com suas faces previamente retificadas. O corpo de provas foi desbastado utilizando a usinagem em 2½ eixos, e os parâmetros estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Parâmetros de processo utilizados no desbaste

Velocidades	Ferramenta	a_e	a_p	Estratégia	Sobremetal teórico
$v_f = 1000 \text{ mm/min}$ $v_c = 188 \text{ m/min}$	Fresa de topo plana 20mm, 8 arestas – Sandvik R216.32-20030-ac32n 1020	3 mm	0,5 mm	Passe em Offset	0,2 mm

Com estas características do processo de desbaste, objetivou-se obter regiões do corpo de prova com sobremetal conhecido e distinto entre as áreas, como ilustra a Figura 3.9.

Figura 3.9: Regiões do corpo de prova após o desbaste

Para as operações de acabamento, foram utilizadas duas fresas de topo de ponta esférica com diâmetros de 6mm e 12mm, fixas pelo porta-ferramentas com diferentes comprimentos de balanços (comprimento fora do sistema de fixação). Os dados de processo estão apresentados pela Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Parâmetros de processo utilizados no acabamento

Velocidades	$v_f = 1600 \text{ mm/min}$ $v_{c \text{ max}} = 188 \text{ m/min}$	$v_f = 1600 \text{ mm/min}$ $v_{c \text{ max}} = 376 \text{ m/min}$
Nível	Comprimento de balanço 45 mm	Comprimento de balanço 75 mm
Ferramenta	Esférica, 6 mm, 2 arestas, Sandvik: R216.42-06030-AK07H 1610	Esférica, 12 mm, 2 arestas Sandvik R216.42-06030-AK07H 1020
a_e	0,2 mm	0,2 mm
Sobremetal teórico (a_p)	0,2 mm	0,2 mm

A Figura 3.10 ilustra a posição da peça em relação ao dinamômetro. Os passes de usinagem foram realizados no sentido transversal ao corpo de prova no sentido ascendente com corte concordante.

Figura 3.10: Posição do corpo de prova B em relação ao dinamômetro

Utilizando-se um sistema CAD, foram simuladas as características geométricas do material remanescente após o desbaste, em função do ângulo de inclinação da superfície, além do contato ferramenta/peça.

3.2.3 Estudo simplificado da força de usinagem em formas complexas

Muitos trabalhos sobre força de usinagem em superfícies planas, empregando ferramentas de topo plana, podem ser encontrados na literatura. Entretanto, o conhecimento sobre a força de usinagem em superfícies de forma complexa utilizando ferramentas de ponta esférica, ainda requer um foco de atenção. Neste estudo é analisada a força de usinagem em superfícies não planas, utilizando uma ferramenta de ponta esférica.

Foram avaliadas as componentes da força de usinagem e a rugosidade superficial em função do diâmetro efetivo de corte utilizando-se de uma ferramenta de ponta esférica. O corpo de prova definido para este experimento é formado por uma superfície semicircular de raio 27 mm, utilizando $\frac{1}{4}$ de uma forma cilíndrica.

Foi estudado a operação final de acabamento, empregando-se o sentido descendente de usinagem e transversal à seção circular, utilizando corte concordante. Para simplificar a análise das componentes da força de usinagem, utilizou-se uma ferramenta de ponta esférica, com 16 mm de diâmetro sem ângulo de hélice. A Figura 3.11 ilustra o corpo de prova; o esboço das trajetórias da ferramenta na usinagem de acabamento; e a disposição do sistema de coordenadas do dinamômetro em relação ao corpo de prova.

Figura 3.11: Corpo de prova utilizado e esboço das trajetórias de usinagem

Para se obter esta geometria, o corpo de provas foi desbastado partindo de um bloco de matéria-prima (150mm x 100mm x 90mm), empregando os parâmetros apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Parâmetros de processo utilizados no desbaste

Rotação	Ferramenta	a_e	a_p	Estratégia	Avanço
2.650 RPM	Esférica 12 mm	0,5 mm	0,5 mm	Passes horizontais	425 mm/min

Utilizou-se também uma operação de pré-acabamento, conforme os parâmetros apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Parâmetros de processo utilizados no pré-acabamento

Rotação	Ferramenta	a_e	a_p	Estratégia	Avanço
4.100 RPM	Esférica 12 mm	0,2 mm	0,2 mm	Passes horizontais	738 mm/min

Para que as oscilações da velocidade de avanço não influenciassem nos resultados, os programas NC foram gerados com comandos de interpolação

circular, com apenas uma linha de programa para descrever cada trajetória descendente de usinagem, permitindo assim, que o avanço programado se mantivesse constante. Os parâmetros do processo utilizados nas operações de acabamento, estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Parâmetros de processo utilizados no acabamento

Nível	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Vc	220 m/min	275 m/min	330 m/min	440 m/min
Rotação	4380 RPM	5471 RPM	6565 RPM	8753 RPM
Vel. Avanço	1000 mm/min	1200 mm/min	1444 mm/min	1925 mm/min
Avanço/aresta	0,1 mm			
ap	0,8 mm			
ae	0,3 mm			
Ferramenta	Fresa de topo esférica - 16 mm, Walter: A550.Z16.08.064			

Para realizar uma análise comparativa entre as diferentes condições de usinagem, obteve-se o vetor força de usinagem (F_u), pela Equação 3.1 (LIMA et al 2003):

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

3.1

Foram também observadas as componentes cartesianas da força de usinagem. Três posições do corpo de prova foram definidas para realizar a análise, conforme mostra a Tabela 3.11. Estas posições foram escolhidas, pois são significativas para a análise, representando os casos extremos de início e fim da usinagem, além da situação intermediária.

Tabela 3.11: Regiões utilizadas para análise

Região	Posição angular no corpo de prova
A – Início da usinagem	85° da linha horizontal
B – Posição intermediária	45° da linha horizontal
C – Final da usinagem	5° da linha horizontal

Realizaram-se simulações gráficas com o CAD para verificar as características do contato ferramenta/peça para acrescentar a este estudo de usinagem. O diâmetro efetivo de corte, quando se utiliza uma ferramenta de ponta esférica é definido segundo a literatura pesquisada, apenas para usinagens planas, onde o eixo longitudinal da ferramenta de corte se mantém perpendicular à superfície usinada. Neste trabalho determinou-se matematicamente o diâmetro efetivo de corte em seu valor máximo e mínimo, em função da posição da ferramenta de corte na superfície usinada.

3.3 Métodos para a obtenção de dados e execução dos experimentos

3.3.1 Aquisição da posição da ferramenta e da velocidade de avanço instantânea

Para estudar o comportamento da velocidade de avanço em superfícies complexas, foi desenvolvido um sistema de aquisição das velocidades individuais de cada eixo da máquina CNC, em função de sua posição cartesiana no espaço, durante a realização da usinagem. As informações de posicionamento dos eixos da máquina e suas respectivas velocidades de movimentação são armazenadas em variáveis de sistema do CNC. Com estas informações pode-se obter a trajetória realizada pela ferramenta e a velocidade de deslocamento em qualquer ponto do percurso.

Inicialmente, utilizou-se a conexão Ethernet com a máquina CNC (na Interface Homem-Máquina-MMC), empregando o protocolo NetDDE (conexão em azul ilustrada na Figura 3.12). O número de pontos obtidos não foi suficiente para visualizar, de forma confiável, o comportamento do processo, devido à baixa velocidade de aquisição desta comunicação. O método mais eficiente encontrado para a aquisição das velocidades de avanço utiliza uma placa de comunicação ProfiBus RS 485, conectada diretamente no CNC da máquina (conexão em vermelho). A velocidade de aquisição por este método, cerca de 80 Hz, foi suficiente para aquisição de dados relativos à posição e velocidade de avanço. A

taxa de aquisição via Ethernet está em torno de 35 Hz. Uma comparação mais detalhada entre os métodos Ethernet e ProfiBus para aquisição de sinais encontra-se em Apêndice 02.

Figura 3.12: Comunicação com o CNC via Ethernet e ProfiBus

Os dados provenientes dos experimentos foram obtidos por duas rotinas de aquisição criadas com o software Labview. Uma rotina realiza a aquisição, em tempo real, da posição da máquina durante a usinagem e sua respectiva velocidade de avanço; enquanto a outra rotina realiza a aquisição das componentes da força de usinagem em função da posição. Os diagramas das rotinas utilizadas encontram-se no Apêndice 03.

3.3.2 Aquisição das componentes da força de usinagem

O software Labview também foi utilizado para gerenciar os sinais coletados em Volts provenientes do amplificador do dinamômetro. Desta forma, o equipamento utilizado permitiu a aquisição das componentes da força de usinagem, a uma frequência de 80.000 Hz (apenas para a aquisição das forças). Os parâmetros

utilizados no amplificador para a aquisição das forças foram definidos individualmente para cada direção, durante as etapas preliminares.

Com a colaboração de um especialista, projetou-se um filtro para tratamentos dos sinais de força obtidos pelo dinamômetro, com a finalidade de eliminar a influência da vibração livre do corpo de prova/dinamômetro nos dados de força obtidos pelo dinamômetro. Foi empregado o filtro Chebyshev tipo II, de oitava ordem, com *stop band ripple* 40 db e *stop band* 600 Hz (passa baixa). Mais informações deste trabalho encontra-se em Apêndice 04.

A fim de se determinar os valores médios das componentes da força de usinagem (Média Fx, Média Fy, Média Fz), foi desenvolvida uma rotina em *Visual Basic* para sincronizar a aquisição de cada componente de força em função da posição da ferramenta ao decorrer da usinagem. Desta forma, foram obtidos seus valores médios em uma amostra de três passes consecutivos de usinagem, como exemplifica a Figura 3.13, para o caso da força na direção Z.

Figura 3.13: Gráfico da componente Fz da força de usinagem

Após cada experimento os valores numéricos da velocidade de avanço de cada eixo, a posição cartesiana de movimentação da máquina (direções XYZ), e a força de usinagem (FX, FY, FZ) foram exportadas do programa Labview para o software

Excel. Todos os dados obtidos foram formatados em colunas, como apresentado na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Formatação elaborada para tratamento das variáveis de resposta

Posição da máquina			Velocidade de movimentação				Força de usinagem		
Coluna A	Coluna B	Coluna C	Coluna D	Coluna E	Coluna F	Coluna G	Coluna H	Coluna I	Coluna J
Posição do eixo X	Posição do eixo Y	Posição do eixo Z	Velocid. direção X	Velocid. direção Y	Velocid. direção Z	Velocid. resultante	Força FX	Força FY	Força FZ

O vetor velocidade de avanço resultante (v_f) foi obtido através Equação 3.2, o qual representa a velocidade instantânea em cada ponto da trajetória:

$$v_f = \sqrt{v_{fx}^2 + v_{fy}^2 + v_{fz}^2} \quad 3.2$$

Da mesma forma, o perfil da peça foi encontrado somando-se, vetorialmente, cada componente de posição (P) correspondente, conforme a Equação 3.3.

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} \quad 3.3$$

Com a taxa de aquisição definida em 80.000 pontos por segundo e, obtendo o número de pontos adquiridos entre os picos de força, pôde-se identificar a frequência de atuação das arestas de corte.

3.3.3 Desenvolvimento do pós-processador dos programas NC contendo funções Spline

Para programas NC utilizando funções polinomiais *Spline*, não existe até o momento uma padronização entre os fornecedores de CNC. Existem diferentes possibilidades de interpretação, envolvendo o formato de programa e o grau de polinômio. Isto requer um pós-processador específico para cada CNC capaz de interpretar programas NC contendo trajetórias de ferramentas descritas por uma equação *Spline*. Inicialmente, neste trabalho utilizou-se um pós-processador para a

geração de programas NC contendo funções *Spline*, fornecido juntamente com o sistema CAD/CAM Unigraphics. Observaram-se desvios na trajetória da ferramenta.

Com isso, foi necessário gerar um pós-processador para o comando Siemens 840D, com a finalidade de interpretar comandos de movimentação utilizando-se de equações *Spline*, gerados pelo software CAM Unigraphics. O fluxograma da Figura 3.14 ilustra as etapas executadas dentro de um pós-processador, para processar dados gerados pelo CAM e convertê-los em um programa NC específico para uma dada configuração máquina/CNC.

Figura 3.14: Ciclo de desenvolvimento de pós-processador

As etapas do ciclo de pós-processamento estão descritas a seguir:

♦ *Event Generator*. É o mecanismo que extrai do sistema CAM as informações das trajetórias de ferramenta e as outras informações que deverão estar contidas no programa NC, gerando eventos e variáveis. Os eventos são conjuntos de dados gerados nesta etapa, que poderão causar uma ação específica em uma dada arquitetura de máquina/CNC.

♦ *Event Handler*: São programas contendo procedimentos que determinam o que deverá ser processado em cada evento. Cada procedimento determinará se haverá ou não dados de saída, e a formatação específica destes dados. Esta formatação, que envolve as características da máquina/CNC a ser utilizada, está definida no *Definition File*.

♦ *Definition file*: É um arquivo que contém informações específicas sobre a configuração do conjunto máquina/CNC a ser utilizado.

As etapas *Event Handler* e *Definition file* são criadas pelo software POST-BUILDER utilizando códigos de programação em linguagem tcl (Tool Command Language), possuindo interface para programação. Para a criação ou alteração de pós-processadores específicos estas etapas devem ser alteradas.

O software CAD/CAM Unigraphics utilizado nestes experimentos possibilitou o cálculo de programas NC contendo trajetórias de ferramentas descritas por equações polinomiais tipo *Spline*. No entanto, foi necessário criar um pós-processador capaz de gerar programas NC que contenham estas equações e que possam ser interpretados pelo comando utilizado (Siemens 840D). Para exemplificar o ciclo de pós-processamento utilizando uma equação polinomial *Spline*, foi gerado como exemplo um programa NC. Através de uma ferramenta de software para revisão do ciclo (*debug*), foi possível visualizar o procedimento de pós-processamento. A Figura 3.15 demonstra esta ferramenta para revisão.

Figura 3.15: Debug do ciclo de pós-processamento

A coluna da esquerda mostra todos os eventos criados em ordem seqüencial. Selecionando um evento nesta coluna, serão destacados os códigos de saída correspondentes ao evento, observados na coluna da direita. A coluna do centro mostra as variáveis e os endereços associados com um evento particular. A Figura 3.16 ilustra parte do programa NC gerado neste processo, com algumas adaptações realizadas.

```

=====
Information listing created by : Adriano Fagali
Date : 11/27/2003
Current work part : E:\CDP_UGS\Exemplo
Node name : opf18
=====
N0010 #####
N0020 (Adriano Fagali de Souza)
N0030 #####
N0040 Trajetória Polinomial
N0050 (## PTP file size = 217 bytes .8 feet##)
N0060 G64
N0070 T00
N0080 M06
N0090 G0 X222.5 Y-100. S6660 M03
N0100 G6.2 P04 K0.0 X215.1797 Y-100. Z8.7947
N0110 K0.0 X213.4142 Z14.3877
N0120 K0.0 X211.9031 Z19.5217
N0130 K0.0 X209.1413 Z25.3937
N0140 K.2624 X206.026 Z25.5524
N0150 K.292 X201.5578 Z20.124
N0160 K.3209 X199.2231 Z12.0233
N0180 K.348 X189.8242 Z7.4582
N0190 K.6541 X190.9945 Z23.8869
N0200 K.6794 X183.8681 Z20.5811
N0210 K.9116 X182.5386 Z19.3482

```

Figura 3.16: Programa NC para interpolação polinomial Spline

Neste caso, para ativar o comando polinomial, o CNC requer a sintaxe G6.2. O programa NC deverá possuir equações polinomiais de quarto grau, e os parâmetros do polinômio também são necessários. Esta metodologia foi empregada para desenvolver o pós-processador utilizado neste trabalho. Nos programas NC gerados foram utilizados os comandos disponíveis no CNC Siemens 840D para a usinagem em alta velocidade.

3.3.4 Execução dos experimentos de usinagem

Uma vez definidos todos os parâmetros de usinagem, estes dados foram atribuídos ao software CAM para cálculo das trajetórias de ferramenta. Após este cálculo, o específico pós-processador desenvolvido neste projeto foi utilizado para gerar os respectivos programas NC; que posteriormente, foram transferidos para a máquina CNC para a realização da usinagem.

A máquina CNC possui uma placa de comunicação padrão *Ethernet*, que foi utilizada para realizar a transferência de programas entre a máquina e a estação de trabalho. Iniciava-se a rotina de aquisição de dados desenvolvida com o software Labview antes de iniciar a execução de cada programa NC. Ao final da usinagem, a rotina era interrompida para finalizar a aquisição, gerando arquivos em formato ASCII, que foram trabalhados posteriormente no aplicativo Excel.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Influência do programa NC na velocidade de avanço em usinagens complexas

4.1.1 Análise preliminar

O corpo de provas usinado neste experimento está ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1: Corpo de prova usinado

Utilizando-se dos dados obtidos pelo sistema de aquisição, o gráfico da Figura 4.2 mostra a trajetória da ferramenta e o comportamento da velocidade de avanço na usinagem do semicírculo 1.

Figura 4.2: Velocidade de avanço: Semicirculo 1 – Interpolação linear; v_f 3500 mm/min

Observa-se que a velocidade de avanço sofreu grandes oscilações, atingindo em apenas alguns instantes o valor programado (3.500 mm/min), ocorrendo vibrações na máquina. A Figura 4.3 mostra o mesmo experimento, porém agora utilizando a interpolação circular, comando G02.

Figura 4.3: Velocidade de avanço: Semicirculo 2 – Interpolação circular; v_f 3500 mm/min

Neste caso a velocidade de avanço se manteve constante durante a usinagem, em 3.500 mm/min.

Estes experimentos indicam que a velocidade de avanço é reduzida pelo CNC no caso de interpolações lineares. Isso pode ser atribuído, em parte, ao grande volume de informações que o CNC deve processar (muitas linhas de programa). Com o programa contendo comandos G01, observou-se empiricamente, que 1.000 mm/min é a máxima velocidade de avanço que a máquina consegue executar este programa, mantendo o avanço constante, sem ocorrer vibrações na estrutura, como demonstra o gráfico da Figura 4.4.

Figura 4.4: Velocidade de avanço: Semicírculo 3 – Interpolação linear; v_f 1000 mm/min

A velocidade de avanço média obtida nestes experimentos de usinagem estão apresentadas na Tabela 4.1. No caso do semicírculo 1, observa-se uma redução de 43,5% da velocidade de avanço programada.

Tabela 4.1: Velocidades médias em cada semicírculo.

Análise	Avanço programado	Interpolação	Avanço médio
Semicírculo 1	3.500 mm/min	Linear	$\cong 1.978$ mm/min
Semicírculo 2	3.500 mm/min	Circular	$\cong 3.500$ mm/min
Semicírculo 3	1000 mm/min	Linear	$\cong 1000$ mm/min

Realizou-se a análise da rugosidade na direção do avanço (conforme Figura 3.5), utilizou-se o rugosímetro portátil, obtendo-se o parâmetro R_a (μm). Os valores de rugosidade obtidos estão apresentados na Tabela 4.2, e correspondem a média aritmética de cinco amostras.

Tabela 4.2: Parâmetros de rugosidade R_a

Semicírculo	1	2	3
Média R_a [μm]	1,92	1,01	1,39
Desvio-Padrão	0,01	0,01	0,01
Inter. confiança de 95%	0,03	0,03	0,05

Os valores mais elevados de R_a foram obtidos no primeiro semicírculo (comandos G01); enquanto os menores valores foram obtidos com o segundo semicírculo (comandos G02).

4.1.2 Análise definitiva

A Figura 4.5 mostra o copo de prova usado para aprofundar o estudo Influência dos programas NC na velocidade de avanço em usinagem de superfícies complexas.

Figura 4.5: Corpo de prova usinado

4.1.2.1 Análise da velocidade de avanço

Os gráficos apresentados nas Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8, demonstram a trajetória da ferramenta e o comportamento da velocidade de avanço na usinagem deste corpo de prova, utilizando os três métodos para representar trajetórias de

ferramenta. A tolerância de cálculo final no sistema CAM foi de 0,005 mm. A velocidade média em cada caso é utilizada para comparação. Empregando-se interpolação linear, a velocidade média de uma trajetória foi de 2.476mm/min (Figura 4.7).

Figura 4.6: Comportamento da usinagem utilizando a interpolação linear

Empregando-se funções polinomiais *Spline*, a velocidade média de uma trajetória foi de 2.604 mm/min (Figura 4.7).

Figura 4.7: Comportamento da usinagem utilizando equações polinomiais *Spline*

A velocidade média do programa contendo interpolações circular/linear foi de 2.502 mm/min (Figura 4.8).

Figura 4.8: Comportamento da usinagem utilizando a interpolações circular/linear

Observa-se que nos três casos a velocidade de avanço sofreu grandes oscilações, atingindo em apenas alguns instantes o valor programado. Nas regiões planas do corpo de prova, ascendente ou descendente, a velocidade de avanço programada foi obtida. Isto pode ser atribuído ao fato de que nestas regiões, apenas dois pontos cartesianos (duas linhas de programa) representam uma trajetória relativamente longa, não exigindo baixo tempo de processamento e resposta da máquina, e alta capacidade de aceleração.

4.1.2.2 Análise da qualidade superficial

A rugosidade superficial foi analisada na direção perpendicular ao sentido da velocidade de avanço. Foram obtidas cinco amostras de rugosidade em cada uma das quatro regiões selecionadas para esta análise (conforme Figura 3.6). Os valores médios das amostras, o desvio padrão e o intervalo de confiança estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Rugosidade obtida R_a (μm)

	Área 1			Área 2		
Método	Spline	Cir./Linear	Linear	Spline	Cir./Linear	Linear
Média R_a (μm)	0,952	0,966	0,970	1,184	1,236	1,546
Desv. Padrão	0,008	0,015	0,007	0,011	0,015	0,009
Int. confiança 95%	0,007	0,013	0,006	0,010	0,013	0,008

	Área 3			Área 4		
Método	Spline	Cir./Linear	Linear	Spline	Cir./Linear	Linear
Média R_a (μm)	0,868	0,802	0,964	1,008	1,002	1,268
Desv. Padrão	0,008	0,008	0,005	0,016	0,020	0,008
Int. confiança 95%	0,007	0,007	0,005	0,014	0,018	0,007

Não houve grande disparidade dos valores médios de R_a entre as trajetórias. Na maior parte dos casos, observou-se apenas uma pequena redução deste parâmetro quando utilizado o método Spline para descrever a trajetória da ferramenta. O método linear apresentou piores resultados de rugosidade. Nota-se também uma significativa diferença de rugosidade entre as diferentes regiões do corpo de prova, no mesmo estudo. Isto demonstra que a rugosidade superficial após a usinagem de formas complexas não é influenciada apenas pelos parâmetros de corte (a_e , a_p e f_z), mas está também relacionada com a posição de contato entre a ferramenta de corte e a superfície da peça. A análise visual da textura superficial após a usinagem está apresentada na Tabela 4.4. A usinagem foi realizada em passes paralelos. O sentido de avanço (v_f) corresponde ao sentido vertical e os passes radiais (a_e) correspondem ao sentido horizontal, como pode ser observado nas fotos.

Tabela 4.4: Textura superficial do corpo de prova

Área	Interpolação linear	Interpolação circular/linear	Spline
área 1			
Rugosidade Média	Ra =0,970 V _f – Grandes oscilações	Ra =0,966 v _f - Constante	Ra =0,952 v _f – Constante
área 2			
Rugosidade Média	Ra =1,546 V _f – Grandes oscilações	Ra =1,236 V _f – Oscilações moderadas	Ra =1,184 V _f – Oscilações moderadas
área 3			
Rugosidade Média	Ra =0,964 V _f – Grandes oscilações	Ra =0,802 V _f – Grandes oscilações	Ra =0,868 V _f – Grandes oscilações
área 4			
Rugosidade Média	Ra =1,268 V _f – Grandes oscilações	Ra =1,002 V _f – Oscilações moderadas	Ra =1,008 V _f – Oscilações moderadas

Significativas diferenças de textura superficial podem ser observadas visualmente nos diferentes casos. Nas áreas 2 e 3 da interpolação linear houve uma significativa degradação da superfície. Devido ao padrão de rugosidade observado, esta qualidade superficial deteriorada não pode ser atribuída apenas ao método utilizado para geração das trajetórias da ferramenta. Este resultado pode estar relacionado a vibrações decorrentes do processo de fresamento. As marcas não uniformes nas cristas, deixadas ao longo da trajetória da ferramenta, principalmente observadas nas áreas 1 e 4 da interpolação linear e na área 3 para os outros dois casos, podem ser atribuídas às variações da velocidade de avanço, que ocorreram com diferentes intensidades, nos três casos estudados. Com isto, pode-se afirmar que o método *Spline* assim como o método circular/linear, embora apresentem melhores resultados, se comparados ao método tradicional (linear), ainda não são capazes de eliminar os problemas causados pelas oscilações de avanço. Estas oscilações conduzem à deterioração da qualidade superficial, como salienta a área 3.

Devido à grande oscilação da velocidade de avanço em cada uma das áreas analisadas, não foi possível relacionar a qualidade superficial de cada região com a respectiva velocidade de avanço.

4.1.2.3 Análise do desvio entre os três métodos de trajetória

O erro de forma da peça usinada por uma máquina CNC pode ser atribuído inicialmente a duas fontes: Máquina/CNC e processos (Figura 4.9).

Figura 4.9: Componentes do erro de forma de uma peça usinada por uma máquina CNC

A parcela do erro dimensional da peça usinada referente à máquina/CNC deve-se à sua rigidez; ao sistema de acionamento; à malha controle de posicionamento; e ao

algoritmo utilizado pelo CNC para interpolar trajetórias de ferramenta. O erro dimensional devido ao processo de usinagem envolve os parâmetros de corte; as características da ferramenta de corte e sua fixação; fixação da peça; dentre outras características de processo.

Este estudo foca-se nos métodos utilizados para representar as trajetórias de ferramenta. Com isso, foi avaliado o erro ocorrido entre as trajetórias, quando estas executadas pelo centro de usinagem. As trajetórias foram calculadas pelo CAM com desvio máximo de 0,005 mm. Entretanto, estas trajetórias podem sofrer desvios devido ao processo de interpolação do CNC, que é distinto para cada método. Foram obtidos do CNC, através da interface *Profibus*, os pontos descritos pela ferramenta durante as usinagens (Figura 4.10). Desta forma, verificaram-se os desvios entre elas.

Figura 4.10: Trajetórias obtidas do CNC durante a usinagem

Em alguns pontos da trajetória foram observados desvios acentuados do perfil original, como apresentado pela Figura 4.10. Estas diferenças são atribuídas ao algoritmo de interpolação do CNC para cada método, uma vez que as trajetórias calculadas pelo CAM encontram-se dentro da tolerância estipulada, de 0,005 mm. Nas demais regiões, as trajetórias se encontram dentro desta faixa de tolerância.

Em um experimento simples, detectaram-se desvios da ordem de 0,1 mm ao longo de uma trajetória linear, utilizando a interpolação dos eixos X e Y do centro de usinagem, como relata o Apêndice 05.

4.1.2.4 Análise da força de usinagem

Os valores das componentes F_x , F_y , F_z da força de usinagem foram obtidos com a finalidade de ampliar o conhecimento deste processo de usinagem. Estão apresentados nas Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13, os gráficos de comportamento das forças ao longo da usinagem, utilizando os três métodos de interpolação.

Figura 4.11: Força de usinagem - Programa interpolação linear

Figura 4.12: Força de usinagem - Programa interpolação circular/linear

Nos principais pontos de descontinuidade de trajetória e nos vales, observam-se picos de força (como ilustram as setas da Figura 4.13), provavelmente causados pela maior área de contato entre a ferramenta e a peça.

Figura 4.13: Força de usinagem - Programa Spline

A aplicação dos diferentes métodos utilizados para a definição das trajetórias não demonstrou uma influência direta na força de usinagem observada, uma vez que os parâmetros de corte (a_p , a_e , f_z) foram programados os mesmos, embora sofressem pequenas alterações em função do avanço.

Nota-se que as componentes da força de usinagem se alteram de direção em função da posição de contato ferramenta/peça e das características do corte, ascendente e descendente. Este fato pode implicar em diferentes desvios de forma, entre a peça usinada e o modelo CAD.

4.2 Análise da flexão da ferramenta de corte devido à variação do sobremetal deixado para a usinagem de acabamento

O corpo de prova usinado neste experimento está ilustrado na Figura 4.14.

Figura 4.14: Corpo de prova usinado

4.2.1 Estudo das características geométricas do processo

Nas operações de acabamento, a forma de contato da ferramenta/peça sofreu grandes variações em função das características do processo. Considerando o corpo de prova, a Figura 4.15 demonstra o contato da ferramenta esférica de diâmetro 6 mm, sobremetal teórico 0,2 mm, na região **b** do corpo de prova.

Fig. a: Corte ascendente

Fig. b: Corte descendente

Figura 4.15: Características de corte na região **b** do corpo de prova

A Figura 4.15a mostra o contato de corte quando o sentido de avanço for ascendente e a Figura 4.15b, quando o corte for descendente. Pode-se observar a

variação do diâmetro efetivo de corte para as duas situações. No sentido ascendente o raio de contato varia entre 2,9 e 2,3 mm e no sentido descendente o raio efetivo varia entre 1,9 mm e 0,5 mm (ferramenta esférica de 6 mm e sobremetal teórico de 0,2 mm). Estes dados foram obtidos através de simulações com o CAD. A área hachurada em azul corresponde ao sobremetal teórico, constante em toda a usinagem, definido no sistema CAM (0,2 mm). A área em vermelho demonstra o material remanescente após o desbaste com uma ferramenta de topo plana, em cada nível de usinagem. Nas simulações gráficas foram obtidas as áreas transversais de corte em função de cada região, como apresentadas pela Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Material remanescente nas três regiões do corpo de prova

Região do corpo de prova	Área da seção transversal de material remanescente em cada nível
a	0,03 mm ²
b	0,12 mm ²
c	1,03 mm ²

Observando ainda a Figura 4.15, nota-se que durante a transição de corte entre os degraus, o contato entre a aresta de corte e a superfície fica interrompido em determinada região. Estas características de processo podem contribuir significativamente para a instabilidade da usinagem.

4.2.2 Análise da força de usinagem

Neste estudo, a força de usinagem foi obtida para verificar a flexão da ferramenta de corte e acrescentar detalhes à análise qualitativa. Os gráficos da Figura 4.16 e Figura 4.17 apresentam o comportamento das componentes cartesianas da força de usinagem (F_x , F_y , F_z) em função do tempo, nos quatro casos deste estudo. As condições de corte foram apresentadas na Tabela 3.7. A Figura 4.16 refere-se ao experimento utilizando a ferramenta de 6 mm de diâmetro e comprimentos em balanço de 75 mm e 45 mm, respectivamente.

Fig. a – Balanço de 75 mm

Fig. b – Balanço de 45 mm

Figura 4.16: Gráfico da força de usinagem para a ferramenta de 6 mm de diâmetro

A Figura 4.17 ilustra as componentes da força de usinagem quando utilizada a ferramenta de 12 mm de diâmetro para os dois comprimentos de fixação.

Fig.a – Balanço de 75 mm

Fig.b – Balanço de 45 mm

Figura 4.17: Gráfico da força de usinagem para a ferramenta de 12 mm de diâmetro

Observa-se que a ferramenta de maior diâmetro exerceu maior força de usinagem. Isto pode ser atribuído à maior área de contato com a peça para a remoção do mesmo sobremetal.

Ampliando-se as curvas de força no tempo (Figura 4.18a), observam-se picos de força cuja frequência é de 333 Hz. Estes picos indicam ser as componentes da força de usinagem, pois coincidem com a frequência de atuação das arestas de corte da ferramenta (duas arestas; 10.000 RPM). Os gráficos também mostram, que no intervalo de atuação das arestas, as componentes da força de usinagem estão oscilando, ocorrendo constantes alterações de sinal. Em uma análise simplificada, através de uma entrada impulso, estimou-se a frequência de vibração livre do sistema dinamômetro/peça, e detectaram-se as frequências predominantes: 1,4kHz

e 1,3kHz, respectivamente nas direções X e Y. A Figura 4.18b demonstra a vibração natural do sistema na direção X, após a excitação externa. Verifica-se que esta frequência natural (1,4kHz) coincide com a frequência obtida durante a usinagem, nos intervalos de atuação das arestas de corte (Figura 4.18).

Fig. a: Aquisição das forças durante a usinagem

Fig. b: Frequência natural do sistema na direção x

Figura 4.18: Vibração do dinamômetro/peça e a ação de cada aresta de corte

Foram obtidos os valores médios entre cinco picos de cada componente de força nas frequências de ação das arestas (333Hz). Os gráficos da Figura 4.19 e Figura 4.20 apresentam estes resultados para as ferramentas de diâmetro 6 mm e 12 mm, respectivamente.

Fig. a: Ferramenta 6 mm. Balaço 75 mm

Fig. b: Ferramenta 6 mm. Balaço 45 mm

Figura 4.19: Componentes da força de usinagem para ferramenta de 6 mm de diâmetro

Fig. a: Ferramenta 12 mm. Balaço 75 mm

Fig. b: Ferramenta 12 mm. Balaço 45 mm

Figura 4.20: Componentes da força de usinagem para ferramenta de 12 mm de diâmetro

Ao contrário do esperado, o sentido da componente F_y foi oposto ao sentido de avanço durante a usinagem da região **c** do corpo de prova, para os quatro casos estudados. Nota-se que este fato ocorreu em função da posição de contato da ferramenta nesta área de corte. Nas regiões **a** e **b** a componente F_y incidiu no mesmo sentido do avanço de usinagem (valores negativos em relação às coordenadas do dinamômetro). A Figura 4.21 ilustra as posições dos vetores formados pelos valores de pico das componentes F_x e F_y , nas três regiões do corpo de prova. Estes vetores correspondem à força ativa (F_t), que é a componente da força de usinagem (F_u) no plano de trabalho. O gráfico foi construído utilizando os valores que representam o experimento de usinagem com a ferramenta de 12 mm de diâmetro e 45 mm de balaço.

Figura 4.21: Comportamento da força ativa referente às três posições de usinagem

4.2.3 Análise do desvio de forma e da flexão da ferramenta

O desvio de forma entre a geometria projetada e a peça após a usinagem pode ser causado por diferentes fontes, como: estrutura da máquina-ferramenta, algoritmos de comando do CNC, características do processo de corte, flexão da ferramenta devido à força de usinagem, dentre outras. Nesta proposta de estudo é analisado o desvio de forma devido à flexão da ferramenta, pois este é o fator que representa um erro dimensional significativo na usinagem de moldes e matrizes, devido à freqüente necessidade de se utilizar ferramentas com excessivo comprimento em balanço. Conforme recomendação dos fabricantes de ferramentas de corte, pode-se estimar a flexão da ferramenta utilizando critérios de resistência dos materiais, considerando a ferramenta como uma viga mono-engastada sob a ação de uma força radial, decorrente do processo de corte (Figura 4.22).

Figura 4.22: Flexão de uma viga mono-engastada

A estimativa desta deformação é obtida pela Equação 4.1 (SANDVIK, 2000).

$$\delta = \frac{F \times L^3}{3 \times E \times I}; \quad I = \frac{\pi \times D_c^4}{64} \quad 4.1$$

Onde:

E : módulo de elasticidade. Metal duro: 360K N/mm²

I : momento de inércia

Aprofundando-se neste estudo, observou-se que o desvio de forma da peça final devido a flexão da ferramenta não corresponde diretamente com a distância entre o centro da ferramenta fletida com o centro da ferramenta estática (δ). A magnitude deste erro (e) está relacionada com a distância da ponta da ferramenta e a superfície perpendicular a seu eixo. Outro fato importante observado é que este erro também está relacionado com a inclinação da superfície (Figura 4.23). Quando a superfície se afasta do centro da ferramenta de corte em função de sua inclinação, a flexão da ferramenta terá maior influência no desvio de forma.

Figura 4.23: Desvio de forma em função da inclinação da superfície e flexão da ferramenta

Conhecendo-se a flexão da ferramenta durante a usinagem, foram desenvolvidas equações matemáticas para se estimar o erro de forma em função da inclinação da superfície. Utilizando relações trigonométricas, obteve-se as equações 4.2 e 4.3.

Para superfície perpendicular ao eixo da ferramenta:

$$e = L \times [1 - \cos(\arcsen \delta / L)] \quad 4.2$$

Para superfície com inclinação θ em relação ao eixo horizontal:

$$e' = \sin \alpha \times [(\delta - Tg \alpha \times e) + (\cos \alpha \times e)] \quad 4.3$$

Onde:

e : desvio de forma para superfícies perpendiculares ao eixo da ferramenta

e' : desvio de forma para superfícies não perpendiculares ao eixo da ferramenta

α : ângulo de inclinação da superfície

L : Comprimento de balanço da ferramenta

δ : flexão da ferramenta

O modelo simplificado da viga mono-engastada foi utilizado para se obter uma estimativa inicial da flexão da ferramenta; empregando a componente F_y da força de usinagem, que corresponde à direção de avanço. Esta é a componente da força de usinagem mais representativa para ocasionar desvios de forma neste caso

estudado. Foi utilizado o valor de pico nas três regiões do corpo de prova (regiões *a*; *b*; *c*), para cada configuração de ferramenta, como apresentado nos gráficos da Figura 4.19 e Figura 4.20.

A flexão da ferramenta também foi estimada de forma prática. A ferramenta, sem rotação, foi deslocada contra o corpo de prova fixo ao dinamômetro. Esta movimentação foi realizada na direção Y, por incrementos milésimos, até a componente F_y atingir um valor de grandeza semelhante ao valor obtido no experimento de usinagem. O gráfico da Figura 4.24 apresenta no eixo X, a distância que a máquina se movimentou após o contato da ferramenta com o corpo de prova. O eixo Y corresponde à força F_y referente a esta movimentação.

Figura 4.24: Flexão da ferramenta obtida de forma experimental

A Tabela 4.6 apresenta uma comparação entre os valores de flexão obtidos de forma experimental e os valores calculados pelo critério de resistência dos materiais, Equação 4.1, utilizando a componente F_y obtida na região *b* corpo de prova.

Tabela 4.6: Resultados da flexão da ferramenta

Ferramenta	Fy [N]	Flexão viga engastada [mm]	Flexão experimental [mm]
T 12 mm Balanço 75 mm	-100	0,008	0,033
T 12 mm Balanço 45 mm	-200	0,02	0,19
T 6mm Balanço 45 mm	-15	0,026	0,04
T 6mm Balanço 75 mm	-30	0,18	0,27

Verifica-se que os valores de flexão da ferramenta obtidos experimentalmente são superiores, mas estão na mesma ordem de grandeza dos valores obtidos de forma analítica (viga mono-engastada). Pressupõe-se que os seguintes fatores propiciaram estas disparidades:

- a-) Para permitir o cálculo simplificado da flexão, a ferramenta de corte foi considerada um cilindro uniforme, com rigidez homogênea. O momento torçor envolvido com o processo de corte também não foi considerado no modelo analítico.
- b-) Na análise experimental, a deformação ocorrida no corpo de prova quando comprimido pela ferramenta não foi considerada.

Teve-se a intenção de confrontar o desvio de forma teórico obtido pelas equações 4.2 e 4.3, empregando os valores de flexão da ferramenta (Tabela 4.6), com o desvio de forma real da peça usinada. Para isto, o corpo de prova, após as usinagens, foi inspecionado por uma máquina de medir por coordenadas, Mitutoyo Bright-M507. Foram obtidos pontos cartesianos referentes às dimensões das superfícies do corpo de prova. Estes pontos foram importados no sistema CAD e comparados com a geometria original, a fim de se obter a exatidão dimensional entre o projeto CAD e a peça real. Contudo, concluiu-se que os dados obtidos pela máquina de medir por coordenadas foram inconsistentes, fornecendo valores não

coerentes com o processo. Por este fato, o corpo de prova foi novamente analisado em uma máquina de medir por coordenadas Starret modelo Varguard Plus, mais sofisticada que a máquina anterior. Contudo os dados obtidos neste caso permaneceram inconsistentes, não permitindo a comparação entre o desvio de forma teórico e o real. Com isso, foram rastreadas as possíveis fontes de erro. Verificou-se que estas podem estar envolvidas em todas as etapas da cadeia de fabricação, iniciando-se no modelamento do produto em sistema CAD, até a inspeção final, como foi esquematizado pela Figura 4.25.

Figura 4.25: Possíveis fontes de erro no processo de fabricação

As exatidões pertinentes a cada etapa de fabricação estão sucintamente detalhadas a seguir:

- ♦ CAD: Para criar formas geométricas, o sistema CAD utiliza um valor de tolerância para a geração de objetos *wireframe*¹ e objetos tridimensionais. Neste caso, a tolerância empregada foi de 0,001 mm.
- ♦ Transferência CAD-CAM: Para facilitar a transferência de informações geométricas entre o sistema CAD e o sistema CAM, grande parte dos softwares CAD/CAM comerciais utiliza uma malha de triângulos gerada sobre a superfície original do CAD, para realizar esta comunicação. Esta malha é gerada pelo CAD utilizando um valor de tolerância, e é utilizada pelo CAM para calcular as trajetórias de ferramenta. Mais detalhes desta comunicação entre os sistemas

¹ *Wireframe*: Objetos geométricos de simples construção em um software CAD, tais como: retas, círculos, e curva. São utilizados para geração de objetos tridimensionais.

CAD/CAM foram apresentados por SHÜTZER e SOUZA (2000b). Neste caso, a tolerância empregada foi 0,001 mm.

- ♦ CAM: Para calcular as trajetórias de ferramenta, o sistema CAM utiliza uma tolerância, como apresentado no Capítulo 2. A tolerância utilizada foi de 0,002 mm.

- ♦ Referenciamentos:

a-) No processo de usinagem, foi referenciado inicialmente o comprimento exato da ferramenta de corte fixa ao porta ferramenta, através de um equipamento disponível no centro de usinagem. Este equipamento possui elevada precisão. Contudo, foram comparadas usinagens com diferentes ferramentas e fixações. Isto implica na necessidade de repetir o processo de referenciamento para cada caso, aumentando a possibilidade de diferenças na definição do comprimento exato das ferramentas.

b-) A matéria-prima deve ser posicionada na mesa da máquina em função das coordenadas cartesianas, condizente com o programa NC gerado. Neste caso, foi utilizado um apalpador para definir a posição dos eixos coordenados em função da fixação da matéria-prima. Este equipamento possui grande precisão. Entretanto, a rotina de aquisição fornecida junto com o equipamento, permite definir os eixos cartesianos apenas por dois pontos de contato com a peça, para cada eixo. Isto pode implicar na exatidão do eixo coordenado a ser definido, caso a superfície não esteja perfeitamente esquadrejada.

c-) Após usinado, o corpo de prova foi posicionado na mesa da máquina de medir por coordenadas. Para referenciamento, ao contrário da rotina de posicionamento do centro de usinagem, a máquina de medir utiliza vários pontos das superfícies de referência. Com isso, são atribuídos planos de referência, tornando possível verificar a inclinação da superfície a ser utilizada para referência, o que permite maior precisão na análise. Portanto, a diferença de referenciamento utilizada no centro de usinagem e na máquina de medir, pode acarretar em incertezas de medição.

- ♦ 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.

4.2.4 Análise da qualidade superficial

A qualidade superficial foi analisada pelos correspondentes valores médios entre 5 amostras do parâmetro R_a , obtidos perpendicularmente ao sentido de avanço, apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Valores de rugosidade. Parâmetro Ra

Diâmetro da ferramenta [mm]	Balanço [mm]	Região	Ra [μm]	Desvio padrão	Int. Confiança 95%
Ø 12	45	a	0,47	0,04	0,04
		b	0,61	0,03	0,03
		c	1,76	0,05	0,04
	75	a	0,60	0,03	0,03
		b	0,68	0,06	0,05
		c	2,13	0,03	0,03
Ø 06	45	a	1,16	0,04	0,04
		b	3,22	0,04	0,04
		c	1,41	0,02	0,02
	75	a	6,59	0,17	0,15
		b	4,94	0,08	0,07
		c	2,12	0,07	0,06

Para o caso da ferramenta de 12 mm de diâmetro, verifica-se que a rigidez da ferramenta teve influência nos valores de Ra obtidos.

No caso da ferramenta de 6 mm de diâmetro, além do elevado valor de Ra, destacam-se os resultados da textura superficial observados visualmente. Com a ferramenta fixa à 45 mm, observam-se marcas superficiais na região **c** do corpo de prova, correspondentes aos inícios dos degraus deixados pela operação anterior (Figura 4.26a). O comprimento de fixação de 75 mm, mesmo sugerido pelo fabricante, provocou grandes instabilidades durante a usinagem, prejudicando significativamente a qualidade superficial, comprometendo a ferramenta de corte. A (Figura 4.26b) ilustra a qualidade degradada da superfície na região **a** do corpo de prova.

Figura 4.26: Fotos da textura superficial após a usinagem.

4.3 Estudo simplificado da força de usinagem em formas complexas

A Figura 4.27 mostra a foto do corpo de prova usinado neste estudo. As setas indicam as regiões utilizadas nos quatro casos de usinagem (conforme apresentado no item 3.2.3). O polígono vermelho limita a área com significativa degradação da qualidade superficial, como está discutido a seguir, no Item 4.3.5.

Figura 4.27: Corpo de prova usinado

Para demonstrar o comportamento das componentes cartesianas da força de usinagem, o gráfico da Figura 4.28 demonstra as forças F_x , F_y e F_z , obtidas ao longo de um passe de usinagem para o caso 1 (V_c 220 m/min). Nos outros casos de usinagem o comportamento das forças apresenta-se bastante semelhante.

Figura 4.28: Componentes da força de usinagem obtidas neste experimento

O gráfico demonstra acentuadas discrepâncias principalmente nas componentes F_z e F_y no início da usinagem. Este fato ocorre até uma posição que corresponde a 15° após o início da usinagem (Figura 4.29). Realizando simulações gráficas com o auxílio do sistema CAD, observou-se que, do início da usinagem até esta posição, o centro da ferramenta esférica permanece em contato na área de corte. Quinze graus da trajetória após o início da usinagem, o centro da ferramenta sai da região de corte, tornando mais estável o comportamento das componentes da força de usinagem. Foram coletados cavacos no início e ao final da usinagem. Uma breve discussão sobre os cavados formados nestas regiões encontra-se no Item 4.3.6.

Figura 4.29: Posição de contato da ferramenta com o corpo de prova

Ampliando as curvas de força no tempo, em uma região aleatória (gráfico da Figura 4.30a), observam-se picos de força com frequência de 150 Hz, representando a frequência de atuação das arestas de corte (para o caso 1 - $v_c=220\text{m/min}$). As forças F_x e F_y oscilam com frequências em torno de 1,25 kHz no intervalo entre os picos de força, acarretando em constantes alterações de sinal. Em uma análise simplificada, através de uma entrada impulso, estimou-se a frequência de vibração livre do sistema dinamômetro/peça, e detectou-se a frequência de vibração em torno de 1,25kHz na direção Y, e próximo a este valor na direção X (Figura 4.30b). Verifica-se que esta frequência natural (1,25kHz) coincide com a frequência obtida durante a usinagem, nos intervalos de atuação das arestas de corte.

Fig. a: Aquisição das forças durante a usinagem

Fig. b: Frequência de vibração natural na direção Y

Figura 4.30: Atuação da ferramenta e vibração natural do sistema peça/dinamômetro

Estas características do processo foram observadas ao longo da usinagem em todos os casos.

4.3.1 Análise do contato ferramenta/peça e do diâmetro efetivo de corte

A geometria semicircular deste corpo de prova permite verificar o comportamento do fresamento variando o ponto de contato entre uma ferramenta de ponta esférica e a superfície da peça. A Figura 4.31 esboça as principais características do contato ferramenta/peça nesta usinagem. O segmento $\overline{AC}$ representa o raio efetivo da ferramenta de corte em seu valor máximo, e o segmento $\overline{BD}$ o raio efetivo de valor mínimo. Estas dimensões são influenciadas pela profundidade de corte (a_p); pelo raio de ponta da ferramenta (RF); pela curvatura da superfície (neste caso o raio da peça RP); e pela posição da ferramenta, definida pelo ângulo θ .

A profundidade de usinagem (a_p) é representada pelo sobremetal. Nota-se que no início da usinagem, onde a superfície usinada é perpendicular ao eixo da ferramenta, a profundidade de corte (a_p) se encontra na direção axial da ferramenta.

Ao decorrer da trajetória, a direção da profundidade de corte se altera, tornando-se radial à ferramenta, no final da usinagem. Com isso, destaca-se que o volume de sobremetal influencia o valor do raio efetivo máximo de corte quando a ferramenta utiliza os quadrantes 3 e 4 de sua seção circular, na região do corte (Posição *a* - Figura 4.31). Neste caso, o centro da ferramenta está posicionado na área de corte. Ao se deslocar no sentido de avanço a ferramenta passa a atuar apenas com o terceiro quadrante de sua seção circular (Posição *b* - Figura 4.31). Quando isso ocorre, o valor do sobremetal influencia apenas o valor do raio efetivo mínimo. Nesta posição, o raio efetivo máximo (segmento $\overline{AC}$) torna-se independente do sobremetal.

Figura 4.31: Formato do contato ferramenta/peça

Conhecendo os diâmetros de corte mínimo e máximo é possível definir o diâmetro efetivo mais apropriado para cada estudo específico. Uma expressão matemática foi desenvolvida para se obter o diâmetro efetivo de corte em função da posição específica da trajetória semicircular. Para isto, deve-se conhecer o ângulo formado pelos pontos extremos de contato da ferramenta com a peça (pontos A e B), referenciando-se pelo centro da ferramenta (ângulo ξ), e o ângulo de

posicionamento da ferramenta em relação à superfície (θ). O ângulo θ é definido pelo ponto de contato da ferramenta e o eixo horizontal. Utilizando-se a lei dos cosenos (Figura 4.31), tem-se:

$$(RP + a_p)^2 = (RP + RF)^2 + RF^2 - 2 \times (RP + RF) \times RF \times \cos \xi \quad 4.4$$

Com isso, o ângulo ξ pode ser obtido pela Equação abaixo.

$$\xi = \cos^{-1} \left[\frac{(RP + RF)^2 + RF^2 - (RP + a_p)^2}{2 \times RF(RP + RF)} \right] \quad 4.5$$

onde:

RP – raio da peça

RF – raio da ferramenta

a_p – profundidade de corte

Obtendo-se o ângulo ξ e conhecendo a posição da ferramenta no momento do corte em relação a peça (ângulo θ), o ângulo ψ pode ser determinado ($\theta + \psi + \xi = 90^\circ$). Desta forma, raio efetivo máximo ($\overline{AC}$) pode ser calculado, nas circunstâncias em que a profundidade de corte influencia em seu valor (início da usinagem), pela Equação 4.6.

$$\overline{AC} = RF \times \sin \psi \quad 4.6$$

Quando a ferramenta passa a utilizar apenas seu terceiro quadrante para o corte, e o volume do sobremetal não influencia na dimensão do raio efetivo máximo, este pode ser calculado apenas em função da posição da ferramenta em relação à superfície usinada, pela Equação 4.7.

$$\overline{AC} = RF \times \cos \theta \quad 4.7$$

O diâmetro efetivo mínimo ($\overline{BD}$) pode ser calculado pela equação 4.8. Esta expressão é válida para a variável $\theta + \xi \leq 90^\circ$. Quando $\theta + \xi \geq 90^\circ$, a ferramenta esférica gradativamente troca seu quadrante de usinagem, como ilustrado na Figura 4.32, e o raio efetivo mínimo neste caso é nulo, pois a ferramenta utiliza seu centro no momento do corte.

$$\overline{BD} = RF \times \text{sen} \left\{ \theta + \cos^{-1} \left[\frac{(RP + RF)^2 + RF - (RP + ap)^2}{2Rf \times (RP + RF)} \right] \right\} \quad 4.8$$

A Figura 4.32 esboça as características do contato ferramenta/peça em três momentos diferentes de usinagem. Embora o diâmetro efetivo de corte se altere constantemente ao longo da usinagem, os ângulos ξ e α permanecem constantes. Ambos os ângulos são calculados apenas em função do raio da peça (RP), do raio da ferramenta (RF) e da profundidade de corte (a_p). A área da seção transversal do cavado depende apenas do avanço por dente (f_z) e da profundidade de corte (a_p), mantendo-se constante em toda a extensão da usinagem.

Nota-se que após o início, até determinada posição da usinagem, a ferramenta utiliza ambos quadrantes no processo de corte (Figura 4.32b). Estas alterações de contato podem alterar o sentido das componentes da força de usinagem, como observado nas componentes de força obtidas no experimental, apresentado no Item 4.3.2.

Figura 4.32: Posição do centro da ferramenta de corte no decorrer da usinagem

4.3.2 Análise experimental da força de usinagem

O gráfico da Figura 4.33 demonstra os valores numéricos das componentes F_x , F_y , e F_z obtidas nas regiões A, B e C do corpo de prova, durante a usinagem com velocidade de corte 220 m/min (caso 1). Os outros casos de usinagem tiveram o mesmo comportamento, divergindo-se apenas os valores numéricos.

Figura 4.33: Componentes cartesianas da força de usinagem para $V_c=220$ m/min

A trajetória de usinagem é realizada no plano YZ, no quadrante positivo referente às coordenadas do dinamômetro (Figura 3.11). No início a usinagem tem a direção Y como a maior componente do sentido de avanço e a direção Z tem menor representação. A direção do avanço se altera proporcionalmente ao longo da usinagem, até que no final, o avanço é dado apenas na direção Z. Entretanto, nota-se que a componente F_z teve seu maior valor no início da usinagem, reduzindo significativamente quando se aproxima do final da trajetória. Ao contrário do esperado, esta variação de F_z é inversa ao sentido de avanço. Este fato pode ser atribuído a posição de contato da ferramenta, que no início da usinagem possui seu centro (com velocidade de corte nula) em contato com a região de corte, elevando o valor de F_z . Ao final da usinagem, embora o avanço esteja na direção Z, a ferramenta realiza o corte com seu diâmetro nominal, e seu centro não está em

contato com o corte. Nesta posição a ferramenta realiza o corte efetivo, e com isso influencia F_z apenas com o processo de corte.

Fato semelhante ocorre com a componente F_y que se mantém no sentido oposto ao sentido de avanço durante toda a usinagem. O avanço da ferramenta ocorre no sentido positivo da direção Y , em relação às coordenadas do dinamômetro. Isto mostra que a força provocada pelo sentido de avanço da ferramenta foi anulada pela força que ocorre na direção de remoção do cavaco, e que está posicionada no sentido negativo da direção Y . Desta forma, a direção do vetor força de usinagem pode não ser correspondente ao sentido de avanço.

Quanto à componente F_x , nota-se numericamente que esta altera seu sentido ao decorrer da usinagem. No início, F_x é negativa e ao final torna-se positiva. Pode-se explicar este fato observando a Figura 4.34.

Figura 4.34: Direção do vetor força de usinagem em relação à posição da ferramenta

A força de usinagem possibilitou realizar uma análise comparativa das diferentes condições de corte, envolvendo a posição de contato ferramenta/peça e a velocidade de corte. O gráfico da Figura 4.35 utiliza a velocidade de corte (v_c); a força de usinagem (F_u); e a posição do corpo de prova onde as componentes da força de usinagem foram obtidas (posição A, B, C). Estas correspondem à posição inicial, intermediária e final da usinagem, como já apresentado na Tabela 3.11.

Figura 4.35: Força de usinagem em função da velocidade de corte e posição

Verifica-se uma tendência de queda de F_u com o aumento da v_c , em todas as posições de usinagem do corpo de prova. Fica evidente a drástica diferença de F_u , da posição inicial da usinagem (A), onde o centro da ferramenta participa do ato de corte. Observa-se também que a diferença de F_u entre as posições B e C não foi drástica. Isto demonstra que o corte utilizando o centro da ferramenta propiciou um excessivo esforço de usinagem, em torno de 100%.

4.3.3 Análise da força de corte experimental

Utilizando as componentes de força obtidas pelo dinamômetro, foi determinada a força de corte máxima, no ponto de maior solicitação durante a atuação de uma

aresta de corte, para as quatro velocidades de corte utilizadas. As análises foram realizadas na posição B do corpo de prova (45° após o início de cada passe de usinagem).

Segundo DINIZ e NEVES 2003, a força de corte (F_c) corresponde à força tangencial (F_t) no momento do corte. Para se determinar a F_c partindo das componentes cartesianas da força de usinagem, inicialmente necessitam-se extrair as seguintes informações do processo:

a-) Determinar a posição angular da aresta onde será analisada a F_c . Neste estudo será analisado o ponto de atuação da aresta onde a força de corte atinja seu valor máximo (maior espessura do cavaco). Portanto, deve-se conhecer a posição angular da aresta de corte neste momento específico durante o corte;

b-) Determinar a posição dos eixos tangencial e radial em relação aos eixos cartesianos, em função da posição angular da aresta no ponto específico a ser estudado. Determinar a força ativa (F_a) em função de F_x e F_y , e decompô-la nos eixos tangencial e radial no ponto específico a ser estudado. Desta maneira é obtida a força de corte.

O desenvolvimento utilizado para obter estas informações está apresentado a seguir.

a-) Posição angular da aresta no ponto de máxima força durante o corte

A força de corte (F_c) é considerada a força atuante na direção tangente à ferramenta (F_t), para um ponto específico, durante a atuação da aresta. Portanto, a força de corte corresponderá à projeção da força ativa (F_a) no eixo tangencial. A força ativa é o vetor resultante das forças F_x e F_y obtidas pelo dinamômetro.

Desta forma, conhecendo-se a força ativa, deve-se obter o eixo tangencial na posição específica para determinar a força de corte. O eixo tangencial em um ponto específico do corte é perpendicular ao eixo radial, que por sua vez, é definido pela direção do raio da ferramenta na posição específica. Portanto, deve-se conhecer a

posição da aresta de corte no ponto a ser analisado, que neste caso corresponde a posição de espessura máxima do cavaco. Observou-se que os picos de F_x e F_y ocorreram simultaneamente de forma acentuada um instante após o início do corte. Este foi considerado o ponto de maior espessura do cavaco.

Na usinagem empregando sentido concordante de corte (utilizado neste estudo) a espessura máxima do cavaco é dada no início da atuação da aresta. Entretanto, através de simulações gráficas (Figura 4.36), pôde-se observar que a espessura máxima do cavaco é obtida um momento após o início da atuação da aresta, de acordo com o momento dos picos de força.

Foi denominado α' o ângulo de contato onde a espessura do cavaco é máxima, formado pelo raio da ferramenta e o eixo das ordenadas. Este ângulo será utilizado para determinar o eixo tangencial no ponto de maior espessura do corte, e posteriormente, a força de corte. As simulações foram realizadas utilizando os parâmetros do processo de usinagem: espessura de corte (a_e) 0,3 mm; avanço por aresta 0,1 mm; raio efetivo máximo da ferramenta na posição B do corpo de prova 5,65 mm (obtido pela equação 4.7). Como resposta, foi obtido o ângulo total de atuação da aresta (α) que corresponde à $18,6^\circ$ e o ângulo α' igual à $17,1^\circ$, como mostra a Figura 4.36.

Figura 4.36: Ângulos de contato durante a atuação da ferramenta

O ângulo total de atuação da aresta (α) ainda pode ser calculado de forma analítica pela Equação (4.9) (GOMES e SILVA 2003).

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R - a_e}{R}\right) \quad 4.9$$

Onde:

R : raio da ferramenta

a_e : espessura radial de corte

Utilizando-se da trigonometria, o ângulo α' pode ser obtido em função do avanço por dente (f_z) e do raio efetivo da ferramenta no momento do corte, Equação (4.10).

$$\alpha' = \alpha - \left(\arcsen \frac{f_f}{R_{efetivo}} \right) \quad 4.10$$

b-) Posição relativa do eixo tangencial e decomposição das forças

Com a obtenção do ângulo α' pode-se definir o eixo radial, na direção e na posição do raio da ferramenta, no ponto a ser estudado. Perpendicular, define-se o eixo tangencial. Na Figura 4.37 estão apresentados os eixos radial e tangencial, respectivamente X' e Y' . Em seguida, foi calculada a força ativa (F_{at}) como resultante das componentes F_x e F_y obtidas pelo dinamômetro, no ponto de maior solicitação, atribuído ao ponto de maior espessura do cavaco. Posteriormente, a força ativa foi decomposta na força radial (F_r) no eixo radial, e na força tangencial (F_t), que corresponde à força de corte (F_c), no eixo tangencial (Figura 4.37).

Figura 4.37: Características intrínsecas do processo em um momento específico do corte Utilizando-se da trigonometria, a força de corte (F_c) foi calculada Equação (4.11).

$$F_{tg} = F_c = F_{at} \times \cos \varphi \quad 4.11$$

Desta forma, o gráfico da Figura 4.38 demonstra as força de corte nos quatro casos de usinagem:

Figura 4.38: Força de corte obtida experimentalmente em função da velocidade de corte

Observa-se uma redução proporcional da força de corte com o aumento da velocidade. Em média, para este caso, um aumento de 7% da velocidade de corte representou a redução de 1% da força de corte.

4.3.4 Estimativa teórica da força de corte

A força de corte teórica foi calculada pelo método de Kienzle conforme apresentado por FERRARESI et al (1976), Equação 4.12. Foi considerado para esta análise, o ponto à 45° do corpo de prova (posição B) e a aresta de corte posicionada no momento de maior carregamento da ferramenta (Figura 4.39); nas mesmas condições analisadas no item anterior.

$$F_c = K_{s1} \times b \times (f_f \times \text{sen} \alpha' \times \text{sen} \chi)^{1-z} \quad 4.12$$

onde:

K_{s1} : Pressão específica de corte em função da espessura do cavaco

$1-z$: Constante de Kienzle

f_z : avanço por dente

α' : ângulo de penetração da aresta no sentido radial (ângulo de ataque)

χ : ângulo de penetração da aresta no sentido axial

b : Seção diagonal do cavaco

F_c : Força de corte

Os valores de K_{s1} e $1-z$ são fornecidos por manuais da empresa SANDVIK, fabricante de ferramentas de corte. Utilizando simulações gráficas, Figura 4.39, os valores geométricos do processo de usinagem foram obtidos.

Figura 4.39: Características geométricas do processo

O ângulo de posicionamento axial da ferramenta no momento do corte, onde ocorre a máxima força de corte (α') está associado ao diâmetro da ferramenta e ao valor do passo radial, como já apresentado. Por sua vez, o diâmetro da ferramenta esférica depende da profundidade de corte axial (a_p) e da inclinação da superfície. Neste caso, o raio efetivo da ferramenta é de 5,65 mm. A Tabela 4.8 apresenta os parâmetros de cálculo da força de corte.

Tabela 4.8: Cálculo da força de corte. Equação 4.12

Parâmetros utilizados						Força de corte
K_{s1}	$1-z$	f_z	α'	χ	b	207N
2000 N/mm ²	0,75	0,1 mm	15°	31,7°	2,6 mm	

O valor da força de corte obtido pela Equação 4.12 é em média três vezes superior aos valores obtidos no experimento (Item 4.3.3). Pode-se atribuir como principal fator desta discrepância, o parâmetro K_{s1} utilizado. Este parâmetro foi obtido em catálogos da empresa SANDVIK, e consiste em um valor médio, extraído de forma

empírica, considerando condições de corte específicas para velocidades de corte variando de 95 m/min até 240 m/min. Este parâmetro é tabelado em função do material a ser usinado. Na análise experimental constatou-se uma redução da força de corte apenas com o aumento da velocidade de corte. Sabe-se que ocorre uma redução do parâmetro K_{s1} com o aumento da velocidade de corte (DINIZ et al 1999). Desta forma, justifica-se a diferença entre os valores obtidos pelo método teórico e o método prático.

4.3.5 Análise da qualidade superficial

Foram obtidos cinco valores de Ra em nas regiões **A** e **C** (inicial e final) do corpo de prova, para os quatro casos analisados. A Tabela 4.9 apresenta as médias destes valores.

Tabela 4.9: Rugosidade obtida Ra (μm)

Região inicial	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Média Ra (μm)	0,65	0,44	0,36	0,31
Desv. Padrão	0,005	0,007	0,009	0,013
Int. Conf. 95%	0,005	0,006	0,008	0,012
Região final	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Média Ra (μm)	0,33	0,32	0,32	0,28
Desv. Padrão	0,007	0,016	0,004	0,008
Int. Conf. 95%	0,006	0,014	0,004	0,007

Com os valores de Ra obtidos na região inicial do corpo de prova, verifica-se que a velocidade de corte dos diferentes casos teve grande influência na rugosidade. Esta diferença pode ser notada também visualmente. A Figura 4.40a apresenta a foto da região inicial da usinagem com a superfície de pior qualidade, que corresponde ao caso 1. Não é possível notar os traços da atuação da aresta de corte e a superfície é grosseiramente opaca, com indicações de esmagamento pelo centro da ferramenta. A Figura 4.40b apresenta a foto da mesma região do corpo de prova

(definida pela linha escura na região inferior das fotos), correspondente ao caso 4, onde foi empregado maior velocidade de corte. Neste caso, é nítida a atuação da aresta de corte.

Fig a: Região inicial da usinagem – Caso 1

Fig b: Região inicial da usinagem – Caso 4

Figura 4.40: Qualidade superficial em função da velocidade de corte

Nota-se ainda que esta região de pior qualidade superficial varia gradativamente de extensão nos quatro casos, como apresentado no polígono vermelho da Figura 4.27. No caso 1, com a menor velocidade de corte, maior região do corpo de prova apresenta esta característica superficial. Com o aumento da velocidade de corte atribuído aos outros casos, a extensão da área com esta característica diminui proporcionalmente. Esta qualidade superficial degradada não ocorre na região próxima ao final da usinagem em nenhum dos quatro casos estudados. Observa-se também que a região final do corpo de prova apresenta menor valor de Ra em todos os casos. Este fato pode ser atribuído à posição de corte mais propícia da ferramenta nesta região do corpo de prova.

Com os resultados obtidos neste estudo, conclui-se que a usinagem com ferramentas de ponta esférica, em casos onde seu centro permanece em contato com o corte, apresenta inconvenientes mais relevantes que o esperado, degradando significativamente a superfície usinada e elevando drasticamente as forças atuantes no processo de corte. Sugere-se, quando possível, trabalhar com a ferramenta não perpendicular a superfície usinada, inclinando a peça. De forma mais propícia, empregar centros de usinagem com 4 ou 5 eixos de movimentação para manter a ferramenta não perpendicular a superfície, independente de sua inclinação.

4.3.6 Análise simplificada do cavaco gerado

Observou-se que a seção transversal do cavaco permanece a mesma durante toda a trajetória, pois a superfície do corpo de prova e a ferramenta possuem seções transversais circulares. Entretanto, os cavacos coletados nas posições iniciais e finais deste processo não possuem o mesmo formato. No início da usinagem são formados cavacos tipo agulha e, no final, cavacos enrolados, próximos à forma de cones. Foram coletados cavacos durante todos os casos estudados e as formas dos cavacos permanecem semelhantes independentes da velocidade de corte.

No sistema CAD foi criado um esboço do cavaco formado pela ferramenta esférica na usinagem da região A do corpo de prova, onde a superfície tende a ser plana. Observou-se que a seção transversal do cavaco parte do centro da ferramenta (Figura 4.41). Este esboço não considera a dinâmica e os fatores reais do processo.

Figura 4.41: Esboço do cavaco formado pela ferramenta esférica em uma superfície plana

A Figura 4.42 apresenta a foto de um cavaco coletado na região inicial da usinagem. Observa-se uma provável fratura do cavaco antes da aresta finalizar o corte, como sugerido por NING et al (2001). Supõe-se que este fato possa ter ocorrido devido às instabilidades na usinagem desta região, em função do centro da ferramenta estar em contato no momento do corte. O cavaco se rompe em partes antes da aresta finalizar o corte. A foto da Figura 4.42 apresenta uma destas partes.

Figura 4.42: Cavaco coletado no início da usinagem

A Figura 4.43 apresenta a foto de um cavaco coletado nesta região da usinagem do corpo de prova.

Figura 4.43: Cavaco coletado ao final da usinagem

Os cavacos apresentados nas fotos foram formados durante a usinagem com velocidade de corte de 220 m/min. Entretanto, os cavacos coletados nos quatro casos tiveram a mesma forma, no início e no final da usinagem, independente da velocidade de corte empregada. Fotos para visualizar as lamelas dos cavacos encontram-se em Apêndice 06.

Observam-se grandes semelhanças nos cavacos obtidos no início e no final da usinagem deste experimento com os cavacos obtidos por NING et al (2001), conforme apresentado no Capítulo 2. Segundo NING, cavacos tipo agulha (semelhantes aos obtidos na parte inicial deste experimento) são provenientes de usinagens consideradas não-estáveis. Cavacos provenientes de usinagens estáveis, com estas características de processo, deverão possuir forma ligeiramente cônica e estarem enrolados (semelhante aos cavacos obtidos ao final da trajetória). Desta forma, pode-se concluir que a região inicial desta usinagem foi realizada de forma não-estável, e que a usinagem se tornou estável ao seu final. Este fato pode ser atribuído a ação do centro da ferramenta na região de corte, no início da usinagem. Ao final do processo, a ferramenta de ponta esférica tende a realizar um corte tangencial, aproximando-se seu diâmetro nominal do diâmetro efetivo de corte, excluindo a região central da ferramenta da área de contato com a peça, tornando a usinagem mais estável.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

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 (interpolação linear) 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.
- ♦ 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.
- ♦ O método polinomial *Spline* utilizado nos programas NC representou maior eficiência para usinagem, mantendo a velocidade de avanço em patamares mais elevados. 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.

Contudo, ainda pode-se recomendar o método *Spline* ou o método circular/linear (quando possível), para realizar usinagens de formas complexas.

- ♦ Não foram observadas grandes alterações na força de usinagem em função dos métodos utilizados para a descrição das trajetórias da ferramenta, mas sim ao longo do perfil, em função da geometria a ser usinada.
- ♦ Os sistemas CAM que permitem o cálculo de programas NC contendo polinômios *Spline* requerem dois valores de tolerância para cálculo. Estes valores repercutem diretamente no resultado final, contrapondo a máxima velocidade de avanço e o desvio de forma.
- ♦ Constatou-se a falta de uma padronização específica entre os diferentes fabricantes de CNC, para a interpretação de programas NC contendo funções *Spline*. Desta forma, as empresas que desenvolvem os sistemas CAD/CAM devem desenvolver uma saída *Spline* para cada CNC específico, envolvendo além da sintaxe, as diferentes funções matemáticas.
- ♦ A metodologia desenvolvida para a aquisição de dados utilizando a comunicação ProfiBus demonstrou ser eficiente para a análise qualitativa das forças atuantes durante a usinagem de formas complexas. Entretanto, a interface ProfiBus não possibilita altas frequências de aquisição.
- ♦ Foram constatados desvios semelhantes entre os três métodos de trajetória. As trajetórias calculadas pelo CAM estavam conforme o valor de tolerância definido para cálculo. As trajetórias capturadas pela interface Profibus durante a usinagem apresentaram desvios. Pode-se concluir, que a máquina/CNC foi responsável pelo desvio. Supõe-se que este erro é proveniente dos algoritmos de interpolação do CNC.
- ♦ Observou-se que o sobremetal remanescente para a operação de acabamento é fortemente influenciado pela operação de desbaste; a geometria da ferramenta de

corte; e a curvatura da superfície. O sobremetal real corresponde ao sobremetal teórico adicionado ao sobremetal remanescente. Esta alteração de sobremetal repercute diretamente na qualidade superficial e na força de usinagem.

- ◆ Constatou-se geometricamente que o erro dimensional atribuído à flexão da ferramenta no momento do corte não corresponde diretamente à diferença entre o centro da ferramenta estática e o centro da ferramenta fletida, como sugere algumas fontes na literatura. Conhecendo as variáveis do processo, este erro pode ser calculado pela trigonometria, e está relacionado com a inclinação da superfície.

- ◆ O erro geométrico entre a geometria CAD e a peça usinada pode ocorrer em diferentes etapas do processo de fabricação, por diferentes fontes. O processo de inspeção final também representa fontes de incerteza na análise dimensional entre a peça usinada e o projeto CAD. Para uma análise criteriosa do desvio de forma, as diferentes fontes de erro apresentadas neste trabalho devem ser levadas em consideração.

- ◆ Com o aumento da velocidade de corte, verificou-se queda na força de corte e melhora na qualidade superficial.

- ◆ Constatou-se a grande ineficiência da usinagem utilizando ferramentas de ponta esférica, quando seu centro permanece na região de corte. As forças decorrentes do processo tendem a dobrar seu valor, se comparadas às regiões onde o centro não atua no corte. A qualidade da superfície usinada também fica comprometida onde a ferramenta corta com seu centro.

- ◆ Observam-se constantes alterações do ponto de contato da ferramenta esférica com a superfície cilíndrica. Com isso as componentes de força se alteram de sentido no decorrer da usinagem. Além de tornar o estudo mais complexo, estas características podem contribuir para a instabilidade do processo.

- ♦ Na literatura pesquisada, a definição do diâmetro efetivo de corte, quando utilizada uma ferramenta de ponta esférica, é apresentada apenas para usinagens onde o eixo da ferramenta de corte é perpendicular à superfície usinada. Na usinagem de formas complexas, o diâmetro se altera constantemente, e na maior parte dos casos, este valor calculado pode apresentar grandes contrastes, influenciando de forma negativa no processo de usinagem. Os parâmetros definidos para corte sofrem a influência direta do diâmetro da ferramenta em contato com a superfície.

- ♦ Através dos cavacos obtidos durante a usinagem, comprovou-se a grande instabilidade do processo de corte quando uma ferramenta de ponta esférica utiliza seu centro na região de corte.

Baseando-se nas conclusões apresentadas e na experiência adquirida com este trabalho de pesquisa, sugerem-se as seguintes propostas de estudo para futuros trabalhos:

- ♦ Sugere-se o desenvolvimento e implementação de novos algoritmos *Spline* para serem utilizados como trajetórias de ferramenta, tornando mais eficiente a usinagem de formas complexas em alta velocidade de avanço.

- ♦ Sugere-se a implementação de rotinas em um software CAM, para prever o volume de material remanescente após o desbaste em 2 ½ eixos, em função da geometria da ferramenta e da profundidade de corte (a_p), além de verificar as características do contato ferramenta/peça, que influencia diretamente na qualidade do processo de usinagem. Desta forma, em regiões críticas, os parâmetros de corte, como a velocidade de avanço e velocidade de corte, poderão ser alterados para manter constante o carregamento sobre a ferramenta.

- ♦ Desenvolver um método eficiente para se determinar criteriosamente o erro de forma entre o projeto CAD e a peça usinada.

- ♦ Aprimorar a análise do desvio de forma em função da flexão da ferramenta de corte.
- ♦ Utilizar simulações em um sistema CAD para modelar processos de usinagem.

6 REFERÊNCIAS

- ANDRAE, P. (1999). Chip formation in high speed cutting HSC. In: INTERNATIONAL MACHINING & GRINDING CONFERENCE, 3., 1999, Cincinnati. *Proceedings...* Dearborn: SME. Session 215: metal removal, p.107-120.
- ARNONE, M. (1998). *High performance machining*. Cincinnati: Hanser Gardener.
- ASHBURN, A. (1979). High-speed machining. *American Machinist*, New York, v.123, n.3, p.115-116, Mar. (Special Report, n.710).
- BATES, C.A. (1997). Some well-defined curves. *Americam Machinist*, v.141, n.11, p.51-54, Nov.
- BAUCO, S. A. (2003). *Usinagem em altíssimas velocidades*. São Paulo: Érica. p.111-124.
- BEARD, T. (2001). *Programming for high speed machining*. Disponível em:<<http://www.mmsonline.com/articles/089708.html>>. Acesso em: 19/05/01.
- BECK, H.W. (1998). Alta velocidade e ferramentas de alto desempenho reduzem o tempo de usinagem. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.34, n.387, p.40-47, abr.
- BEZERRA, A. A. (2003). *Estudo do desgaste no roscamento com alta velocidade em ferro fundido*. 188p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BHANDARKAR, P. M.; DOWNIE B.; HARDWICK, M.; NAGI, R. (2000). Migrating from IGES to STEP: one to one translation of IGES drawing to STEP drafting data. *Computers in Industry*, v.41 p.261–277.

BLACK, J. T. Mechanics of chip formation (1989). In: DAVIS, J. R. (Ed.). *Metals handbook: machining*. 9. ed. Ohio, USA: ASM, 1989. v. 16. p7 18.

BOUJELBENE, M. MOISAN, A.; TOUNSI, N.; BRENIER, B. (2004). Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Amsterdam, v.44, n.1, p.101-107, Jan.

BRAGHINI, A.J. (2002). *Metodologia para escolha de fluidos de corte não agressivos ao meio ambiente para aplicações em usinagem de metais*. 203p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CAVALHEIRO, A.Z. (1998). *Sistematização do planejamento da programação via CAM do fresamento de cavidades de moldes para peças injetadas*. 197p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

CAVICHIOILLI, F.A. (2003). *Usinagem em altíssimas velocidades*. São Paulo: Érica, 136-146 p.

CHANG, T.C; WYSK, R.A.; WANG, H.P. (1998). *Computer-aided manufacturing*. 2nd.ed. New Jersey: Prentice Hall.

CHÉLY, S.J. (2000). A Alta velocidade reduz os custos de usinagem de cavidades. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.37, n. 417, p.64-67, out.

CHEVRIER, P. (2003). Escola francesa divulga suas experiências com HSM. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.40, n.453, p.84-95, out.

CHIANG, S.T.; TSAI, C.M.; LEE, A.C. (1995). Analysis of cutting forces in ball-end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.47, n.3/4, p.231-249, Jan.

CHRISTOFFEL, K. (2001). High-speed machining - from a tool manufacturer's perspective. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA - MANUFATURA AVANÇADA, 6., 2001, Piracicaba. *Anais...* Santa Bárbara d'Oeste: UNIMEP. p.121-134.

CHU, C.N.; KIM, S.Y.; KIM, B.H. (1997). Feed rate optimization of ball and mill considering local shape feature. *Annals of the CIRP*, Paris, v.46, n.1, p.433-436.

COELHO, R.T. BRAGHINI JR A; VALENTE, C. M; MEDALHA, G. C. (2003). Experimental evaluation of cutting force parameters applying mechanistic model in orthogonal milling. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, Rio de Janeiro, v.35, n.3, p.247-253, Sept.

COLWELL, L.V.; QUACKENBUSH, L.J. (1962). *A Study of high-speed milling*. Office of Research Administration, The University of Michigan. Report No. 05038-1 and 2-F, Parts I and II.

DARÉ, G. (2000). Desenvolvimento integrado do produto: uma referência para o projeto de componentes de plástico injetados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 2., 2000, São Carlos. *Anais...* São Carlos: UFSCar. p.274-282.

DEUTSCHE PATENTSCHRIFT. (1931). Verfahren zur Bearbeitung von Metallen oder bei einer Bearbeitung durch Schneidende Werkzeuge sich ähnlich Verhaltende Werkstoffe. Deutsche Patentschrift NR 523594.

DINIZ, A.E.; NEVES, D. (2003). O Fresamento de material endurecido com fresa de ponta esférica – análise da influência dos parâmetros de usinagem de desbaste na força de corte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2., 2003, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: ABCM/UFU. 1 CD-ROM.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. (1999). *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo: MM Editora.

DOYLE, L. (1953). Metal Machining. Prentice-Hall, 511p.

DÜRR, H.; SCHÜNEMMAN, R. (1999). Industrial application of new approaches of the CAD/CAM process chain for high speed machining of sculptured surfaces. In: INTERNATIONAL GERMAN AND FRENCH CONFERENCE, 2., 1999, Darmstadt. *Proceedings...* Darmstadt: PTW. p.117-120.

_____. (2000). Cadeias de processo baseadas em NURBS. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.36, n.415, p.18-27, Ago.

EBERLEIN, W. (1999). Modern CNC control systems for high speed machining. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, 5., 1999, Opatija. *Proceedings...* Local: Editora. p.ii-108-ii121.

ELBESTAWI, M.A. (1997). High-speed milling of dies and molds in their hardened state. *Annals of the CIRP*, Paris, v.46, n.1, p.57-62.

FALLBÖHMER, P.; RODRÍGUES, C. A.; ÖZEL, T.; ALTAN, T. (2000). High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.98, n.1, p.104-115.

FALLBÖHMER, P.; ALTAN T.; TÖNSHOFF, H.; NAKAGAWA, T.; (1996). Survey of the die and mold manufacturing industry. *Journal of Material Processing Technology*, Amsterdam, v.59, n.1/2, p.158-168, May.

FAROUKI, R.T.; MANJUNATHAIAH, J.; YAN, G.F. (1999). G Codes for the specification of pythagorean- hodograph tool paths and associated feed rate functions on open-architecture CNC machines. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Amsterdam, v.39, n.1, p.123-142, Jan.

FERRARESI, D. (1977). *Fundamentos da usinagem dos metais*. 9.ed. São Paulo: Edgard Blücher.

FERRARESI, D; PALLEROSI, C. A.; RUFINO, R. (1976). *Apostila sobre fresamento*. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, p.71.

FIEDLER, U.; WÜRZ, T. (2001). Fixação e balanceamento de ferramentas. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.37, n.421, p.24-37, fev.

FINZER, T. (1998). High speed machining of sculptured Surfaces in die and mold manufacturing. In: SCULPTURED SURFACE CONFERENCE, MACHINING IMPOSSIBLE SHAPE, 1998, Auburn Hills. *Proceedings*. p.9-11.

FRIEDHOFF, J. (2002). Fresamento a alta velocidade de materiais endurecidos. *Máquinas e Metais*, n.438, p.46-53.

GAMARRA, J. R. (2003), *Usinagem em altíssimas velocidades*. São Paulo: Érica, p. 94-110.

GE FANUC [2000]. *Automation CNC: technical brief NURBS interpolation*. Japan.

GEIST, J. (1999). Influence of HSC-appropriate machining parameters on NC programming. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA – INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA MANUFATURA PARA O ANO 2000, 4., 1999, Santa Bárbara d'Oeste. *Anais...* Santa Bárbara d'Oeste: UNIMEP. p.57-68.

GOMES, J.O. (2001). Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be. 144p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GOMES, J.O.; PITORRI, M.A.; SOUZA, G. O. (2003). Otimização do processo de desbaste de machos para ferramentas de injeção. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.40, n.454, p.116-129, nov.

GOMES, J.O.; SILVA, J.C. (2003). Análise da utilização de fresas de topo esférico de arestas helicoidais e de arestas retos no acabamento de superfícies complexas no aço SAE H13 (48HRC). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2., 2003, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: s.n. 1 CD-ROM.

GORCZYCA, F. E. (1987). Application of metal cutting theory. New York, Industrial press. ISBN 0-8311-1176-3.

GREGOLIN, J.A.R.; ANTUNES, A.M.S. (2002). *Estudo prospectivo sobre tecnologias de fabricação de moldes para injeção de plásticos*. Relatório. Projeto de pesquisa fomentado pela FINEP.

GUZEL, B.U.; LAZOGLU, I. (2003). Increasing productivity in sculpture surface machining via off-line piecewise variable feed rate scheduling based on the force system model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Amsterdam, v.44, n.1, p.21-28, Jan.

HENRIQUES, J.R. (1999). *Integração entre sistemas CAD/CAPP/CAM*. Santa Bárbara d'Oeste: Universidade Metodista de Piracicaba. Trabalho de Formatura.

KAHLES, J.F.; FIELD, M.; HARVEY, S.M. (1979). Survey: production uses & development work on high speed machining. *American Machinist*, New York, v.123, n.3, p.117-121, Mar.

KING, R. I., VAUGHN, R. L. (1984). A synoptic review of High Speed Machining from Salomon to the present, in high speed machining, American Society of Mechanical Engineers, p. 1-13.

KING, R. I; McDONALD, J. (1976). Product design implications of new high speed milling techniques, ASME.

KIRSCHNIK, G.M. (1997). Características técnicas de comando numérico computadorizado para HSC. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA – USINAGEM COM ALTÍSSIMA VELOCIDADE DE CORTE E ALTA PRECISÃO, 2., 1997, Santa Bárbara d'Oeste. *Anais...* Santa Bárbara d'Oeste: UNIMEP. p.1-15.

KNOPPERS, R.; GUNNINK, J.W. (2000). Ferramental de compactação de tempo usando tecnologia e arquivos STL. *Máquinas e Metais*, v.36, n.415, p.124-137, ago.

KOENIGSBERGER, F.; SABBERWAL A.J.P. (1961). An Investigation into the cutting forces pulsations during milling operations. *International Journal of Machine Tool Design Research*, Oxford, v.1, p.15-33.

KONG, L.; FUH, J. Y. H.; LEE, K. S.; LING, L. S.; ZHANG, A. Y. (2003). A Windows-native 3D plastic injection mold design system. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.139, n.1/3, p.81-89, Aug.

KOREN, Y. (1989). In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals handbook. 9th ed. Metals Park, Ohio, USA. v.16 - Machining, p.613-617.

KRONENBERG, M. (1966). *Machining science and application* – theory and practice to operation and development of machining process. Oxford: Pergamon Press.

LARTIGUE, C.; THIEBAUT, F.; MAEKAWA, T. (2001). CNC tool path in terms of B-Spline curves. *Computer-Aided Design*, London, v.33, n.4, p.307-319, Apr.

LAURENT, P.; SABLONNIÈRE, P. (2001). Pierre Bézier: an engineer and a mathematician. *Computer Aided Geometric Design*, Amsterdam, v.18, p.609-617.

LAZOGLU, I. (2003). Sculptured surface machining: a generalized model of ball-end milling force system. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Amsterdam, v.43, n.5, p.453–462, Apr.

LIANG, S. Y.; HECKER, R.; LANDERS, R. (2002). Machining process monitoring and control: The State-of-the-art. Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress. New Orleans, US, nov. 2002.

LIMA, V.T.; LACERDA, H.B.; LIMA, A.M. (2003). Análise e predição de forças de corte e vibrações tipo “chatter” no fresamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2., 2003, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: ABCM. 1 CD-ROM.

LO, C.C. (1998). A New approach to CNC tool path generation. *Computer-Aided Design*, London, v.30, n.8, p.649-655, July.

LYNCH, M. (1992). *Computer numerical control for machining*. New York: McGraw-Hill.

_____. (1994). Computer numerical control accessory devices. New York: McGraw-Hill.

MACHADO, A.R.; SILVA, M.B. (1999). *Usinagem dos metais*. 4.versão. Uberlândia: Ed.UFU. Apostila.

MARCONDES, F. C.; SANTOS, A. V. (2003). *Usinagem em altíssimas velocidades*. São Paulo: Érica, p.36-38.

McGEE, F.J. (1979). Study: methods for aluminum work pieces. *American Machinist*, v.123, n.3, p.121-126, Mar.

MICHELETTI, G. F. (1977). Advanced manufacturing process: Metal cutting. Apostila didática. Universidade de São Paulo-Escola de engenharia de São Carlos.

MODERN MACHINE SHOP ON LINE (2002). High speed machining. MMS Online. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/hsm>>. Acesso em 12 jan. 2002.

MONREAL, M.; RODRIGUEZ, C. (2003). Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling. *Computer-Aided Design*, London, v.35, n.4, p.395-401, Apr.

MOREIRA, J. (2003). Tecnologia CNC para usinagem a alta velocidade. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.39, n.446, p.149-159, mar.

MÜLLER, P.; SOTO, M. (1999). Usinagem sem refrigeração de furos e roscas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA – INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA MANUFATURA PARA O ANO 2000, 4., 1999, Santa Bárbara d'Oeste. *Anais...* Santa Bárbara d'Oeste: UNIMEP. p.127-133.

NING, Y.; RAHMAN, M.; WONG, Y.S. (2001). Investigation of chip formation in high speed end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 113, p.360-367.

NOTAS MÁQUINAS E METAIS (2000). Ferramentarias investem no Brasil. (2000). *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.36, n.408, p.8, jan.

OLIVEIRA, F. G. (2003). *Usinagem em altíssimas velocidades*. São Paulo: Érica, p.29-35.

RIGBY, P. (1993). High speed milling in the mold and die making industries. In: DIAMOND AND CBN ULTRAHARD MATERIALS SYMPOSIUM, Ontario.

SANDVIK (1999). *Fabricação de moldes e matrizes: guia de aplicações*. São Paulo.

_____. (2000). *Steel turning*. Suécia. 1 CD-ROM.

SCHMITT, T. (1996). High speed milling machines. In: Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte, 1996, Santa Bárbara d'Oeste.

SCHOCK, J. (1998). Usos potenciais da HSC na usinagem de moldes e matrizes. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.35, n.394, p.28-33, nov.

SCHULTZ, D.F. (1999). *What's wrong with postprocessor*. Metalworking Technology Guide. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/mtg9808.html>>. Acesso em: 29/04/1999.

SCHULZ, H.. (1996). High speed milling machines. In: Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte, 1996, Santa Bárbara d'Oeste.

_____. (1997). Start of art and trends of high-speed machining. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA – USINAGEM COM ALTÍSSIMA VELOCIDADE DE CORTE E ALTA PRECISÃO, 2., 1997, Santa Bárbara d'Oeste. *Anais...* Santa Bárbara d'Oeste: UNIMEP.

_____. (1999). The History of high-speed machining. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, 5., 1999*, Opatija. p.o002-o0012.

_____. (2001). Determinação e análise dos fatores tecnológicos e geométricos sobre o processo de usinagem com altíssima velocidade de corte. Projeto submetido ao Programa Probral, Capes.

SCHULZ, H.; FINZER, T. (1999). Optimization of the cutting process using HSC in die and mold manufacturing. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, 5., 1999, Opatija.

SCHULZ, H.; ABELE, E.; SAHM, A. (2001). High-speed machining – fundamentals and industrial application. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA – MANUFATURA AVANÇADA, 6., 2001, Piracicaba. *Anais...* Santa Bárbara d'Oeste: UNIMEP. p.25-44.

SCHÜTZER, K.; SOUZA, A. F.; STANIK, M. (2000): Aplicação da Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte na Manufatura de Moldes e Matrizes. In: Anais do Congresso Usinagem 2000. São Paulo, Set.

SCHÜTZER, K.; SOUZA, A.F. (1999). Introdução do processo HSC na indústria brasileira. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.36, n.407, p.32-45, Dez.

_____. (2000a). Aplicação da usinagem com altíssima velocidade de corte na manufatura de moldes e matrizes. In: CONGRESSO USINAGEM, 2000, São Paulo, *Anais...* 1 CD-ROM.

_____. (2000b). Concepção do produto e fabricação utilizando a tecnologia de usinagem em altíssima velocidade de corte. In: CONGRESSO NACIONAL DE MECÂNICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 6., 2000. *Anais...* Aveiro, PT. p.635-644.

SIEMENS USER MANUAL (2000). *Manual de usuários*. Disponível em CD ROM.

SILVA, L. R. (2002). *Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de níquel com alta velocidade de corte*. 189p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, São Carlos, 2002.

SILVA FILHO, M.S. (2000). *Fresamento por regiões como uma alternativa na usinagem de cavidades para moldes e matrizes*. 121p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SINHOFF, V.; ALTMÜLLER, S.; EISENBLÄTTER, G. (1999). A Usinagem a seco em alta velocidade: revolução ou evolução?. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.35, n.404, p.22-37, set.

SOGABE, M. (1996). Otimizados, os motores lineares poderão dar muito maior velocidade a usinagem. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.31, n.362, p.36-41, mar.

SOUZA, A.F. (2001). *Análise das interpolações de trajetórias de ferramenta na usinagem HSC (high speed cutting) em superfícies complexas*. 89p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba.

SOUZA, A.F.; SCHUTZER, K. (2001). Interpolating free form tool path for high speed cutting technology. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, 7., 2001, Zagreb. *Proceedings...* p.i146-i154.

SOUZA, A.F.; COELHO, R.T. (2003). O Caminho para atingir o estado-da-arte é o bom entendimento. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.40, n.455, p. 82-97, Dez.

TÖNSHOFF, H.K.; MEYERHOFF, M. (1996). Entwicklungstendenzen im Werkzeug- und Formenbau, Ergebnisse einer internationalen Umfrage. In: VDI-Z Spezial Werkzeug- und Formenbau.

TRENT, E.M.; WRIGHT, K. P. (2000). Metal Cutting. Butterworth-Heinemann, 466p.

UG/POST MANUAL (2001). Unigraphics Solutions.

VAUGHN, R.L.; QUACKENBUSH, L.J. (1966). *The High-speed milling of titanium alloys*. Detroit: Society of Manufacturing Engineers. Technical Paper MR 66-151.

VAUGHN, R.L.; QUACKENBUSH, L.J.; COLWELL, L.V. (1962). *Shock waves and vibrations in high-speed milling*. New York: American Society of Mechanical Engineers. Technical paper 62-WA-282.

VOISINET, D.D. (1988). *CADD - projeto e desenho auxiliados por computador*. São Paulo: McGraw-Hill.

VOLPATO, N. (1995). Modelamento e geração de programa CNC para a usinagem de moldes. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.30, n.348, p.62-76, jan.

WECK, M.; SCHUMACHER, A.; QUEINS, M. (1999). Nova geração de máquinas-ferramenta de alta velocidade. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.35, n.401, p.16-39, jun.

WEINERT, K.; GUNTERMANN, G. (2000). Usinagem de superfícies complexas. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.36, n.415, p.18-27, ago.

WITTE, H. (1998). *Máquinas ferramentas*. São Paulo: Hemus. Cap.3, p.395.

YAU, H.T.; KUO, M.J. (2001). NURBS machining and feed rate adjustment for high-speed cutting of complex sculptured surfaces. *International Journal of Production Research*, London, v.39, n.1, p.21-41, Jan.

ZELINSKI, P. (2001). *A Better process from better posts*. Disponível em:<<http://www.mmsonline.com/articles/110003.html>>. Acesso em: 08/04/2001.

ZHENG, L.; CHIOU, Y.S.; LIANG, S.Y. (1996). Three dimensional cutting forces analysis in end milling. *International Journal of Mechanical Science*, Amsterdam, v.38, n.3, p.259-269, Mar.

7 APÊNDICES

APÊNDICE 01 – Apêndice de multimídia

No Cd-rom anexo na pagina seguinte estão apresentadas, em formatos de vídeo, duas constatações obtidas ao decorrer deste trabalho. Os filmes podem ser executados no software *Windows Media Player*.

- ♦ **Vídeo 01:** Comportamento da máquina CNC na usinagem contendo trajetórias complexas. Este vídeo teve por finalidade demonstrar as intensas alterações da velocidade de avanço na usinagem de formas complexas. As movimentações observadas no vídeo representam as trajetórias de ferramenta apresentadas na Figura 7.8. Foi utilizado o método de interpolação linear, com tolerância de cálculo 0,005 mm; velocidade de avanço 4.500 mm/min; foram utilizados todos os comando para a otimização do avanço disponíveis neste CNC. Foi empregado o comando para omitir a desaceleração da máquina na transição entre blocos do programa NC (comando G64 para este CNC), como apresentado na revisão da literatura.

Figura 7.8: Trajetórias da ferramenta visualizadas no vídeo

As características geométricas utilizadas para o cálculo destas trajetórias foram elaboradas com a finalidade de tornar visível o problema da usinagem em alta velocidade de avanço, e enfatizar a importância deste tópico de estudo na fabricação de formas complexas em altas velocidades.

- ♦ **Vídeo 02:** Este vídeo auto-executável apresenta o método empregado para construção de uma curva *Spline* em sistemas computacionais. O vídeo mostra a construção de uma *Spline* utilizando-se da formulação proposta por Bézier em 1972. Este polinômio paramétrico foi implementado no software Excel e mostra a curva gerada por este método; o respectivo polígono de controle; e como são realizadas edições na curva.

APÊNDICE 02 - Comparação entre a aquisição de dado via Ethernet e ProfiBus.

Utilizando-se de um CNC de arquitetura aberta, as informações de posição e velocidade da máquina eram obtidas pela comunicação on-line via *Ethernet*, entre uma placa de rede disponível no CNC do centro de usinagem e uma interface criada com o software Labview, utilizando-se do protocolo de comunicação NETDDE desenvolvido pela Microsoft. A Figura 7.1 ilustra esta comunicação realizada com a máquina para obtenção dos dados. Deve-se notar, que neste método a aquisição é realizada pela interface homem-máquina (MMC – CNC).

Figura 7.1: Comunicação com CNC de aberta via NETDDE

Com este método de aquisição foi possível visualizar o comportamento da velocidade de avanço em áreas complexas, identificando e quantificando as áreas críticas para a velocidade de avanço. Entretanto, este método permite baixa frequência de aquisição de sinais. A taxa de aquisição também não é homogênea; ela é dependente do sistema operacional (Windows) e varia durante um intervalo de tempo. A aquisição via Profibus permite uma taxa constante de 70 Hz. O gráfico da Figura 7.2 apresenta uma comparação entre os dois métodos. A trajetória de ferramenta proveniente do programa NC (em azul), e os pontos referentes à

velocidade de avanço capturados durante a execução de um experimento de usinagem.

Figura 7.2: Aquisição de dados

APÊNDICE 03 – Rotinas LabView

1-) Rotina para a aquisição das componentes da força de usinagem e da posição.

2-) Rotina para a aquisição da posição da máquina e da velocidade de avanço.

APÊNDICE 04 - Projeto do filtro para tratamento dos sinais de força em relação aos ruídos dinâmicos dos sistemas peça/dinamômetro.

Neste trabalho, com a colaboração de um especialista, teve-se a intenção de projetar um filtro para tratamentos dos sinais de força obtidos pelo dinamômetro, com a finalidade de eliminar a influencia da vibração livre do corpo de prova/dinamômetro nos dados de força obtidos pelo dinamômetro. Para verificar a eficiência do filtro desenvolvido, foi utilizada a aquisição da vibração natural, realizada com uma entrada impulso, como descrito previamente. O filtro anulou a vibração natural do sistema, como comprova a Figura 7.3. O gráfico apresenta as componentes Fx e Fy geradas pela excitação externa e seus respectivos sinais tratados pelo filtro Chebyshev tipo II, de oitava ordem, com stop band ripple 40 db e stop band 600 Hz (passa baixa).

Figura 7.3: Sinais de vibração natural do sistema e os respectivos filtrados

Após esta análise, este filtro foi empregado para a aquisição das componentes cartesianas da força de usinagem.

APÊNDICE 05 - Desvios de trajetória devido à interpolação do CNC

Através de uma trajetória retilínea em diagonal (interpolação dos eixos X e Y), verificou-se o erro de trajetória em função da interpolação do CNC. Um programa NC foi executado para realizar uma movimentação linear entre dois pontos, representando uma trajetória de 200 mm, com 4.500 mm/min de avanço. Através da interface Profibus, foi possível capturar pontos discretos desta movimentação, entre o início e fim da trajetória. Observou-se alguns pontos distantes, aproximadamente 0,1 mm, da trajetória linear, como ilustra a Figura 7.5. Desta forma, comprova-se que a exatidão da trajetória fica comprometida pela interpolação realizada pelo CNC para descrever uma trajetória entre dois pontos distantes.

Figura 7.5: Desvio da trajetória em função do CNC

APÊNDICE 06 – Fotos dos cavacos obtidos no experimental 3, na região inicial da usinagem, para as velocidades de corte 220 m/min e 440m/min. Ampliação: 2.500X.

Figura 7.6: Velocidade de corte – 220m/min

Figura 7.7: Velocidade de corte – 440m/min