

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA

PROCESSOS E MODOS DE FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIES
ESFÉRICAS DE PRECISÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECANICA

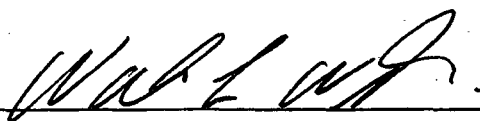
ROLANDO VARGAS VALLEJOS

FLORIANÓPOLIS, ABRIL 1992

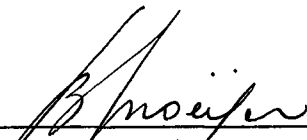
PROCESSOS E MODOS DE FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIES
ESFÉRICAS DE PRECISÃO

ROLANDO VARGAS VALLEJOS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECANICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA

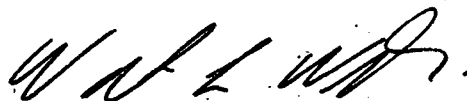


Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.
Orientador

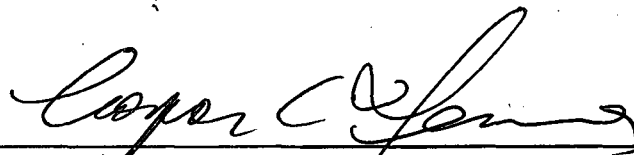


Prof. Berend Snoeijer, Dr.-Ing.
Coordenador da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

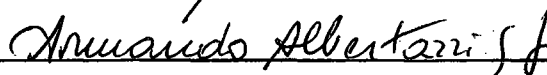
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.



Prof. Caspar Erich Stemmer, Esp.



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng. Mec.



Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng. Mec.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, pela orientação e a amizade inestimável.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e desenvolvimento (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos. A COPESP, como responsável pela quota.

Ao M. Eng. Mec. Rolf Bertrand Schroeter e ao doutorando M. Eng. Mec. Antônio Salvador da Rocha, pelas sugestões e pelo apoio durante a elaboração desta Dissertação.

Ao M. Eng. Mec. Juan Carlos Castillo V. e aos mestrandos Moacir Eckhardt e João Carlos Oliveira Lopes, pela amizade e incentivo.

Aos colegas de curso e professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos técnicos Hamilton Silveira, Valtair Fabriciano Garcez, Sérgio dos Santos, Osvaldo Sodré e aos graduandos Manfred Molz, André Holztratner, Renato Rosa Improta, pelo auxílio prestado.

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório de Máquinas-Ferramentas - USIMAQ, do Grupo de Pesquisa e Treinamento em Comando Numérico - GRUCON e do Laboratório de Metrologia - LABMETRO, pela cooperação prestada.

A firma Alcan Alumínio do Brasil S.A., pela doação do material.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

INDICE

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. | ESTADO DA ARTE | 3 |
| 2.1. | Fabricação de superfícies esféricas | 3 |
| 2.1.1. | Análise da matéria-prima | 3 |
| 2.1.2. | Geração da forma esférica | 4 |
| 2.1.3. | Retificação | 6 |
| 2.1.4. | Lapidação | 7 |
| 2.1.5. | Polimento | 8 |
| 2.1.6. | Limpeza e inspeção | 9 |
| 2.2. | Descrição básica das máquinas-ferramenta | 10 |
| 2.2.1. | Máquina com deslocamento "T" | 10 |
| 2.2.2. | Máquina de contorno com deslocamentos perpendiculares "stacke slideway" ... | 11 |
| 2.2.3. | Máquina polar "R - θ " | 12 |
| 2.2.4. | "Chordal generator" | 13 |
| 2.2.5. | Fresadora de ultraprecisão | 14 |
| 2.3. | Componentes básicos das máquinas | 15 |
| 2.3.1. | Árvore | 15 |
| 2.3.2. | Sistema de acionamento | 17 |
| 2.3.3. | Estação de posicionamento da ferramenta | 17 |
| 2.3.4. | Guias de deslocamento | 18 |
| 2.3.5. | Base | 18 |
| 2.3.6. | Sistema de suporte | 19 |
| 2.3.7. | Sistema de suporte da ferramenta | 19 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.3.8. | Sistema de controle da máquina | 20 |
| 2.3.9. | Sistema de controle do meio ambiente | 20 |
| 2.4. | Parâmetros gerais de operação | 21 |
| 2.4.1. | Velocidade de corte | 21 |
| 2.4.2. | Avanço | 22 |
| 2.4.3. | Penetração passiva | 22 |
| 2.4.4. | Fluido de corte | 22 |
| 2.5. | Ferramentas de corte | 23 |
| 2.5.1. | Diamante natural | 24 |
| 2.5.2. | Diamante sintético | 25 |
| 2.5.3. | Geometria da quina e afiação | 25 |
| 3. | ANÁLISE TEÓRICA | 26 |
| 3.1. | Introdução | 26 |
| 3.2. | Geração de superfícies esféricas pela superposição de movimentos circulares | 26 |
| 3.2.1. | Modo torneamento | 27 |
| 3.2.2. | Modo fresamento | 32 |
| 3.3. | Geração de superfícies esféricas pela superposição de movimentos circulares e de translação interpolada | 38 |
| 3.3.1. | Método de interpolação empregando uma fresa de matrizaria com topo esférico - DIN 1889 | 39 |
| 3.3.2. | Método de interpolação empregando uma ferramenta de torneamento | 40 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4. | PREPARAÇÃO DOS EXPERIMENTOS | 42 |
| 4.1. | Generalidades | 42 |
| 4.2. | Máquinas-ferramenta utilizadas | 42 |
| 4.2.1. | Máquina-ferramenta convencional | 43 |
| 4.2.2. | Centro de usinagem CNC | 45 |
| 4.3. | Dispositivos utilizados | 46 |
| 4.3.1. | Mesa divisora circular | 46 |
| 4.3.2. | Carro transversal porta-ferramenta .. | 46 |
| 4.3.3. | Dispositivo de fixação do corpo de prova | 46 |
| 4.3.4. | Suporte da ferramenta | 47 |
| 4.4. | Material ensaiado | 47 |
| 4.4.1. | Composição e propriedades mecânicas . | 48 |
| 4.4.2. | Corpos de prova | 49 |
| 4.5. | Ferramentas | 50 |
| 4.5.1. | Ferramentas de aço-rápido | 50 |
| 4.5.2. | Ferramenta de diamante | 51 |
| 4.6. | Equipamentos auxiliares empregados nos ensaios | 52 |
| 4.6.1. | Retificadora óptica | 52 |
| 4.6.2. | Microscópio óptico de medição | 53 |
| 4.6.3. | Equipamento para verificação da qualidade da superfície esférica | 53 |
| 4.7. | Determinação das variáveis do processo | 54 |
| 4.7.1. | Posicionamento dos eixos ferramenta/peça | 54 |
| 4.7.2. | Ângulo de incidência (α_n) | 55 |
| 4.7.3. | Ângulo de saída (γ_n) | 55 |
| 4.7.4. | Ângulo de inclinação (λ_s) | 55 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4.7.5. | Raio de quina (r_e) | 55 |
| 4.7.6. | Velocidade de corte (vc) | 56 |
| 4.7.7. | Avanço (f) | 56 |
| 4.7.8. | Penetração passiva (a_p) | 56 |
| 4.7.9. | Fluido de corte | 57 |
| 4.8. | Metodologia dos ensaios | 57 |
| 5. | DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS | 59 |
| 5.1. | Considerações iniciais aos ensaios | 59 |
| 5.2. | Ensaio realizado com a fresadora convencional | 60 |
| 5.2.1. | Erros de posicionamento da ferramenta no sistema de coordenadas da peça ... | 60 |
| 5.2.2. | Avaliação do erro de forma das semi-esferas | 60 |
| 5.2.3. | Geometria da ferramenta para os modos fresamento e torneamento | 61 |
| 5.2.4. | Verificação da qualidade das semi-esferas | 62 |
| 5.2.5. | Otimização da geometria da ferramenta | 63 |
| 5.2.6. | Verificação da qualidade das semi-esferas | 64 |
| 5.2.7. | Velocidade de corte | 64 |
| 5.2.8. | Avanço | 65 |
| 5.2.9. | Penetração passiva | 66 |
| 5.2.10. | Fluido de corte | 66 |
| 5.2.11. | Ensaio realizado com a ferramenta de diamante | 66 |

| | |
|--|----|
| 5.3. Ensaaios realizados com o centro de usinagem ... | 67 |
| 5.3.1. Modo torneamento | 67 |
| 5.3.2. Método de interpolação | 67 |
| 5.4. Verificação da qualidade das semi-esferas | 68 |
| | |
| 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS | 69 |
| | |
| 6.1 Influência sobre a forma da superfície esférica | 69 |
| 6.1.1. Erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Z | 69 |
| 6.1.2. Erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo X | 70 |
| 6.1.3. Erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y | 72 |
| 6.1.4. Combinação de erros | 74 |
| 6.1.5. Comparação entre os modos torneamento e fresamento | 74 |
| 6.1.6. Velocidade de corte no modo torneamento | 75 |
| 6.1.7. Avanço no modo torneamento | 75 |
| 6.2. Influência sobre a rugosidade da superfície esférica | 76 |
| 6.2.1. Ângulo de incidência (α_n) | 76 |
| 6.2.2. Ângulo de saída (γ_n) | 76 |
| 6.2.3. Ângulo de inclinação (λ_s) | 78 |
| 6.2.4. Otimização da geometria da ferramenta | 78 |
| 6.2.5. Velocidade de corte | 80 |
| 6.2.6. Avanço | 81 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 6.2.7. | Penetração passiva | 82 |
| 6.2.8. | Fluido de corte | 83 |
| 6.3. | Ensaio realizado com ferramenta de diamante . | 83 |
| 6.4. | Ensaio realizado com o centro de usinagem ... | 84 |
| 6.4.1. | Modo torneamento | 84 |
| 6.4.2. | Método de interpolação | 84 |
| 7. | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PROXIMOS TRABALHOS | 85 |
| 7.1. | Conclusões | 85 |
| 7.2 | Sugestões para próximos trabalhos | 87 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 88 |
| | ANEXO 1 | 92 |
| | ANEXO 2 | 95 |
| | ANEXO 3 | 98 |
| | ANEXO 4 | 103 |

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

| | |
|--|----|
| 2.1 - Representação esquemática do processo de retificação para superfícies esféricas | 7 |
| 2.2 - Representação esquemática do processo de lapidação para superfícies esféricas | 8 |
| 2.3 - Representação esquemática de uma máquina com deslocamento "T" | 11 |
| 2.4 - Representação esquemática de uma máquina de contorno com deslocamentos perpendiculares | 12 |
| 2.5 - Representação esquemática de uma máquina polar "R - θ " | 13 |
| 2.6 - Representação esquemática de uma máquina "gerador de corda" | 14 |
| 2.7 - Representação esquemática de uma fresadora de ultraprecisão | 15 |
| 2.8 - Representação esquemática de uma árvore com mancais aerostáticos esféricos | 16 |
| 2.9 - Movimentos indesejáveis na árvore de uma máquina-ferramenta | 16 |

CAPÍTULO 3

| | |
|--|----|
| 3.1 - Representação esquemática da situação desejada para o modo torneamento | 27 |
| 3.2 - Influência do raio de quina da ferramenta | |

| | |
|---|----|
| e do avanço sobre a rugosidade cinemática | 28 |
| 3.3 - Correção do diâmetro e da posição da superfície esférica | 29 |
| 3.4 - Influência do erro de posicionamento da ferramenta no eixo Y sobre a forma da semi-esfera . | 30 |
| 3.5 - Influência do erro de posicionamento da ferramenta no eixo X sobre a forma da semi-esfera . | 31 |
| 3.6 - Representação esquemática do modo fresamento na geração de uma semi-esfera | 33 |
| 3.7 - Geração de uma semi-esfera de grande diâmetro pelo modo fresamento | 33 |
| 3.8 - Representação esquemática da situação desejada para o modo fresamento | 34 |
| 3.9 - Posicionamento do centro da semi-esfera pelo deslocamento da ferramenta segundo o eixo Z | 35 |
| 3.10 - Influência sobre a forma da semi-esfera considerando o posicionamento da ferramenta sobre o eixo X | 36 |
| 3.11 - Esquema da montagem que N. R. Erickson utilizou para analisar os erros de posicionamento da ferramenta sobre o eixo X | 37 |
| 3.12 - Representação do tipo de superfície que se consegue no modo fresamento, devido aos erros de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y | 38 |
| 3.13 - Simulação do programa para a obtenção de uma semi-esfera de diâmetro qualquer | 39 |
| 3.14 - Influência de uma ferramenta com gume defeituoso sobre a forma da superfície esférica, quando esta descreve um movimento de translação interpolado ... | 40 |

| | |
|--|----|
| 3.15 - Influência da grandeza do raio de gume da ferramenta sobre a forma da superfície esférica | 41 |
|--|----|

CAPÍTULO 4

| | |
|---|----|
| 4.1 - Montagem realizada na fresadora universal Ruhla FUW 250/IV para reproduzir o modo torneamento | 44 |
| 4.2 - Montagem realizada na fresadora universal Ruhla FUW 250/IV para reproduzir o modo fresamento | 44 |
| 4.3 - Montagem realizada no centro de usinagem CNC Hüller Hille nb-h 65 para reproduzir o modo torneamento e o método de interpolação | 45 |
| 4.4 - Dispositivo de fixação do corpo de prova utilizado no modo fresamento | 46 |
| 4.5 - Dispositivo de fixação do corpo de prova utilizado no modo torneamento | 47 |
| 4.6 - Suporte de ferramenta utilizado no modo torneamento | 48 |
| 4.7 - Desenho dos corpos de prova utilizados nos diferentes ensaios | 50 |
| 4.8 - Ferramenta tipo fresa frontal de um dente utilizada no modo fresamento | 51 |
| 4.9 - Ferramenta de diamante usada no modo torneamento .. | 52 |

CAPÍTULO 5

| | |
|--|----|
| 5.1 - Representação esquemática da geometria da ferramenta utilizada no modo fresamento | 61 |
| 5.2 - Representação esquemática das ferramentas | |

| | |
|--|----|
| utilizadas na otimização do modo torneamento | 63 |
|--|----|

CAPÍTULO 6

| | |
|---|----|
| 6.1 - Saliência característica na presença do erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo X da peça, no modo fresamento. Ampliação: 25 X | 70 |
| 6.2 - Gráfico obtido na máquina de medir por coordenadas, e que apresenta um corte da semi-esfera no plano ZX. Para erros positivos a superfície tende a ter uma forma achatada | 71 |
| 6.3 - Gráfico obtido na máquina de medir por coordenadas, e que apresenta um corte da semi-esfera no plano ZX. Para erros negativos a superfície tende a ter uma forma pontiaguda | 72 |
| 6.4 - Saliência característica na presença do erro de posicionamento negativo da ferramenta sobre o eixo Y da peça, no modo torneamento. Ampliação: 25 X ... | 73 |
| 6.5 - Influência da velocidade de corte sobre a forma da semi-esfera | 75 |
| 6.6 - Influência do avanço sobre a forma da semi-esfera . | 76 |
| 6.7 - Influência do ângulo de saída sobre a rugosidade da semi-esfera | 77 |
| 6.8 - Influência do ângulo de inclinação sobre a rugosidade da semi-esfera | 78 |
| 6.9 - Otimização do gume da ferramenta para a obtenção de uma menor rugosidade no modo torneamento | 79 |
| 6.10 - Variação da rugosidade ao longo da superfície da semi-esfera para o modo torneamento | 80 |

| | |
|---|----|
| 6.11 - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade | 81 |
| 6.12 - Variação da rugosidade ao longo da superfície da semi-esfera para o modo fresamento | 82 |
| 6.13 - Influência do avanço sobre a rugosidade | 82 |

S I M B O L O G I A

| | | |
|------------------|---------|--|
| D | mm | Diâmetro teórico da superfície esférica |
| D' | mm | Diâmetro da superfície esférica gerada |
| D _f | mm | Diâmetro que a ferramenta descreve |
| f | mm/rot | Avanço |
| h | mm | Espessura de usinagem |
| i ₁ | | Relação de engrenagens da fresadora e da mesa giratória |
| i ₂ | | Relação entre a base circular e a manivela da mesa divisora |
| Im | μm | Incerteza de medição |
| IR | μm | Indeterminação do resultado |
| n _f | rot/min | Rotação da ferramenta |
| n _p | rot/min | Rotação da peça |
| P _f | mm | Passo do fuso da fresadora |
| r _e | mm | Raio de quina |
| R _a | μm | Desvio médio aritmético de rugosidade |
| R _{máx} | μm | Profundidade máxima individual de rugosidade |
| R _t | μm e mm | Profundidade máxima de rugosidade |
| R(z) | mm | Raio (medido a partir do eixo Z) da superfície que está sendo gerada, como função de Z |
| s | mm/min | Avanço no controle da fresadora |
| S | mm | Distância entre o plano da ferramenta e o eixo da mesa giratória em Z = 0 |
| vc | m/min | Velocidade de corte |
| α _n | graus | Ângulo de incidência |
| γ _n | graus | Ângulo de saída |

| | | |
|-----------------|-------|--|
| ε_r | graus | Ângulo de quina |
| Δx | mm | Erro de posicionamento sobre o eixo X |
| Δy | mm | Erro de posicionamento sobre o eixo Y |
| Δz | mm | Erro de posicionamento sobre o eixo Z |
| λ_s | graus | Ângulo de inclinação |
| φ | graus | Ângulo entre a ferramenta e o eixo X da peça |
| χ_r | graus | Ângulo de direção |

R E S U M O

Existem diferentes processos para a geração de superfícies esféricas. Estes processos são diferenciados segundo o tipo de movimentos que a ferramenta e/ou a peça realizam. Em função destes movimentos, variam as fontes de erro que influenciam a forma e a rugosidade da superfície esférica.

O objetivo deste trabalho é estudar estes processos considerando os possíveis fatores que levam a erros geométricos e microgeométricos durante a usinagem. Características da máquina-ferramenta, erros de posicionamento da ferramenta sobre o sistema de coordenadas da peça, qualidade geométrica da ferramenta e parâmetros de usinagem, são considerados fatores de influência na geração de superfícies esféricas.

Nos ensaios realizados, foram obtidos menores erros de esfericidade utilizando o modo torneamento, estes erros estão na faixa de $4 \pm 1 \mu\text{m}$. A rugosidade R_a obtida foi de $0,68 \pm 0,04 \mu\text{m}$.

A B S T R A C T

There are different processes for the generation of spherical surfaces. These processes are differentiated by the type of movements that the tool and/or the part make. These movements cause the error sources that influence the shape and roughness of the spherical surface to vary.

This work aims the study of these processes, considering the probable factors that can cause geometrical and microgeometrical errors during machining. Characteristics of the machine-tool, tool positioning errors related to the coordinate system of the part, geometrical quality of the tool and machining parameters are considered influential factors for the generation of spherical surfaces.

During the experiments, smaller shape errors were obtained in the turning mode. The magnitude of these errors was of 4 ± 1 μm , and the surface roughness (Ra) was of $0,68 \pm 0,04$ μm .

C A P Í T U L O 1

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico dos últimos anos, particularmente o desenvolvimento da eletrônica, abriu novos horizontes para o projeto de sistemas microtécnicos e sistemas mecânicos. A integração da eletrônica em máquinas-ferramenta, por exemplo, hoje é estado da arte. Mesmo assim, a fabricação de precisão ainda mantém uma posição chave na Engenharia de Precisão.

A fabricação de componentes com tolerâncias dimensionais pequenas (classe IT 6 e menores) exige maior conhecimento e domínio dos processos de fabricação. Maior exigência na qualidade dos componentes implica em ter-se que controlar maior quantidade de variáveis dentro da tecnologia de fabricação, dispor-se de máquinas-ferramenta com maior precisão, avançadas tecnologias de acionamento e de controle e garantia da qualidade.

Em sistemas de alta tecnologia, como máquinas-ferramenta de ultraprecisão, máquinas de medir por coordenadas, giroscópios para navegação aérea, mancais aerostáticos, sistemas de posicionamento de telescópios, faz-se necessário a fabricação de componentes de sistemas dinâmicos de elevada precisão. Os elementos geométricos principais nestes sub-sistemas dinâmicos são, por exemplo, calotas esféricas.

Neste trabalho são estudadas as técnicas mais conhecidas de fabricação de superfícies esféricas e analisados os fatores que levam a erros geométricos e microgeométricos durante o processo

de usinagem. Por exemplo, a influência do posicionamento relativo entre os eixos de rotação da peça e da ferramenta sobre a forma das superfícies esféricas como também a influência das variações dos parâmetros de usinagem sobre a forma e a rugosidade das mesmas.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1. Fabricação de superfícies esféricas

Existem vários processos para gerar uma superfície esférica. Estes processos variam conforme a matéria-prima, a tolerância dimensional que se deseja atingir, as máquinas-ferramenta e as ferramentas utilizadas. As etapas que fazem parte de um processo de fabricação também variam. Entre essas etapas as mais comuns são [1] :

- análise da matéria prima;
- geração da forma esférica;
- retificação;
- lapidação;
- polimento;
- limpeza e inspeção.

2.1.1. Análise da matéria-prima

O desempenho de uma peça, seja na fabricação ou na utilização, é também função do material da mesma. Dispondo-se de uma série de processos de fabricação e de diversos tipos de materiais, a seleção desses materiais e dos processos deve atender ao requisito fundamental de: "menor custo de fabricação para uma qualidade físico-mecânica/dimensional especificada" [2].

No caso da usinagem de precisão existem várias pesquisas sobre máquinas-ferramenta, dispositivos, ferramentas e sistemas de medição, mas poucas do ponto de vista dos materiais. Sendo a superfície usinada o resultado da interação da ferramenta com o material, o efeito das propriedades do material não pode ser omitido [3].

A qualidade superficial é função primária da microestrutura e dos defeitos do material empregado. Deve-se, portanto, considerar as características metalúrgicas e a presença de impurezas no material a ser usinado [3].

Ultimamente obtiveram-se progressos com ligas de alumínio e de cobre, já que se conseguem rápida e facilmente superfícies espelhadas com rugosidades $R_{\text{máx}}$ de até $0,03 \mu\text{m}$, usando ferramentas de diamante monocristalino [3,4].

Os materiais a serem usados na mecânica de precisão devem possuir as seguintes características:

- resistência mecânica média;
- ligas não devem ser tratadas termicamente;
- tensões residuais baixas;
- resistência ao desgaste;
- estabilidade dimensional;
- pequena quantidade de componentes intermetálicos;
- boa resistência à corrosão.

Além disso, dependendo da aplicação, pode-se requerer materiais magnéticos, como também de pouco peso [3].

2.1.2. Geração da forma esférica

Para a geração de uma superfície esférica a ferramenta de

corte deve descrever a superfície pretendida. Isto pode ser obtido pela superposição de movimentos circulares ou de movimentos circulares e de translação interpolada. A superposição de movimentos circulares permite o trabalho em uma máquina-ferramenta precisa convencional, onde os eixos de rotação da peça e da ferramenta devem se cruzar no centro da superfície esférica. A superposição de movimentos circulares e de translação interpolada exige máquinas-ferramenta comandadas numericamente, onde o ponto de contato relativo peça/ferramenta varia sobre o gume da ferramenta, impondo severas exigências sobre a qualidade geométrica da mesma [5,6,7,8].

Na geração pela superposição de movimentos circulares, é possível distinguir duas variantes de processo: o modo fresamento, onde o eixo-peça gira lentamente e o eixo-ferramenta rapidamente, e o modo torneamento, onde o eixo-peça gira rapidamente e o eixo-ferramenta lentamente [5,7,8].

As ferramentas de corte empregadas na geração de superfícies esféricas têm a sua geometria em função do processo que está sendo usado e as características da superfície que se deseja obter. Os materiais destas ferramentas abrangem o aço-rápido, metal duro e, em alguns casos, diamante mono e policristalino.

Quando se trata de geradores de superfícies esféricas de elevada precisão, as máquinas-ferramenta possuem sistemas de medição para o controle da forma e rugosidade da superfície usinada, durante e depois do processo. Estes sistemas de medição baseiam-se em princípios ópticos e mecânicos, tendo-se como exemplos uma variedade de interferômetros ópticos, perfilômetros de contato *stylus*, mancais aerostáticos LVDTs (*linear variable differential transformers - small solenoid transducers*), TIS

(total integrated scatterometry), BRDF (bidirectional reflectance distribution function - or angle resolved) e outros. Tais sistemas de medição possuem também um suporte de comando numérico computadorizado (CNC) [1].

A taxa de remoção de material nestas máquinas-ferramenta é baixa, trabalhando-se com penetrações passivas e avanços muito pequenos.

Dependendo do material da peça, do material da ferramenta, da máquina-ferramenta e das condições usadas na geração da superfície esférica, às vezes são necessários outros processos de acabamento.

2.1.3. Retificação

O processo de retificação é um processo de acabamento no qual a remoção de material ocorre, normalmente, na faixa de alguns milésimos de milímetro, de forma que a observação da interação dos gumes dos grãos com o material da peça é bastante difícil. Entretanto, empregando-se um raciocínio teórico em análises e modelos, é possível levantar conclusões sobre os processos físicos e químicos que permitem a otimização do processo [9].

Na retificação, grãos finos de abrasivo (como corindo sintético ou diamante) são fixados mediante um ligante a uma ferramenta em forma de copo. A ferramenta é montada diretamente na árvore da máquina-ferramenta, obtendo-se assim maior rigidez do sistema [6].

A peça é fixada em um eixo que gira a baixa rotação e avança no sentido da ferramenta. A ferramenta, que gira a alta rotação,

tem uma inclinação relativa ao eixo-peça (figura 2.1) [1,6].

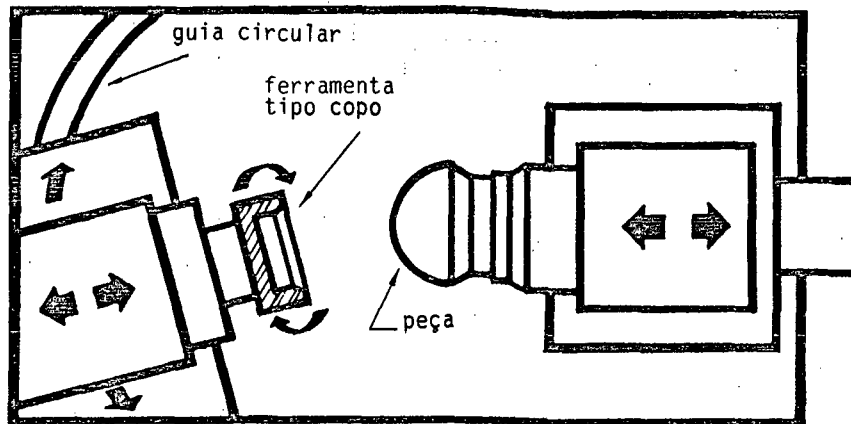


Figura 2.1 - Representação esquemática do processo de retificação para superfícies esféricas.

Os grãos abrasivos gastam-se rapidamente porque estão sujeitos a elevadas pressões. Neste tipo de deformação mecânica, picos e vales se distribuem aleatoriamente no material. Para conseguir um melhor acabamento, após a retificação deve-se realizar um processo de polimento [6].

2.1.4. Lapidagem

O princípio da lapidação é o mesmo da retificação. A diferença está no fato de que o meio abrasivo não está ligado, e sim adicionado, em forma de pasta ou emulsão à base de água e abrasivo [10]. A lapidação é considerada como um processo preparatório ao polimento [1].

Na lapidação de aços, geralmente a ferramenta é de ferro fundido, apresentando uma superfície côncava ou convexa segundo a peça que se deseja obter [11]. A ferramenta pode ser fixada ou articulada à árvore da máquina que gira a alta rotação. A máquina

lapidadora é semelhante a uma fresadora convencional (figura 2.2)

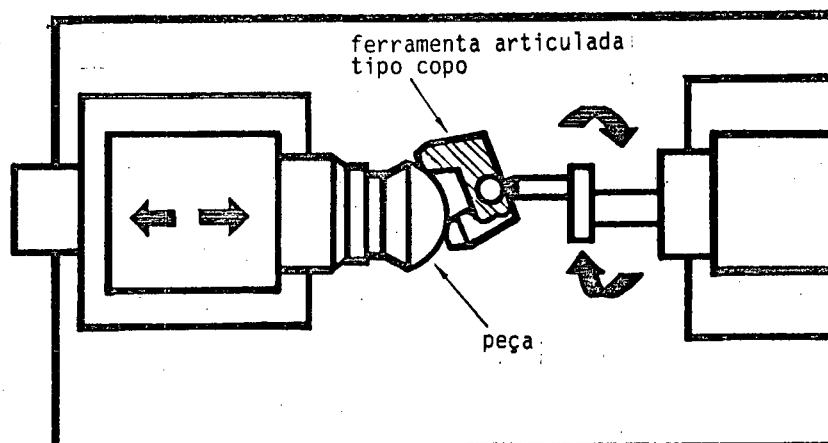


Figura 2.2 - Representação esquemática do processo de lapidação para superfícies esféricas.

No início, quando a ferramenta é colocada sobre a peça, as duas superfícies não encaixam perfeitamente uma na outra, ocorrendo contato somente nas partes salientes. A pressão nestes pontos é elevada, causando um desgaste rápido. À medida que a área de contato aumenta, a pressão diminui. O processo continua até as duas superfícies conseguirem um assentamento total, mantendo uma pressão uniforme [1].

Neste processo o tamanho de grão do abrasivo varia de grosso, no desbaste, a fino, no acabamento. A peça, a ferramenta e seus adjacentes devem ser limpos e inspecionados rigorosamente antes de se mudar o tamanho de grão, para evitar contaminação, além da necessidade de se controlar também as dimensões finais.

2.1.5. Polimento

O propósito do polimento é produzir uma superfície especular, livre de manchas e riscos. Além disso, a superfície a

ser polida deve ser suficientemente esférica, porque os erros de forma e ondulações fora da tolerância não serão corrigidos. No polimento se usa geralmente uma ferramenta de ferro fundido, uma camada de piche (de aproximadamente 5 mm) e uma suspensão de pequenas partículas abrasivas [1,6].

Em um polimento progressivo químico-mecânico, a ação abrasiva pode ser associada a uma reação química. A atuação química muda a camada da superfície da peça para um composto mais macio, que é removido mecanicamente [1,6].

A superfície da peça pode possuir um grande número de microfissuras provenientes do processo de retificação ou lapidação, que devem ser eliminadas no polimento. No começo a ação de polimento é rápida; uma superfície brilhante aparecerá em questão de minutos. Se no polimento algumas partes da superfície forem polidas mais rapidamente do que outras, isto indica que deve efetuar-se uma ação corretiva sobre o processo, como reprensar a ferramenta de polir, verificar o posicionamento desta ou relapidar a peça [1,6].

2.1.6. Limpeza e inspeção

Uma vez que a peça é polida, deve ser limpa rigorosamente. Se o veículo de lapidação ou polimento for graxa ou óleo, usa-se um solvente como álcool etílico ou acetona, ou mesmo componentes solúveis em água, como sabão e detergentes em solução em água quente ou fria [1,11].

Tecidos finos que não desprendam fios nem partículas, ou escovas especiais, podem ser usados para a limpeza da superfície. Não se deve forçar a sujeira ou cavacos sobre a superfície da

peça, pois isso pode causar arranhões. Deve-se prestar atenção particular as bordas que não foram usinadas [1,11].

Uma inspeção final é necessária após a limpeza. Com a incidência de um feixe de luz sobre a superfície da peça e a rotação lenta da mesma sobre seu eixo, consegue-se observar os arranhões que eventualmente existam. Uma lupa 6 - 10 X ajuda muito esta operação [1,10].

Terminada esta sequência, a peça deve ser avaliada metrologicamente.

2.2. Descrição básica das máquinas-ferramenta

Atualmente existem máquinas-ferramenta de diferentes configurações para a fabricação de superfícies esféricas, sendo estas projetadas segundo uma aplicação geral ou específica. As mais conhecidas são:

2.2.1. Máquina com deslocamento "T"

É chamada de máquina com base em "T" devido ao formato da base. A configuração básica é mostrada esquematicamente na figura 2.3. Se assemelha a uma máquina de faceamento horizontal de eixo único, mas é uma máquina de contorno com dois eixos. Nesta configuração o eixo-árvore e a ferramenta movem-se em direções perpendiculares entre si, permitindo, assim, gerar superfícies planas, esféricas, toroidais, paraboloidais, hiperboloidais, elipsoidais ou quaisquer superfícies de simetria rotacional [12].

A sua construção mecânica consiste em uma base rígida e estável, térmica e mecanicamente, mancais hidrostáticos ou

aerostáticos para as guias e a árvore, dispositivos para isolar as vibrações, controles de posicionamento peça/ferramenta e uma estação de posicionamento da ferramenta. Em alguns casos são incluídos controles com programas por computador, sistemas laser para medição, transdutores piezelétricos e equipamentos de servo-posicionamento. Além disso, são instaladas em salas com ambientes controlados quanto à temperatura, umidade, limpeza e vibrações [12,13,14,15].

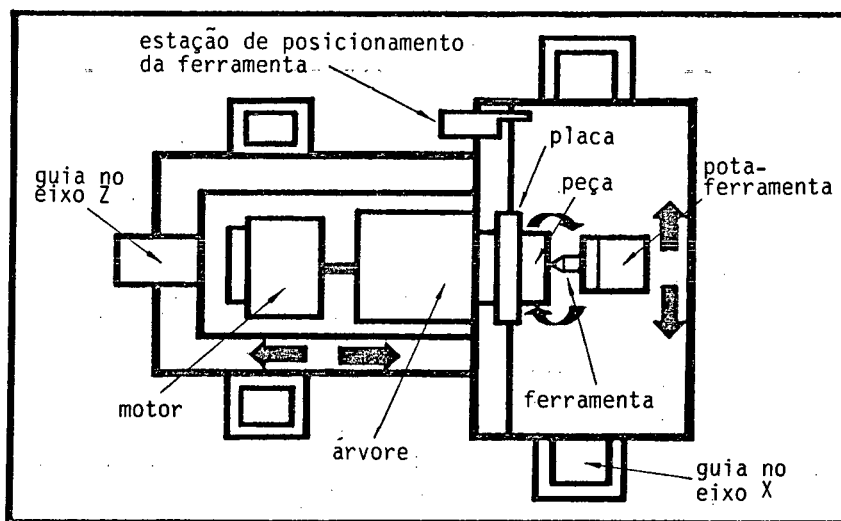


Figura 2.3 - Representação esquemática de uma máquina com deslocamento "T".

2.2.2. Máquina de contorno com deslocamentos perpendiculares ("stacked slideway")

A configuração de uma máquina de contorno com deslocamentos perpendiculares ("stacked slideway") é representada na figura 2.4. Assim como a máquina com base em "T", é uma máquina de contorno com dois eixos, que produz superfícies de simetria rotacional. A principal diferença é que o movimento transversal não é mais realizado pela árvore, mas sim pela mesa da máquina.

Ela possui controladores e uma estação de posicionamento da ferramenta como também controladores do meio ambiente. A principal vantagem desta máquina-ferramenta é seu tamanho, já que tem capacidade para usinar peças relativamente grandes [12].

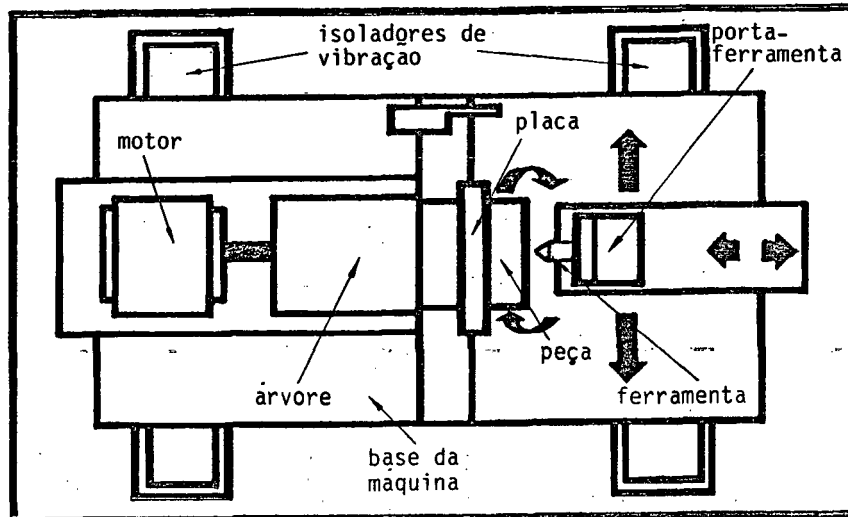


Figura 2.4 - Representação esquemática de uma máquina de contorno com deslocamentos perpendiculares.

2.2.3. Máquina polar "R - e"

Outra configuração de máquina de contorno é a máquina polar "R - e", denominada assim porque seus movimentos são ao longo das direções "R" e "e" de um sistema de coordenadas polares. Esta configuração de máquina tem sido desenvolvida especificamente para a produção de superfícies esféricas ou quase esféricas usadas na óptica. A ferramenta é montada em um suporte sobre uma guia que, por sua vez, é fixada a uma mesa giratória (figura 2.5). Pode-se, com isto, gerar superfícies côncavas e convexas, dependendo da localização do ponto de giro da ferramenta. A peça a ser usinada é fixada na árvore. Possui também todos os sistemas de controle/medição das outras máquinas descritas acima [12,16].

Como não existem máquinas "R - θ " comercialmente disponíveis atualmente, qualquer necessidade implicará em projeto e construção sob encomenda, elevando ainda mais os custos dessa já dispendiosa tecnologia [12].

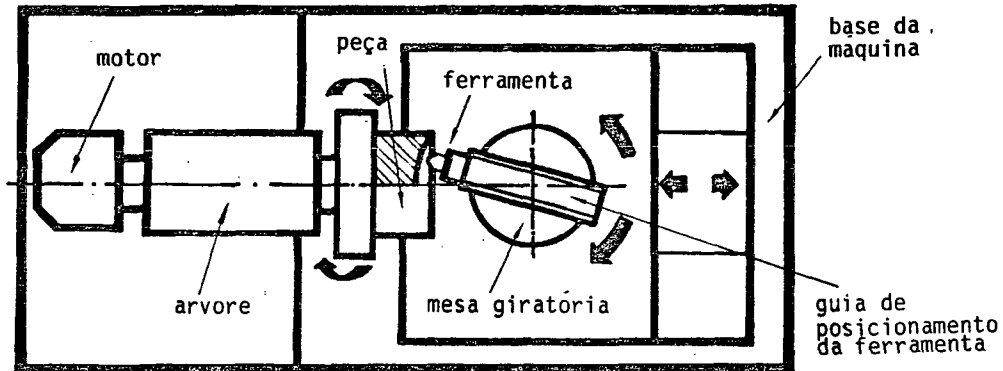


Figura 2.5 - Representação esquemática de uma máquina polar "R - θ ".

2.2.4. Gerador de corda ("chordal generator")

Uma máquina com a qual estão sendo conseguidos resultados excelentes quanto a erros de forma e acabamento é a chamada gerador de corda ("chordal generator"). A principal característica da configuração dessa máquina é que a posição do eixo da ferramenta fica sempre normal à superfície da peça. Deste modo, no programa de contorno não é preciso corrigir os erros geométricos que a ferramenta possa apresentar. Consegue-se erros de esfericidade de $0,08 \mu\text{m}$ e rugosidades $R_{\text{máx}}$ menores que $0,02 \mu\text{m}$ [15,16]. Deve-se notar que a velocidade de corte varia em função do ângulo formado entre o eixo da ferramenta e o eixo de giro da peça. É importante que os eixos da ferramenta e peça fiquem no mesmo plano para produzir superfícies esféricas, minimizando erros de forma. Com esta configuração podem ser produzidas

superfícies côncavas e convexas entre 35 e 150 mm de diâmetro (figura 2.6) [15,16].

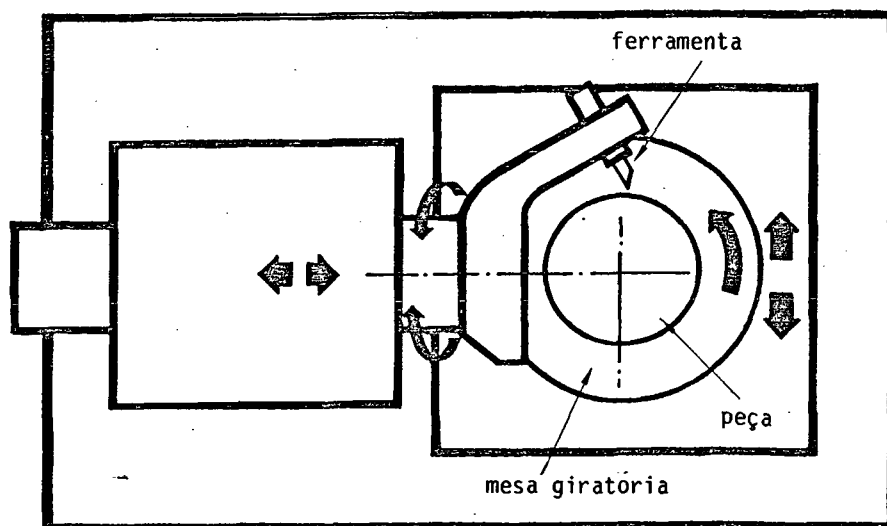


Figura 2.6 - Representação esquemática de uma máquina "gerador de corda".

2.2.5. Fresadora de ultraprecisão

Uma máquina-ferramenta que apresenta muitos recursos é a fresadora de ultraprecisão, cuja configuração é similar à de uma fresadora convencional (figura 2.7). Esta máquina possui todos os sistemas de medição, controle e CNC já mencionados [5,17].

Superfícies esféricas são conseguidas pela intersecção do eixo da árvore com o eixo da mesa giratória. Na árvore é fixada uma fresa frontal de um dente ("flycutter"), e na mesa giratória, a peça. A ferramenta gira a velocidades altas; a peça, entretanto, gira vagorosamente. Quando os eixos de geração (ferramenta) e rotação (peça) são paralelos entre si é gerada uma superfície plana, quando estes eixos não se cruzam e têm uma determinada inclinação entre si é possível obter diversas outras superfícies de simetria rotacional.

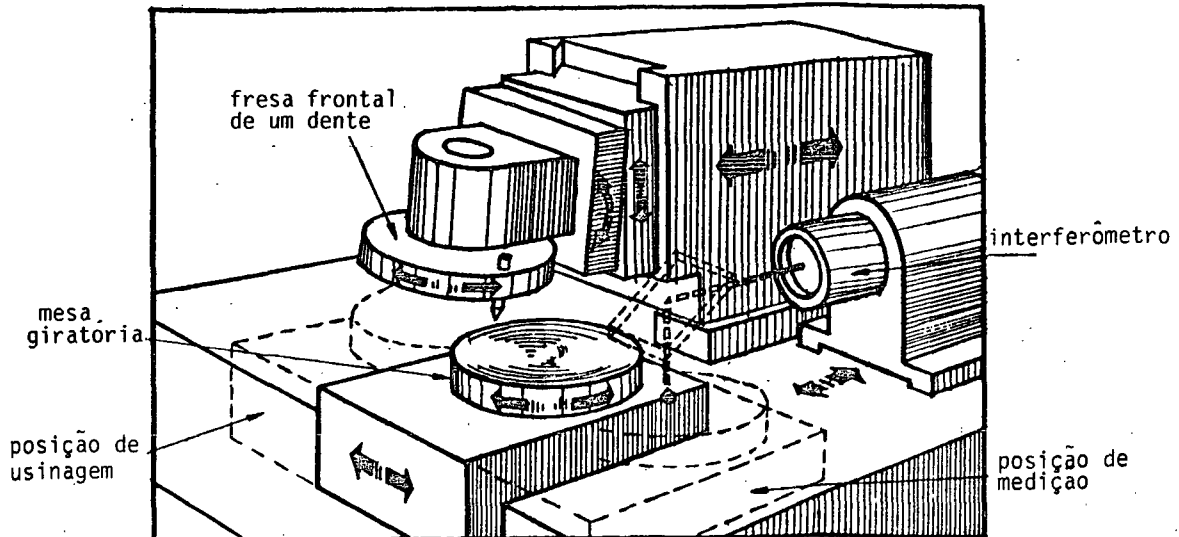


Figura 2.7 - Representação esquemática de uma fresadora de ultraprecisão.

2.3. Componentes básicos das máquinas

Grande parte dos componentes de máquinas geradoras de superfícies esféricas são similares aos usados nas máquinas-ferramentas convencionais. Entre os mais importantes podemos mencionar:

2.3.1. Árvore

A árvore da máquina deve proporcionar um movimento de rotação suave e preciso, com uma rigidez e capacidade de carga adequada. Entre os mancais disponíveis tem-se: *a*) hidrostáticos ou aerostáticos, usando uma variedade de fluidos e pressões, e *b*) hidrodinâmicos e de rolamentos de esferas, rolos ou agulhas de precisão. Destas opções, a mais usada para geração de superfícies esféricas de precisão é o mancal aerostático pressurizado externamente. Um exemplo é mostrado na figura 2.8. Este tipo de

árvore consiste em um eixo-rotor montado com mancais esféricos nos extremos, guias de grafite, descansos de mancais e um suporte do conjunto [12,18,19].

Os três tipos de movimentos indesejáveis em uma árvore são: angular, axial e translação radial (figura 2.9).

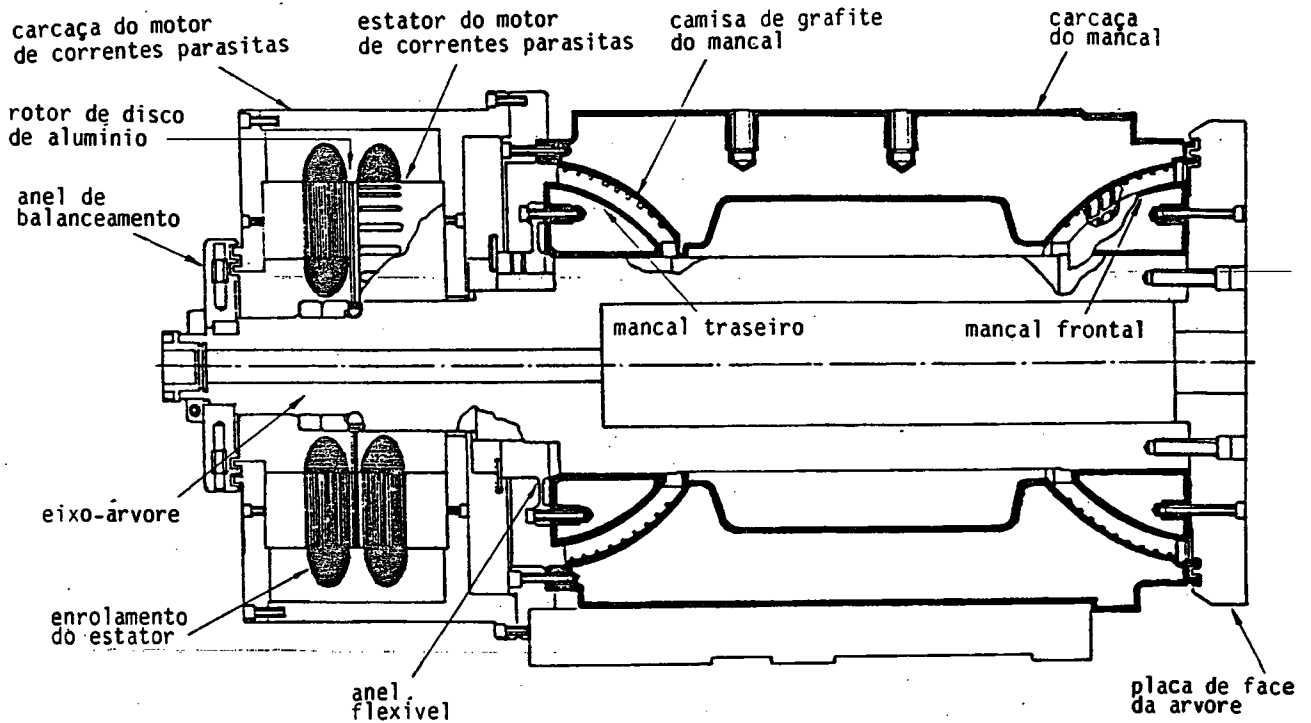


Figura 2.8 - Representação esquemática de uma árvore com mancais aerostáticos esféricos.

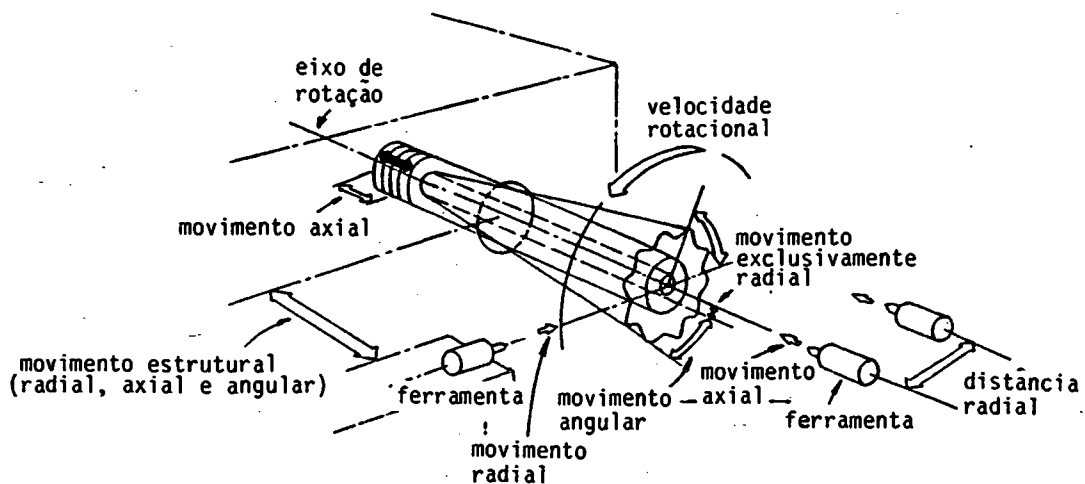


Figura 2.9 - Movimentos indesejáveis na árvore de uma máquina-ferramenta.

A precisão da árvore referente a estes movimentos é determinada pelo erro de circularidade e montagem adequada dos mancais e das guias de grafite [12].

2.3.2. Sistema de acionamento

O sistema de acionamento proporciona a força necessária para movimentar a árvore e os dispositivos necessários no processo. O sistema empregado é escolhido para uma determinada precisão, suavidade de movimento e torque de saída. A seleção do motor se baseia no torque requerido para acionar a árvore a uma velocidade específica e/ou o torque requerido para aceleração/desaceleração da mesma [12].

Os motores podem ser de corrente contínua ou alternada, e de projeto convencional, sem carcaça, de rotor de disco ou de correntes parasitas, devendo-se considerar que em alguns casos a velocidade de corte deve permanecer constante ao longo da superfície que está sendo gerada. Isto implica que a rotação da árvore variará em função da posição radial da ferramenta [12].

O acoplamento do motor com a árvore é crítico devido ao risco considerável da transmissão de vibrações mecânicas à peça, através da árvore e seu suporte. O acoplamento pode ser feito de diferentes formas: direta ou indiretamente, com correias planas ou circulares. Também são previstos freios mecânicos, magnéticos ou elétricos [12].

2.3.3. Estação de posicionamento da ferramenta

Uma estação de posicionamento da ferramenta é usada para

referenciar a ferramenta do sistema de coordenadas da máquina, proporcionando uma informação exata ao sistema de controle. Para referenciar a ferramenta usa-se um par de mancais aerostáticos LVDTs (linear variable differential transformers-small solenoids transducers) que são montados sobre um suporte, o qual é fixo firmemente na base da máquina-ferramenta. A ferramenta é localizada por estes LVDTs e estas coordenadas são gravadas na memória do computador de comando da máquina-ferramenta [12,13].

2.3.4. Guias de deslocamento

As guias de deslocamento são as que permitem o movimento da ferramenta, da peça e/ou de conjunto da árvore na máquina-ferramenta. Estas guias são projetadas para prover movimentos repetitivos, suaves e tão retilíneos quanto possível [12,13].

Assim como para as árvores, existem muitas opções para as guias. Empregam-se guias hidrodinâmicas, hidrostáticas e aerostáticas, operando com grande variedade de fluidos, como também guias de rolamentos de precisão [12,13].

2.3.5. Base

A base serve para suportar todos os componentes da máquina-ferramenta. Ela garante estabilidade no posicionamento da peça e da ferramenta, e na interface com o sistema de suporte da máquina [12,13].

Existe uma grande variedade de materiais para a fabricação de bases. A escolha destes materiais depende da configuração básica, grau de estabilidade e aplicação final da máquina-

ferramenta que vai ser suportada. Normalmente a base é feita de um material resistente a solicitações mecânicas como aço doce (0,5 % de C), ferro fundido, granito, composites, ou materiais moldados, como a mistura de areia de sílica e ligante epóxi. O objetivo é obter uma estrutura rígida e bem amortecida [12].

2.3.6. Sistema de suporte

Acoplado ou em muitos casos integrado à base, temos o sistema de suporte da máquina, cuja função principal é de isolar a máquina das vibrações mecânicas externas transmitidas pelo solo. Através da determinação do espectro mecânico e particularmente da ressonância estrutural da máquina, são montados sistemas para minimizar essas vibrações [12,13].

Normalmente as máquinas-ferramenta convencionais usam borracha e isoladores de vibrações entre a máquina e o solo. As máquinas de precisão usam sistemas pneumáticos. Estes sistemas, constituídos de cilindros pneumáticos, oferecem melhor performance de isolamento para frequências naturais baixas, melhor amortecimento e a possibilidade de um nivelamento automático da máquina [12,13].

2.3.7. Sistema de suporte da ferramenta

O sistema de suporte da ferramenta, ou porta-ferramenta, é semelhante ao usado em uma máquina convencional. Uma diferença marcante está no grau de precisão com que a ferramenta pode ser posicionada em relação ao eixo da árvore. Parafusos diferenciais, hastes flexíveis ou guias aerostáticas são atualmente usados para

posicionar rapidamente a ferramenta, e com elevada precisão [12,13]. Muitas vezes são integrados sistemas piezoelétricos de microposicionamento, para superpôr um movimento complementar à ferramenta de corte.

2.3.8. Sistema de controle da máquina

O sistema de controle em uma máquina de precisão serve como centro de comando, controlando a posição, velocidade e direção dos movimentos de todos os componentes da máquina. Este pode variar desde um sistema simples para faceamento até sistemas complexos CNC. Estes sistemas CNC provêm os sinais de comando necessários à árvore e aos sistemas de acionamento das guias, de acordo com dados fornecidos, compensações feitas em função de informações do sistema de controle do meio ambiente e realimentação dos sensores de posição e velocidade [12].

2.3.9. Sistema de controle do meio ambiente

Este sistema proporciona a estabilidade necessária do meio ambiente durante o processo de usinagem, para que seja atingida a precisão requerida na peça. Esta estabilidade é alcançada com o controle da temperatura através da aplicação de jatos de ar ou óleo, sistemas de isolamento acústico e vibratório e controladores de umidade. Enquanto máquinas-ferramenta convencionais podem trabalhar com o controle ambiental da sala onde são instaladas, as máquinas-ferramenta de precisão não podem operar sem um controle ambiental imediato de cada um de seus componentes [12].

2.4. Parâmetros gerais de operação

As máquinas-ferramenta anteriormente descritas geralmente usam ferramentas de diamante, característica esta que reduz bastante a faixa de operação dos parâmetros de corte. Sendo assim, dependendo do material a usinar, do número de peças requeridas, da precisão das mesmas, das características da máquina sendo usada, entre outros, estes valores podem variar significativamente. Devido à quantidade de variáveis que intervêm no processo de usinagem não é possível fornecer parâmetros precisos para cada processo. No entanto, tem-se uma faixa de valores que são enquadrados no uso geral.

2.4.1. Velocidade de corte

O acabamento superficial é influenciado diretamente pela velocidade de corte. Com o aumento da velocidade de corte as componentes dinâmicas da força de usinagem, na formação de cavaco, se tornam menos pronunciadas, levando a uma melhora da rugosidade de processo. Por outro lado, uma velocidade de corte elevada exige rotações elevadas na máquina-ferramenta, o que, por sua vez, exige um balanceamento perfeito de todos os componentes rotativos. Com isto procura-se que as ondulações que se formam na superfície da peça sejam mantidas em valores mínimos.

Na usinagem de componentes de alumínio e de ligas de cobre tem-se verificado que velocidades próximas de 1800 m/min dão bons resultados, na maioria dos materiais ópticos metálicos. Para materiais frágeis aconselha-se usar velocidades mais baixas (aproximadamente 900 m/min) [7,12,19,20].

2.4.2. Avanço

Na fabricação de precisão as velocidades de avanço são muito baixas, sendo expressos em distância percorrida por unidade de tempo (mm/min) ou distância percorrida por rotação (mm/rot). O avanço mínimo é limitado pelo grau de afiação do gume e pelo raio de quina da ferramenta [12].

Os valores de avanço recomendados para os processos da geração de superfícies esféricas mencionados estão em uma faixa de 0,01 a 0,03 mm/rot. No desbaste são usados avanços maiores, para que seja diminuído o tempo útil de trabalho [7,12,14,19,20].

2.4.3. Penetração passiva

A penetração passiva na usinagem de precisão também depende do material e tipo de fixação da peça, da geometria da ferramenta e das características da máquina-ferramenta. Os valores utilizados são menores que os utilizados na usinagem convencional, situando-se no desbaste em torno de 0,3 mm, e no acabamento diminuindo até aproximadamente 0,15 μm [5,12,14,20].

2.4.4. Fluido de corte

A função do fluido de corte na usinagem é introduzir uma melhoria no processo, atuando principalmente através da:

- Retirada dos cavacos da zona de corte;
- Eliminação do calor gerado na usinagem;
- Diminuição do atrito entre ferramenta e cavaco.

Geralmente a necessidade de lubrificação é maior para

materiais difíceis de usinar. Já para materiais fáceis de usinar, os fluidos de corte têm antes uma função refrigerante. Na fabricação de precisão geralmente usam-se materiais de fácil usinagem, portanto recomendam-se óleos de corte de baixa viscosidade [14,21], emulsões a baixas concentrações [7,21], querosene [14,22] ou álcool etílico [21] como fluidos de corte.

2.5. Ferramentas de corte

Na usinagem de precisão empregam-se todas as classes de ferramentas também empregadas na usinagem convencional. Dependendo do acabamento requerido no componente, são requeridas ferramentas mais afiadas e com menos defeitos no gume. As ferramentas metálicas (aço-carbono, aço-rápido e aço-ferramenta), as metálicas-cerâmicas (metal duro e cermets) e as cerâmicas (óxido de alumínio, óxido de zircônio, nitreto de silício e nitreto de boro cúbico) são limitadas de uma forma geral em termos de afiação do gume. O diamante monocristalino é o único material de ferramenta que permite conjugar um raio de gume pequeno (até a ordem de um raio atômico de carbono) e um gume perfeito (erros na ordem de grandeza da distância do reticulado cristalino do diamante). É por estes motivos que predomina o uso de ferramentas de diamante na usinagem de precisão e ultraprecisão. Às vezes, ferramentas de diamante não são utilizadas devido à incompatibilidade do material da peça com a química do carbono do diamante [12]. Como exemplo tem-se a usinagem não recomendada de materiais ferrosos com ferramentas de diamante, em decorrência da afinidade do ferro com o carbono. O diamante se transforma em grafite na região de contato entre

ferramenta e peça devido às temperaturas elevadas atingidas nesta região. O grafite, por sua vez, reage com o ferro, tendo-se como consequência um cegamento rápido do gume da ferramenta [23].

Para a classificação das ferramentas de diamante distingue-se entre diamantes naturais e diamantes sintéticos, ambos podendo ocorrer tanto na forma monocristalina como policristalina [23].

2.5.1. Diamante natural

Na natureza encontra-se o diamante tanto na forma monocristalina como na forma policristalina. O diamante natural em sua forma monocristalina tem grande importância para a usinagem com ferramentas de corte de geometria definida. Já na sua forma policristalina tem apenas uma importância secundária, devido ao fato do diamante sintético policristalino apresentar vantagens tanto econômicas como tecnológicas [23].

Uma propriedade importante do diamante monocristalino é a anisotropia (dependência de orientação) das propriedades mecânicas, como dureza, resistência ao desgaste e módulo de elasticidade. Enquanto que em materiais policristalinos a anisotropia é anulada pela distribuição completamente aleatória dos cristais constituintes, nos materiais monocristalinos a anisotropia é mantida em decorrência da orientação da estrutura cristalina [23].

2.5.2. Diamante sintético

O processo para fabricação de diamante sintético ocorre sob a utilização de uma solução catalítica a temperatura e pressão

elevadas, nas quais o diamante é a fase estável. Pela escolha adequada da pressão e da temperatura é possível controlar o crescimento dos cristais e, com isso, determinar o tamanho dos cristais na faixa de alguns micrometros até vários milímetros. Assim garantem-se certas propriedades físicas dos diamantes, como pureza e porosidade [23].

Apesar da fabricação de diamantes sintéticos monocristalinos ser possível tecnicamente, na fabricação de ferramentas de geometria definida basicamente só são empregados diamantes naturais, uma vez que, para os tamanhos de ferramentas de 1 a 5 mm, a fabricação de diamantes sintéticos monocristalinos ainda não é econômica [23].

2.5.3. Geometria do gume e afiação

A rugosidade da superfície usinada é principalmente determinada pelas condições de corte e geometria do gume da ferramenta. O erro geométrico do gume circular tem bastante influência sobre a forma geométrica da superfície esférica a ser usinada [12,22]. Além da precisão do perfil do gume, a afiação e a vida da ferramenta são importantes. Consegue-se uma melhora na afiação do gume aprimorando as condições de lapidação da mesma. Atualmente existem máquinas para lapidar ferramentas de diamante com arcos circulares que fornecem erros geométricos menores do que $0,05 \mu\text{m}$ no gume [22].

C A P Í T U L O 3

ANÁLISE TEÓRICA

3.1. Introdução

Para permitir uma análise dos fatores que levam a erros geométricos e microgeométricos na geração de superfícies esféricas, é necessário realizar uma análise dos processos mais utilizados. Por exemplo, na geração de superfícies esféricas pela superposição de movimentos circulares, quando os eixos de rotação da peça e da ferramenta não se cruzam, produz-se um erro de forma. Na geração pela superposição de movimentos circulares e de translação interpolada, quando a ferramenta tem um erro geométrico no gume, produz-se também um erro de forma.

3.2. Geração de superfícies esféricas pela superposição de movimentos circulares

Uma superfície esférica é descrita pela superposição de movimentos circulares, sendo necessário que os eixos de rotação destes movimentos se cruzem. A ferramenta descreve, em alguns casos, apenas um arco de circunferência e, em outros, vários círculos completos, já que a peça gira sobre seu próprio eixo. O movimento de corte pode ser descrito pela ferramenta e o de avanço pela peça ou vice-versa.

Estes diferentes processos classificam-se em dois modos: o

modo torneamento e o modo fresamento.

3.2.1. Modo torneamento

O modo torneamento ocorre quando a peça é fixada na árvore da máquina-ferramenta, formando um sistema rígido que gira a rotações elevadas. A ferramenta, idêntica às utilizadas em operações de torneamento, é fixada sobre uma mesa giratória e executa o movimento de avanço.

a. Situação desejada

A situação desejada no modo torneamento ocorre quando o eixo de giro da ferramenta cruza o eixo de giro da peça (figura 3.1). O plano sobre o qual a ferramenta se desloca, normal à superfície esférica, coincide com o plano XZ da máquina-ferramenta. Dependendo da posição da ferramenta neste plano é possível torneiar uma superfície esférica côncava ou convexa.

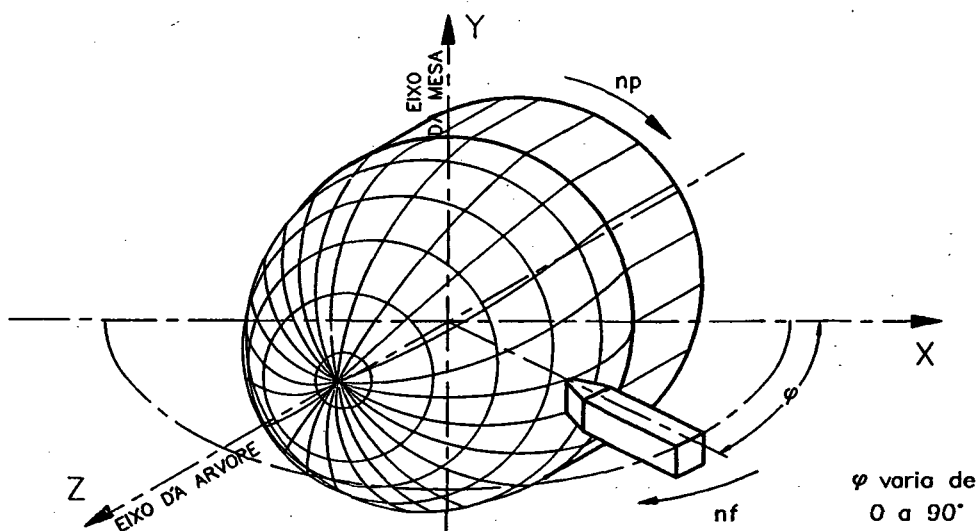
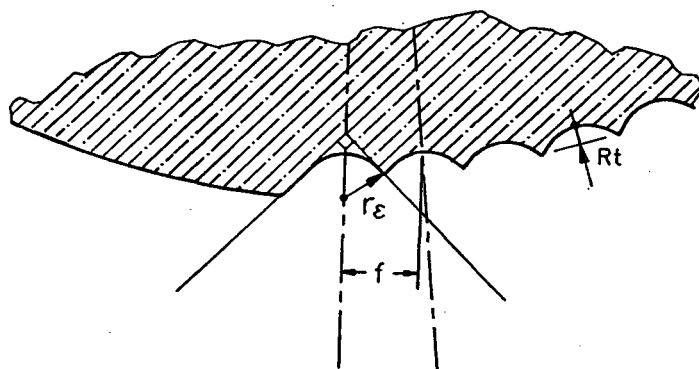


Figura 3.1 - Representação esquemática da situação desejada para o modo torneamento.

A trajetória que a ferramenta descreve para formar, por exemplo, uma semi-esfera, é de um arco de circunferência de 90° .

Em máquinas-ferramenta onde não é possível variar a rotação do eixo-árvore durante a usinagem, a velocidade de corte varia sobre a superfície esférica. Isto ocorre porque a velocidade angular da árvore é constante, enquanto que os diâmetros descritos pela ferramenta em relação ao eixo de rotação da peça diminuem quando a ferramenta se aproxima a este. O avanço, por sua vez é constante, e pode ser ajustado segundo o acabamento que se deseja obter sobre a superfície esférica, já que a rugosidade cinemática teórica é decorrente do raio da quina da ferramenta e do movimento relativo entre peça e ferramenta (figura 3.2).



$$R_t = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (3.1)$$

Figura 3.2 - Influência do raio de quina da ferramenta e do avanço sobre a rugosidade cinemática.

b. Posicionamento da ferramenta sobre o eixo Z

O diâmetro da esfera no modo torneamento é unicamente função da posição de montagem da ferramenta sobre a mesa giratória. Quando a posição do centro da esfera já estiver definida pela montagem adequada da mesa giratória em relação ao eixo de rotação da peça, ao alterar-se a posição radial da ferramenta, teremos

uma espessura de usinagem constante ao longo da trajetória circular da ferramenta (figura 3.3 a.).

Quando for efetuado um deslocamento da mesa giratória, com o intuito de corrigir-se a posição do centro da esfera que está sendo gerada, a espessura de usinagem aumenta de um mínimo no equador até um máximo no pólo (figura 3.3 b.).

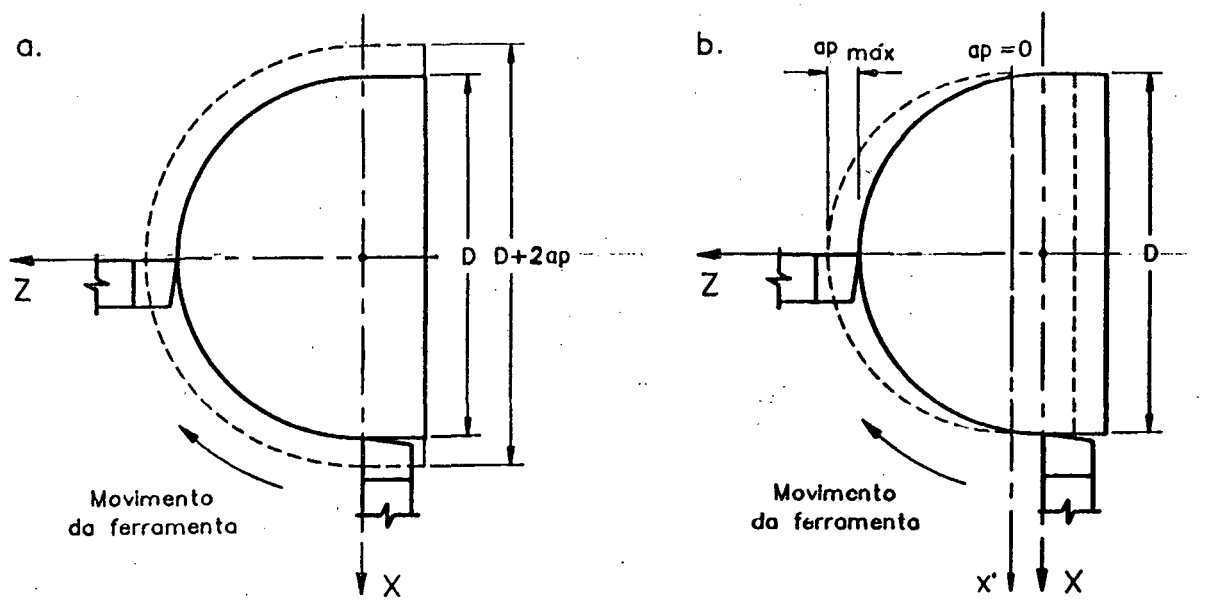


Figura 3.3 - Correção do diâmetro e da posição da superfície esférica.

Tanto a correção de diâmetro como a correção de posição teoricamente não influenciam a forma esférica da superfície gerada.

c. Posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y

Quando existe um erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y da peça, a superfície esférica é influenciada negativamente tanto por uma montagem da ferramenta abaixo como acima da linha de centro. O diâmetro da superfície esférica é

afetado por este erro de posicionamento, sendo expresso pela equação:

$$D' = 2 \sqrt{(D/2)^2 + \Delta y^2}, \quad (3.2)$$

onde: D' = diâmetro da nova superfície gerada,

D = diâmetro teórico da superfície esférica,

Δy = erro de posicionamento.

A equação é válida para Δy positivo e negativo. Quando a ferramenta for montada abaixo da linha de centro da peça (Δy negativo) teremos um erro típico no pólo da semi-esfera, caracterizado pelo surgimento de uma haste cilíndrica com o diâmetro de $2 \times \Delta y$ (figura 3.4 a.).

Se a ferramenta for posicionada acima da linha de centro (Δy positivo), o erro no pólo não se torna tão perceptível como no primeiro caso. Sua forma varia conforme o ângulo de incidência α da ferramenta (figura 3.4 b.).

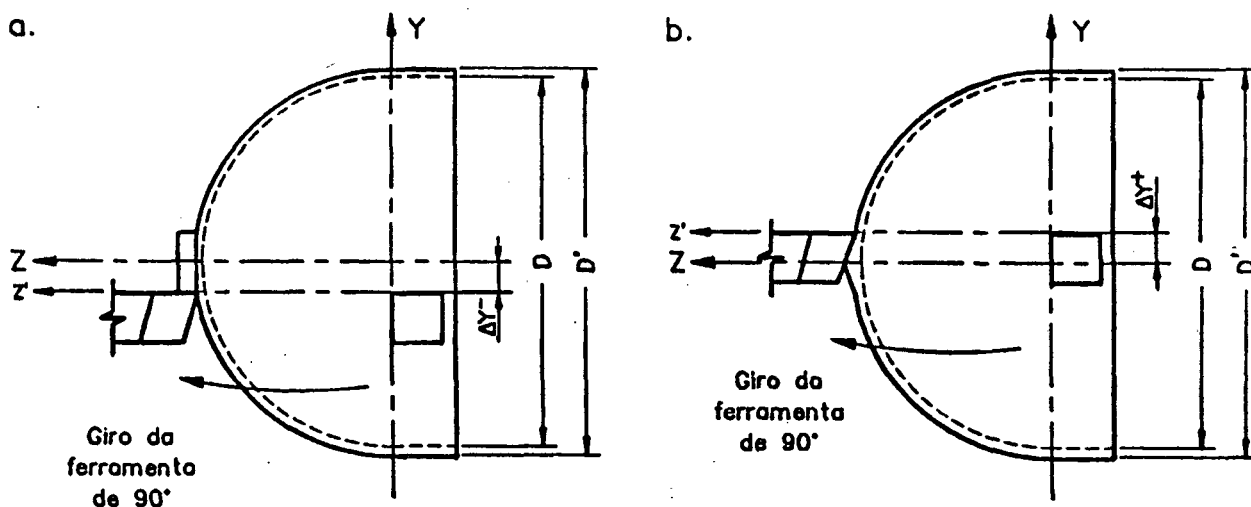


Figura 3.4 - Influência do erro de posicionamento da ferramenta no eixo Y sobre a forma da semi-esfera.

d. Posicionamento da ferramenta sobre o eixo X

Quando há um erro de posicionamento do eixo de rotação da ferramenta sobre o eixo X da peça, este tem influência sobre a forma da superfície que está sendo gerada. A forma da superfície varia em função do erro de posicionamento Δx . A interseção da superfície gerada com planos paralelos ao plano XY dá lugar a circunferências de diferentes diâmetros, estando estas em função da posição sobre o eixo Z. Quando o erro de posicionamento Δx da ferramenta for positivo, para um giro da ferramenta de 90° , contados a partir do equador da superfície que está sendo gerada, teremos a formação de um cilindro sobre o pólo, com diâmetro igual a $2 \times \Delta x$. Ao continuar-se o giro da ferramenta além dos 90° , a ferramenta continua interferindo com o material da peça (figura 3.5 a.). O diâmetro do corpo geométrico será maior sobre o equador que sobre o pólo.

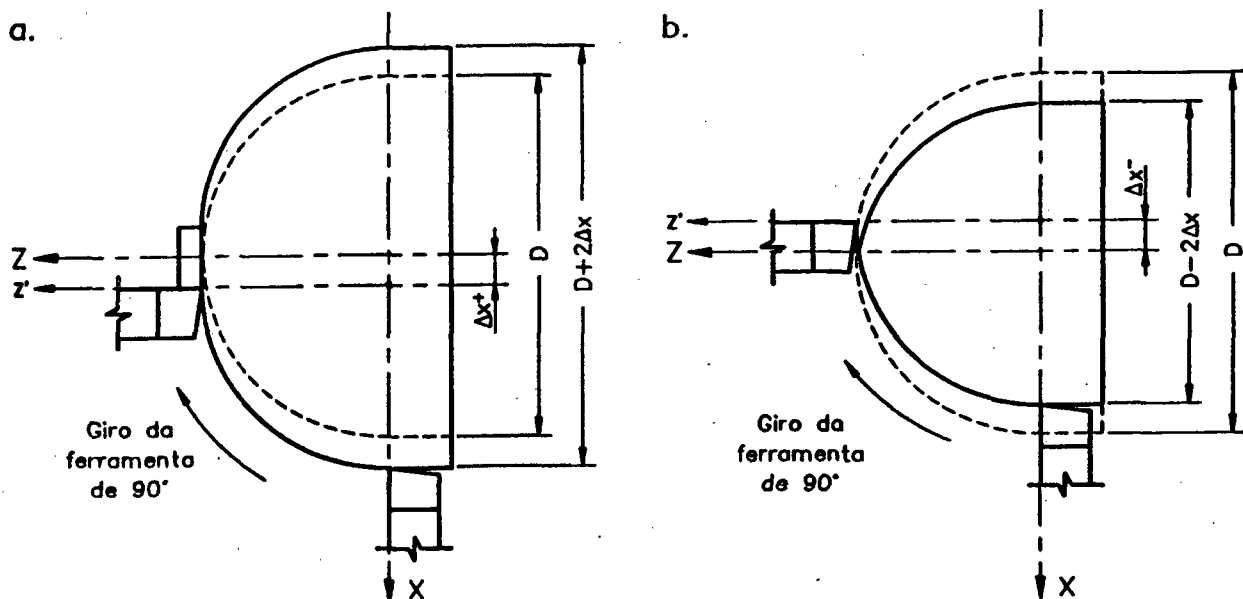


Figura 3.5 - Influência do erro de posicionamento da ferramenta no eixo X sobre a forma da semi-esfera.

Para um posicionamento Δx negativo da ferramenta, teremos a formação de um corpo cujo diâmetro é menor sobre a linha do equador que sobre o pólo. Se a ferramenta descrever uma trajetória maior que 90° (contados a partir do equador) ela não removerá mais material da peça (figura 3.5 b.).

Qualquer combinação de erros de posicionamento do eixo de rotação da ferramenta sobre o sistema de coordenadas da peça, contanto que inclua erros sobre o eixo X, produzirá uma superfície não esférica.

3.2.2. Modo fresamento

No modo fresamento a peça é fixada sobre uma mesa giratória, e executa o movimento de avanço. A ferramenta é fixada na árvore da máquina-ferramenta por meio de um dispositivo rígido e bem balanceado, e executa o movimento de corte, descrevendo movimentos circulares sobre a superfície que está sendo usinada.

O raio da circunferência que a ferramenta descreve pode ser regulável dentro de uma faixa limitada, ou ser fixo. O diâmetro D da superfície esférica que está sendo gerada depende do ângulo de inclinação ϕ (formado pelo eixo de giro da peça e da ferramenta) e do diâmetro de giro D_f da ferramenta. Para um ângulo ϕ de 45° obtém-se uma semi-esfera em apenas um ciclo de fresamento. Para tal, o diâmetro D_f da ferramenta deverá ser igual ao diâmetro da esfera dividido pela raiz quadrada de dois (figura 3.6).

Para ângulos de inclinação ϕ maiores que 45° continua-se gerando superfícies esféricas que, no entanto, não abrangerão mais uma semi-esfera. O raio destas superfícies aumenta com o aumento do ângulo de inclinação da ferramenta, chegando a

infinito para um ângulo de inclinação igual a 90° .

Pelo reposicionamento de ferramentas de pequeno diâmetro é possível aumentar a área gerada de superfícies esféricas de grande diâmetro (figura 3.7).

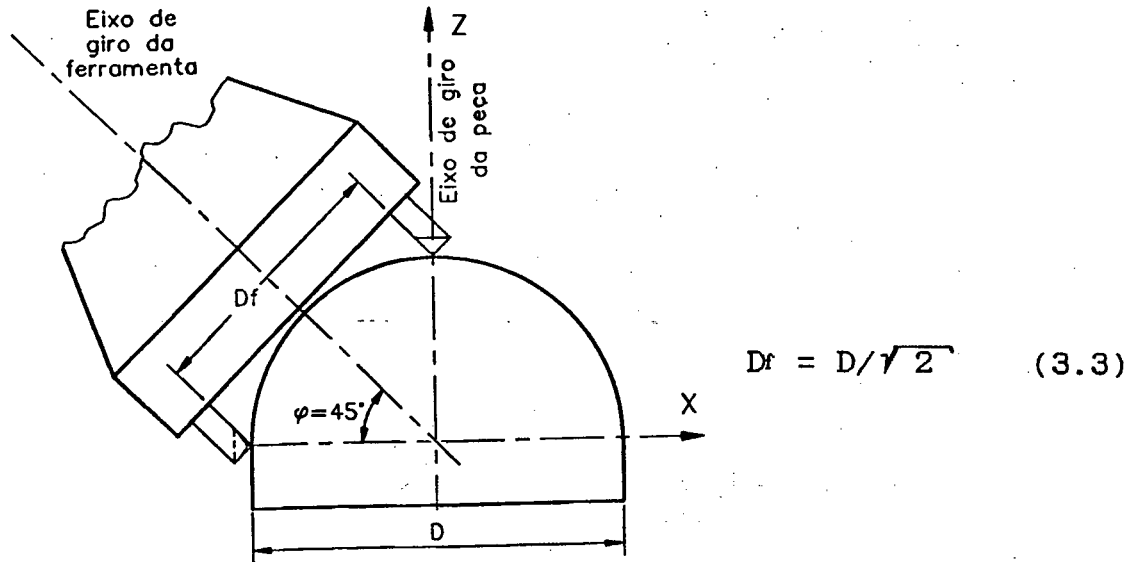


Figura 3.6 - Representação esquemática do modo fresamento na geração de uma semi-esfera.

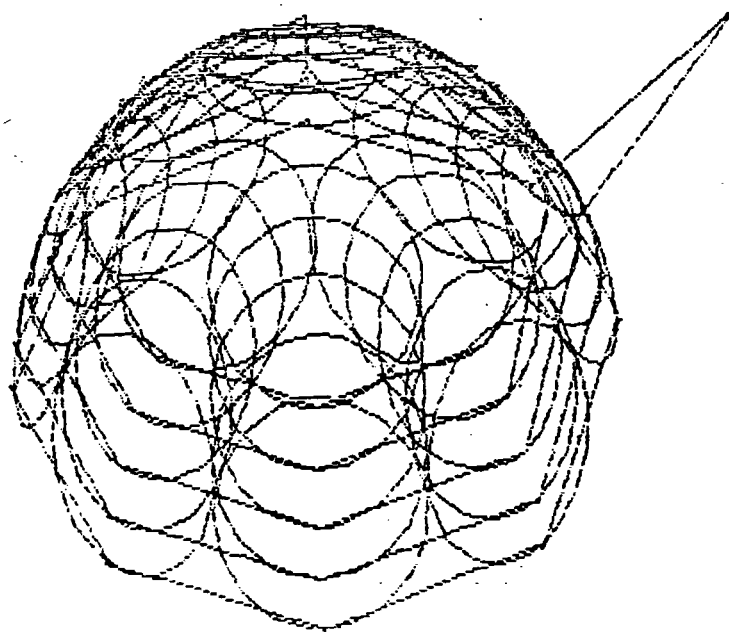


Figura 3.7 - Geração de uma semi-esfera de grande diâmetro pelo modo fresamento.

a. Situação desejada

Para gerar uma semi-esfera pelo modo fresamento, o eixo da árvore da máquina-ferramenta deve interceptar o centro geométrico da superfície esférica. O eixo da árvore deve formar um ângulo φ igual a 45° com o eixo X da peça, e o diâmetro da circunferência que a ferramenta descreve deve ser igual a $D_f = D/\sqrt{2}$ (figura 3.8).

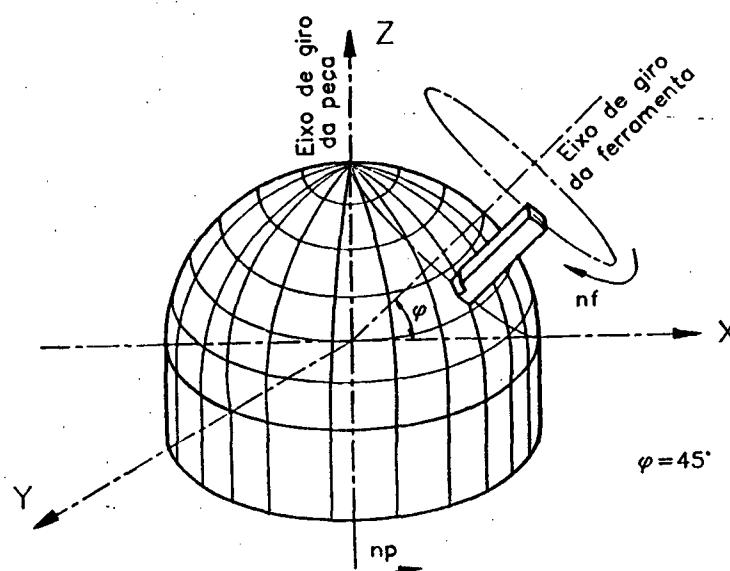


Figura 3.8 - Representação esquemática da situação desejada para o modo fresamento.

A velocidade de corte é constante durante todo o processo, já que o número de rotações e o raio da circunferência que a ferramenta descreve são constantes.

No entanto, o avanço é variável, já que está em função da posição da ferramenta. O avanço é máximo sobre a linha do equador da semi-esfera, e diminui até chegar a zero no pólo.

b. Posicionamento da ferramenta sobre o eixo Z

Um deslocamento da ferramenta segundo o eixo Z da máquina-ferramenta, desloca também o centro da superfície que está sendo gerada. Este deslocamento não tem influência sobre o diâmetro da superfície esférica nem sobre a sua esfericidade. A espessura de usinagem é máxima no pólo e mínima sobre a linha do equador (figura 3.9).

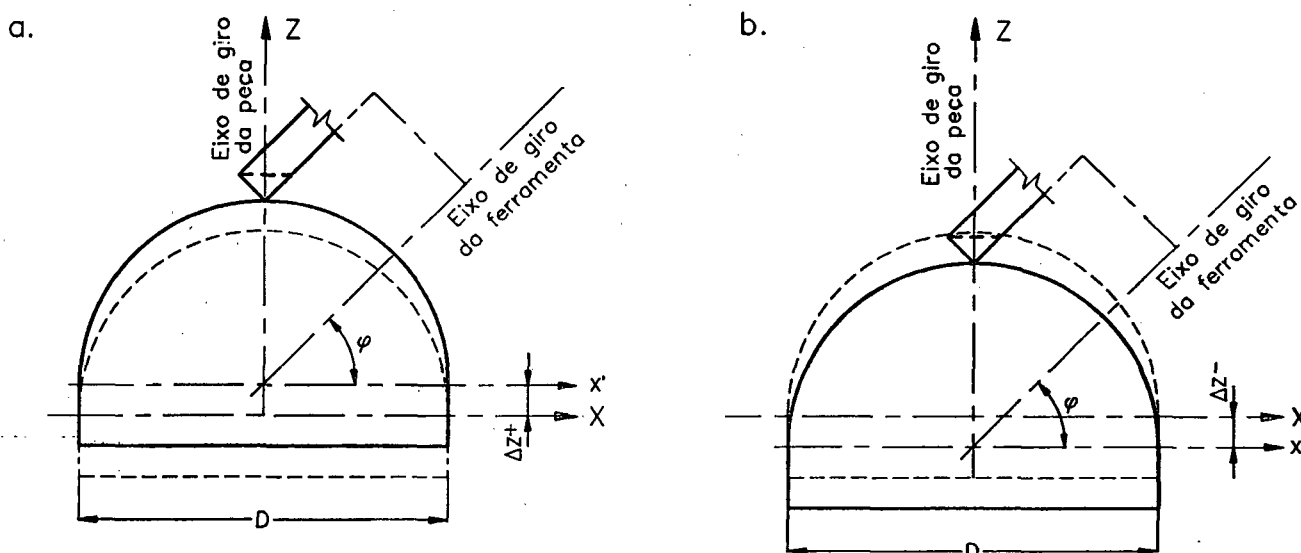


Figura 3.9 - Posicionamento do centro da semi-esfera pelo deslocamento da ferramenta segundo o eixo Z.

c. Posicionamento da ferramenta sobre o eixo X

Para uma ferramenta regulada com um diâmetro $D_f = D/\sqrt{2}$ posicionada a 45° temos uma influência do deslocamento da ferramenta sobre o eixo X semelhante ao que temos no modo torneamento. Para a ferramenta posicionada com $\Delta x = 0$ o movimento circular da ferramenta intercepta o pólo e o equador da superfície que está sendo gerada, que é teoricamente, uma semi-

esfera. Para um deslocamento $\Delta x > 0$ (positivo), a ferramenta não atinge mais o pólo e o equador apresenta um diâmetro igual a $D + 2\Delta x$ (figura 3.10 a). Para $\Delta x < 0$ (negativo) o movimento circular da ferramenta ultrapassa o pólo e retira material em excesso no equador, ficando este com um diâmetro igual a $D - 2\Delta x$ (figura 3.10 b). Para ambos os erros de posicionamento a superfície gerada não é uma semi-esfera.

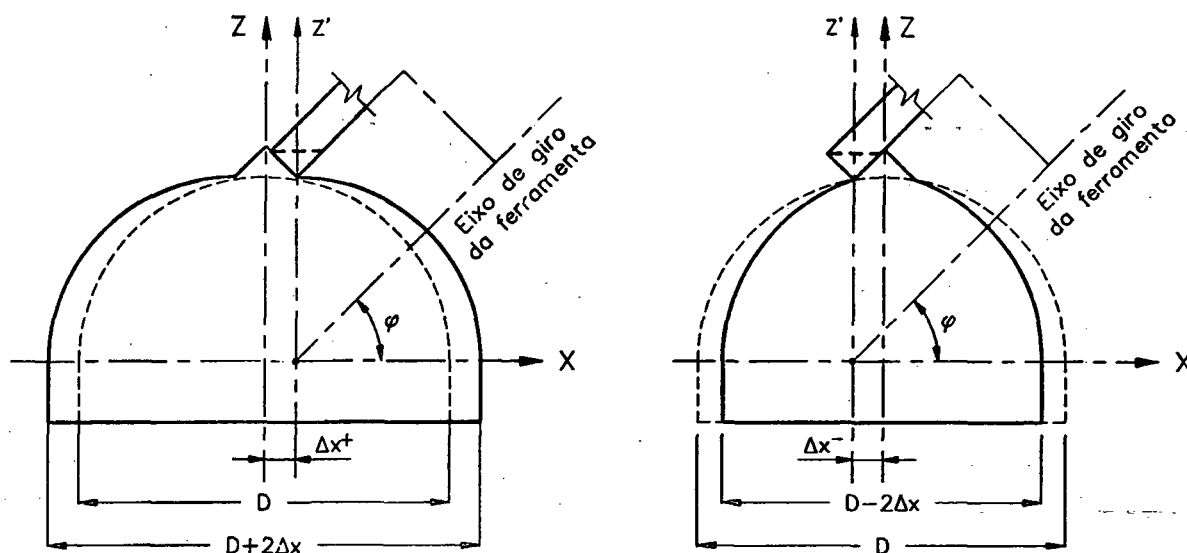


Figura 3.10 - Influência sobre a forma da semi-esfera considerando o posicionamento da ferramenta sobre o eixo X.

d. Posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y

N. R. Erickson [24] analisa este tipo de erro no modo fresamento para superfícies de simetria rotacional, como elipsóides, parabolóides, hiperbolóides e outras superfícies mais complexas. A montagem que ele usou está esquematizada na figura 3.11. A ferramenta tipo "flycutter", que descreve um diâmetro D_f , é fixada na árvore da fresadora convencional. O cabeçote é inclinado num ângulo $(90^\circ - \varphi)$ em relação ao seu eixo vertical

usual. S é a distância entre o plano da ferramenta e o eixo da mesa giratória em $Z = 0$, e Δ é o erro de posicionamento do eixo de giro da ferramenta sobre o eixo Y da peça.

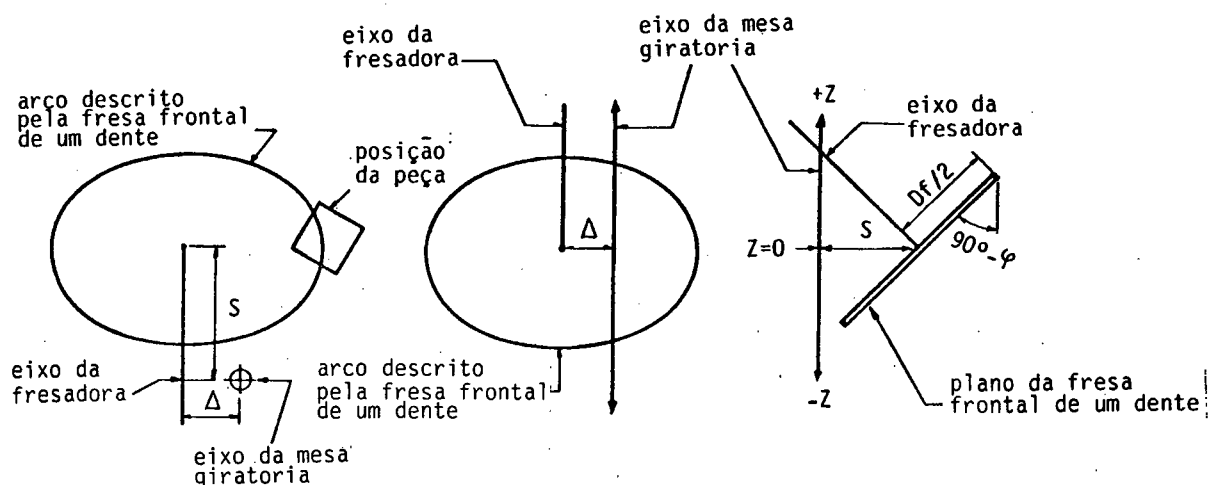


Figura 3.11 - Esquema da montagem que N.R. Erickson utilizou para analisar os erros de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y .

A trajetória da ferramenta sobre a peça de trabalho é complicada, sendo descrita pela equação:

$$R_{(z)}^2 = (Z \tan \varphi + S)^2 + \{ [(Df/2)^2 - (Z/\cos \varphi)^2]^{(1/2)} \pm \Delta \}^2, \quad (3.4)$$

onde: $R_{(z)}$ = raio (medido a partir do eixo Z) da superfície que está sendo gerada, como uma função de Z .

Na ausência do erro, a ferramenta corta ao longo de todo o círculo que descreve, originando uma superfície com riscas que se cruzam, devido à superposição dos movimentos circulares (detalhe A da figura 3.12). Se o erro for positivo somente aparecerão riscas em um sentido (detalhe B), e se for negativo aparecerão riscas no outro sentido (detalhe C).

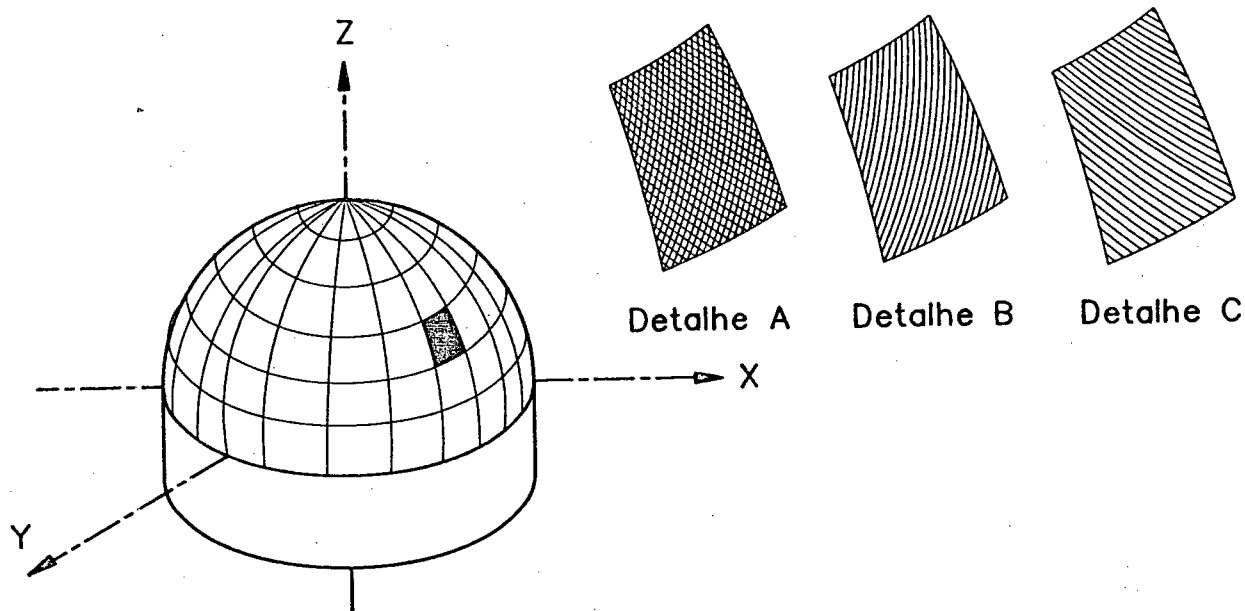


Figura 3.12 - Representação do tipo de superfície que se consegue no modo fresamento, devido aos erros de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y.

Qualquer combinação de erros de posicionamento do eixo de giro da ferramenta sobre o sistema de coordenadas da peça produzirá uma superfície não esférica.

3.3. Geração de superfícies esféricas pela superposição de movimentos circulares e de translação interpolada

Entende-se como movimento de translação interpolada o movimento com deslocamentos incrementais, perpendiculares entre si, da ferramenta, da peça ou de ambos. Estes movimentos são controlados por computador.

Esses processos são diferenciados de acordo com o tipo de ferramenta, entre os mais conhecidos podemos citar o processo que emprega uma fresa de matrizaria com topo esférico e o processo que emprega uma ferramenta de torneamento.

3.3.1. Método de interpolação empregando uma fresa de matrizaria com topo esférico - DIN 1889

Neste processo a peça é fixada sobre a mesa da máquina-ferramenta. A fresa é fixada na árvore e descreve círculos concêntricos sobre diferentes planos paralelos ao plano XY. Os incrementos em Z e X variam em função da posição da ferramenta sobre a superfície esférica. A correção da posição da ferramenta deve ser feita em função do diâmetro da fresa. A rugosidade que se deseja obter define os incrementos. Para a análise do problema foi feito um programa em linguagem APT, para a obtenção de uma semi-esfera de diâmetro qualquer, tendo como variáveis o diâmetro da ferramenta e a rugosidade R_t que se deseja atingir (vide Anexo 1). A simulação é feita para a obtenção de uma semi-esfera de 60 mm de diâmetro, usando uma fresa de 6 mm de diâmetro, e visando atingir uma rugosidade R_t de 0,05 mm (figura 3.13).

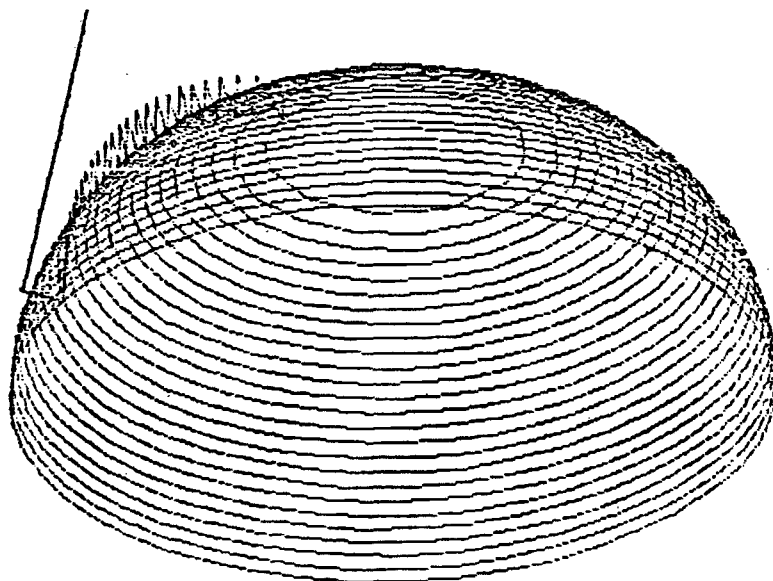


Figura 3.13 - Simulação do programa para a obtenção de uma semi-esfera de diâmetro qualquer, tendo como variáveis o diâmetro da ferramenta e a rugosidade R_t .

Pode-se observar que qualquer erro sistemático de posicionamento do eixo da ferramenta em relação ao centro da peça não tem influência sobre a superfície esférica. A desvantagem deste método reside no tempo de usinagem, visto ser este um processo muito demorado.

3.3.2. Método de interpolação empregando uma ferramenta de torneamento

Neste método a peça é fixada na árvore da máquina-ferramenta. A ferramenta é posicionada a 45° em relação ao eixo de giro da peça, tem um gume de forma circular, e descreve o movimento de translação interpolada.

O gume circular da ferramenta deverá ser o mais perfeito possível, já que qualquer erro geométrico será transferido para a forma da superfície que está sendo gerada. Na figura 3.14 mostra-se uma ferramenta com o gume defeituoso, em duas posições no contorno da peça.

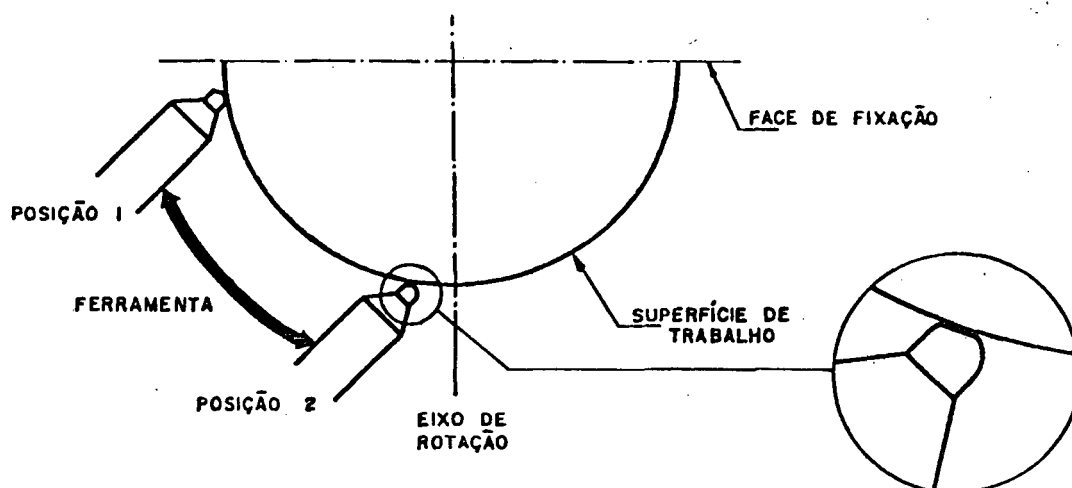


Figura 3.14 - Influência de uma ferramenta com gume defeituoso sobre a forma da superfície esférica, quando esta descreve um movimento de translação interpolada.

Na posição 2 a parte defeituosa do gume está em contato com a superfície da peça. O ponto de contato relativo peça/ferramenta varia sobre o gume da ferramenta dependendo da sua posição [12, 22].

Assim, como a forma do gume da ferramenta é uma fonte de erro, a grandeza do raio de gume também pode produzir erros significativos. A figura 3.15 demonstra os efeitos decorrentes do uso de um raio de gume r_{e1} para usinar superfícies esféricas, que é menor que o raio r_{e2} usado para gerar o programa de interpolação, assumindo pontos de referência de 0° a 90° em um mesmo sistema de coordenadas [12].

Os diferentes erros de forma analisados no item 3.2.1 também podem ser reproduzidos usando-se este método, devido aos erros de posicionamento entre peça e ferramenta.

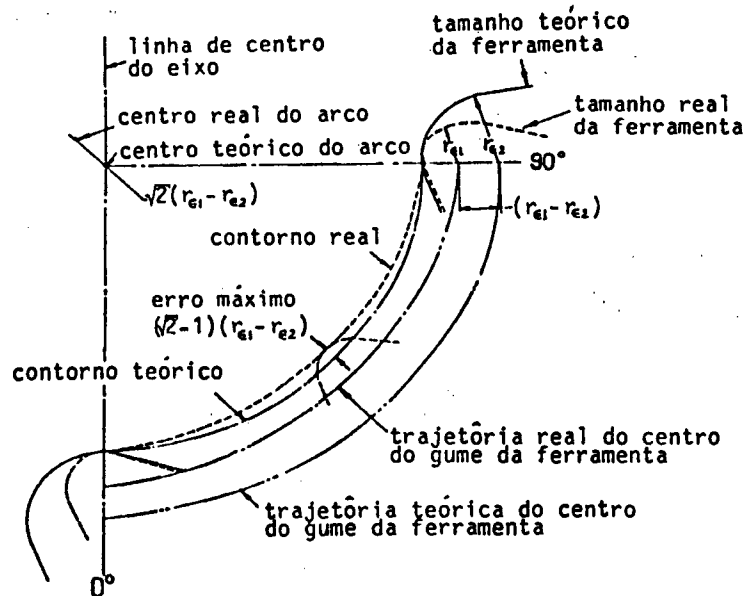


Figura 3.15 - Influência da grandeza do raio de gume da ferramenta sobre a forma da superfície esférica.

C A P Í T U L O 4

PREPARAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

4.1. Generalidades

Para a obtenção de resultados satisfatórios durante a análise dos diferentes processos de geração de superfícies esféricas é preciso ter, pelo menos, um certo controle do processo de usinagem, partindo principalmente das características das máquinas-ferramenta e dispositivos a serem utilizados. Neste sentido foram estudadas e avaliadas as máquinas-ferramenta convencionais disponíveis no Laboratório de Máquinas-Ferramenta da Universidade Federal de Santa Catarina, escolhendo-se a de menor erro de circularidade na árvore e com os recursos necessários para reproduzir as montagens dos diferentes processos a serem analisados.

4.2. Máquinas-ferramenta utilizadas

As máquinas-ferramenta convencionais avaliadas foram: uma fresadora universal SHW - UF1/K [25], que apresentou um erro de circularidade na árvore de $25 \pm 1 \mu\text{m}$; uma fresadora universal Ruhla - FUW 250/IV [26], que apresentou um erro de circularidade de $12 \pm 1 \mu\text{m}$, e uma furadeira de coordenadas Feinstmaschinenbau BKoE 315 x 500 [27], que apresentou um erro de circularidade de $13 \pm 1 \mu\text{m}$. Para poder comparar os resultados obtidos, usou-se

também um centro de usinagem CNC [28], que apresentou um erro de circularidade na árvore de $16 \pm 1 \mu\text{m}$. Estes resultados foram obtidos realizando uma série de ensaios onde foram usinados corpos de prova repetindo as mesmas condições de ensaio para cada máquina-ferramenta, assim como material da peça, material e geometria da ferramenta, diâmetros, velocidades de corte, avanços, penetrações passivas e fluido de corte. A indeterminação do resultado (IR) foi obtida pela soma da incerteza de medição do sistema de medição (Im) e o máximo desvio típico observado em relação ao valor médio das medidas, segundo Schneider [37].

4.2.1. Máquina-ferramenta convencional

A máquina-ferramenta convencional escolhida foi a fresadora universal Ruhla - FUW 250/IV, que apresentou o menor erro de circularidade na árvore (vide Anexo 2). As características técnicas principais desta máquina-ferramenta são citadas no Anexo 3 [25].

Foi feita também uma calibração para a determinação dos erros sistemáticos nos comandos de acionamento de rotação da árvore e do avanço (vide Anexo 2).

Uma característica desta máquina-ferramenta é que possui muitos dispositivos e recursos para efetuar diferentes processos de usinagem. As figuras 4.1 e 4.2 mostram a montagem para reproduzir tanto o modo fresamento como o modo torneamento respectivamente.

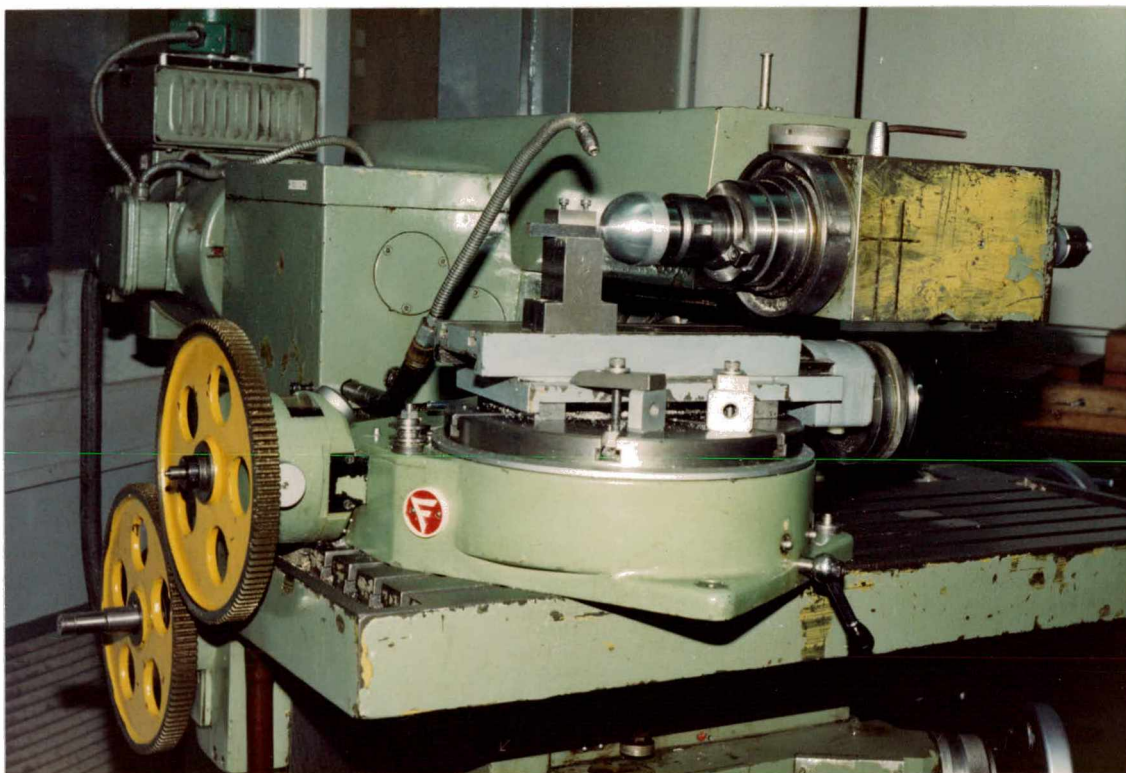


Figura 4.1 - Montagem realizada na fresadora universal Ruhla FFW 250/IV para reproduzir o modo torneamento.

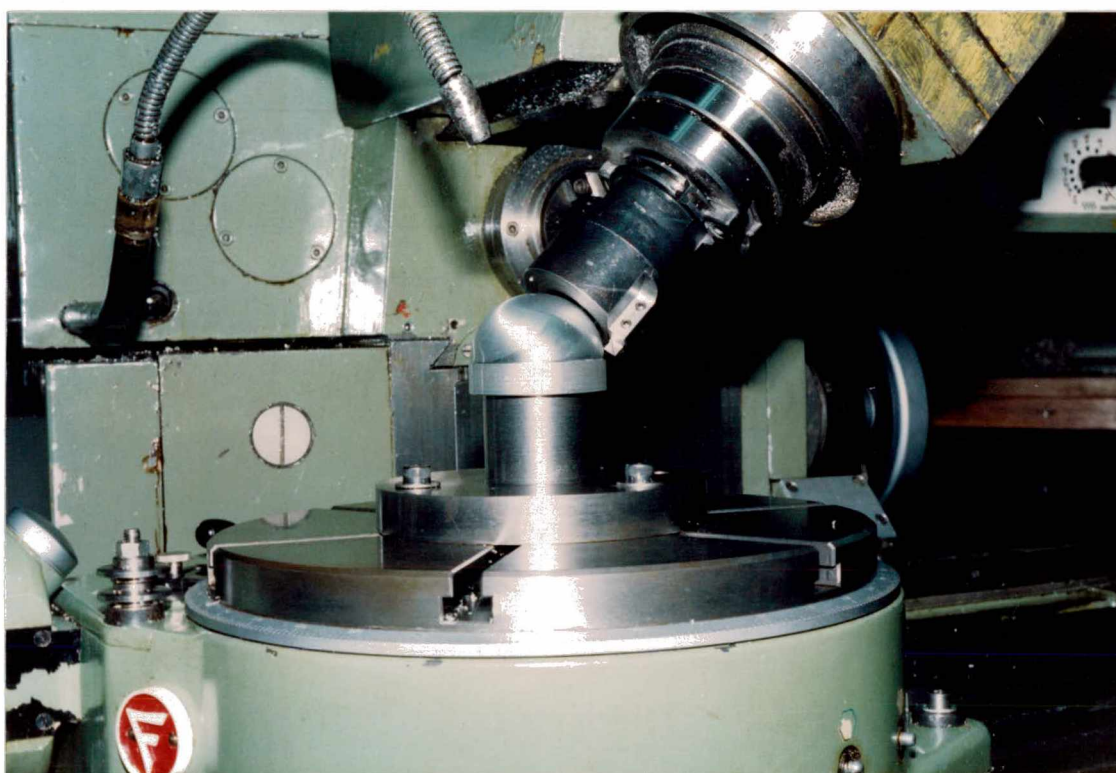


Figura 4.2 - Montagem realizada na fresadora universal Ruhla FFW 250/IV para reproduzir o modo fresamento.

4.2.2. Centro de usinagem CNC

Foi utilizado um centro de usinagem CNC Hüller Hille nb-h 65, com características técnicas principais citadas no Anexo 3 [28]. O gráfico do ensaio referente ao erro de circularidade na árvore é mostrado no Anexo 2.

Na figura 4.3 mostra-se a montagem para reproduzir o modo torneamento, a mesma que também foi usada na usinagem pelo método de interpolação, para a obtenção de superfícies esféricas.

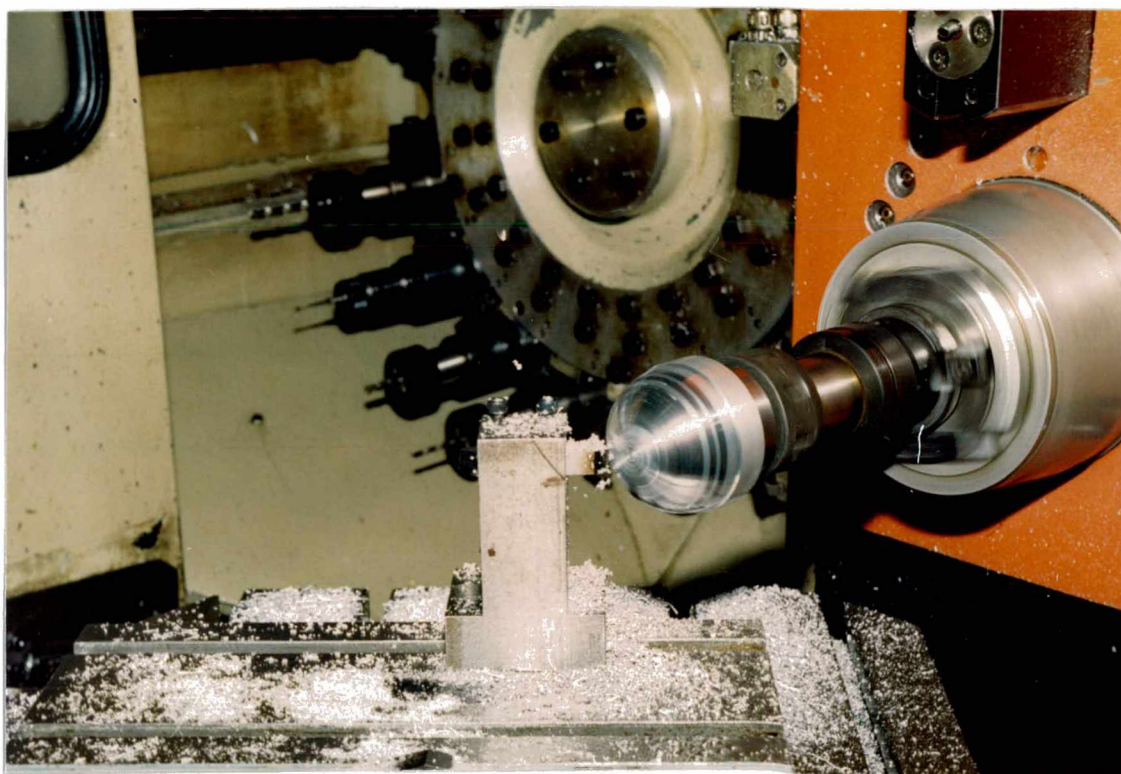


Figura 4.3 - Montagem realizada no centro de usinagem CNC Hüller Hille nb-h 65 para reproduzir o modo torneamento e o método de interpolação.

4.3 Dispositivos utilizados

4.3.1. Mesa divisora circular

Foi usada uma mesa divisora circular da WMW, com características técnicas citadas no Anexo 3 [27].

4.3.2. Carro transversal porta-ferramenta

Usou-se um carro transversal porta-ferramenta pertencente a um torno de precisão marca Kart, modelo EKM - 200 [29].

4.3.3. Dispositivo de fixação do corpo de prova

Foram feitos dois dispositivos para a fixação do corpo de prova. Na figura 4.4 está representado o suporte usado no modo fresamento, e na figura 4.5 o usado no modo torneamento.

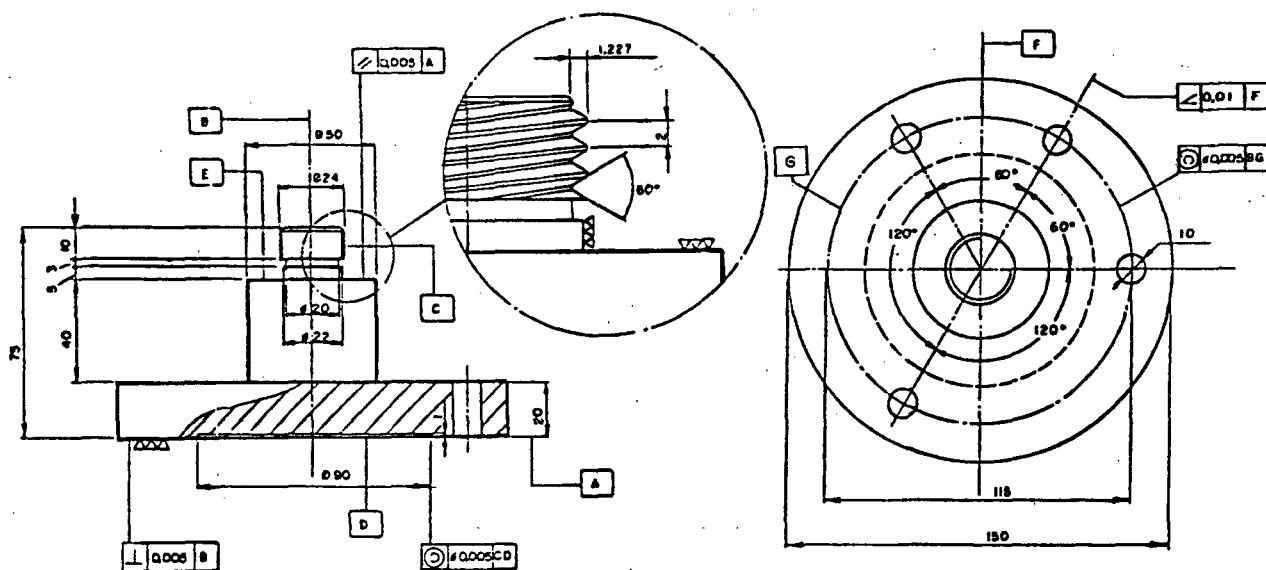


Figura 4.4 - Dispositivo de fixação do corpo de prova utilizado no modo fresamento.

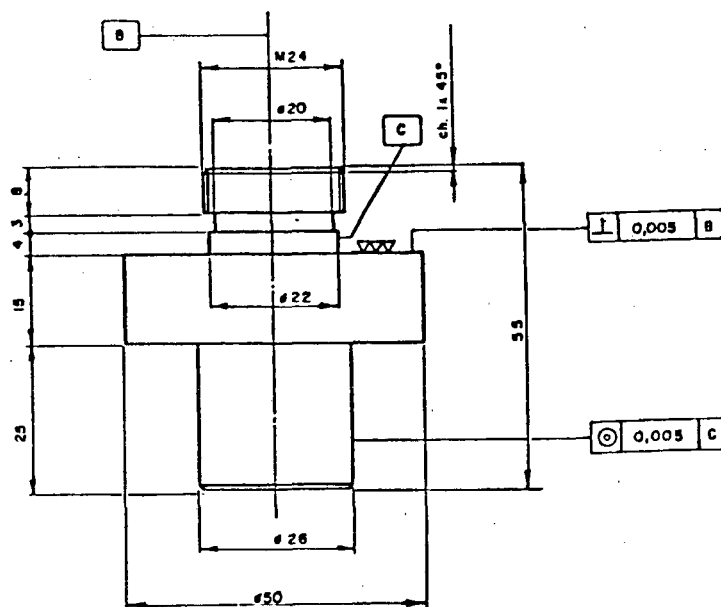


Figura 4.5 - Dispositivo de fixação do corpo de prova utilizado no modo torneamento.

Não sendo necessária a concentricidade do furo de fixação com o diâmetro exterior da peça, porque são analisados somente erros de esfericidade, usa-se um sistema de fixação simples, efetivo e que facilita a montagem e desmontagem do corpo de prova.

4.3.4. Suporte da ferramenta

Para reproduzir o modo torneamento é utilizado um suporte de ferramenta que é fixado no carro transversal. A figura 4.6 mostra este dispositivo simples e rígido.

4.4. Material ensaiado

Os ensaios de usinagem das semi-esferas foram realizados nas ligas de alumínio 2011-T3 e 6061-T6, designação conforme USA/AA,

fornecidos pela Alcan Alumínio do Brasil. A escolha destas ligas se deve ao fato de serem adequadas a usinagem e de se ter um grande número de informações tecnológicas de usinagem destes materiais [21,30].

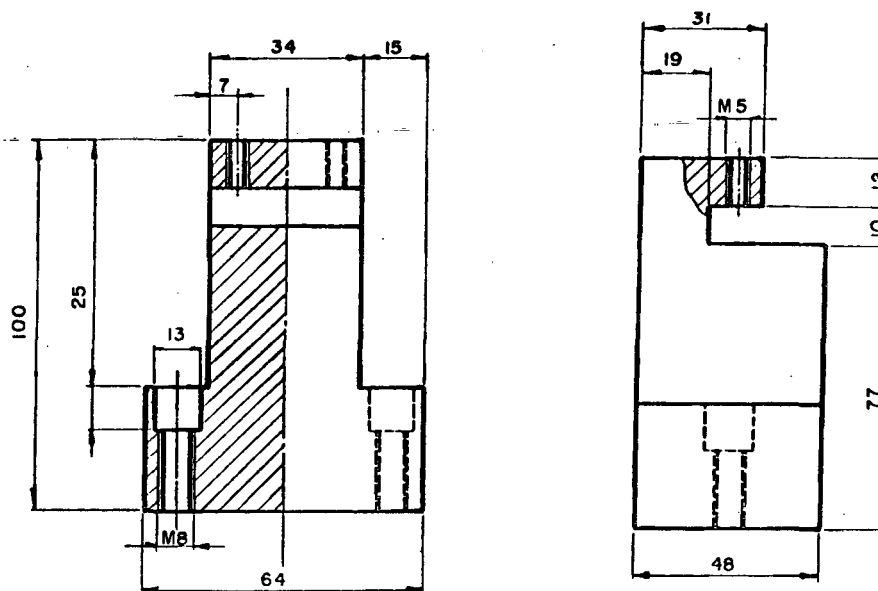


Figura 4.6 - Suporte de ferramenta utilizado no modo torneamento.

4.4.1. Composição e propriedades mecânicas

A composição química e as propriedades mecânicas das ligas de alumínio citadas estão detalhadas nas tabelas 1 e 2 respectivamente [21]:

| LIGA DE ALUMÍNIO | ELEMENTO QUÍMICO (%) | | | | | | | |
|------------------|----------------------|------|-------|-------|-------|------|-------|--------------|
| | Si | Cu | Zn | Mn | Mg | Fe | Ti | Pb |
| 2011-T3 | 0,28 | 5,18 | 0,046 | 0,032 | 0,013 | 0,35 | 0,022 | 0,60 0,20 |
| 6061-T6 | 0,61 | 0,20 | 0,048 | 0,063 | 0,91 | 0,31 | 0,017 | - |

Tabela 1 - Composição química das ligas ensaiadas

| PROPRIEDADES MECÂNICAS | LIGAS DE ALUMÍNIO | |
|---|-------------------|---------|
| | 2011-T3 | 6061-T6 |
| Limite de Resistência a Tração [MPa] | 343 | 354 |
| Limite de Escoamento [MPa] | 271 | 341 |
| Alongamento(30mm) [%] | 13,7 | 11,2 |
| Dureza [HBI] | 95 | 105 |

Tabela 2 - Propriedades mecânicas das ligas ensaiadas

A qualidade superficial é função primária da microestrutura, dos defeitos e da presença de impurezas no material da peça. As ligas de alumínio utilizadas contêm Fe e Si em pequena quantidade como impurezas inevitáveis, que a baixas velocidades ou na falta de uma boa refrigeração aderem-se ao gume da ferramenta, produzindo riscos sobre a superfície [3].

A análise microestrutural das ligas de alumínio citadas, mostra que a liga 6061-T6 apresenta melhores propriedades: tamanho de grão uniforme e menor quantidade de defeitos e impurezas, em relação à outra liga.

4.4.2. Corpos de prova

Para facilitar o trabalho de usinagem e a avaliação da superfície esférica, foram usinadas semi-esferas.

A figura 4.7 mostra as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios. A superfície que faz contato com o dispositivo de fixação é cuidadosamente usinada para garantir um bom assentamento. Esses corpos de prova foram obtidos de uma mesma barra de 65 mm de diâmetro.

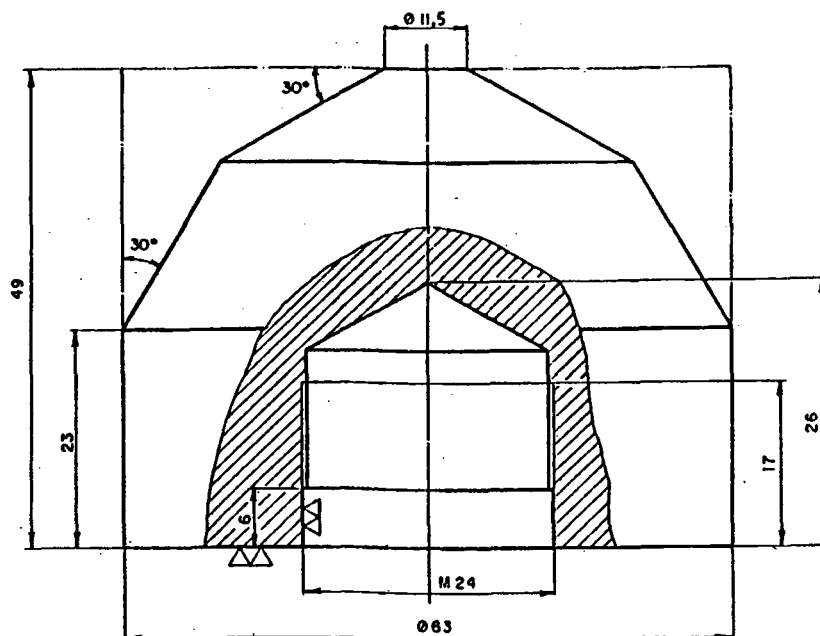


Figura 4.7 - Desenho dos corpos de prova utilizados nos diferentes ensaios.

4.5. Ferramentas

Para a otimização da geometria da ferramenta considerando que o material a usinar é uma liga de alumínio de fácil usinagem, as ferramentas de aço-rápido são as mais indicadas.

Devido às características técnicas e estruturais das máquinas-ferramenta a serem utilizadas, como rotação máxima, rigidez, erros de circularidade na rotação da árvore, erros nos dispositivos, vibrações e variações de temperatura, não se justifica o uso de ferramentas de diamante. Mesmo assim, para fins de comparação, serão feitos também alguns ensaios com uma ferramenta de diamante.

4.5.1. Ferramentas de aço-rápido

Não se dispendo de informações específicas sobre geometrias

de ferramentas de aço-rápido para os diferentes processos de geração de superfícies esféricas, partiu-se de informações existentes sobre processos de usinagem comuns que tem uma certa semelhança com os primeiros.

Para o modo torneamento, utilizaram-se dados sobre o torneamento longitudinal de ligas de alumínio [11,21,30,31, 32,33].

Para o modo fresamento existe a necessidade de se ter uma ferramenta rígida e que cumpra as exigências geométricas do processo. Para isto fabricou-se uma ferramenta tipo fresa frontal de um dente (figura 4.8).

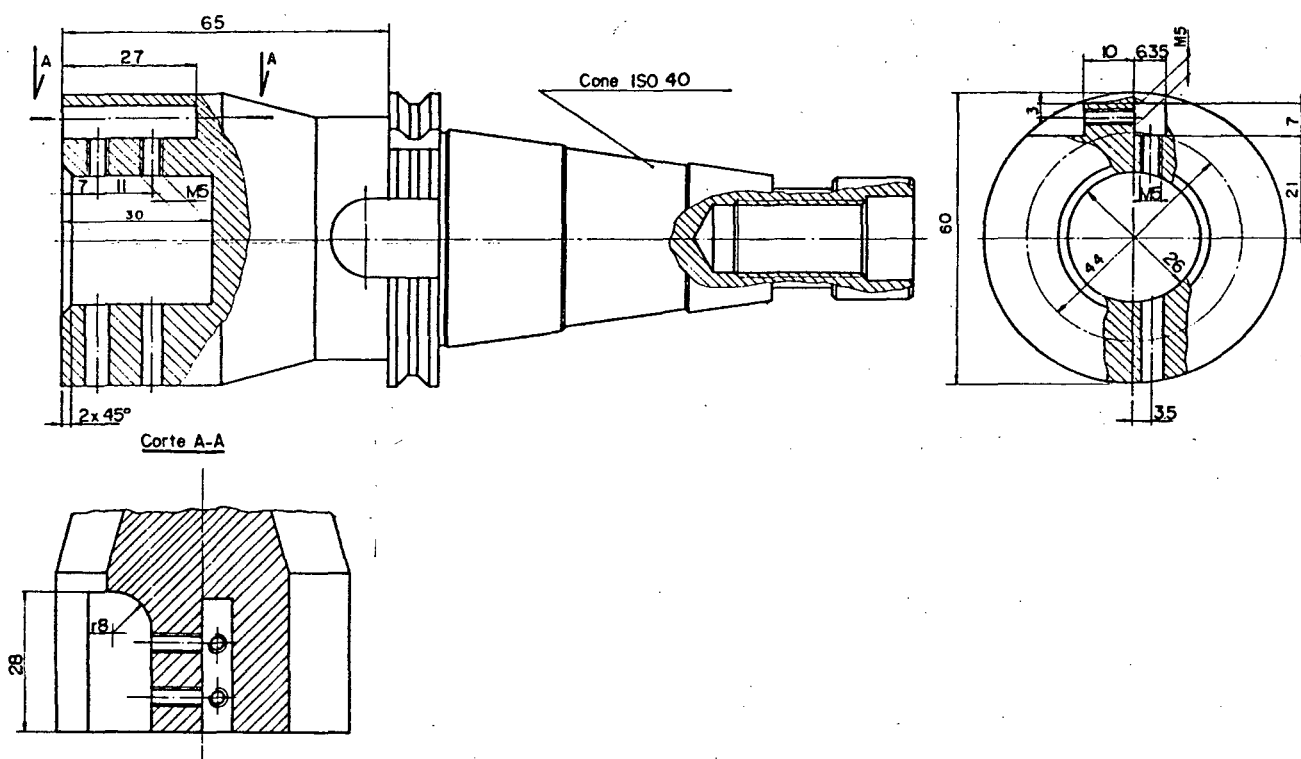


Figura 4.8 - Ferramenta tipo fresa frontal de um dente utilizada no modo fresamento.

4.5.2. Ferramenta de diamante

Usou-se uma ferramenta de diamante monocristalino, lapidada,

com um raio de quina r_ϵ igual a 1 mm (figura 4.9).

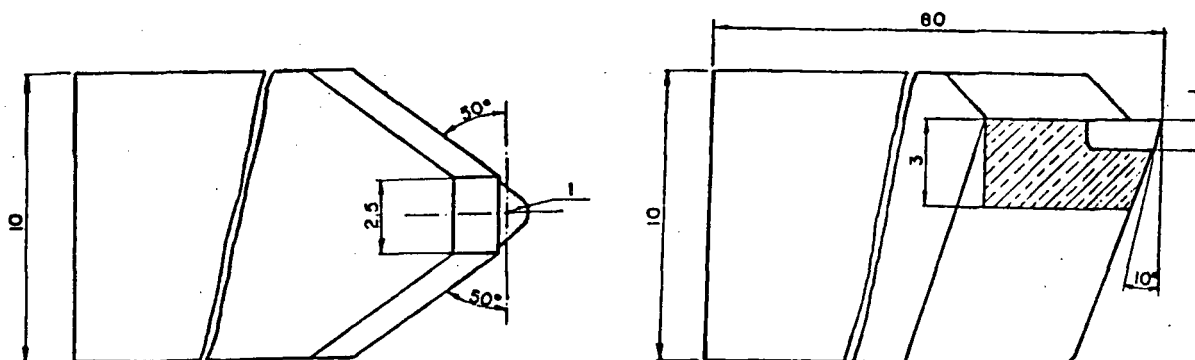


Figura 4.9 - Ferramenta de diamante usada no modo torneamento.

4.6. Equipamentos auxiliares empregados nos ensaios

Para a realização dos ensaios se faz uso de uma série de equipamentos (máquinas-ferramenta e máquinas de ensaio ou de medir) necessários para a confecção das ferramentas e dispositivos, bem como a verificação dos mesmos.

4.6.1. Retificadora óptica

As ferramentas de aço-rápido foram projetadas especificamente para o uso nos dispositivos concebidos para a geração de superfícies esféricas. Tanto para o modo fresamento, como também para o modo torneamento tornou-se necessária a confecção de ferramentas não disponíveis no mercado.

Para obter as diferentes geometrias das ferramentas de aço-rápido usou-se uma retificadora óptica, cujas principais características técnicas estão citadas no Anexo 3 [34].

4.6.2. Microscópio óptico de medição

O microscópio óptico de medição, marca Nikon com aumento máximo de 30 vezes, foi empregado na verificação das ferramentas utilizadas, medição do desgaste e verificação da possível ocorrência de trincas e lascamentos nos gumes.

4.6.3. Equipamento para verificação da qualidade da superfície esférica

Para avaliar as superfícies esféricas usam-se os conceitos de qualidade de forma (erro de esfericidade) e qualidade superficial (rugosidade). Para isto são utilizados, respectivamente, uma máquina de medir por coordenadas e um rugosímetro.

a. Máquina de medir por coordenadas

Por causa do conforto de trabalho, pelo software disponível e a precisão e repetibilidade de medida utilizou-se a máquina de medir por coordenadas marca Carl ZEISS ZMC 550 do Laboratório de Metrologia da UFSC (LABMETRO), com as principais características técnicas citadas no Anexo 3 [35].

b. Rugosímetro

A medição da rugosidade de superfícies curvas exige sapatas especiais do apalpador. Por ainda não se dispor de tais recursos foi utilizado um rugosímetro Perthometer M3A, com as principais características técnicas citadas no Anexo 3 [36].

4.7. Determinação das variáveis do processo

Na geração de esferas por usinagem com ferramentas de corte de geometria definida, tal qual no torneamento ou fresamento, são denominadas de variáveis do processo, o posicionamento dos eixos ferramenta/peça, ângulo de incidência (α_n), ângulo de saída (γ_n), ângulo de inclinação (λ_s), raio de quina (r_e), velocidade de corte (v_c), avanço (f), penetração passiva (a_p) e fluido de corte.

4.7.1. Posicionamento dos eixos ferramenta/peça

Deseja-se estudar a influência dos erros de posicionamento da ferramenta no sistema de coordenadas da peça sobre a superfície esférica, analisados no capítulo 3.

Os erros de posicionamento entre os eixos da ferramenta e da peça, na fresadora universal utilizada, são corrigidos na pressetagem da máquina-ferramenta.

Os erros na faixa dos centésimos de milímetro, podem ser detectados sem instrumentos de medição, a olho nu, e corrigidos observando-se os riscos na superfície que esta sendo gerada, segundo o analisado no capítulo 3. Como se deseja avaliar o efeito produzido por estes erros sobre a forma geométrica da superfície, deverão ser provocados erros até 10 vezes maiores (na faixa dos décimos de milímetro) nos diferentes eixos coordenados (X,Y,Z) e analisar a possível combinação dos mesmos.

4.7.2. Ângulo de incidência (α_n)

Para torneamento da liga de alumínio 2011, usando como material da ferramenta o aço rápido, recomendam-se ângulos de incidência entre 6° e 14° [11,31,32,33]. Weingaertner et al. [21,30] recomenda 8° , sendo que em seus ensaios foram usados, entre outras, as mesmas ligas de alumínio.

4.7.3. Ângulo de saída (γ_n)

Para torneamento da liga de alumínio 2011, usando aço-rápido como ferramenta, recomendam-se ângulos de saída entre 15° e 30° [11,31,32,33]. Weingaertner et al. [21,30] recomenda 25° .

4.7.4. Ângulo de inclinação (λ_s)

Para torneamento da liga de alumínio 2011, usando aço-rápido como ferramenta, recomendam-se ângulos de inclinação entre 0° e 4° [11,31,32,33]. Weingaertner et al. [21,30] recomenda 0° .

4.7.5. Raio de quina (r_ϵ)

A literatura [21] recomenda a adoção de um raio de quina entre 0,2 e 3,0 mm. Segundo as referências [23] e [32] é recomendado o uso do maior raio de quina, tomando-se precauções para não levar a um comprimento de contato excessivo entre peça e ferramenta, o que pode provocar vibrações prejudiciais à qualidade superficial. Para um processo de acabamento, Weingaertner et al. [30] recomenda raios de quina grandes (na

ordem de 2,0 mm) desde que não induzam vibrações e prejudiquem o mecanismo de formação do cavaco.

4.7.6. Velocidade de corte (v_c)

A velocidade de corte é definida como sendo a maior velocidade relativa entre peça e ferramenta.

Para o torneamento externo longitudinal de ligas de alumínio tratáveis termicamente, com ferramentas de aço-rápido, Weingaertner et al [21] recomenda velocidades de corte, para processos de desbaste, de 180 a 250 m/min, e para processos de acabamento, de 250 a 600 m/min.

4.7.7. Avanço (f)

Para processos de desbaste recomendam-se avanços de 0,15 a 0,50 mm/rot, e para processos de acabamento de 0,05 a 0,25 mm/rot [21]. Faz-se notar que estes valores são fornecidos para as indústrias considerando a usinagem convencional e não a usinagem de precisão.

4.7.8. Penetração passiva (a_p)

Recomendam-se penetrações passivas, para processos de desbaste, de até 5 mm, e para processos de acabamento de até 0,5 mm [21].

4.7.9. Fluido de corte

Considerando o alumínio como material de fácil usinagem (pequenas forças de corte, baixa pressão no corte), o fluido de corte tem antes uma função refrigerante que lubrificante. Bons resultados são obtidos com óleos de corte de baixa viscosidade ou emulsões em concentrações máximas de 5 % [21].

4.8. Metodologia dos ensaios

Com o intuito de determinar a influência das variáveis do processo sobre a qualidade final das semi-esferas, ou seja, sobre a qualidade de forma (esfericidade) e a qualidade superficial (rugosidade), deve-se fazer uma combinação destas entre si. Esta combinação deve ser feita de modo que apenas uma das variáveis seja alterada, mantendo-se as outras constantes, permitindo verificar a influência de cada uma delas separadamente [37].

Optou-se por iniciar os experimentos com as condições fornecidas pela literatura. Tendo-se uma faixa de valores, procurou-se iniciar os ensaios com o valor intermediário e posteriormente otimizando-o segundo as tendências apresentadas nos resultados prévios.

O número de repetições para cada conjunto de variáveis independentes deve ser, segundo Schneider [37], de no mínimo igual a três, por motivos estatísticos. No entanto, como o número de ensaios resulta muito grande, quando o número de variáveis independentes e o número de variações de cada variável também é grande, a adoção desta prática torna-se demasiado onerosa [38].

No presente trabalho, a metodologia adotada será a

realização de cada combinação de variáveis apenas uma vez. Havendo dúvida quanto aos resultados, o ensaio será repetido. Em caso de ocorrer uma nítida inferioridade de uma condição ensaiada quanto à qualidade da semi-esfera obtida em relação às outras, a mesma não será considerada. Com isto pretende-se chegar a um bom nível de conhecimento de como se obter superfícies esféricas de boa qualidade através de um número de ensaios relativamente pequeno, mesmo em detrimento de um conhecimento mais profundo sobre o comportamento de cada variável.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

5.1. Considerações iniciais aos ensaios

Os corpos de prova, bem identificados, como também os dispositivos de fixação, devem ser limpos e examinados, especialmente a rosca e as superfícies que estarão em contato durante o ensaio.

Devido à análise feita no item 4.4., para os ensaios com ferramentas de aço-rápido é utilizada a liga de alumínio 2011-T3, e para os ensaios com ferramentas de diamante é utilizada a liga de alumínio 6061-T6.

Para o controle das condições de usinagem empregadas em cada corpo de prova, ressaltando a variável independente em estudo e a posterior avaliação, foi elaborada uma tabela de controle de dados com as informações relativas a cada ensaio (vide exemplo da tabela de análise da geometria da ferramenta, no Anexo 4).

Uma vez terminado o ensaio, o corpo de prova deve ser retirado cuidadosamente, sem que a sua superfície usinada seja tocada diretamente pelo operador. Então o corpo de prova deve ser limpo rigorosamente, utilizando-se um tecido fino embebido em álcool, ser examinado e levado a uma sala com ambiente controlado para sua posterior avaliação. A ferramenta deve também ser cuidadosamente inspecionada no microscópio óptico, a fim de que seja feita uma avaliação do desgaste ocorrido, possível formação de gume postiço, trincas e lascamentos.

5.2. Ensaio realizados com a fresadora convencional

5.2.1. Erros de posicionamento da ferramenta no sistema de coordenadas da peça

Para determinar a influência dos erros de posicionamento da ferramenta e o sistema de coordenadas da peça sobre a forma da semi-esfera seguiu-se a seguinte metodologia, tanto para o modo torneamento como para o modo fresamento:

- centragem cuidadosa da ferramenta com ajuda de relógios comparadores;
- intencionalmente provocou-se um erro de posicionamento, com um valor Δ de 0,5 mm, segundo a tabela 3, mantidas as condições de usinagem constantes para o processo de acabamento ($v_c = 200$ m/min, $f = 0,06$ mm/rot, $a_p = 0,2$ mm e emulsão 5 % como fluido de corte).

| EIXO COORDENADO | NÚMERO DO ENSAIO | | | | | | | | | |
|--------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Z | $+\Delta$ | $-\Delta$ | | | | | $+\Delta$ | | $+\Delta$ | $+\Delta$ |
| X | | | $+\Delta$ | $-\Delta$ | | | $+\Delta$ | $+\Delta$ | | $+\Delta$ |
| Y | | | | | $+\Delta$ | $-\Delta$ | | $+\Delta$ | $+\Delta$ | $+\Delta$ |

Tabela 3 - Erros de posicionamento

Utilizou-se a fresadora universal SHW - UF1/K para reproduzir o modo fresamento e a fresadora universal Ruhla-FUW 250/IV para reproduzir o modo torneamento.

5.2.2. Avaliação do erro de forma das semi-esferas

É importante ter o conhecimento da influência dos erros de

posicionamento entre os eixos da ferramenta e da peça sobre a superfície esférica obtida. Assim, nos ensaios posteriores, pode ser feita uma análise mais criteriosa do processo em estudo.

A medição da esfericidade dos corpos de prova foi realizada na máquina de medir por coordenadas descrita no item 4.6.3.a. Utilizou-se o programa NN UMESS 300 Zeiss 1987 que vem incluído no "software" da máquina (vide relatório Anexo 4) [35].

5.2.3. Geometria da ferramenta para os modos fresamento e torneamento

No modo fresamento apresentam-se restrições geométricas para a forma da ferramenta, devido ao próprio processo. Com a condição do gume permanecer em todo momento perpendicular à superfície esférica, projetou-se uma geometria para a fresa frontal de um dente, com as características mostradas na figura 5.1.

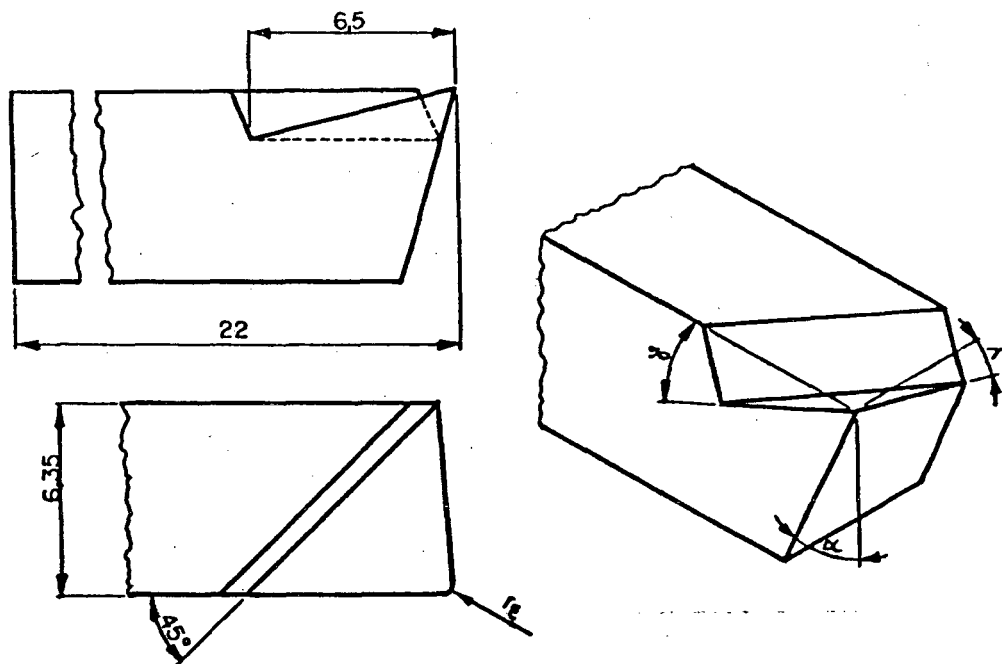


Figura 5.1 - Representação esquemática da geometria da ferramenta utilizada no modo fresamento.

Ensaia-se ângulos de incidência (α_n) de 10° e 15° , ângulos de saída (γ_n) de 0° , 10° e 20° e ângulos de inclinação (λ_s) de 0° , 10° , 20° e 25° , mantendo o raio de quina r_e igual a 0,2 mm.

No modo torneamento foram ensaiados ângulos de incidência (α_n) de 6° , 8° e 10° , ângulos de saída (γ_n) de 10° , 20° e 25° , ângulos de inclinação (λ_s) de 0° , 10° e 20° , e raios de quina r_e de 0,20 , 1,0 e 2,0 mm.

5.2.4. Verificação da qualidade das semi-esferas

Após a usinagem das semi-esferas é necessário avaliar e comparar os dois modos propostos, a fim de se saber com qual deles se consegue gerar uma superfície esférica com o menor erro de forma. Depois de minimizar o erro de forma procura-se reduzir o erro microgeométrico superficial, com o objetivo de melhorar a rugosidade.

Mede-se o erro de esfericidade na máquina de medir por coordenadas seguindo a metodologia descrita no item 5.2.2., e a rugosidade com o rugosímetro descrito no item 4.6.3.a. Para cada semi-esfera são feitas medições de rugosidade R_a e R_t em 16 regiões distintas, seguindo a seguinte metodologia:

- são definidas quatro regiões (círculos) sobre a superfície da esfera, paralelas ao plano XY, e que formam ângulos de 8° , 45° , 68° e 82° com o eixo Z de giro da peça;
- gabaritos são usados para um rápido posicionamento das semi-esferas, o que facilita as medições sobre as ditas regiões;
- sobre cada região são feitas quatro medições, girando-se a peça sobre seu eixo Z em 90° ; destes valores é tomada a

média e a dispersão de medição, que é considerada como a rugosidade dessa região. Havendo uma diferença significativa entre os quatro valores, faz-se um número maior de medições e uma análise estatística mais completa.

5.2.5. Otimização da geometria da ferramenta

Uma vez estabelecido o melhor modo para gerar uma superfície esférica com a fresadora convencional tenta-se melhorar a rugosidade das semi-esferas.

Segundo Nishiguchi [22] conseguem-se resultados satisfatórios na usinagem de precisão de superfícies planas utilizando ferramentas de diamante com gumes retos. Deve-se ter muito cuidado na fabricação das mesmas, principalmente quanto à retidão e ao grau de afiação do gume. Desta maneira, foram ensaiadas ferramentas com gumes retos de 1,0 e 2,0 mm de comprimento, variando também o ângulo de saída (γ_n) em 0° , 10° e 20° . Ensaiou-se ainda uma ferramenta com o gume em forma côncavo, com um raio 10 % maior que o raio da semi-esfera desejada (33 mm) (figura 5.2).

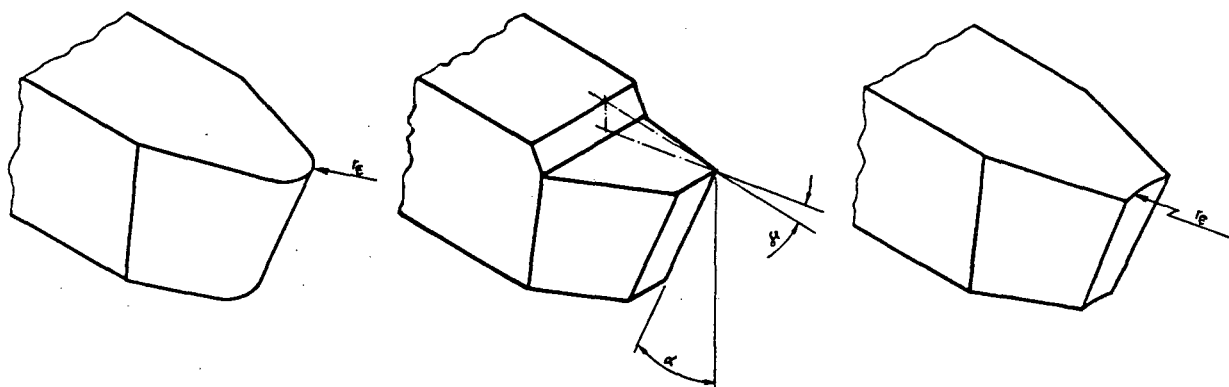


Figura 5.2 - Representação esquemática das ferramentas utilizadas na otimização do modo torneamento.

5.2.6. Verificação da qualidade das semi-esferas

O erro de esfericidade é medido em alguns corpos de prova para conferir a influência sobre a forma esférica em função da geometria da ferramenta modificada. A medição de rugosidade, no entanto, é feita para todos os corpos de prova, seguindo-se a metodologia citada no item 5.2.4. Determina-se, assim, com qual geometria de ferramenta consegue-se a menor rugosidade.

5.2.7. Velocidade de corte

Uma vez definida a geometria da ferramenta foram ensaiadas as seguintes velocidades de corte, em m/min:

200 - 250 - 315 - 400

segundo os valores principais da série fundamental de números normalizados R 10 DIN 323 - CD 389.171.

As respectivas rotações na árvore da fresadora, para o maior diâmetro da peça (60 mm), em rpm, são:

1060 - 1325 - 1670 - 2120

Estes valores são ainda corrigidos segundo o gráfico de erros sistemáticos do controle de rotação da fresadora (vide Anexo 2).

5.2.8. Avanço

Para automatizar o avanço na fresadora foi adaptada uma cadeia cinemática entre o motor de avanços transversais e a mesa divisora circular sobre a qual é montada a peça ou ferramenta. Para que não houvesse um translado da mesa, o fuso da mesma teve que ser desacoplado.

Os avanços escolhidos para a realização dos ensaios, em mm/rot, são:

$$0,010 - 0,016 - 0,025 - 0,040 - 0,063$$

segundo os valores principais da série fundamental de números normalizados R5 DIN 323 - CD 389.171.

Para levar estes valores ao controle de avanço da máquina ferramenta, utilizou-se a seguinte equação:

$$f = i_1 \times i_2 \times \frac{s \times \pi \times D}{P_f \times n} \quad (5.1)$$

onde: f = avanço, em mm/rot,

s = avanço no controle da máquina, em mm/min,

P_f = passo do fuso, em mm (igual a 3),

i_1 = relação de engrenagens do fuso de máquina e da mesa divisora (igual a 122\123),

i_2 = relação entre a base circular e a manivela da mesa divisora (igual a 1/180),

D = diâmetro da peça, em mm (igual a 60),

n = rotação da árvore, em rpm.

Os valores equivalentes s , que estão também em função da

velocidade de rotação, são corrigidos segundo o gráfico de erros sistemáticos do controle de avanço da fresadora (vide Anexo 2).

5.2.9. Penetração passiva

Para determinar a influência da penetração passiva sobre a rugosidade foram escolhidos os seguintes valores, em mm:

0,01 - 0,02 - 0,05 - 0,10 - 0,20

5.2.10. Fluido de corte

Seguindo as recomendações da literatura [21] usou-se, principalmente para ferramentas de aço-rápido, emulsões de óleo em concentrações de 3 % e 5 %, e para a ferramenta de diamante, álcool etílico. Também foram realizados ensaios a seco, isto é, sem o emprego de fluido de corte.

5.2.11. Ensaio realizados com a ferramenta de diamante

Usou-se a ferramenta de diamante descrita no item 4.5.2. Como a fresadora utilizada tem as suas limitações quanto à velocidade de corte (a 315 m/min começam a aparecer vibrações que afetam a qualidade superficial), escolheu-se uma velocidade de corte de 300 m/min. Esta velocidade varia em função da posição da ferramenta, chegando a zero quando a ferramenta passa sobre o eixo Z da peça, valor crítico para ferramentas de diamante. Para evitar isto foram preparados corpos de prova com um furo de 5 mm de diâmetro sobre o eixo Z, de forma que valores próximos a zero

não fossem atingidos.

O avanço utilizado foi de 0,01 mm/rot, a penetração passiva, 0,05 mm e o fluido de corte, álcool etílico.

5.3. Ensaio realizados com o centro de usinagem

Com a ajuda de relógios comparadores e o comando manual do centro de usinagem, foram posicionadas as coordenadas do centro da peça em relação à ferramenta, conforme a montagem mostrada na figura 4.3.

5.3.1. Modo torneamento

Para comparar os resultados obtidos na fresadora universal Ruhla FUW 250/IV, foram realizados ensaios no centro de usinagem CNC reproduzindo o modo torneamento. As condições de ensaio utilizadas foram as seguintes: ferramenta com ângulo de incidência (α_n) de 10° , ângulo de saída (γ_n) de 10° , ângulo de inclinação (λ_s) de 0° e gume reto com 2,0 mm de comprimento; velocidade de corte (v_c) de 250 m/min (no maior diâmetro), avanço (f) de 0,04 mm/rot, penetração passiva (a_p) de 0,2 mm e sem fluido de corte.

5.3.2. Método de interpolação

Foi ensaiado o método de interpolação utilizando o programa já existente no comando do centro de usinagem [38].

A ferramenta e as condições de usinagem foram as mesmas que as citadas no item 5.3.1.

5.4. Verificação da qualidade das semi-esferas

Nos corpos de prova obtidos a partir do item 5.2.7. foram medidos o erro de esfericidade, seguindo-se a metodologia descrita no item 5.2.2., e a rugosidade, seguindo-se a metodologia descrita no item 5.2.4.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. Influência sobre a forma da superfície esférica

6.1.1. Erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Z

Como foi mostrado nos itens 3.2.1.b. e 3.2.2.b., nos ensaios comprova-se que um erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Z da peça, seja positivo ou negativo, não tem influência sobre a forma da superfície esférica. Isto acontece tanto no modo torneamento como no modo fresamento (tabela 4).

| PROCESSO DE GERAÇÃO DA SEMI-ESFERA | MÁQUINA-FERRAMENTA UTILIZADA | ERRO DE ESFERICIDADE (μm) | | | | |
|------------------------------------|----------------------------------|--|--|--|--|--|
| | | Situação Ideal | Erro de Posic. sobre o Eixo Z | Erro de Posic. sobre o Eixo X | Erro de Posic. sobre o Eixo Y | Erro de Posic. sobre os Eixos X e Y |
| | | $\Delta X = 0,0$ $\Delta Y = 0,0$ $\Delta Z = 0,0$ | $\Delta X = 0,0$ $\Delta Y = 0,0$ $\Delta Z = 0,5$ | $\Delta X = 0,5$ $\Delta Y = 0,0$ $\Delta Z = 0,0$ | $\Delta X = 0,0$ $\Delta Y = 0,5$ $\Delta Z = 0,0$ | $\Delta X = 0,5$ $\Delta Y = 0,5$ $\Delta Z = 0,0$ |
| Modo Torneamento | Fresad. Univ. Ruhla - FUW 250/IV | 7 ± 1 | 7 ± 1 | 172 ± 1 | 7 ± 1 | 169 ± 1 |
| Modo Fresamento | Fresad. Univ. SHW - UF1/K | 26 ± 1 | 30 ± 1 | 24 ± 1 | 232 ± 1 | 240 ± 1 |

Tabela 4 - Comparação dos erros de esfericidade conseguidos nos modos torneamento e fresamento.

Os erros de esfericidade de $30 \pm 1 \mu\text{m}$ obtidos na fresadora SHW-UF1/K, utilizada para o modo fresamento, são maiores que os $7 \pm 1 \mu\text{m}$ obtidos na fresadora Ruhla-FUW 250/IV, utilizada para o modo torneamento. Esta diferença é correlacionada com os erros de circularidade do movimento da ferramenta, que na fresadora

SHW-UF1/K representam um valor de $25 \pm 1 \mu\text{m}$, e para a fresadora Ruhla-FUW 250/IV um valor de $12 \pm 1 \mu\text{m}$, conforme mostrado no item 4.2.

6.1.2. Erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo X

No modo fresamento comprova-se que erros de posicionamento da ferramenta sobre o eixo X têm influência sobre o diâmetro da superfície esférica, mas não sobre a forma da mesma, obtendo-se erros de esfericidade de $24 \pm 1 \mu\text{m}$ com a fresadora SHW-UF1/K (tabela 4). Isto demonstra que erros pequenos dessa natureza não têm influência sobre a forma da superfície esférica.

Tanto para erros positivos como negativos, percebe-se o surgimento de um cone no pólo da semi-esfera (figura 6.1). Foi comprovado que as dimensões e a geometria desta saliência estão em função da geometria da ferramenta.



Figura 6.1 - Saliência característica na presença do erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo X da peça, no modo fresamento. Ampliação: 25 X.

No modo torneamento comprova-se que erros de posicionamento da ferramenta sobre o eixo X têm influência sobre a forma da superfície esférica, obtendo-se erros de esfericidade de $172 \pm 1 \mu\text{m}$ com a fresadora Ruhla-FUW 250/IV (tabela 4).

Na medição, o programa da máquina de medir por coordenadas supõe que esteja sendo medida uma esfera. No entanto, devido ao erro provocado pelo deslocamento do eixo de rotação da ferramenta em X, o raio médio calculado é maior que o raio de curvatura descrito pela ferramenta para um deslocamento positivo, e menor para um deslocamento negativo. Este comportamento comprova o erro previsto na análise teórica (figura 3.5). Na segunda etapa da medição, quando o apalpador da máquina de medir realiza uma "varredura" sobre a semi-esfera, percorrendo um arco de 180° do equador ao pólo e retornando ao equador, os erros referenciados nas figuras 6.2 e 6.3 foram calculados em relação ao diâmetro médio da esfera calculada.

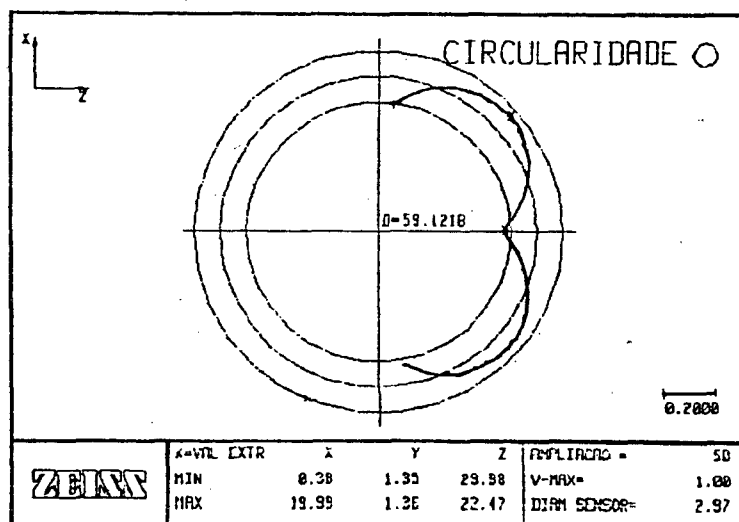


Figura 6.2 - Gráfico obtido na máquina de medir por coordenadas, e que representa um corte da semi-esfera no plano ZX. Para erros positivos a superfície tende a ter uma forma achatada.

Como a "varredura" descreve a curvatura equivalente a trajetória da ferramenta, teremos que, para um erro de posicionamento positivo da ferramenta, o erro de circularidade indicado para o equador e o pólo sejam menores, e para a latitude de 45° maiores que os valores do raio médio da esfera calculada. Para um erro de posicionamento negativo, o erro de circularidade indicado para o equador e para o pólo são maiores, e para a latitude de 45° menores que o valor médio do raio da esfera calculada.

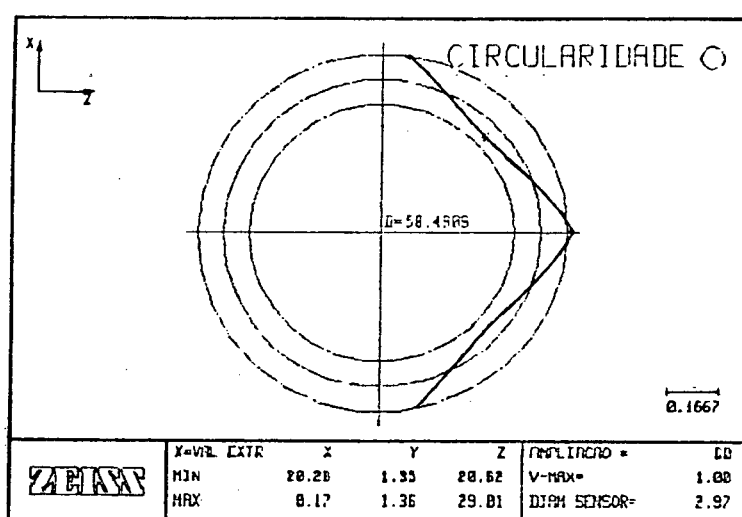


Figura 6.3 - Gráfico obtido na máquina de medir por coordenadas, e que representa um corte da semi-esfera no plano ZX. Para erros negativos a superfície tende a ter uma forma pontiaguda.

6.1.3. Erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y

No modo fresamento comprova-se que erros de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y têm influência sobre a forma da superfície esférica, obtendo-se erros de esfericidade de $232 \pm 1 \mu\text{m}$ com a fresadora SHW-UF1/K (tabela 4). As superfícies conseguidas, tanto para erros positivos como negativos, tendem a

ter uma forma pontiaguda, similar à representada na figura 6.3, esta obtida no modo torneamento. Comprovou-se também o detalhe do surgimento de ranhuras sobre a superfície, como descrito no item 3.2.2.d.

No modo torneamento comprova-se que erros de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y não tem influência sobre a forma da superfície esférica, obtendo-se erros de esfericidade de $7 \pm 1 \mu\text{m}$ com a fresadora Ruhlra-FUW 250/IV (tabela 4). Quando o erro é negativo, percebe-se nitidamente o surgimento de uma saliência cilíndrica no pólo da semi-esfera (figura 6.4). Quando o erro é positivo, esta saliência já não é tão perceptível, pois o ângulo de incidência α da ferramenta vai amassando o material nesta região.



Figura 6.4 - Saliência característica na presença do erro de posicionamento negativo da ferramenta sobre o eixo Y da peça, no modo torneamento. Ampliação: 25 X.

Tanto o erro positivo como também o erro negativo podem provocar o lascamento de ferramentas frágeis, e são de sobremodo críticos no emprego de ferramentas de diamante monocristalino.

6.1.4. Combinação de erros

Comprovou-se que qualquer combinação de erros, na existência do erro de posicionamento da ferramenta sobre o eixo Y, no modo fresamento, e sobre o eixo X, no modo torneamento, é crítica. Na tabela 4 mostra-se os erros de esfericidade conseguidos para uma combinação de erros de posicionamento sobre os eixos X e Y, obtendo-se um valor de $240 \pm 1 \mu\text{m}$ no modo fresamento e de $169 \pm 1 \mu\text{m}$ no modo torneamento.

6.1.5. Comparação entre os modos torneamento e fresamento

Para a comparação entre os modos torneamento e fresamento utilizou-se a fresadora universal Ruhla-FUW 250/IV; com esta foi realizada a execução dos ensaios, nos quais diversas geometrias de ferramenta foram experimentadas, conforme descrito no item 5.2.3. Os menores erros de esfericidade obtidos para ambos os modos são apresentados na tabela 5.

| PROCESSO DE GERAÇÃO DA SEMI-ESFERA | DIÂMETRO DA SEMI-ESFERA [mm] | ERRO DE ESFERICIDADE [μm] | RUGOSIDADE Ra [μm] | GEOMETRIA DA FERRAMENTA | | | | | CONDIÇÕES DE CORTE | | | |
|------------------------------------|------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------|------------|-------------|--------------|---------|--------------------|--------------|------------|-----------------|
| | | | | α_n | γ_n | λ_s | ϵ_r | r_e | v_c [m/min] | f [mm/rot] | a_p [mm] | Fluido de Corte |
| Modo Torneamento | 61,25 | 4 ± 1 | $1,3 \pm 0,05$ | 6° | 10° | 10° | 60° | 0,20 mm | 250 | 0,04 | 0,20 | emulsão 5% |
| Modo Fresamento | 60,19 | 7 ± 1 | $1,0 \pm 0,20$ | 15° | 10° | 20° | 90° | 0,20 mm | 160 | 0,10 | 0,20 | emulsão 5% |

Tabela 5 - Menores erros de esfericidade obtidos para os modos torneamento e fresamento.

Além de se conseguir o menor erro de esfericidade com o modo torneamento, $4 \pm 1 \mu\text{m}$, obteve-se boa repetibilidade dos valores nos diferentes ensaios. No modo fresamento a repetibilidade dos

resultados não foi boa, chegando-se a obter erros de esfericidade de até $23 \pm 1 \mu\text{m}$.

6.1.6. Velocidade de corte no modo torneamento

Na figura 6.5 observa-se que a velocidade de corte tem influência sobre a forma da superfície esférica, — pois obteve-se um aumento do erro de esfericidade a partir de uma velocidade de 250 m/min. Isto se deve às características de rigidez da máquina-ferramenta utilizada, percebendo-se um aumento da vibração na estrutura da mesma com o aumento da velocidade de corte.

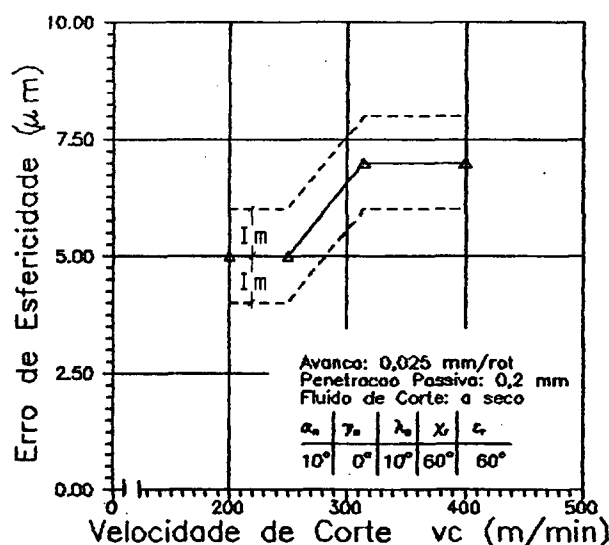


Figura 6.5 - Influência da velocidade de corte sobre a forma da semi-esfera.

6.1.7. Avanço no modo torneamento

Na figura 6.6 observa-se que o avanço tem influência sobre a forma da superfície esférica. Para avanços menores que 0,025 mm/rot, o erro de esfericidade aumenta. Isto pode ser explicado devido ao fato do avanço estar em dependência da geometria da

ferramenta. Utilizou-se para estes ensaios uma ferramenta com o gume reto de 2 mm de comprimento. Este gume reto, para avanços pequenos, pode entrar na região onde a superfície da peça não é mais cortada, e sim amassada. Este fato repercutirá, então, negativamente sobre o erro de esfericidade.

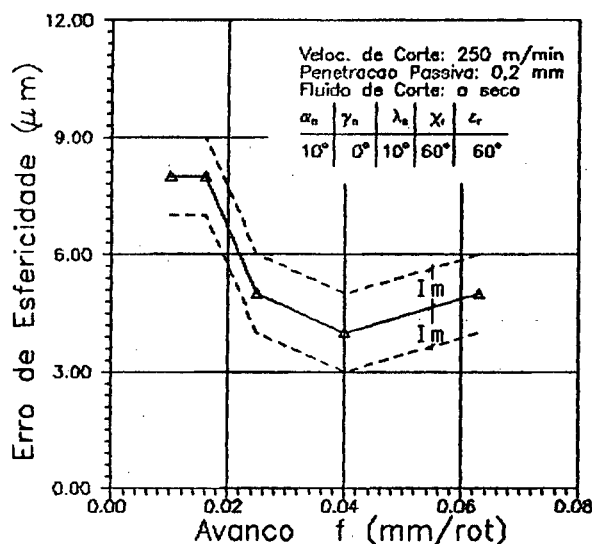


Figura 6.6 - Influência do avanço sobre a forma da semi-esfera.

6.2. Influência sobre a rugosidade da superfície esférica

6.2.1. Ângulo de incidência α_n

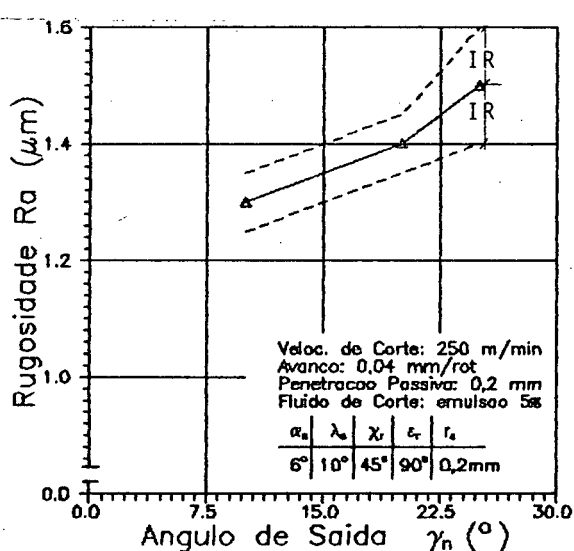
Nos ensaios realizados, no modo torneamento e no modo fresamento, observou-se que o ângulo de incidência α_n não tem grande influência sobre a rugosidade das semi-esferas.

6.2.2. Ângulo de saída γ_n

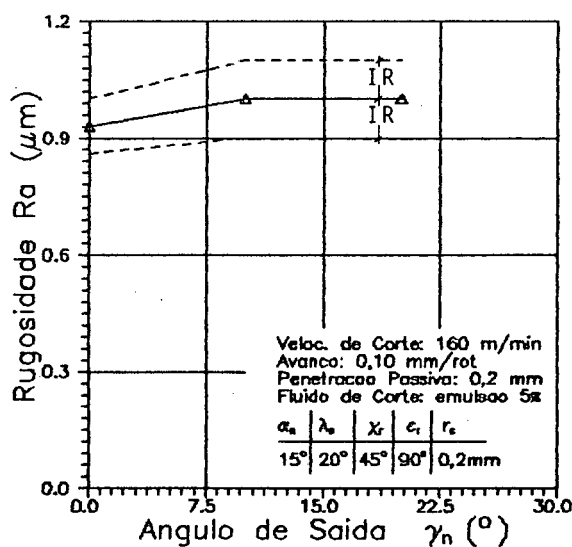
Embora fosse esperada uma melhoria na rugosidade ao aumentar-se positivamente o ângulo de saída [23], tal tendência não foi confirmada através dos ensaios realizados para os modos

torneamento e fresamento. Isto poderia ser explicado pelo fato de que para ângulos de saída (γ_n) menores, o índice de recalque aumenta, ou seja, existe uma maior deformação plástica na região de cisalhamento, com conseqüente aumento na temperatura. Em ligas com chumbo, o que é o caso da liga 2011-T3, é possível que, para maiores temperaturas, atinja-se o ponto de fusão do chumbo, ocorrendo uma melhor lubrificação entre cavaco e ferramenta e cavacos de forma mais favorável, ocasionando assim uma conseqüente melhoria na qualidade superficial.

A figura 6.7 a. apresenta os resultados obtidos no modo torneamento, onde pôde-se perceber a tendência contrária à esperada, obtendo-se melhoria da qualidade superficial com a diminuição do ângulo de saída γ_n . A figura 6.7 b., com os dados obtidos no modo fresamento, não apresenta uma variação significativa da rugosidade em função de γ_n .



a. Modo torneamento.



b. Modo fresamento.

Figura 6.7 - Influência do ângulo de saída sobre a rugosidade da semi-esfera.

6.2.3. Ângulo de Inclinação λ_s

O ângulo de inclinação λ_s possibilita o direcionamento da saída do cavaco. Quando este tiver valor positivo, o cavaco será escoado no sentido de afastar-se da peça.

Os resultados obtidos, tanto no modo torneamento como no modo fresamento, não possibilitaram que se tirasse conclusões definitivas, mas nos dois casos observou-se uma melhoria na qualidade superficial para um ângulo de inclinação $\lambda_s = 10^\circ$ (figura 6.8).

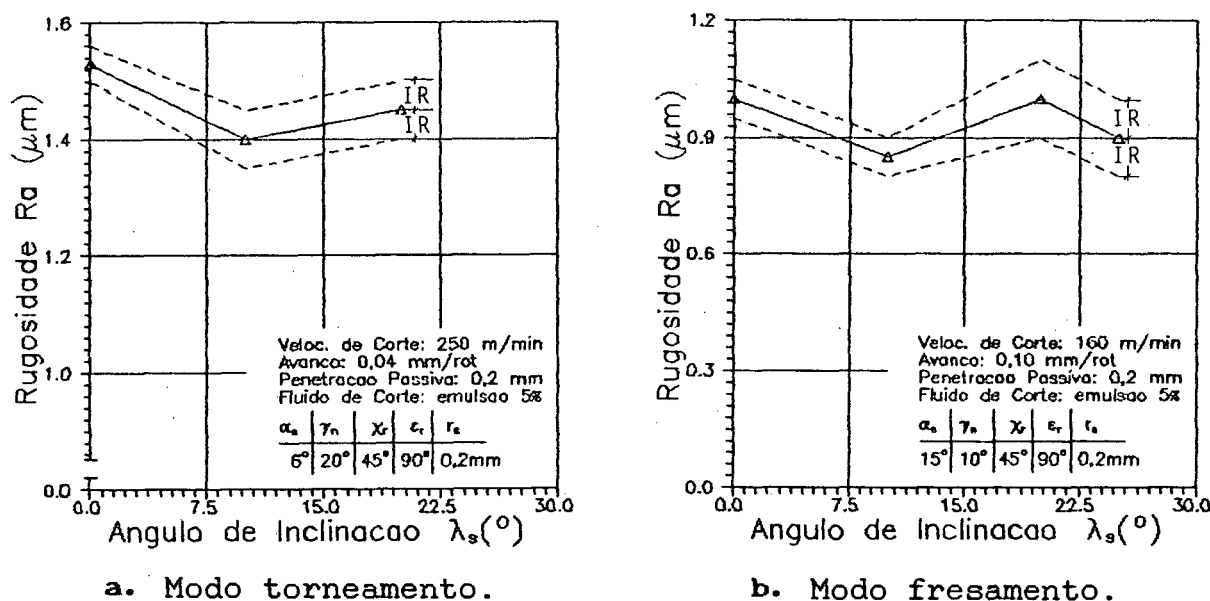
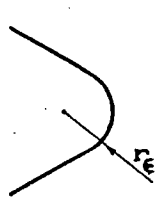
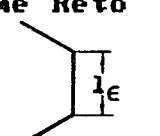
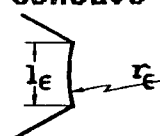


Figura 6.8 - Influência do ângulo de inclinação sobre a rugosidade da semi-esfera.

6.2.4. Otimização da geometria da ferramenta

A otimização da geometria da ferramenta foi feita para o modo torneamento, já que com este modo conseguiu-se obter o menor erro de esfericidade, e com boa repetibilidade de resultados.

Inicialmente variou-se o raio de gume da ferramenta. A equação 3.1. mostra que a rugosidade aumenta com a diminuição do raio de gume, e vice-versa. Esta tendência é visível nos ensaios realizados (figura 6.9). Foram usados raios de gume de 0,2 , 1,0 e 2,0 mm, gumes retos de 1,0 e 2,0 mm de comprimento e um gume de forma côncavo com raio r_{ϵ} de - 33 mm.

| Geometria do Gume da Ferramenta | | Rugosidade Ra do Corpo de Prova [μm] |
|--|---|---|
| Gume Convexo  | $r_{\epsilon} = 0,2\text{mm}$ | $1,40 \pm 0,05$ |
| | $r_{\epsilon} = 1,0\text{mm}$ | $1,05 \pm 0,05$ |
| | $r_{\epsilon} = 2,0\text{mm}$ | $1,00 \pm 0,05$ |
| Gume Reto  | $l_{\epsilon} = 1,0\text{mm}$ | $0,78 \pm 0,03$ |
| | $l_{\epsilon} = 2,0\text{mm}$ | $0,70 \pm 0,03$ |
| Gume Côncavo  | $r_{\epsilon} = 33,0\text{mm}$ $l_{\epsilon} = 2,0\text{mm}$ | $1,10 \pm 0,10$ |

$v_c = 50 \text{ m/min}$
 $f = 0,04 \text{ mm/rot}$
 $a_p = 0,2 \text{ mm}$
 A seco

Figura 6.9 - Otimização do gume da ferramenta para a obtenção de uma menor rugosidade no modo torneamento.

Utilizando a ferramenta com gume reto de 1,0 mm de comprimento, melhorou-se a qualidade superficial, mas o seu posicionamento em relação à peça foi muito difícil. O posicionamento incorreto da ferramenta levou à obtenção de rugosidades maiores do que no caso de ferramentas raiadas, confirmando os resultados obtidos e análises feitas por Nishiguchi [22]. O posicionamento da ferramenta em relação à peça é facilitado quando se utiliza um gume reto de 2 mm de

comprimento, além de se obter menores rugosidades. Com o ângulo de inclinação (λ_s) igual a zero, e variando-se o ângulo de saída (γ_n), determinou-se a melhor geometria de ferramenta ($\alpha_n = 8^\circ$, $\gamma_n = 10^\circ$, $\chi_r = 60^\circ$ e $\epsilon_r = 60^\circ$).

A ferramenta com gume em forma côncavo não apresentou resultados satisfatórios, sendo extremamente difícil o seu posicionamento em relação à peça, além de gerar ranhuras aleatórias sobre a superfície desta.

6.2.5. Velocidade de Corte

No modo torneamento, os ensaios mostram que a variação da velocidade de corte ao longo da superfície esférica não tem influência significativa sobre a rugosidade, contrariando o que era esperado. Esta variação da velocidade de corte está em função da posição radial da ferramenta sobre o eixo Z da peça, ver figura 3.1 (figura 6.10)

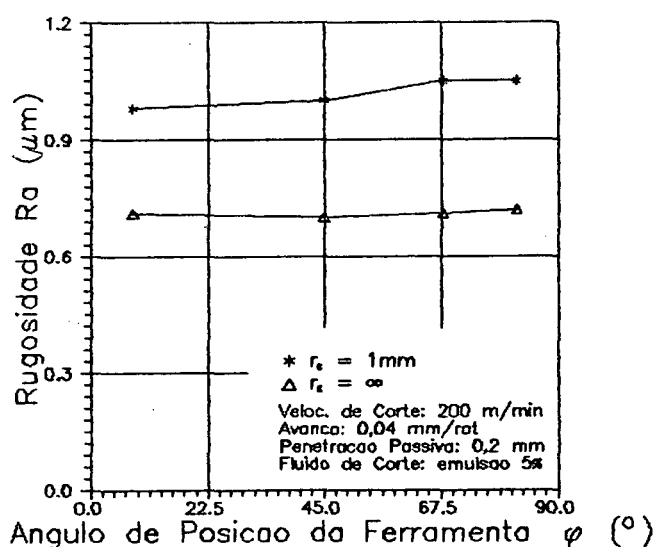


Figura 6.10 - Variação da rugosidade ao longo da superfície da semi-esfera para o modo torneamento.

Por outro lado, percebe-se que o uso de velocidades entre 250 e 400 m/min influencia a rugosidade, aumentando-a devido as maiores vibração na estrutura da máquina-ferramenta (figura 6.11).

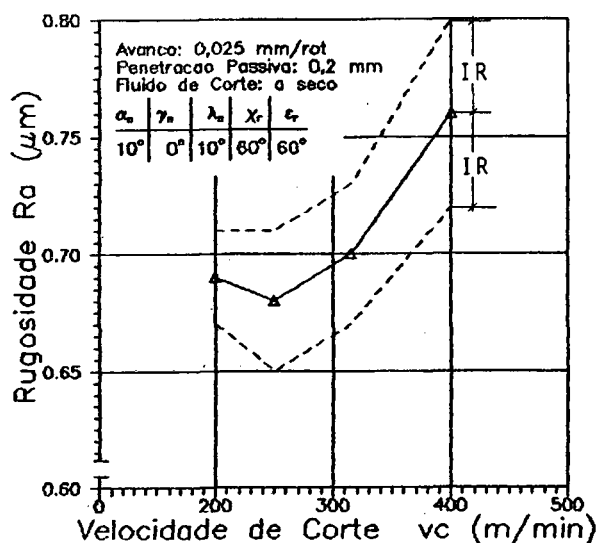


Figura 6.11 - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade.

6.2.6. Avanço

No modo fresamento, a rugosidade ao longo da semi-esfera varia em função do avanço. Isto é mais nítido quando se trabalha com avanços maiores. À medida que o avanço diminui, esta diferença vai se estreitando (figura 6.12).

Os ensaios realizados no modo torneamento, utilizando-se uma ferramenta com gume reto de 2 mm de comprimento, mostram a melhoria da qualidade superficial à medida que o avanço diminui, até um valor de 0,04 mm/rot. A partir deste valor, até 0,01 mm/rot, a rugosidade Ra manteve-se constante, isto devido, principalmente, ao grau de afiação conseguido na ferramenta (figura 6.13).

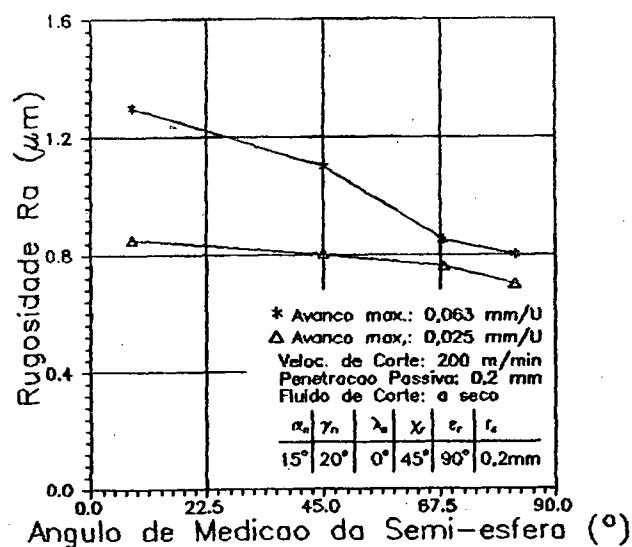


Figura 6.12 - Variação da rugosidade ao longo da superfície da semi-esfera para o modo fresamento.

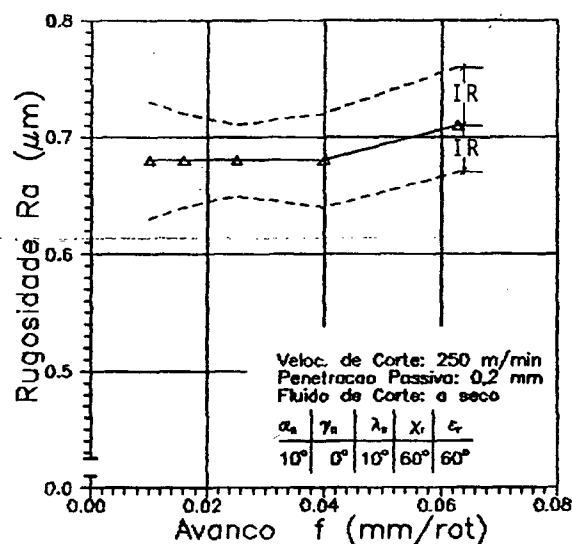


Figura 6.13 - Influência do avanço sobre a rugosidade.

6.2.7. Penetração passiva

No modo torneamento percebeu-se que, nos ensaios realizados, a penetração passiva na faixa de 0,01 a 0,20 mm não apresentou uma influência significativa sobre a rugosidade das semi-esferas.

6.2.8. Fluido de corte

A utilização de fluido de corte nos ensaios (emulsões de óleo em concentrações de 3% e 5%) não resultou em benefícios à rugosidade da peça, em comparação com os resultados na usinagem a seco. Em alguns casos chegou-se mesmo a perceber um aumento da rugosidade, quando o jato de fluido não acompanhava o movimento da ferramenta.

Observou-se que o álcool etílico traz bons resultados, quanto ao seu desempenho sobre a rugosidade, mas não foram realizados ensaios suficientes para que pudessem ser tiradas conclusões definitivas.

6.3. Ensaio realizado com ferramenta de diamante

Com a ferramenta de diamante, e usando as condições descritas no item 5.2.11., conseguiu-se uma rugosidade $R_a = 0,90 \pm 0,03 \mu\text{m}$. Em comparação, utilizando uma ferramenta de aço-rápido com geometria e condições de usinagem similares obteve-se uma rugosidade $R_a = 1,10 \pm 0,1 \mu\text{m}$; isto serviu para confirmar informações da literatura, de que com o uso de ferramentas de diamante são conseguidas menores rugosidades. Observa-se, no entanto, que utilizando ferramentas de aço-rápido com geometria otimizada conseguiram-se rugosidades menores.

6.4. Ensaaios realizados com o centro de usinagem

6.4.1. Modo torneamento

No ensaio realizado no centro de usinagem, utilizando as condições de usinagem e geometria de ferramenta descritas no item 5.3.1., conseguiu-se um erro de esfericidade de $10 \pm 1 \mu\text{m}$, e uma rugosidade $R_a = 0,85 \pm 0,05 \mu\text{m}$. Estes resultados não são melhores que os obtidos na fresadora universal Ruhla FUW-250/IV. Estes resultados são consequência da existência de erros significativos no posicionamento da mesa e na circularidade da árvore desse centro de usinagem (vide Anexo 2).

6.4.2. Método de interpolação

No ensaio realizado utilizando o método de interpolação, obteve-se um erro de esfericidade de $18 \pm 1 \mu\text{m}$, o que demonstra que este método resulta em maiores erros de esfericidade do que no modo torneamento. As fontes de erro neste método encontram-se na mesa e na árvore do centro de usinagem, e na forma do gume da ferramenta.

C A P Í T U L O 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

7.1. Conclusões

Na usinagem de superfícies esféricas, o posicionamento do eixo de giro da ferramenta sobre a origem do sistema de coordenadas da peça é de fundamental importância. Um erro de posicionamento, principalmente sobre o eixo X, no modo torneamento, e sobre o eixo Y, no modo fresamento, terá influência negativa sobre as características da superfície esférica.

Uma comparação entre os modos torneamento e fresamento para a geração de superfícies esféricas, mostrou que com o modo torneamento obtém-se menores erros de esfericidade, e com boa repetibilidade de resultados.

As condições de usinagem, como velocidade de corte e avanço, influenciam a rugosidade e a forma da superfície esférica. Velocidades de corte elevadas produzem maiores vibrações nas máquinas-ferramenta convencionais, e causam maiores rugosidades e erros de esfericidade. Avanços pequenos para ferramentas com raios de qume grandes geram maiores temperaturas na região de contato peça/ferramenta, que afetam o processo de corte e, conseqüentemente, a rugosidade e a forma da superfície esférica.

A penetração passiva (entre 0,01 e 0,20 mm) e o fato da presença de fluido de corte (emulsões de óleo em concentrações de

3% e 5%) não apresentaram influência significativa sobre a rugosidade e a forma da superfície esférica. No caso de existir a necessidade de refrigerar a região de corte, recomenda-se o uso de álcool etílico.

As condições de corte que mostraram os melhores resultados foram: $v_c = 250$ m/min, $f = 0,04$ mm/rot, $a_p = 0,2$ mm, a seco. A geometria da ferramenta de aço-rápido que mostrou os melhores resultados tem as seguintes características: ângulo de incidência (α_n) de 8° , ângulo de saída (γ_n) de 10° , ângulo de inclinação (λ_s) de 0° , ângulo de direção (χ_r) de 60° , ângulo de quina (ϵ_r) de 60° e gume reto de 2 mm de comprimento.

Considerando: que com ferramentas de geometria otimizada de aço-rápido obtiveram-se melhores resultados do que com a ferramenta de diamante; que máquinas-ferramenta convencionais são bastante limitadas quanto às suas velocidade de corte e rigidez; e que o custo da ferramenta de diamante é muito elevado em relação ao benefício que se poderia obter, conclui-se que o uso de ferramentas de diamante em máquinas-ferramenta convencionais na geração de superfícies esféricas não é justificado.

Máquinas-ferramenta CNC podem trazer as mesmas dificuldades que as máquinas-ferramenta convencionais na geração de superfícies esféricas. Justifica-se o emprego de uma máquina-ferramenta CNC quando o erro de circularidade na árvore e os erros de posicionamento relativo entre a peça e a ferramenta são menores.

Utilizando o método de interpolação, no centro de usinagem, obtiveram-se maiores erros de esfericidade do que utilizando o modo torneamento. Isto pode ser explicado pelo fato de as fontes de erro serem maiores para o primeiro caso.

7.2. Sugestões para próximos trabalhos

Concepção e construção de um dispositivo para geração de esferas com possibilidade de correção micrométrica de erros de esfericidade que poderá ser empregado na geração de superfícies de alta qualidade de reflexão (espelhos).

Aprimoramento da qualidade macro e microgeométrica das calotas esféricas por lapidação e polimento.

Aprimoramento da técnica de medição de esferas para os erros geométricos decorrentes do processo de fabricação.

Desenvolvimento de instrumentos eletrônicos de medição específicos para medir a esfericidade de calotas esféricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ ROBERT, P. Traditional optical fabrication methods. IN: APPLIED optics and optical engineering. [S.l.]: Academic Press. Inc. v.10, 1987. p. 225 - 249.
- /2/ ETTORE FILHO, B. Seleção de materiais metálicos. 2. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 1988. p. 13 - 33.
- /3/ OHUCHI, Ken - Ichiro. Ultra-precision machining from the viewpoint of work materials. IMEC. p. 76 - 87, [19--].
- /4/ SEYFRIED, P. et al. Progress in precision engineering. IN: PROCEEDINGS OF THE 6 INTERNATIONAL PRECISION ENGINEERING SEMINAR, 6, 1991, Germany. Anais... Germany: Springer, 1991, p. 85 - 254.
- /5/ LANGENBECK, P. Aspheric generator: an all air bearing machine. Precision engineering, v. 5, n. 3, não paginado, July, 1983.
- /6/ THOMAS, A. D. , THOMAS, G. B. Technology of precision fabrication. [S.n.: s.l.], [19--]. Cópia xerox do documento das paginas 152 - 160.
- /7/ SUMIYA, Mitsuo. et al. Machining of mirror - like surface. Bult, Japan Soc. of Prec. Eng. v. 13, n. 1, p. 16, - 22. Mar. 1982.
- /8/ SAKAI, Yasuo. Ultra - precision machine tool. Bult, Japan Soc. of Prec. Eng. v. 18, n. 2, p. 746 - 752. June, 1984.
- /9/ KONIG, W. Fertigungsverfahren: schleifen, honen, läppen. 3 aufl. Düsseldorf: VDI, 1989. v.2, 316 p.
- /10/ FAG. Catálogo de esferas. São Paulo: FAG. 1984. 38 p.

- /11/ SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEER Tool and manufacturing engineers handbook - machining. 4. ed. Dearborn: One S.M.E. Drive, 1983. v. 1. paginação irregular.
- /12/ GREGORY, M. S. The precision machining of optics. IN: APPLIED optics and optical engineering. [S. l.]: Academic Press. Inc. v. 10, 1987. p. 251 - 386.
- /13/ Pneumo Precision, Inc. - MSG - 325. Diamond tool lathe for micro machining of contours. Keene: Pneumo precision, Inc., [19--]. 14 p.
- /14/ KRAUSKOPF, B. Diamond turning: reflecting demands for precision. Me especial Focus. [19--].
- /15/ Diamond machining - a primer. Lasers & Applications. p. 63 - 70, Mar. 1984.
- /16/ GORGON, J. W. Diamonds, air bearings, and optics. SPIE, v. 159, p. 18 - 20. 1978.
- /17/ KUGLER, L. Ultrafräsmaschine 300/500 B. Heiligenberger: Feinmechanik + Optik Kugler, [19--]. paginação irregular.
- /18/ CASTEVENS, J. M. Development of a one-microinch (250 @) spindle for diamond turning of optics. SPIE, v. 159, p. 10 - 17, 1978.
- /19/ KOBAYASHI, A. et al. High precision cutting with a new ultra precision spindle. Annals of the CIRP, v. 27 p. 283 - 287. 1978.
- /20/ LANGENBECK, P. Precision diamond machining of metal optics - A review. Laser und optoelektronik. heft 4. June, 1984.
- /21/ WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B. Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil. 1990. 71 p.

- /22/ NISHIGUCHI, T. et al. Advanced grinding technology for precision diamond cutting tools - Improving accuracy of tool geometry. Japan: Hitachi, [19--]. p. 183 - 203.
- /23/ KÖNIG, W. Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren. 3 aufl. Düsseldorf: VDI, 1990. v. 1, 409 p.
- /24/ ERICKSON, N. R. Off-axis mirrors made using a conventional milling machine. Applied Optics, v. 18, n. 7, p. 956 - 957, Apr. 1979.
- /25/ SHW. Universal - fräsmaschine type UF1/K. Berlin: SHW, [19--]. paginação irregular.
- /26/ WMW - RUHLA. Universal-werkzeugfräsmaschine FUW 250/IV. Berlin: WMW - Ruhla, [19--]. paginação irregular.
- /27/ WMW. Einständer-koordinaten-bohrmaschine BKoE 450 x 800. Berlin: WMW, [19--]. 97 p.
- /28/ THYSSEN HOLLER HILLE GmbH. Numerisch gesteuertes Bearbeitungszentrum Witten: Hüller Hille GmbH., [19--], paginação irregular.
- /29/ KART. Extra high precision diamond lathe EKM - 200. Budapest: KART, [19--]. paginação irregular.
- /30/ WEINGAERTNER, W. L. et al. 1º Relatório de ensaios - Análise da usinabilidade de ligas de alumínio de corte livre. Florianópolis: ALCAN, 1991. 90 p.
- /31/ STEMMER, C. E. Ferramentas de corte. 2. ed. Florianópolis : Editora da UFSC, 1989. 288 p.
- /32/ FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751 p.
- /33/ LINDBERG, A. R. Processes and materials of manufacturing. Boston: Allyn and Bacon, Inc., 1964. 95 p.

- /34/ VEB MIKROMAT DRESDEN. *Optische Profilschleifmaschine Typ SWPO 50*. Berlin: VEB Mikromat Dresden, [19--]. paginação irregular.
- /35/ CARL ZEISS. *Gear measuring center ZMC 550*. West Germany: Carl Zeiss, [19--]. 69 p.
- /36/ FEINPRUEF Gmb H. *Rugosímetro perthometer M3A*. Göttingen: Feinpruef, [19--]. 16 p.
- /37/ SCHNEIDER, C. A., LUCKE, H. A. *Apostila de técnicas de pesquisa experimental*. Florianópolis: LABMETRO, 1990: 100 p.
- /38/ SCHROETER, R. B. *Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável*. Florianópolis, UFSC, 1989: 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1989.
- /39/ SIEMENS Sinumeric 7M - *Instruções de programação*. São Paulo: Siemens, [19--]. paginação irregular.

A N E X O 1

```
//PGRAPT   JOB EMC3PRGO, 'EMC3JOL.PGR', MSGLEVEL=(1,1),
//          MSGCLASS=V, CLASS=1, TIME=1
//*****
//*****
//*****          PROCESSAMENTO DE PROGRAMAS APT          *****
//*****          *****
//*****          *****
//*****          *****
//GO          EXEC PGM=DKWO
//*           (BIBLIOTECA ONDE SE ENCONTRA O PROCESSADOR APT)
//STEPLIB    DD DSN=PO.EMCLVMS.B20.SYS1.DKWLMVS, DISP=SHR
//*           (BIBLIOTECA ONDE SE ENCONTRA O MODULO DO
//*           PROCESSADOR PARA FORTRAN VS)
//ALINKLIB   DD DSN=PO.EMCLMVS.B20.SYS1.DKWLMVS, DISP=SHR
//*           (BIBLIOTECA ONDE SE ENCONTRA O ARQUIVO LIBRARY)
//LIBDPOOL   DD DSN=PO.EMCLIBD.B10.APTAC.LIBDPOOL, DISP=SHR

//*****
//*****          AREAS DE TRABALHO TEMPORARIAS          *****
//*****          *****
//FT01F001   DD SPACE=(TRK,(60,30),RLSE), UNIT=SYSDA
//FT02F001   DD DSN=P1.EMCAPT.D00.CLFILE, SPACE=(TRK,(60,15))
//           DCB=(RECFM=F, LRECL=3228, BLKSIZE=3228),
//           DISP=(OLD,KEEP), VOL=SER=UFSC01
//DPOOL      DD SPACE=(TRK,(90,30)), UNIT=SYSDA
//*****
//*****          SYSIN E SYSOUT'S          *****
//*****          *****
//FT06F001   DD SYSOUT=V, DCB=(RECFM=VBA, LRECL=133, BLKSIZE=1995)
//ERRFILE    DD SYSOUT=V
//SYSPUNCH   DD SYSOUT=V
//POSPUNCH   DD SYSOUT=V
//FT07F001   DD SYSOUT=V
//FT05F001   DD *
```

\$\$*****\$\$

PARTNO/ EXFERA USIMAQ
MACHIN/NBH65

\$\$*****\$\$

\$\$
CLPRNT/OPTION
TOLER/0,09
RESERV/PCF,5,L24,5
\$\$
\$\$ CONSTANTES
\$\$
RAIOES = 30
TOLERA = 0.1
\$\$
\$\$ PONTOS
\$\$
PCSF = P/0,0,0
PX = P/10,0,0
PY = P/0,10,0

```

PO = P/0,0,0
P1 = P/-60,-60,0
$$
$$ LINHAS
$$
LX = L/AXIS
$$
$$
$$ SUPERFICIES
$$
CLRSRF/60
SF = SPHERE/PCSF,RAIOES
$$
$$ MACRO PARA TROCA DE FERRAMENTA
$$
LUCIA = MACRO/A,B,DI,D
LOADTL/A
SELCTL/B
CUTTER/DI,D
TERMAC
$$
$$ CORPO PROGRAMA INICIAL
$$
ORIGIN/1
CALL/LUCIA,A=1,B=2,DI=20,D=0
SP/1000,CLW
FE/200
$$          USINAGEM DA ESFERA
VPL = 0
CTP = 1
TPACB = 30
RAIOFE = 10
DIST = SQRTF((RAIOFE ** 2 - (RAIOFE - TOLERA) ** 2) * 4)
ANGUL1 = ATANF(DIST/(RAIOES + RAIOFE))
    FROM/P1
    GT/-45,0,0
    GO/SF,(PL/0,0,1,VPL),ON,LX
    TL,GL/SF,ON,2,INTOF,LX
    GD/5
LOOPST
FAZ) ANGT = ANGUL1 * CTP
    ANGZ = 90 - ANGT
    DELTAZ = SIN(ANGZ) * DIST
    VPL = VPL + DELTAZ
    IF (TPACB - VPL) FIMSF,FIMSF,ACBSF
ACBSF)GO/SF,(PL/0,0,1,VPL),ON,LX
    TL,GL/SF,ON,2,INTOF,LX
    GD/5
    RETRCT
    CTP = CTP + 1
    JUMPTO/FAZ
FIMSF) CONTIN
LOOPND
FINI
/*

```


ANEXO 2

Gráfico do erro de circularidade, de um corpo de prova usinado, obtido na máquina de medir por coordenadas. A ferramenta foi montada na árvore da fresadora universal Ruhla-FUW 250/IV.

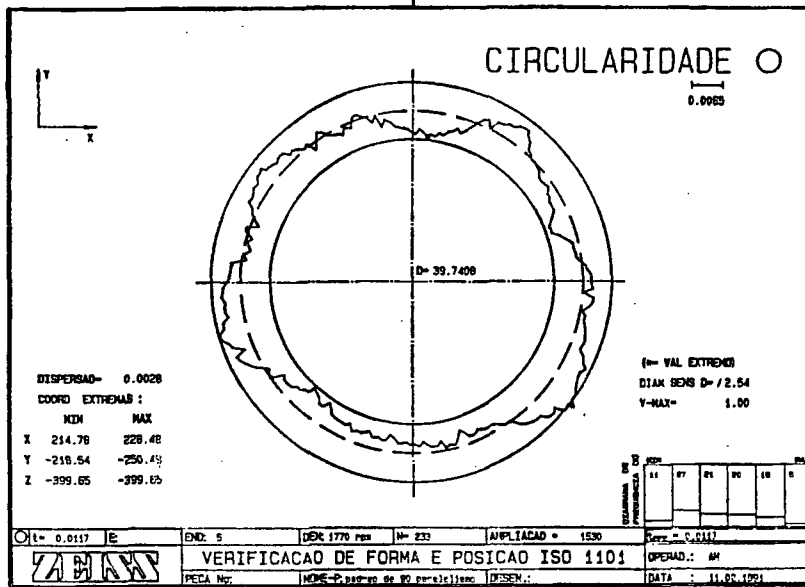


Gráfico do erro de circularidade, de um corpo de prova usinado, obtido na máquina de medir por coordenadas. A ferramenta foi montada na árvore do centro de usinagem CNC Hüller Hille nb-h 65.

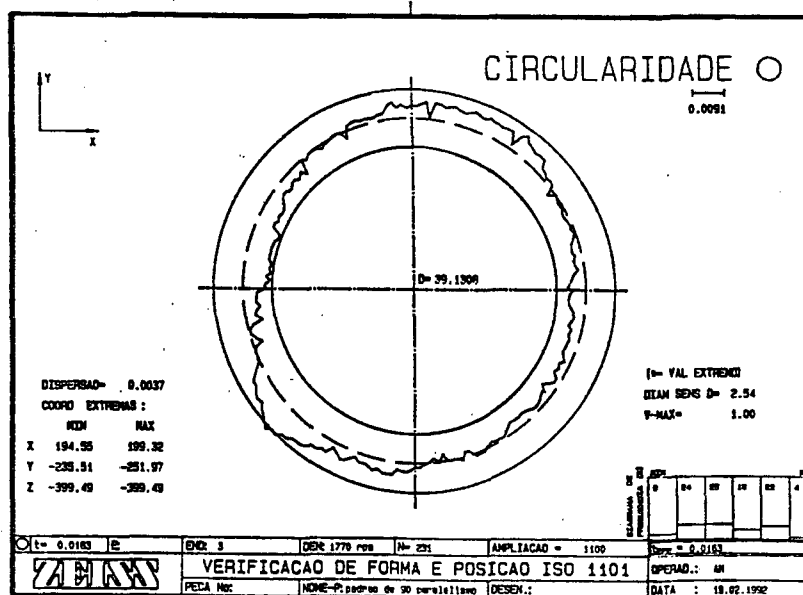
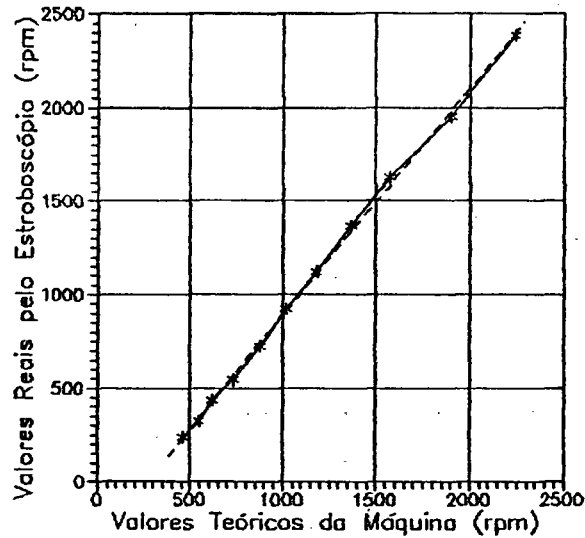
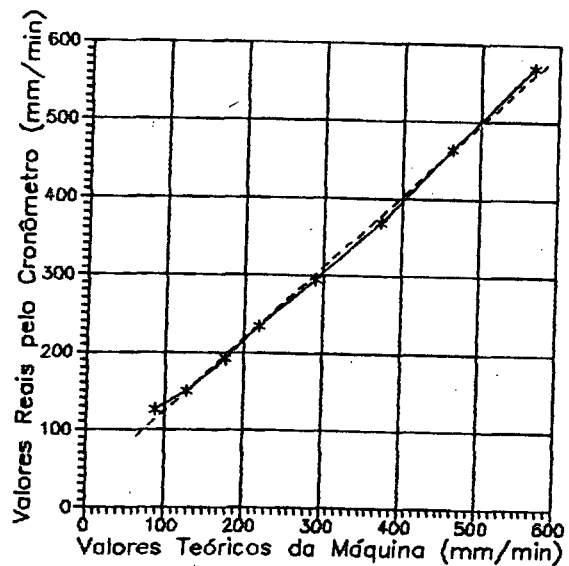
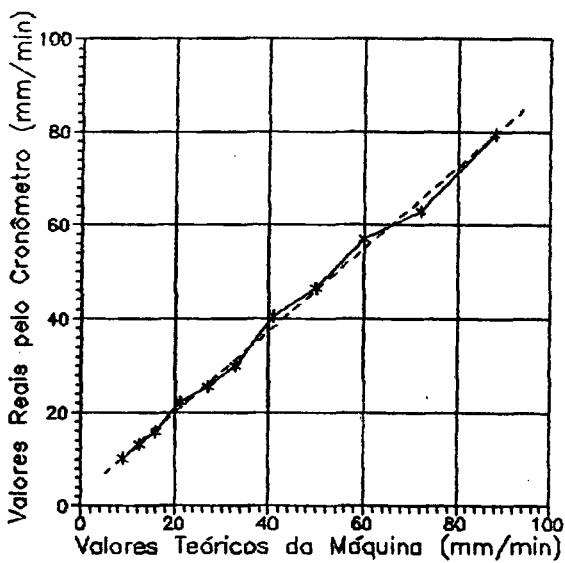


Gráfico que apresenta a curva da função transferência real no comando de acionamento das rotações da árvore na fresadora universal Ruhla- Fw 250/IV.



Gráficos que apresentam a curva da função transferência real nos comandos de acionamento de avanço da mesa na direção X da fresadora universal Ruhla-FUW 250/IV.



A N E X O 3

Principais características técnicas das máquinas-ferramentas, dispositivos e dos equipamentos para a verificação da qualidade das semi-esferas.

- Fresadora universal

Modelo: FUW 250/IV

Fabricante: WMW - Ruhla

Dados técnicos:

Faixa de rotação: 45 a 2240 rpm (variação contínua)

Cone da árvore: ISA 40

Mesa de trabalho: 250 x 800 mm

Carga admissível: 120 kg

Faixa de avanços: 6,3 a 1250 mm/min

Potência absorvida: 5,5 kW

Peso bruto (aprox.): 1520 kg

- Centro de usinagem CNC

Modelo: nb-h 65

Fabricante: Thyssen Hüller Hille

Dados técnicos:

Comando: Sinumerik 7M - Siemens

Faixa de rotação: 25 a 4000 rpm

Faixa de avanço: 1 a 9999 mm/min

Potência efetiva de acionamento: 7,6 kW

Torque máximo: 160 Nm

Capacidade de armazenamento de

ferramentas no magazine: 20 posições

Diâmetro máximo da ferramenta: 110 mm

Erro de posicionamento da árvore: $\pm 10 \mu\text{m}$

- Mesa divisora circular

Fabricante: WMW

Dados técnicos:

Diâmetro da mesa: 300 mm

Altura da mesa: 120 mm

Precisão de leitura grosseira: 1 grau

Precisão de leitura fina: 2 segundos

Precisão de ajuste: \pm 5 segundos

Peso bruto: 55 kg

Carga admissível: 30 kg

Espaço ocupado pela mesa: 550 x 400 x 120 mm

- Retificadora óptica

Modelo: SWPO 80

Fabricante: WMW

Dados técnicos:

Superfície diretamente trabalhável

com o pantógrafo: 10 x 10 mm

Superfície indiretamente trabalhável

mediante deslocamento da peça: 250 x 70 mm

Espessura máxima a ser trabalhada: 76 mm

Inclinação para retificação traseira axial: $- 10^{\circ}$ a $+ 30^{\circ}$

Inclinação para retificação

traseira lateral: $- 10^{\circ}$ a $+ 10^{\circ}$

Curso ajustável: 10 a 80 mm

Diâmetro máximo do rebolo: 160 mm

Rotação do fuso porta rebolo: 1500/3000 rpm

Faixa de ajuste do carro superior

angular: $- 45^{\circ}$ a $+ 45^{\circ}$

curso máximo longitudinal: 150 mm

Faixa de ajuste do carro inferior

angular: - 45° a + 90°

curso máximo transversal: 100 mm

Rotação do motor de retificação: 2800 rpm

Potência do motor de retificação: 0,5 kW

Potência do motor de aspiração de pó: 0,5 kW

Espaço requerido (com a mesa): 1600 x 1500 x 1700 mm

Peso bruto (aprox.): 1050 kg

- Máquina de medir por coordenadas

Modelo: ZMC 550

Fabricante: Carl Zeiss - Oberkochen

Dados técnicos:

Faixa de operação: X = 0 a 550 mm

Y = 0 a 500 mm

Z = 0 a 450 mm

Carga admissível: 600 kg

Incerteza de medição: 1D = $\pm (1,0 + L/400)$ μm

3D = $\pm (1,5 + L/250)$ μm

Temperatura em que a incerteza

de medição é garantida: 20 \pm 3° C

Resolução: 0,2 μm

Peso bruto (aprox.): 2050 kg

- Rugosímetro

Modelo: Perthometer M3A

Fabricante: Feinpruef Gmb H

Tipo de rugosidade: R_t e R_a

Indicação do valor: analógica

Resolução: 0,1 μm

Comprimentos de medição: 1,5 - 4,8 - 15 mm

Comprimentos de "cut - off": 0,25 - 0,8 - 2,5 mm

Faixas de medição: 0...0,25 - 0...2,5 - 0...25 μm (Ra)

0...1 - 0...10 - 0...100 μm (Rt)

A N E X O 4

GEOMETRIA DA FERRAMENTA

DADOS TECNICOS

Maquina Ferramenta _____
 Material da Ferramenta _____
 Sist. Fixacao da Ferramenta _____
 Material do Corpo de Prova _____

DADOS GERAIS

Experimento No. _____
 Corpo de Prova No. _____
 Data _____
 Inicio _____ h.
 Termina _____ h.

DADOS SOBRE O EXPERIMENTO

DESBASTE

v. _____ M/min
 _____ rpm
 f. Med. _____ MM/min

| Incre. MM | No de Passes |
|-----------|--------------|
| | |
| | |

ACABAMENTO

Vc. _____ M/min
 _____ rpm
 f. Med. _____ MM/min

| Incre. MM | No de Passes |
|-----------|--------------|
| Z | |
| X | |

GEOMETRIA DA FERRAMENTA

| Alfa α° | Gama γ° | Lambda λ° | raio q MM |
|---------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| | | | |

| Fluido de Corte | Inclin. do Cabecote |
|-----------------|---------------------|
| | 45 graus |

DADOS SOBRE POS-EXPERIMENTO

Diametro da Esfera

metro: _____ MM

gaste da Ferramenta

gaste: _____

Erro de Esfericidade

Maximo: _____

Minimo: _____

Dispersao S: _____

Nº de Pontos: _____

Rugosidade

| Ra | Rt |
|-----|----|
| 08° | |
| 45° | |
| 68° | |
| 82° | |

```

=====
DATA:                NOME-P:                PEÇA No.:
ENDIRCH | TAREFA | DEN | SB | MED EFET | MED NOM | TOL S | TOL I |
=====
3      ESFER E      X      0,0373
          Y      -0,0232
          Z      0,2302
          D      61,2936

4      PTO ZERO    X      0,0373
          Y      -0,0232
          Z      0,2302

1      SISTEMA COORD COMO POS-P

2      ESFER E      X      -0,0020
          Y      -0,0052 } (1)
          Z      0,0239 }
          D      61,2516 } (2)

21P S/MIN/MAX      0,0013      (17) -0,0021      (19) 0,0018
(3)                (4)                (5)                (6)

```

- (1) Coordenadas do Centro
(2) Diâmetro
(3) Número de Pontos Apalpados
(4) Desvio Padrão (S)
(5) Apalpação com maior distância à esfera calculada,
na direção negativa
(6) Apalpação com maior distância à esfera calculada,
na direção positiva