

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Mecânica
Disciplina de Projeto de Máquinas-Ferramentas – EMC 5325

Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas

Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau

2004-1

Atenção: Este material está sendo elaborado para publicação sob forma de um livro junto a Editora da UFSC, não sendo permitida sua reprodução total ou parcial para a quais quer fins. O uso de seu conteúdo e das figuras contidas neste são permitidas somente com a autorização expressa do autor, ou com o uso das devidas referências.

SUMÁRIO

Introdução

- I.1 Histórico
- I.2 Especificação geral do problema
- I.3 Importância econômica das máquinas-ferramentas
- I.4 Considerações sobre o processo de usinagem
 - I.4.1 Ferramentas e máquinas
 - I.4.2 Processo de torneamento
 - I.4.3 Fresamento
 - I.4.4 Furação
 - I.4.5 Retificação
 - I.4.6 Outros processos
- I.5 Relação entre os processos de Fabricação Tolerâncias e Acabamento
- I.6 Nocões gerais de Teoria de Projeto
- I.7 Tendências no projeto de máquinas-ferramentas

1 Estruturas de Máquinas-Ferramentas

- 1.1 Arranjos de máquinas-ferramentas
- 1.2 Considerações Gerais
 - 1.2.1 Considerações estáticas
 - 1.2.2 Considerações dinâmicas
 - 1.2.3 Formas de análise da rigidez em máquinas-ferramentas
- 1.2 Materiais de máquinas-ferramentas
 - 1.2.1 Ferro-fundido
 - 1.2.2 Aços
 - 1.2.3 Materiais cerâmicos
 - 1.2.4 Concreto
 - 1.2.5 Granito
 - 1.2.6 Granitos sintéticos e concretos poliméricos
 - 1.2.7 Outros Materiais
 - 1.2.8 Fabricação de Estruturas de Máquinas-Ferramentas
 - 1.2.9 Seleção de Materiais para Estrutura de Máquinas-Ferramentas

2 Árvores de máquinas-ferramentas

- 2.1 Especificações para Árvores de Máquina-Ferramentas
- 2.2 Classificação das Árvores de Máquinas-Ferramentas
- 2.3 Principais componentes para o projeto de árvores de máquinas-ferramentas
- 2.4 Rigidez
- 2.5 Configuração dos Mancais de Elementos Rolantes
 - 2.5.1 Determinação da distância ótima entre os rolamentos
- 2.6 Considerações sobre Árvores Dotadas de Mancais a Filme Fluido
- 2.7 Seleção do tipo de árvore

3 Mancais

- 3.1 Mancais de Deslizamento
- 3.2 Mancais de Elementos Rolantes
 - 3.2.1 Seleção de Mancais de Rolamentos
- 3.3 Mancais Lubrificadas a Filme Fluido
 - 3.3.1 Mancais Fluidoestáticos
 - 3.3.2 Mancais Fluido Dinâmicos
- 3.4 Mancais Magnéticos
- 3.5 Seleção do mancal mais adequado

4 Guias

- 4.1 CLASSIFICAÇÃO DAS GUIAS
 - 4.1.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À FORMA
 - 4.1.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DESLIZAMENTO
 - 4.1.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AOS GRAUS DE LIBERDADE
 - 4.1.4 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À FORMA DE RESTRIÇÃO
- 4.2 Guias de deslizamento
 - 4.2.1 Dimensionamento de GUIAS DE DESLIZAMENTO
- 4.3 Guias de elementos rolantes
 - 4.3.1 Dimensionamento de GUIAS DE elementos rolantes
- 4.4 Guias a filme fluido
 - 4.4.1 Dimensionamento de GUIAS a filme fluido
- 4.5 Guias especiais
- 4.6 Critérios de Seleção

5 Acionamentos

- 5.1 ACIONAMENTOS ROTATIVOS
 - 5.1.1 Motores Assíncronos
 - 5.1.1 Servomotores de Corrente Contínua - CC
 - 5.1.2 Servomotores de Corrente Alternada - CA
 - 5.1.3 Motores de Passo
- 5.2 ACIONAMENTOS LINEARES
 - 5.2.1 Atuadores Hidráulicos/Pneumáticos
 - 5.2.2 Atuadores PIEZELÉTRICOS
 - 5.2.3 Motores Lineares
 - 5.2.4 Outras Formas de Acionamentos Lineares
- 5.3 Seleção e Conclusões

6 Conversores e Transmissores de Movimento

- 6.1 Elementos Transmissores de Movimento
- 6.2 Elementos Conversores de Movimento
- 6.2 Elementos para Acoplamento do Movimento

7 Sistemas de Controle

- 7.1 Considerações Gerais
- 7.2 Formas de Controle
- 7.3 Controles Numéricos

8 Sensores para emprego em máquinas-ferramentas

- 8.1 Sensores Passivos
- 8.2 Sensores Ativos
 - 8.2.1 Sensores de posição
- 8.3 Sensores Diversos
- 8.4 Aspectos da integração Mecânica-Eletrônica

9 Monitoramento do Processo de Usinagem

10 Sistemas de fixação de ferramentas e peças

- 10.1 Sistema de Fixação de Ferramenta
- 10.2 Sistema de Fixação de Peças

11 Noções Gerais de Qualificação e Aceitação de Máquinas-Ferramentas

Bibliografia Recomendada e Referências

Apêndice Simbologia

a	[°]	ângulo de rotação, ou rolamento em torno do eixo X
a _p	[mm]	profundidade de corte
b	[°]	ângulo de rotação, ou guinagem em torno do eixo Y
B	[mm]	largura de corte
d	[mm]	diâmetro
c _r	[μm]	folga radial
c	[°]	ângulo de rotação, ou arfagem em torno do eixo Z
D _r	[mm]	diâmetro do restritor de fluxo
D	[mm]	diâmetro
D _m	[mm]	diâmetro medido
D _k	[mm]	diâmetro médio do cristal
D _T	[mm]	diâmetro da ferramenta
D _w	[mm]	diâmetro da peça
e	[mm]	excentricidade
E	[N/mm ²]	módulo de elasticidade
F	[N]	força ou carregamento estático
F _m	[N]	força de atração do motor linear
F _c	[N]	força de impulso do motor linear
F(t)	[N]	força ou carregamento dinâmico
e _d	[mm]	erro diametral
e _r	[mm]	erro radial
F _c	[N]	força de corte
F _f	[N]	força de avanço
F _p	[N]	força passiva
M _w	[N.m]	momento gerado pela força força peso
M _{fc}	[N.m]	momento gerado pela força força de corte
M _{fp}	[N.m]	momento gerado pela força força passiva
f	[mm/min.]	avanço
f _a	[mm/min.]	avanço para acabamento
f _d	[mm/min.]	avanço para desbaste
f _t	[mm/min.]	avanço total
f	[Hz]	frequência
h _{AB}	[nm]	altura
K	[N/μm]	rigidez
L	[mm]	comprimento do mancal
n	[rpm]	rotação da árvore
r	[mm]	raio
R _a	[nm]	rugosidade média
r _d	[mm]	raio ideal da ferramenta
r	[mm]	raio de quina
RF	[1/mm]	frequência espacial
r _m	[mm]	raio medido
R _{rms}	[mm]	rugosidade raiz média quadrática
R _{t,c}	[nm]	rugosidade cinemática
R _{t,t}	[nm]	rugosidade cinemática teórica
r _T	[nm]	raio da ferramenta
r _w	[nm]	raio da peça
P-V	[nm]	rugosidade pico-vale
Q _r	[l/s]	consumo relativo de ar
T	[°C]	temperatura

U	[μm]	deslocamentos
t	[s]	tempo
v_c	[m/min.]	velocidade de corte
v_f	[m/min.]	velocidade de avanço
W_r	[N]	capacidade de carga relativa
wv	[μm]	comprimento de onda
X	[mm]	direção coordenada
Y	[mm]	direção coordenada
Z	[mm]	direção coordenada
α	[$^\circ$]	ângulo de folga
α_1	[$^\circ$]	ângulo de folga
α_2	[$^\circ$]	ângulo de folga extra
β	[$^\circ$]	ângulo
δ	[nm]	raio da aresta de corte
δx	[μm]	erro de movimento radial em X
δy	[μm]	erro de movimento radial em Y
δz	[μm]	erro de movimento radial em Z
ε	[%]	excentricidade relativa (c/e)
$\delta\varphi_x$	[μm]	batimento em torno de X
$\delta\varphi_y$	[μm]	batimento em torno de Y
$\delta\varphi_x$	[μm]	erro de posicionamento
χ	[$^\circ$]	ângulo de posição da ferramenta
ϕ	[$^\circ$]	ângulo
ϕ_τ	[$^\circ$]	ângulo de ferramenta
ϕ_w	[$^\circ$]	ângulo da peça
γ	[$^\circ$]	ângulo de saída
λ	[μm]	comprimento de onda
μ	[----]	coeficiente de atrito
ξ	[----]	amortecimento
ρ	[kg/m^3]	densidade
τ_{Fc}	[N.m]	torque gerado pela força de corte

INTRODUÇÃO

Desde o início da revolução industrial quando surgiram as primeiras máquinas-ferramentas desenvolvidas segundo princípios modernos, até meados dos anos 70 do século XX, as máquinas-ferramentas sempre evoluíram com base soluções puramente mecânicas, no máximo incorporando elementos eletrotécnicos e eletrônicos básicos. Contudo nas últimas três décadas os avanços tecnológicos permitiram uma verdadeira revolução no projeto de máquinas-ferramentas. A introdução de novas metodologias de projeto, voltadas a sistematização do conhecimento, orientações de desenvolvimento de projetos voltadas a fabricação, montagem, ajustagem, entre outras, permitiram uma racionalização e otimização do desenvolvimento de máquinas-ferramentas. O uso de sistemas computacionais para auxílio ao projeto, tais como os CAE, CAD, CAM, CAPP, etc., que associados a ferramentas de numéricas de análise estrutural, como por exemplo o método de elementos finitos, também permitiram uma maior otimização do projeto de máquinas-ferramentas.

Outro fator importante no desenvolvimento de máquinas-ferramentas foi a introdução do comando numérico computadorizado, isso permitiu que toda uma gama de eletrônica embarcada pudesse controlar parâmetros da máquina até limites inimagináveis até então. O aumento artificial da estabilidade dinâmica da máquina, assim como o monitoramento em tempo real das deformações na estrutura e até mesmos do processo de usinagem, levaram a melhora do desempenho geral das mesmas. O monitoramento permitiu também o aumento das exatidões de posicionamento das máquinas, quer pela compensação dos erros originários pelas deformações térmicas e mecânicas sobre a estrutura, quer através do mapeamento dos erros das guias, acionamentos e sistemas de medição.

A introdução de fusos de esferas recirculantes e guias de elementos rolantes no lugar de fusos trapezoidais e guias de escorregamento, permitiram uma redução dos custos de fabricação e montagem, maior racionalização e padronização de componentes, bem como velocidades de avanços muito maiores. O mesmo foi observado como relação aos mancais rotativos, onde foi observado uma melhora substancial da qualidade dos mancais de elementos rolantes, o surgimento dos mancais de elementos cerâmicos, além do desenvolvimento de mancais magnéticos, que proporcionaram árvores mais rígidas, como maior capacidade de carga e velocidades de giro muito maiores do que as observadas até então. Essas velocidades de giro maiores não forma fator único e exclusivo dos desenvolvimento dos mancais, mas foram também fruto de novos acionamentos, com maior dinâmica, ou seja capacidade de aceleração e desaceração bem superiores aquelas encontradas nos motores assíncronos.

Esses e outros fatores de ordem não tecnológica, tal como o custo da mão de obra, combinaram-se de forma a permitir que as máquinas-ferramentas rompessem com os limites impostos pelas soluções puramente mecânicas, e entrassem em uma era de sistemas mecatrônicos integrados de alta eficiência.

Desta forma, este trabalho pretende abordar aspectos específicos do projeto de máquinas-ferramentas destinadas a usinagem convencional, não cobrindo os aspectos relacionados as máquinas para processos não convencionais, as quais tem requisitos próprios de projeto. Máquinas destinadas aos processos de usinagem não convencionais, onde em sua maior parte não há interação entre peça e ferramenta, e conseqüentemente todos os esforços decorrentes dessa, tem requisitos que diferem, em muito, das máquinas-ferramentas destinadas aos a maioria dos processo convencionais. A ênfase aqui será no tocante as máquinas destinadas ao torneamento, fresamento e retificação, e suas variações mais usuais, sendo que os conceitos básicos podem ser aplicados ao desenvolvimento de qualquer tipo de máquina-ferramenta.

I.1 Histórico

As origens das máquinas-ferramentas podem ser remontadas ao período paleolítico superior, cerca de 6.000 A.C., onde nossos ancestrais desenvolveram plainas primitivas, utilizando pedaços de madeira para prover uma estrutura e pedra lascada como ferramenta, tais como a apresentada na figura I.1.

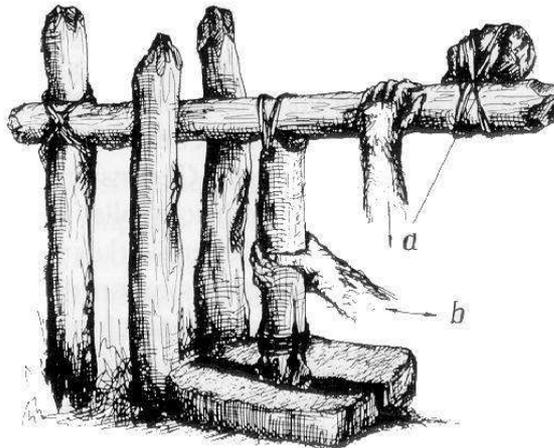


Figura I.1 – Plaina neolítica (Spur,1979)

Afrescos egípcios datando de 1500 A.C. mostram o trabalho com furadeiras com ferramentas rotativas acionadas a arco, elemento o qual permaneceu como principal acionamento de máquinas-ferramentas o século XVI.



Figura I.2 – Furadeira de arco egípcia 1500 a.C. (Spur, 1979)

A renascença (século XVI) trouxe novamente o comércio a Europa, e junto a com esse a necessidade de se produzir mais, com melhor qualidade, com menor custo e no menor tempo possível, necessidades essas que levaram a substituição dos arco pelas rodas d'água como fonte motriz nas máquinas ferramentas. Neste período as máquinas-ferramentas ainda utilizavam estruturas em madeira e suas precisões e produtividade ainda se rivalizam com a produção de hábeis artesões.

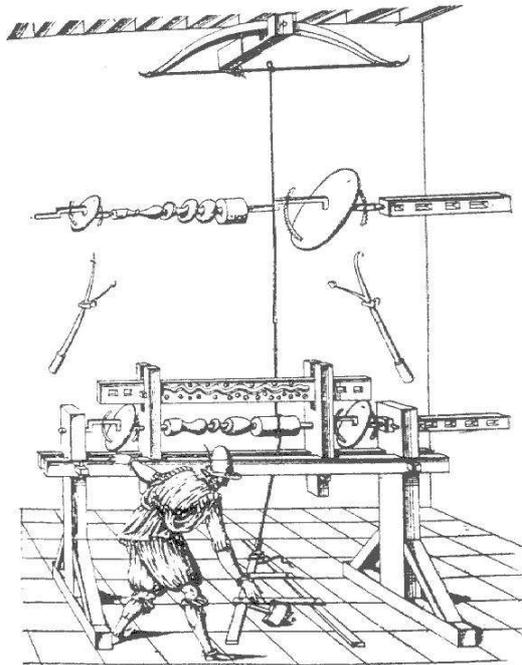


Figura I.3 – Torno acionado por arco de 1565 (Spur, 1979)

Esse período é marcado basicamente pelo torneamento ornamental, sendo o francês Jacques Benson em 1569, que é considerado um de seus grandes expoentes. O período renascentista (fins do sec. XIV e início do sec. XV) ainda apresenta a figura ímpar de Leonardo Da Vinci, em cujos esboços existem máquinas-ferramentas de características revolucionárias, idéias as quais influenciaram muitos projetistas na Revolução Industrial.

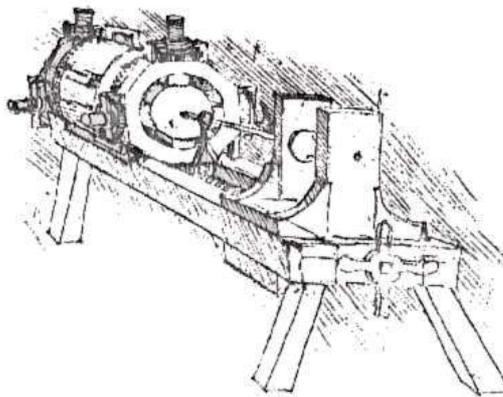


Figura I.4 – Ensaio de Da Vinci para uma furadeira com placa centrante (Spur, 1979)

Já em fins do século XVI com a introdução e disseminação da pólvora no continente Europeu, houve um desenvolvimento das técnicas de furação, associado aos avanços nas técnicas de fundição, principalmente no tocante a fabricação de armas.

Uma das primeiras obras conhecidas sobre torneamento é publicada pelo francês Charles Plumier no século XVIII, no mesmo período surgem as primeiras máquinas projetadas de acordo com princípios modernos (Moore, 1975).

O holandês Verbruggen, em 1755, aprimora a técnica de furação de canhões, a qual ficou inalterada por cerca de quatro séculos. Originalmente, a técnica de furação de canhões era baseada na guiagem da ferramenta pelo furo proveniente da fundição, o que resultava em furos desalinhados e imprecisos, a técnica desenvolvida por Verbruggen consistia em guiar a broca em ambos os extremos.

As brocas neste período já contavam com canais helicoidais, os quais foram introduzidos por rrrr em 17yy. Pequenas variações método permitiria a Wilkinson, na revolução industrial, obter tolerâncias não maiores do que um dedo em cilindros com diâmetro de 1829 mm (72 pol.) (Moore, 1975). A melhoria no processo introduzida por Wilkinson permitiu a James Watt o desenvolvimento da máquina a vapor. Lembrando que Wilkinson era o fabricante de cilindros oficial de James Watt.

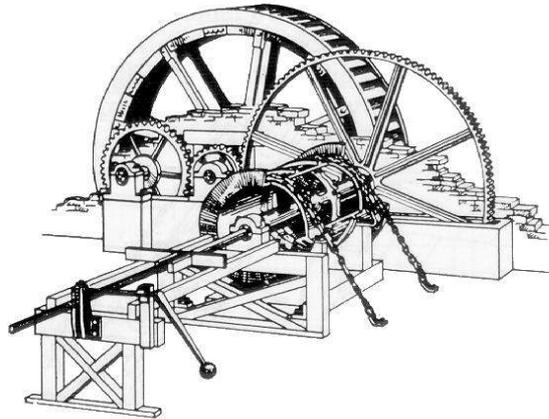


Figura I.5 – Furadeira de Wilkinson, acionada por roda d'água (Spur, 1979)

Os primeiros tornos projetados segundo princípios modernos foram realizados pelo francês Vaucanson, por volta de 1765. Tratavam-se de tornos com barramentos prismáticos paralelos em V, os quais só encontraram aceitação no século seguinte, por intermédio de Maudslay. Este reuniu sob um único projeto o uso do ferro, aço e bronze em oposição à madeira como elemento estrutural de uma máquina-ferramenta. Maudslay aliou seu bom senso de fabricante de instrumentos ao projeto de máquinas e gerou discípulos como Bramah, Clement, Whitworth, Nasmyth e outros (Morre, 1989; Thyer, 1991).

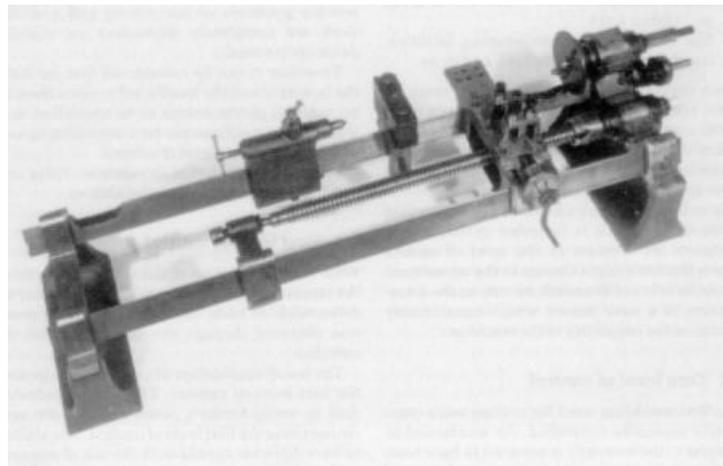


Figura I.6 – Torno de Maudslay (Moore, 1978)

Nasmyth, o inventor da forja a vapor, foi a pessoa que expressou as idéias de Maudslay em três regras básicas:

- *Tenha uma noção clara do que deseja obter e então você terá todas as condições de fazê-lo.*
- *Mantenha um controle de qualidade rígido sobre seus materiais; tenha uma visão clara de cada "libra" de material e qual sua importância, coloque em si mesmo a pergunta (existe realmente a necessidade de tal componente estar lá?). Evite complexidade e faça tudo tão simples quanto possível.*
- *Lembre-se de ter uma noção da função exercida por cada uma das peças.*

Estas máximas tornaram-se a essência para o projeto de uma máquina-ferramenta de qualidade. Porém, apesar das inúmeras teorias de projeto existentes, a tendência ao longo da formação de um projetista é que este desenvolva sua própria metodologia, sistematizando procedimentos e sintetizando o melhor de diversas técnicas de projeto (Davidson, 1972; Slocun, 1992; Weck, 1992; Paul-Beitz, 1996).

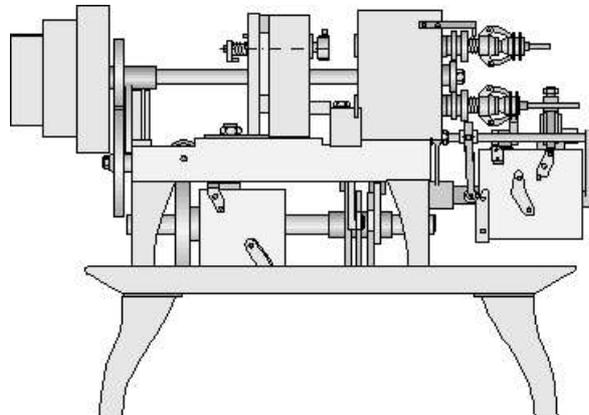


Figura I.7 – Torno multifuso de fins do século XIX

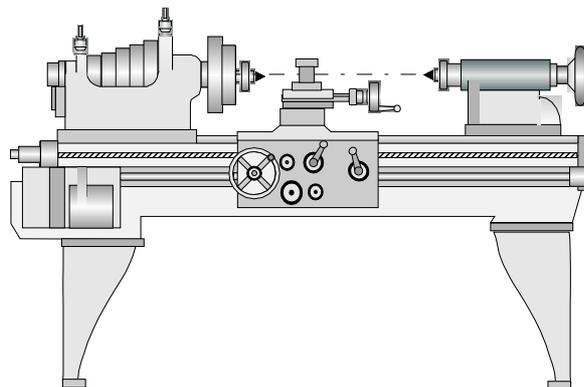


Figura I.8 – Torno universal do início do século XX, com acionamento por correias

A evolução da eletrônica na primeira metade do século XX, aliada ao desenvolvimento dos computadores, levou a criação da primeira máquina-ferramenta numericamente controlada. Em 1946 é desenvolvido o primeiro computador eletrônico digital, o ENIAC, em 1947 é inventado o primeiro transistor nos laboratórios da Bell, e em 1950 utilizando-se um computador eletrônico EDSAC, é desenvolvida a primeira máquina-ferramenta numericamente controlada (NC), nos laboratórios do *Massachusetts Institut of Techonology* - MIT.

Atualmente o projeto de máquinas-ferramentas para usinagem com ferramentas de geometria definida, aponta par três áreas de desenvolvimento distintas. A primeira voltada para obter a máxima flexibilidade de produção, sendo caracterizada pela máquinas do tipo hexapot, a segunda caracterizada pela máximação da taxa de remoção, a qual forma a base da usinagem em alta velocidade – HSM, e a terceira voltada para atender as necessidades de obtenção de alta exatidão dimensional, geométrica e elevada qualidade superficial, ou seja, para a ultraprecisão, figura I.9.



Figura I.9 – Tendências do projeto de máquinas-ferramentas

Para muitos considerada como o estado-da-arte em termos de usinagem, a tecnologia de usinagem em altíssima velocidade (HSC - High Speed Cutting) está completando 70 anos. O método desenvolvido por C. Salomon foi patenteado em 27 de abril de 1931, na Alemanha, sendo a patente concedida à companhia Krupp A.G. Apesar das primeiras pesquisas sobre usinagem de alta velocidade de corte (HSC) datarem da década de trinta do século XX, essa estava baseada basicamente no conceito de alta velocidade de corte relativa entre peça e ferramenta, poderia ser somente obtida com o elevado giro da árvore máquina. A possibilidade de se obterem velocidades de avanços elevadas transformou o conceito de usinagem em velocidade de corte – HSC – em usinagem em alta velocidade – HSM, onde as possibilidades em termos de aumento da taxas de remoção forma muito ampliados.

A tecnologia de usinagem em alta velocidade só começou a despertar interesse do universo da fabricação metal mecânica, especificamente da usinagem, ao longo da última década, do século passado. Essa tecnologia sofreu um grande impulso em função dos avanços nos acionamentos, nas guias de elementos rolantes e na eletrônica de controle, em especial na capacidade de processar digitalmente e em alta velocidade o elevado volume de dados transferidos entre o sistema de medição e os acionamentos.

Atualmente sistemas de posicionamento linear de alta velocidade podem operar com avanços entre 10 e 300 m/min., sendo que a tecnologia para máquinas-ferramentas está limitada em torno de 60 m/min.

I.2 Especificação geral do problema

Como forma de fazer sua parte no processo produtivo, uma máquina-ferramenta deve satisfazer os seguintes requisitos:

- (1) – independente da habilidade do operador, as peças a serem produzidas na máquina devem ser obtidas com tolerâncias de forma e dimensional dentro de limites permitíveis, juntamente com os requisitos de qualidade superficial.
- (2) – como forma de ser competitiva na operação, ela deve mostrar alto desempenho técnico com eficiência econômica.

Quando considerado o projeto de uma máquina-ferramenta seus elementos podem ser divididos em três grupos, os quais são:

- a) – a estrutura;
- b) – acionamentos para a ferramenta, avanços e dispositivos de movimentação;
- c) – a operação e os dispositivos de controles.

Neste curso serão feitas considerações sobre os três itens, em especial a estrutura, a qual consiste na porção fixa da máquina (placas base, mesas, colunas, cabeçotes, etc.), juntamente com suas partes móveis, as quais carregam as peças e ferramentas. O *lay-out* da estrutura é determinado pelas seguintes considerações:

I. As condições operacionais

Estas são determinadas pelos movimentos requeridos pelos diferentes processos de usinagem, avanços e dispositivos de movimentação sendo localizados tanto na peça quanto na ferramenta ou em ambos.

As condições operacionais são determinadas pelas cinemática e as características do processo de usinagem. A cinemática determina que os movimentos podem ser distribuídos tanto na peça quanto na ferramenta, ou mesmo em ambos.

2. Capacidade de forma

A capacidade de forma corresponde a área ou volume útil, coberto por uma máquina-ferramenta, independentemente da massa da peça. Isto não cobre somente a forma total da peça, que pode ser acomodada em uma máquina, mas também o espaço total que pode ser coberto pelos movimentos relativos entre peça e ferramenta, a relação volume/área de trabalho. Exemplos do primeiro são encontrados nos grandes diâmetros que são permitidos pelo batimento devido a flexão da peça do centro do torno, a forma do fundido que pode ser coberta por uma máquina de furação, ou que pode passar por um portal de uma plaina ou fresadora horizontal, plaina ou retificadora plana, ou o diâmetro máximo e o comprimento que pode ser usinado em um torno, ou retífica cilíndrica.

3. Requisitos de desempenho

Isto inclui tanto o desempenho quantitativo (como por exemplo, a taxa de remoção de material, o diâmetro máximo que pode ser furado em um sólido, tec.), quanto o desempenho qualitativo, expresso sob a forma de grau de exatidão ou qualidade superficial.

4. Eficiência técnica e econômica

Aqui o problema difere dos outros encontrados em outros ramos da engenharia. No projeto de estruturas de máquinas geralmente as condições de localizar e alinhar diferentes peças são determinadas somente pelos requisitos funcionais dos movimentos, são relacionados as forças aplicadas e as velocidades operacionais. Entretanto o projeto das estruturas de máquinas-ferramentas deve também se preocupar com fatores que podem afetar a produtividade da máquina e também aumentar os custos requeridos de instalação, controle e manutenção. Ambos, transporte e instalação de máquinas de grande porte podem ser facilitado se a estrutura for dividida em partes relativamente menores, as quais podem ser facilmente montadas ou erguidas. Esses arranjos não permitem a montagem mas também de segurança e facilidade de manuseio, além de também de alinhamento preciso e montagem segura das várias unidades quando da instalação da máquina.

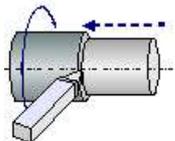
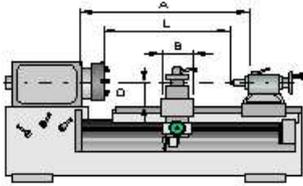
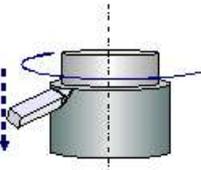
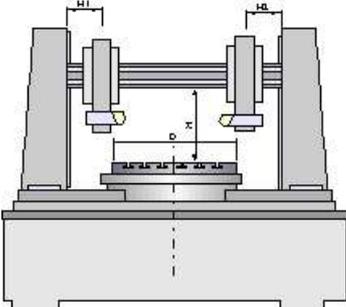
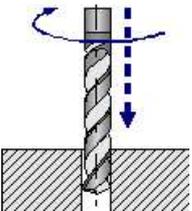
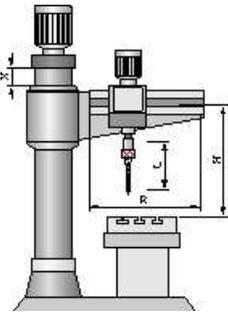
Acessibilidade e a disposição dos diversos constituintes da máquina-ferramenta devem ser tal que assegure que o *set-up* e o controle da máquina seja possível com a maior segurança e o mínimo de fadiga para o operador.

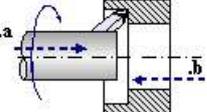
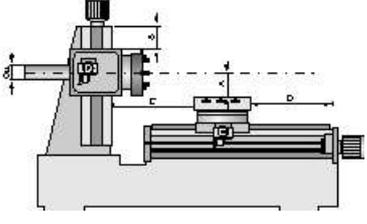
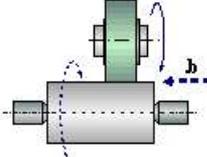
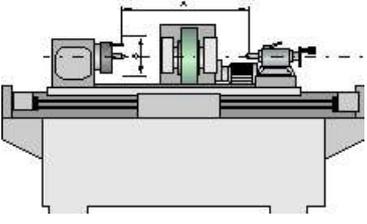
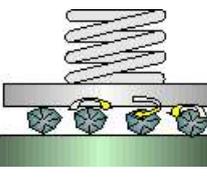
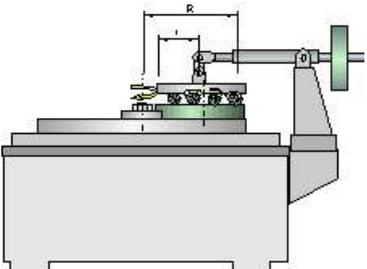
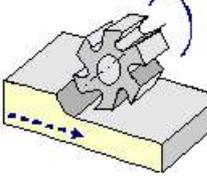
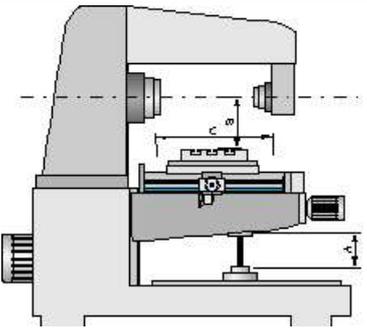
Finalmente qualquer trabalho de reparo ou manutenção deve ser possível sem a dificuldade e no mínimo tempo, e sem a necessidade de ferramentas e/ou ferramental especial. Por exemplo, peças sujeitas a desgaste excessivo e que requerem freqüente manutenção ou substituição, devem ser facilmente acessíveis e intercambiáveis. Se sua expectativa de vida pode ser calculada, é então possível implementar um programa de manutenção preditiva, e assim evitar de serem realizados os tradicionais reparos de emergência. Desta forma a eficiência da máquina é aumentada.

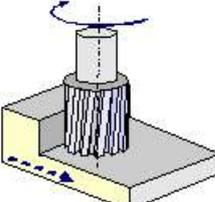
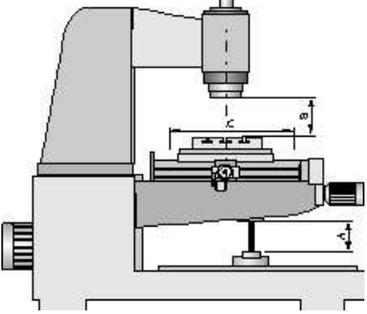
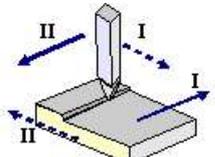
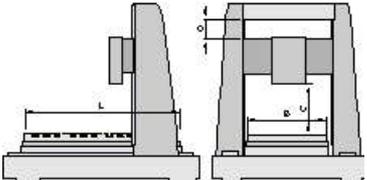
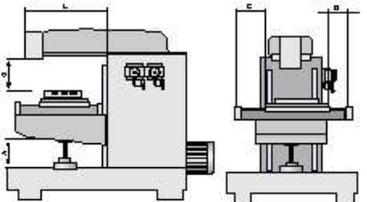
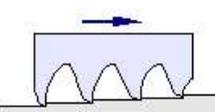
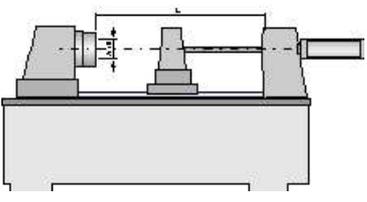
Do ponto de vista da facilidade de manutenção é importante, também o uso de peças e unidades padronizadas, especialmente se certa unidade pode ser obtida externamente a rede do fabricante da máquina. Isto pode ser o caso de não somente rolamentos mas também motores elétricos, dispositivos de controles, sistemas hidráulicos, bombas lubrificantes, filtros, etc. Aqui a previsão para desenhos padronizados e dimensões para localização de sistemas de travamento, flanges, freios, etc, aumentam a eficiência técnica e a economia.

Deve ser entendido que o desempenho de uma máquina-ferramenta não depende somente do projeto e fabricação da máquina em si, mas também do tipo de peça, dos procedimentos (estratégia) de usinagem, dos parâmetros de usinagem, forma e tipo das ferramentas, da rigidez dos dispositivos de fixação para peça e ferramenta. Também é possível variações nas condições de trabalho durante a operação, o que pode ser causado pelo próprio processo de usinagem, como pelo desgaste da ferramenta, mudanças de temperatura, variações de microestrutura e dureza da peça, perturbações do meio, etc (Koenigsberger -Tlusty, 1970).

Tabela I.1 – Relações dos processos de usinagem (Koenigsberger, 1970; Stoeterau, 2002)

TIPO DE OPERAÇÃO DE USINAGEM	MOVIMENTO DE CORTE	MOVIMENTO DE AVANÇO	TIPO DE MÁQUINA-FERRAMENTA	VOLUME DE TRABALHO
<p>TORNEAMENTO LONGITUDINAL</p> 	PEÇA	FERRAMENTA	<p>TORNO</p> 	<p>D = MÁX. COMPRIMENTO BALANÇO</p> <p>D' = MAX. DIÂMETRO</p> <p>L = MÁXIMA DISTÂNCIA ENTRE PONTAS</p> <p>L' = MÁXIMO COMPRIMENTO USINÁVEL</p>
<p>TORNEAMENTO VERTICAL</p> 	PEÇA	FERRAMENTA		
<p>FURAÇÃO</p> 	FERRAMENTA	FERRAMENTA	<p>FURADEIRA</p> 	<p>L = MÁXIMA PROFUNDIDADE DE FURAÇÃO</p> <p>R= MÁXIMA POSIÇÃO RADIAL</p> <p>(X+H) = CUSO MÁXIMO DA COLUNA</p>

TIPO DE OPERAÇÃO DE USINAGEM	MOVIMENTO DE CORTE	MOVIMENTO DE AVANÇO	TIPO DE MÁQUINA-FERRAMENTA	VOLUME DE TRABALHO
<p>MANDRILAMENTO</p> 	FERRAMENTA	FERRAMENTA ou PEÇA		<p>$(C+D)$ = MÁXIMO DESLOCAMENTO</p> <p>$(A+B)$ = ALTURA MÁXIMA</p> <p>Dia. = DIÂMETRO INTERNO MÁXIMO DA ÁRVORE</p> <p>ÁREA DE MESA</p>
<p>RETIFICAÇÃO</p> 	FERRAMENTA	PEÇA		<p>D' = MAX. DIÂMETRO</p> <p>L = MÁXIMA DISTÂNCIA ENTRE PONTAS</p> <p>L' = MÁXIMO COMPRIMENTO RETIFICÁVEL</p>
<p>LAPIDAÇÃO</p> 	FERRAMENTA	PEÇA		<p>R = RAI DO DISCO DE LAPIDAÇÃO</p> <p>R' = RAI MÁXIMO DA MESA</p>
<p>FRESAMENTO FRONTAL</p> 	FERRAMENTA	PEÇA		<p>C = MÁXIMO DESLOCAMENTO</p> <p>B = ALTURA MÁXIMA</p> <p>H. = DIÂMETRO INTERNO MÁXIMO DA ÁRVORE</p> <p>A = DESLOCAMENTO DA MESA</p> <p>ÁREA DA MESA</p>

TIPO DE OPERAÇÃO DE USINAGEM	MOVIMENTO DE CORTE	MOVIMENTO DE AVANÇO	TIPO DE MÁQUINA-FERRAMENTA	VOLUME DE TRABALHO
<p>FRESAMENTO DE TOPO</p> 	FERRAMENTA	PEÇA		<p>C = MÁXIMO DESLOCAMENTO</p> <p>B = ALTURA MÁXIMA</p> <p>H = DIÂMETRO INTERNO MÁXIMO DA ÁRVORE</p> <p>A = DESLOCAMENTO DA MESA</p> <p>ÁREA DA MESA</p>
<p>PLAINAMENTO</p> 	FERRAMENTA	PEÇA		<p>L = MÁXIMO DESLOCAMENTO</p> <p>A = MÁXIMA LARGURA</p> <p>c+B = MÁXIMA ALTURA</p>
	PEÇA	FERRAMENTA		<p>L = MÁXIMO DESLOCAMENTO</p> <p>A + B = MÁXIMA ALTURA</p> <p>c+ D = MÁXIMA LARGURA</p>
<p>BROCHAMENTO</p> 	FERRAMENTA	FERRAMENTA		<p>L = MÁXIMO DESLOCAMENTO</p> <p>A x B ÁREA PARA FIXAÇÃO DA PEÇA</p>

As relações que definem a qualidade do projeto de uma máquina-ferramenta são apresentadas na figura I.10. A qualidade de uma máquina-ferramenta está associada com os sistemas que a compõem, ao uso a que se destina, aos esforços mecânicos e térmicos a que será submetida, a forma como essa afeta o meio ambiente e as precisões e acabamento estipulados para a peça (Weck , 1992).

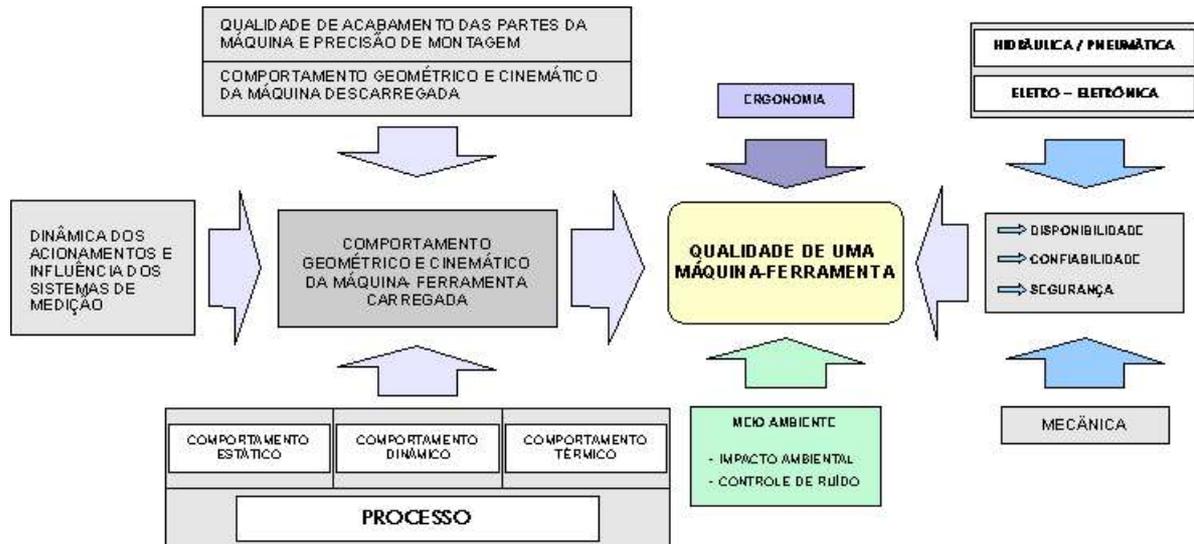


Figura I.10 - Relações que envolvem a qualidade de uma máquina-ferramenta (Weck , 1992)

Porém, quando o objetivo é usinar componentes com qualidade, ou seja exatidão dimensional, geométrica e com qualidade superficial, a máquina-ferramenta passa a ser um dos meios para tal fim. Mesmo indiretamente, como no caso de peças produzidas por processos de conformação ou injeção, a qualidade resultante é uma função dos processos de usinagem utilizados na obtenção dos moldes.

As relações que envolvem a precisão e qualidade de um componente usinado são apresentadas na figura I.11. Nesta figura pode-se observar as diversas parcelas que contribuem para o resultado desejado e quais suas origens. A partir desta figura também pode-se concluir que não basta apenas se concentrar no ponto máquina-ferramenta, pois mesmo a melhor das máquinas pode apresentar resultados de usinagem não satisfatórios, quando se negligencia a fixação ou controle ambiental (König, 1999; Hembrug,1989; Stoeterau, 1999).



Figura I.10 - Relações que envolvem a qualidade de uma peça usinada

I.3 Importância Econômica das Máquinas-Ferramentas

O mercado mundial de máquinas-ferramentas é responsável pela movimentação de boa parte da economia mundial. Apesar de suscetível as variações econômicas, o comércio mundial de máquinas-ferramentas é bastante competitivo, estando os consumidores atentos as inovações tecnológicas, e principalmente aos ganhos de produtividade que estas podem promover. A American Machinist (1996) apresenta a variação do volume de recursos no mercado internacional de máquinas-ferramentas - figura I.13. Com base nesta figura, pode-se observar que os países ricos, que detem maior tecnologia, possuem maior competitividade no setor.

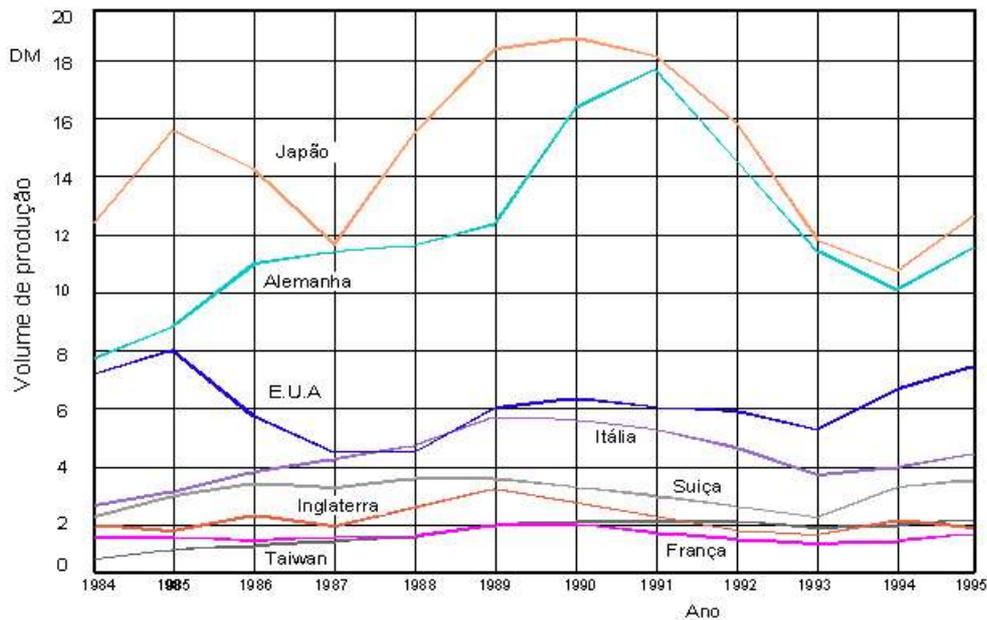


Figura I.11 – Movimentação do mercado internacional de máquinas-ferramentas

I.4 Considerações sobre o Processo de Usinagem

A definição de usinagem segundo a norma DIN 8580, aplica-se a todos os processos onde ocorre a remoção de material sob a formade cavaco. Sendo que a usinagem pode ser classificada de acordo com o processos conforme a figura I.12.

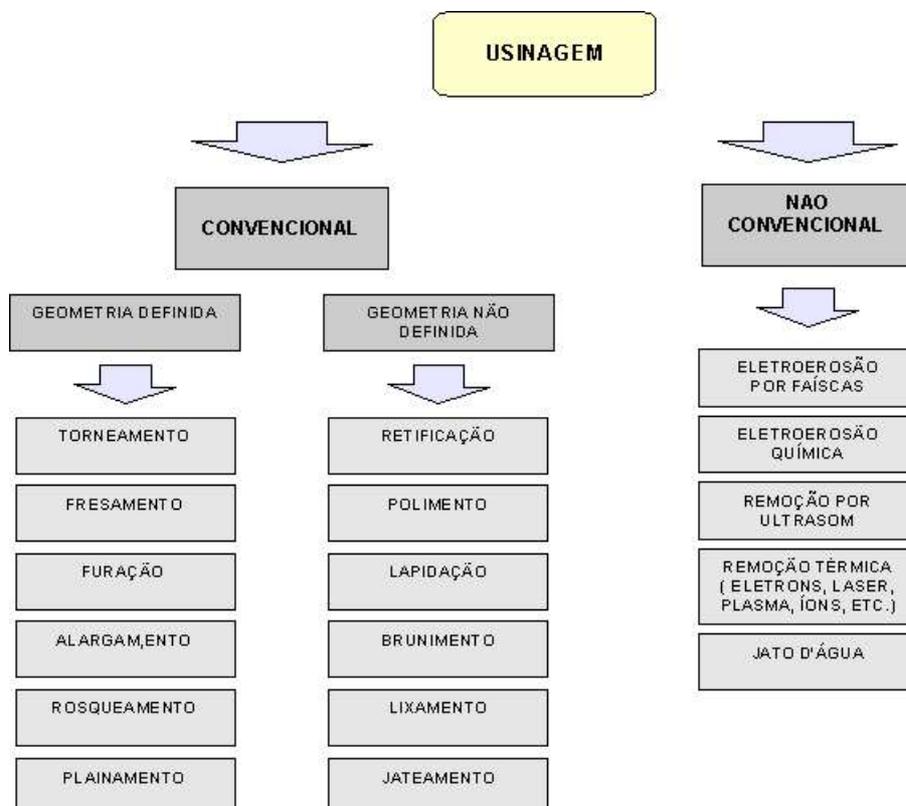


Figura I.12 – Classificação dos processos de usinagem de acordo com os processos

I.4.1 Ferramentas e máquinas

Ao longo do desenvolvimento dos processos de usinagem tem havido uma constante competição entre máquinas e ferramentas, hora o desenvolvimento de materiais novos de ferramentas levando a evolução nas máquinas, e hora as máquinas levando a evolução de novas ferramentas (materiais e geometrias). Contudo os avanços na engenharia de materiais tem levado a uma evolução mais rápida dos materiais para ferramentas, tanto no desenvolvimento de materiais novos quanto no aperfeiçoamento nos materiais já existentes. A essa evolução nos materiais soma-se a possibilidade de revestimentos com filmes finos metálicos e/ou cerâmicos, os quais permitem melhora substancial no desempenho das ferramentas. Ainda deve-se salientar a facilidade de se desenvolver novas geometrias, através de sistemas CAD e métodos numéricos (ex. FEM) para análise dos esforços térmicos, mecânicos e tribológicos, os quais permitem simular o desempenho de ferramentas antes mesmo que essas sejam testadas na prática. A figura I.12 apresenta um quadro com a evolução da velocidade de corte para diversos materiais de ferramentas ao longo do tempo.

A relação entre velocidade corte e rotação, equação I.1, mostra como o aumento na velocidade de corte proporcionado pelos novos materiais tem levado ao desenvolvimento de árvores de alta velocidade de giro.

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (I.1)$$

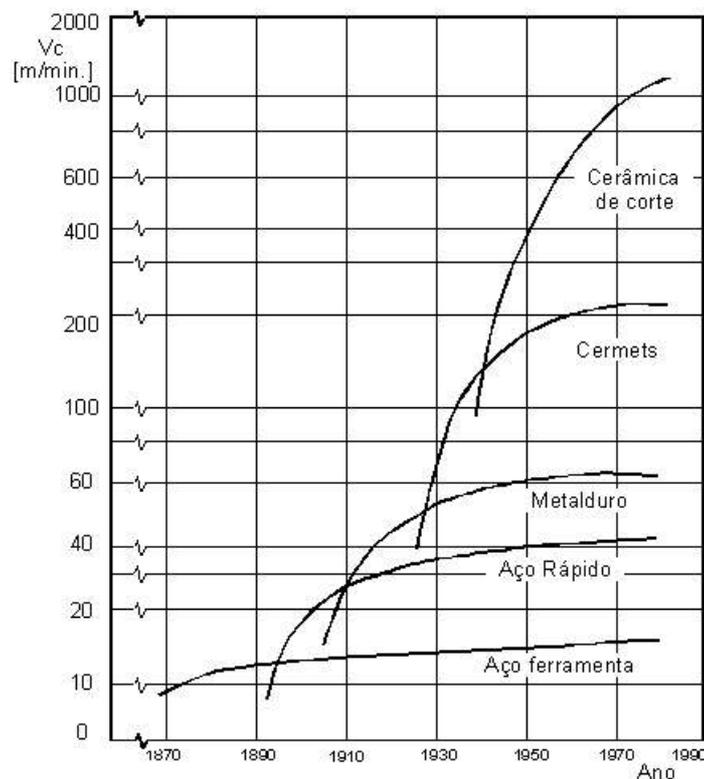


Figura I.12 - Evolução da velocidade de corte para diversos materiais de ferramentas

I.4.2 O Processo de Torneamento

O processo de torneamento aplica-se a peças de revolução, onde a peça executa o movimento rotativo e ferramenta o movimento de translação. Em todos os processos de usinagem convencionais existe o aparecimento de forças decorrentes do ação da ferramenta sobre peça e o conseqüente processo de deformação plástica do material na formação do cavaco. Sob o ponto de vista do engenheiro de processo esses esforços são utilizados como

parâmetro de seleção de máquina-ferramenta, quando relacionados com a potência necessária no acionamento da árvore, ou são também relacionados com a vida da ferramenta no monitoramento do processo. Muitas vezes as informações provenientes dos esforços de usinagem são analisadas de forma diferente quando observadas sob o ponto de vista do engenheiro de projeto, onde esses são de suma importância pois devem ser absorvidos pela estrutura, mancais, do fuso e demais elementos constituintes da mesma. A figura I.13 apresenta uma visão da cinemática do processo de torneamento e os movimentos observados.

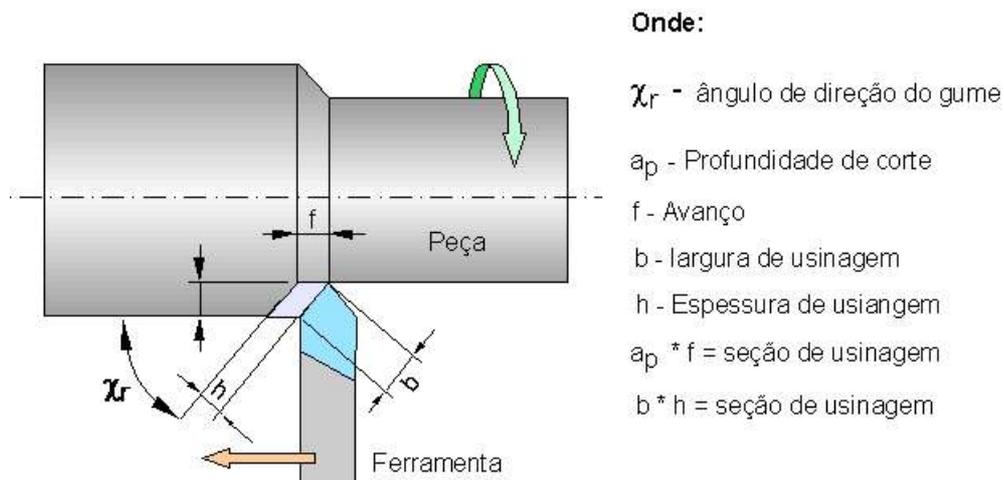


Figura I.13 – Componentes do processo no torneamento

A figura I.14 apresenta uma visão das componentes de força e velocidade no processo de torneamento

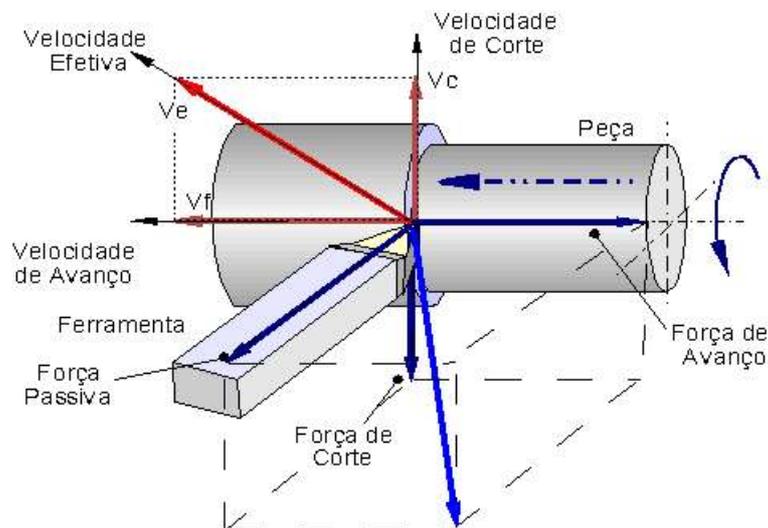


Figura I.14 – Componentes de força e velocidade no processo de torneamento

Apesar da definição clássica do torneamento apontar a peça como executando o movimento rotativo, e a ferramenta o movimento de avanço, a cinemática do processo de torneamento pode ser dividida entre peça e ferramenta, o que em alguns casos leva a processos como o de mandrilamento. Considerando as variações do avanço da ferramentas possíveis temos como dar origem aos principais tipos de torneamento, conforme a figura I.15.

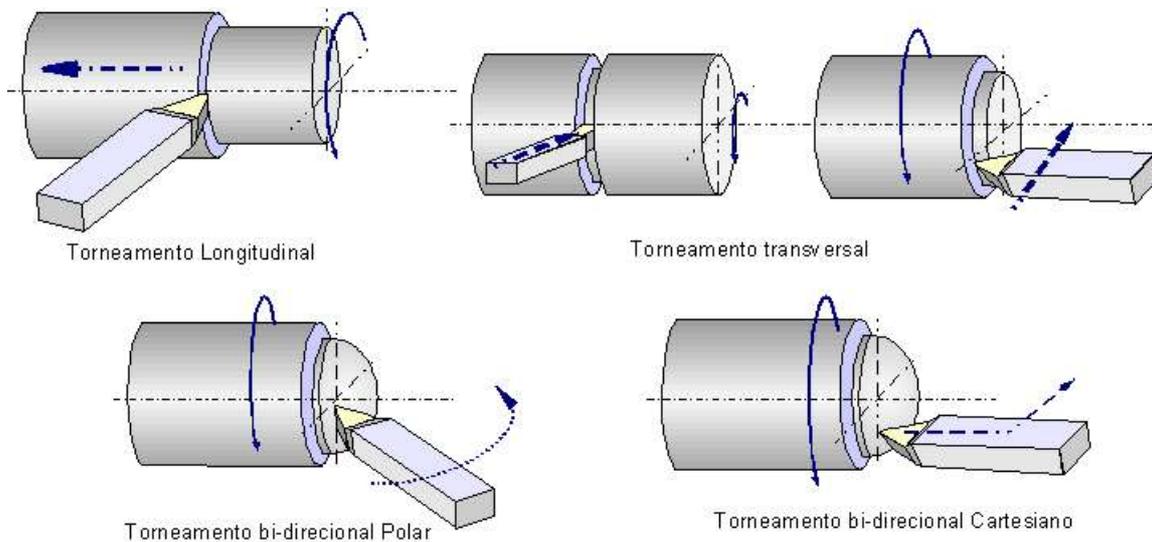


Figura I.15 – Tipos de Torneamento

A formação da superfície no processo de torneamento de forma geral é uma consequência direta da geometria da ferramenta e da cinemática do processo, contudo uma série de fatores que vão desde as características do material da peça e ferramenta e parâmetros do processo, até a estabilidade dinâmica da máquina-ferramenta, passado pelo ambiente em que o processo é realizado, levam a discrepâncias entre a textura superficial calculada a aquela resultante do processo. A figura I.16 apresenta uma visão geral do processo de formação da superfície no torneamento, para superfícies com ângulo de ponta de até 20°.

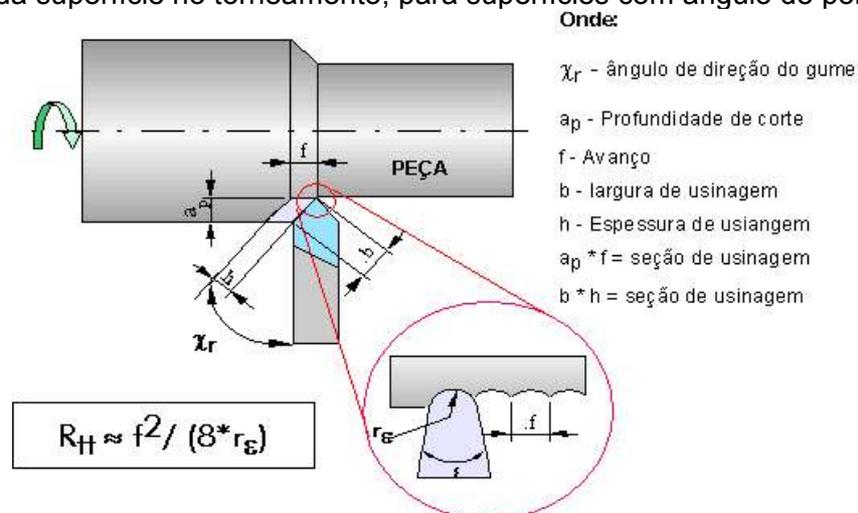


Figura I.16 – Formação da superfície no torneamento

Em função dos esforços gerados pelo processo é possível determinar a potência necessária para seleção e dimensionamento de acionamentos. Assim a potência necessária para usinar um material específico, pode ser calculada como:

$$P = U_p \left(\frac{V_c}{60} \right) C f a_p \tag{I.2}$$

onde : U_p = unidade de potência
 C = fator de correção de avanço
 v_c = velocidade de corte (m/min)
 f = avanço (mm)
 a_p =profundidade de corte (mm)

A potência necessária para remover material a uma taxa de um cm^3 / s é dada por:

$$U_p = \frac{F_c}{f a_p} \quad (1.3)$$

onde: U_p =unidade de potência
 F_c =força de corte (N), medida em experimento
 f = avanço (mm)
 a_p =profundidade de corte (mm)

Valores representativos de U_p para diversos materiais são encontrados na literatura. Todas as considerações feitas para o processo de torneamento podem ser extendidas aos demais processos com algumas ressalvas e considerações específicas.

I.4.3 O Processo de Fresamento

Ao contrario do processo de torneamento que se aplica a peças de revolução o processo de fresamento aplica-se a peças prismáticas, com a ferramenta realizando o movimento de rotação e o movimento de translação sendo compartilhado entre peça e ferramenta. A figura I.17 mostra a cinemática do processo para o fresamento topo e frontal.

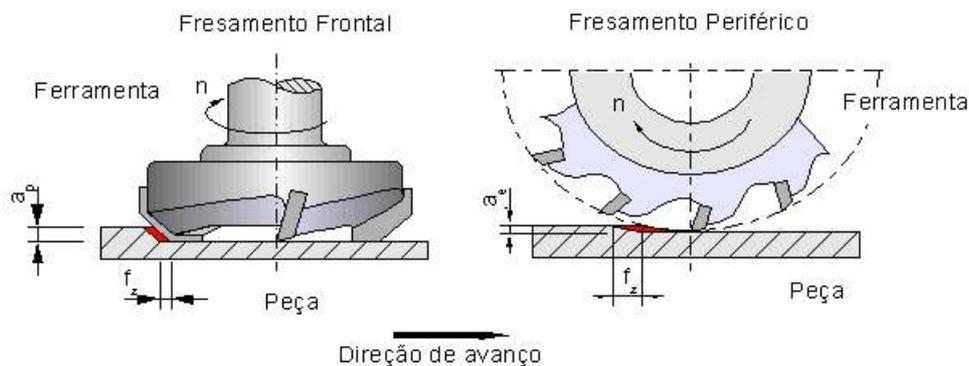


Figura I.17 – Cinemática do processo de Fresamento

Apesar da norma DIN 8589 classificar o fresamento quanto a superfície gerada em: fresamento plano, fresamento circular, fresamento de forma, fresamento de geração e fresamento de perfil. Sob o ponto de vista do projeto de máquinas fresadoras essa classificação pode ser simplificada em três tipos básicos de acordo com o movimento da ferramenta em: fresamento de topo, fresamento em três dimensões ou cinco eixos, e fresamento frontal, conforme a figura I.18.

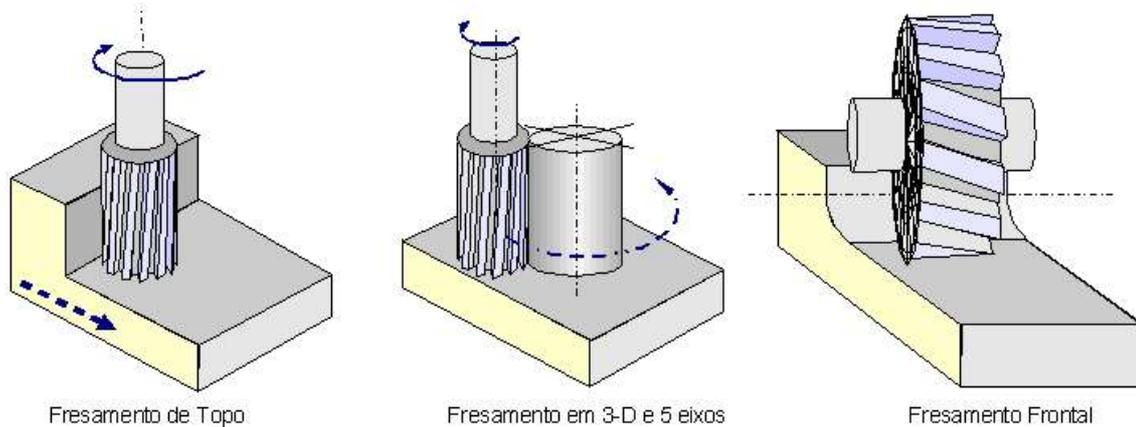


Figura I.18 – Tipos básicos de fresamento

No processo de freamento, ao contrário do torneamento a seções de cavaco é variável de uma espessura mínima para uma máxima, ou vice-versa, em função do freamento ser discordante ou concordante. Contudo o principal no tocante as forças no processo de fresamento é sua característica alternante, proporcionada pela ação de cada um dos dentes cortantes, conforme mostrado na figura I.19.

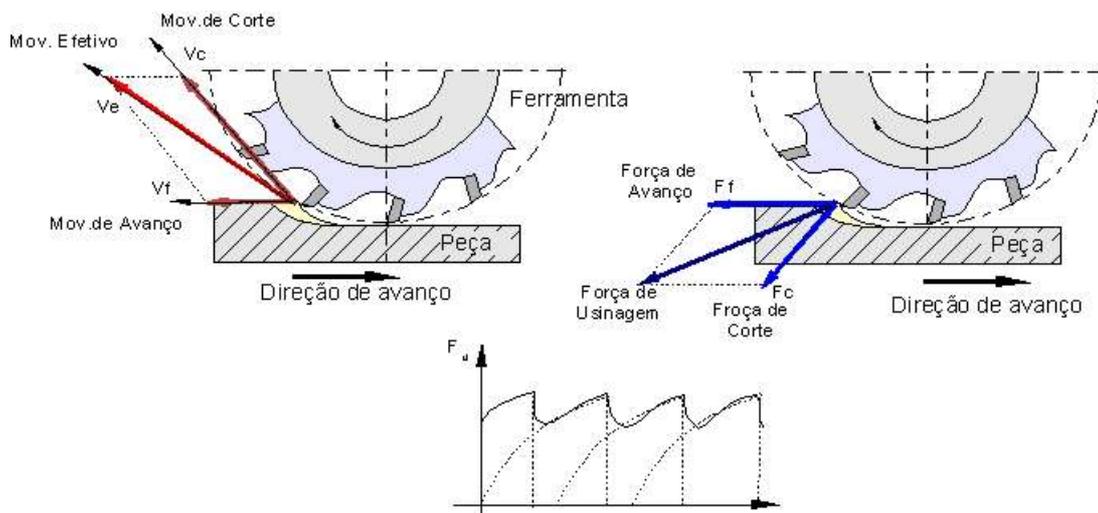


Figura I.19 – Forças no fresamento

I.4.4 O Processo de Furação

O processo de furação é um dos mais comuns, se não o mais comum, dos processos de usinagem, praticamente todas as peças no universo metal mecânico sofrem algum tipo de furação. Do total de furos executados grande parte é produzido pelo processo de usinagem, e em sua maioria com o uso de brocas. Convém lembrar que os furos também podem ser obtidos por fresamento, mandrilamento e torneamento na usinagem com ferramentas de geometria definida, ou por processos de remoção térmica e química, na usinagem não convencional, além dos processos de conformação (ex. Estampagem).

Na usinagem convencional a furação difere dos demais processos na coincidência entre o eixo de rotação e avanço. A figura I.20 mostra a cinemática do processo em termos de rotação e avanço, com as principais forças que ocorrem na furação.

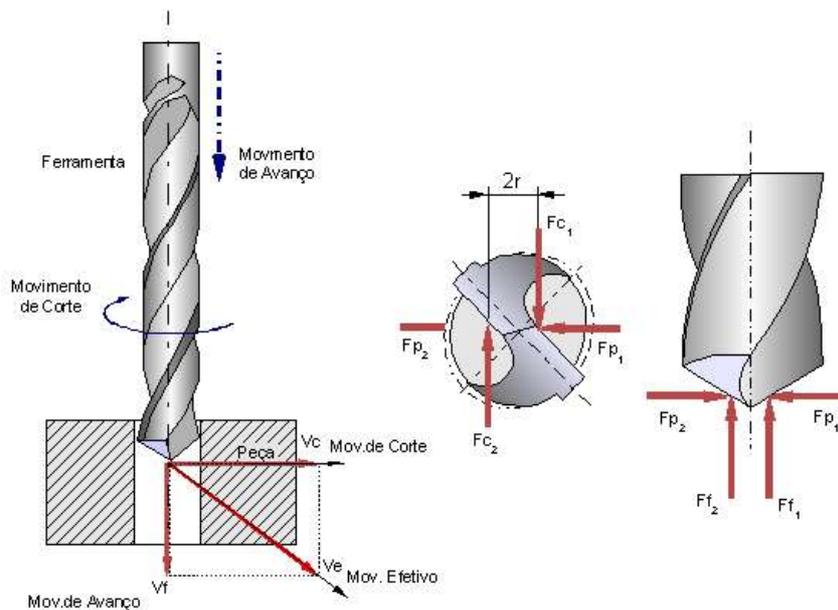


Figura I.21 – Cinemática e esforços no processo de furação

I.4.5 O Processo de Retificação

A retificação é um processo de usinagem com ferramenta de geometria não definida, utilizado principalmente em operações de acabamento, visando a melhoria da qualidade superficial, das tolerâncias geométricas e dimensionais. A retificação se caracteriza pela ação de grãos mais ou menos disformes, de materiais duros que são postos em interferência com o material da peça. Sua diferença básica dos processos com ferramentas de geometria definida está na impossibilidade definir geometricamente os grão abrasivos responsáveis pela usinagem, sendo que esses podem ser classificados quanto a sua forma geral, tamanho médio e tipo de material. A figura I.21 mostra a cinemática do processo e os principais esforços que ocorrem na retificação.

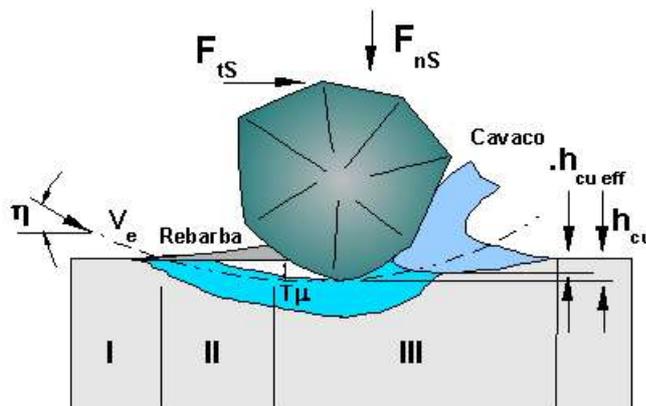


Figura I.21 – Cinemática do processo de retificação

Onde: F_{ts} = força de corte

F_{ns} = força normal a F_{ts}

I – região de deformação elástica atrito grão/material da peça

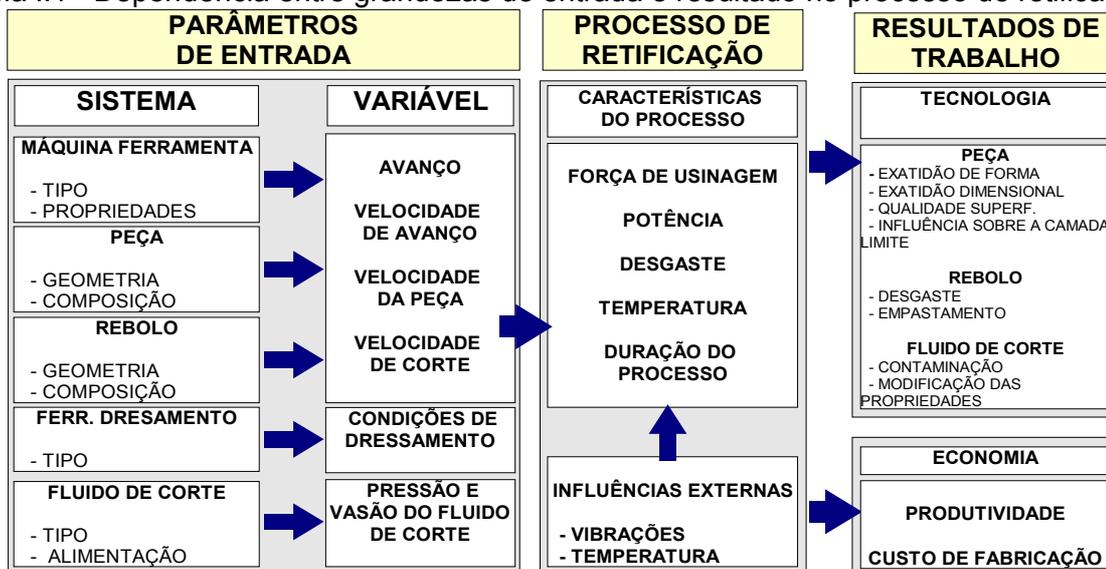
II – região de deformação elástica e plástica, atrito grão/material da peça e atrito interno do material

III – deformação elástica e plástica + remoção de cavaco, atrito grão/material da peça atrito interno do material

h_{cu} = espessura de usinagem

$h_{cu\ eff}$ = espessura de corte efetiva T_m = penetração de início de corte

Tabela I.1 - Dependência entre grandezas de entrada e resultado no processo de retificação



Apesar de proporcionar poucos esforços sobre a estrutura, o processo de retificação gera muito calor, o que torna necessário o uso de muito fluido lubri-refrigerante no processo, tornando a estabilidade térmica do projeto um requisito de fundamental importância. A figura I.22 mostra os três tipos básicos de retificação: a) retificação cilíndrica; b) retificação plana; c) retificação de forma.

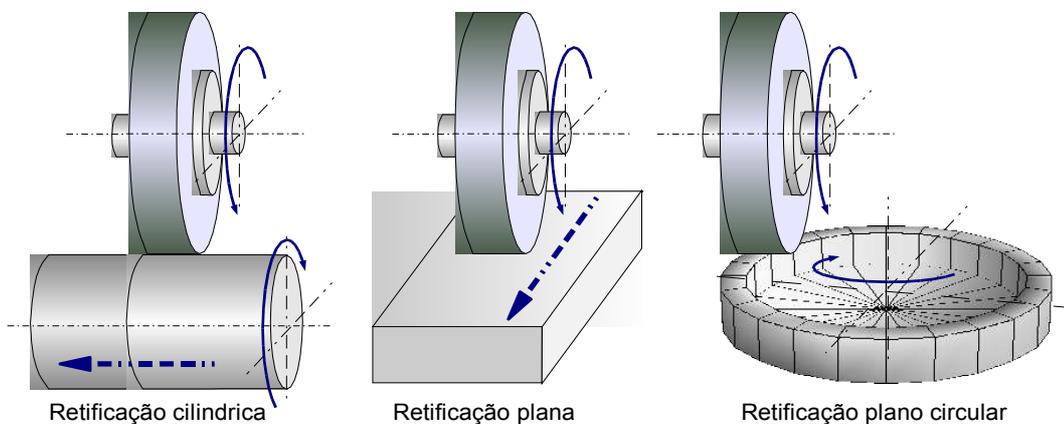


Figura I.22 – Tipos de Retificação segundo a cinemática

I.4.6 Outros Processo de Usinagem

Processos não convencionais de usinagem assim como os processo de usinagem de ultraprecisão com ferramentas de geometria definida, são processos que produzem pouco ou nenhum esforço sobre a estrutura da máquina-ferramenta. Processos de usinagem por remoção térmica, como por exemplo o corte com Laser, levam a maiores preocupações quanto aos efeitos térmicos sobre a estrutura, controle de posição e segurança do operador.

O processo por remoção química tem como principais preocupações o controle do processo, a segurança do operador, proteção dos elementos da máquina e as questões ambientais. Apesar das variações no processo de usinagem, as considerações de projeto de máquinas-ferramentas, em sua grande maioria é comum a todas as máquinas, principalmente em termos de estrutura, graus de liberdade, requisitos de segurança e formas de acionamento e controle.

I.5 Relação entre os Processos de Fabricação Tolerância e Acabamento

Com o objetivo de transformar matéria prima em peças acabadas, com tolerâncias geométrica, dimensional e qualidade superficial pré-definidas, estas tem que ser processadas de diversas maneiras. Os diversos processos de fabricação podem ser classificados como:

- Processos de transformação de material; Ex.: fundição.
- Processos de união de material, estas ainda podem ser subdividas em:
 - permanentes (Ex.: soldagem, colagem, brasagem, etc.) e,
 - não permanentes (Ex.: uniões aparafusadas e rebitadas, etc.).
- Processos por conformação de material; Ex.: laminação, estampagem, embutimento, etc.
- Processos por remoção de material, comumente denominados de processos de usinagem.

Algumas considerações podem ser traçadas entre o processo de fabricação e qualidade superficial possível de ser obtida, estas são apresentadas na tabela I.2.

Tabela I.2 – Relação entre processo de fabricação e qualidade superficial (Whitehouse,1994)

PROCESSO	VALORES DE RUGOSIDADE (mm R _a)												
	50 0,0125	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125
OXICORTE <i>SNAGGING</i> SERRA PLAINAMENTO <i>PLNING, SHAPING</i>													
FURAÇÃO USINAGEM QUÍMICA ELETOEROSÃO FRESAMENTO													
BROCHAMENTO <i>REAMING</i> FEIXE DE ELETRONS LASER ELETOQUÍMICA TORNEMANENTO, <i>BARREL FINISHING</i>													
RETIFICAÇÃO ELETROLÍTICA ROLETAMENTO RETIFICAÇÃO BRUNIMENTO													
POLIMENTO ELETROLÍTICO POLIMENTO LAPIDAÇÃO <i>SUPPERFINISHING</i>													
FUNDIÇÃO EM AREIA LAMINAÇÃO A QUENTE FORJAMENTO FUNDIÇÃO EM MOLDE PERMANENTE													
<i>INVESTMENT CASTING</i> ESTRUSÃO LAMINAÇÃO A FRIO FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO													
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125

A tabela I.3 apresenta a relação entre a exatidão dimensional ou geométrica possível de ser obtida por alguns processos de usinagem.

Tabela I.3 - Relação entre precisão e mecanismo de usinagem.

EXATIDÃO DIMENSIONAL	MECANISMO DE USINAGEM
10 μm	ELETROEROSÃO POR FAÍSCA USINAGEM QUÍMICA CORTE COM FIOS ABRASIVOS
1 μm	ELETROEROSÃO DE PRECISÃO POLIMENTO ELETROLÍTICO USINAGEM FINA OU RETIFICAÇÃO FOTOLITOGRAFIA (LUZ VISÍVEL)
0,1 μm	RETIFICAÇÃO DE SUPERFÍCIES ESPELHADAS LAPIDAÇÃO DE PRECISÃO FOTOLITOGRAFIA (LUZ ULTRAVIOLETA) USINAGEM COM FERRAMENTA DE GUME ÚNICO
0,01 μm	USINAGEM POR ULTRA-SOM LAPIDAÇÃO MECÂNICO-QUÍMICA LAPIDAÇÃO REATIVA USINAGEM A LASER EXPOSIÇÃO A FEIXE DE ELÉTRONS EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO
0,001 μm (1 nm)	LAPIDAÇÃO SEM CONTATO USINAGEM IÔNICA USINAGEM QUÍMICA
SUBNANÔMETRO	USINAGEM POR FEIXES ATÔMICOS OU MOLECULARES

Porém a evolução da técnica não permite que um processo tenha sua exatidão de fabricação (precisão) definida, sem ser referenciada no tempo. O primeiro a levantar relação entre a evolução dos processos de usinagem, as exatidões (precisões) possíveis de serem atingidas, e as formas de medição ao longo do século XX foi Norio Taniguchi, em fins da década de 70.

As tabelas apresentadas neste segmento são orientativas das possibilidades que podem ser atingidas em termos de exatidão dimensional, geométrica e qualidade superficial que podem ser atingidas por alguns processos de fabricação. Porém, deve-se sempre ter em mente que a técnica está em constante evolução, sempre buscando extrair o melhor de cada processo, com o menor custo, máxima produtividade e mínima influência humana. Esta evolução tem levado a melhores qualidades, menores desperdícios e a redução de custos.

A figura I.23 apresenta a evolução da usinagem e sistemas de medição ao longo do século XX, segundo Tanigushi (1994) e Ikawa (1991).

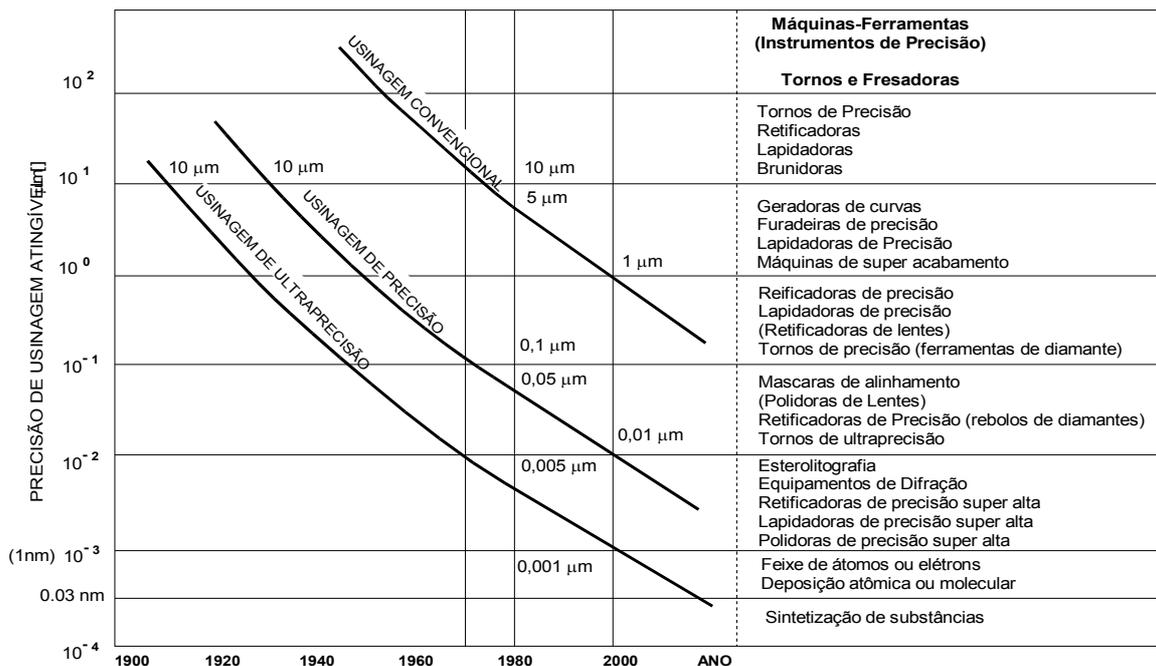


Figura I.23 - Evolução da precisão na usinagem no século XX

I.6 Teoria de Projeto Aplicada a Máquinas-Ferramentas

O projeto, por sua natureza, é um processo sistemático com cada uma de suas etapas sendo iniciada ao término da anterior. A metodologia empregada no desenvolvimento de projetos, incluindo o de máquinas-ferramentas está baseada na proposta apresentada por Pahl e Beitz (1992), e na recomendação da norma alemã VDI 2221, onde o procedimento geral para o projeto é apresentado na figura IX.X.

A seqüência para o desenvolvimento de um projeto proposto por Pahl e Beitz (1992), assim como a VDI 2221, dividem o trabalho em quatro fases principais (Back,1996;Forcellini, 2002; Pereira,1996):

- **a definição da tarefa**, onde o departamento de projeto solicita informações aos representantes dos clientes, visando levantar possíveis custos, rentabilidade e uma viabilidade potencial do projeto;
- **projeto conceitual**, onde são estabelecidas as relações funcionais dos componentes e uma estrutura física é geralmente definida;
- **projeto preliminar**, onde algumas das soluções apresentadas no projeto conceitual são expandidas em detalhes e arranjadas;
- **projeto detalhado**, que pode ser definido como tudo que segue o projeto preliminar com o objetivo de trazer o projeto à vida.

Slocum (1992) acrescenta uma quinta fase as quatro apresentadas anteriormente:

- **acompanhar o projeto (Design follow-up)**, a qual pode ser definida como as atividades que englobam a parte de documentação e planos de manutenção, onde geralmente os projetistas tentam se esquivar ou mesmo fugir (Slocun,1992).

A figura I.24 apresenta as fases, passos no desenvolvimento de projetos, e os resultados esperados a cada um deles segundo a norma alemã VDI 2222.

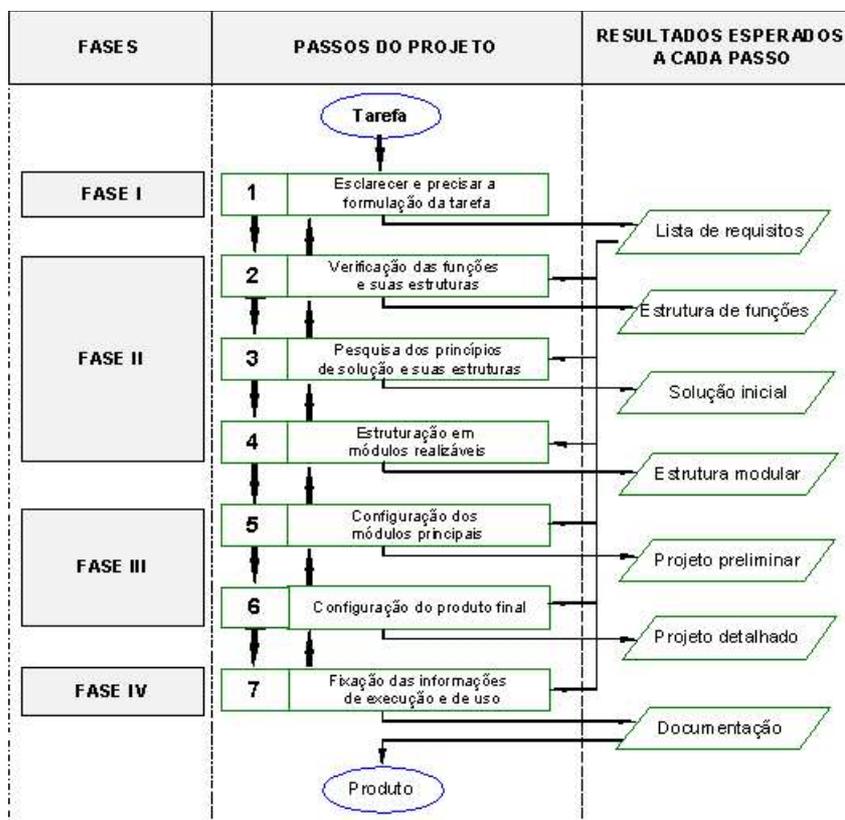


Figura I.24 - Fases, passos e resultados no projeto segundo a norma VDI 2222

O projeto informacional, que precede todo o desenvolvimento de uma máquina-ferramenta, pode ser sistematizado por uma série de questionamentos que permitem identificar requisitos e necessidades do projeto.

A metodologia de projeto proposta por Pahl e Beitz (1992) define três tipos de clientes responsáveis pelo desenvolvimento. O termo cliente visa identificar todas as possíveis pessoas que entrarão em contato, direta ou indiretamente, com a máquina durante todas as fases de seu desenvolvimento, fabricação, transporte, montagem, utilização, manutenção e descarte. Os clientes são definidos como:

Externos - AGRUPAMENTO DE PESSOAS, INSTITUIÇÕES OU EMPRESAS RELACIONADO COM A UTILIZAÇÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA, OU SEJA, AQUELES QUE IRÃO DIRETAMENTE UTILIZÁ-LA NA MANUFATURA;

Intermediários - PESSOAS RESPONSÁVEIS PELA EMBALAGEM, ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E MANUTENÇÃO, FUNDAMENTAIS PARA UM EFICIENTE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA;

Internos - PESSOAS RESPONSÁVEIS PELO PROJETO, FABRICAÇÃO E MONTAGEM DA MÁQUINA-FERRAMENTA, BEM COMO PELO FORNECIMENTO DE COMPONENTES. TEM-SE BASICAMENTE DOIS GRUPOS ENVOLVIDOS: TÉCNICOS DE FABRICAÇÃO e PROJETISTAS.

A cada um desses cliente aplica-se um questionamento para a definição das necessidades para o desenvolvimento de projetos de máquinas-ferramentas, adaptado de segundo Slocun (1992) e Stoeterau (1999).

• CLIENTE EXTERNO

PEÇA DE PRODUÇÃO: QUAIS OS TIPOS (FORMAS) QUE SE DESEJA PRODUZIR?

TOLERÂNCIAS: QUAIS AS TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS E GEOMÉTRICAS ENVOLVIDAS?

QUALIDADE SUPERFICIAL: QUAL A QUALIDADE SUPERFICIAL DESEJADA?

MATERIAIS DE PRODUÇÃO: OS MATERIAIS QUE PODERÃO SER UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DAS PEÇAS DE PRODUÇÃO

TAMANHO DOS LOTES A SEREM PRODUZIDOS: OS TAMANHOS DOS LOTES ENVOLVIDOS SÃO EM GERAL PEQUENOS E MÉDIOS, SENDO MUITO COMUNS OS LOTES DE PEÇA ÚNICA.

• CLIENTE INTERMEDIÁRIO

GEOMETRIA: QUAL É O TAMANHO TOTAL APROXIMADO?

MONTAGEM: A MÁQUINA PODE SER MONTADA DE FORMA ECONÔMICA?

TRANSPORTE: A MÁQUINA PODE SER TRANSPORTADA COM FACILIDADE?

MANUTENÇÃO: QUAIS AS FREQUÊNCIAS DE MANUTENÇÃO EXIGIDAS, E COMO AFETAM A OPERACIONALIZAÇÃO GERAL DA FÁBRICA?

• CLIENTE INTERNO

GEOMETRIA: QUAL É O TAMANHO TOTAL APROXIMADO?

CINEMÁTICA: QUE TIPO DE MECANISMO E QUAL A REPETIBILIDADE, PRECISÃO E RESOLUÇÃO REQUERIDAS?

- AS CARACTERÍSTICAS DE REPETIBILIDADE, PRECISÃO E RESOLUÇÃO NECESSÁRIAS À MÁQUINA SÃO UMA FUNÇÃO DAS TOLERÂNCIAS DOS COMPONENTES A SEREM FABRICADOS, FORNECIDAS PELO CLIENTE EXTERNO. EM GERAL RECOMENDA-SE QUE OS SISTEMAS DE MEDIÇÃO TENHAM PRECISÃO NA ORDEM 1/10 A 1/100 DAQUELA PREVISTA PARA OS COMPONENTES A SEREM FABRICADOS.

DINÂMICA: QUE FORÇAS SÃO GERADAS E QUAIS SÃO SEUS EFEITOS POTENCIAIS SOBRE O SISTEMA E SEUS COMPONENTES? QUAL A RIGIDEZ NECESSÁRIA À MÁQUINA PARA RESISTIR ÀS FORÇAS DO PROCESSO, MANTENDO A PRECISÃO DOS SEUS COMPONENTES E ACABAMENTO SUPERFICIAL?

POTÊNCIA REQUERIDA: QUE TIPOS DE ATUADORES E ACIONAMENTOS PODEM SER UTILIZADOS E QUAIS SÃO OS CONTROLES NECESSÁRIOS?

MATERIAIS: QUAIS OS TIPOS DE MATERIAIS QUE PODEM SER UTILIZADOS PARA MAXIMIZAR A EFICIÊNCIA DA MÁQUINA?

- AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DESEJADAS NOS MATERIAIS A SEREM EMPREGADOS SÃO:
 - A ESTABILIDADE TÉRMICA;
 - A ESTABILIDADE QUÍMICA (RESISTÊNCIA À CORROSÃO);
 - ESTABILIDADE DINÂMICA (CAPACIDADE DE AMORTECIMENTO).

SENSORES E CONTROLE: QUE TIPO DE SENSORES E SISTEMAS DE CONTROLE SÃO NECESSÁRIOS? COMO ELES PODEM SER USADOS PARA REDUZIR O CUSTO DOS SISTEMAS MECÂNICOS EXIGIDOS E AUMENTAR A SUA CONFIABILIDADE?

- OS SENSORES DEVERÃO SER COMPATÍVEIS COM A PRECISÃO QUE SE DESEJA OBTER E O SISTEMA DE CONTROLE DEVERÁ UMA CAPACIDADE DE MOVIMENTAÇÃO E PROGRAMAÇÃO COMPATÍVEL COM AS FORMAS QUE SE DESEJA FABRICAR.

SEGURANÇA: QUAIS SÃO AS EXIGÊNCIAS PARA A PROTEÇÃO DO OPERADOR? DO AMBIENTE? DA MÁQUINA?

- RECOMENDAÇÕES DE NORMA PARA SEGURANÇA DO OPERADOR, DA MÁQUINA E DO MEIO AMBIENTE.
- CAVACOS COM DIMENSÕES MICROMÉTRICAS E ELEVADA SUPERFÍCIE DE CONTATO E PERIGO DE OXIDAÇÃO RÁPIDA (EXPLOSÃO) E PERIGO SE INALADA.

PRODUÇÃO: OS COMPONENTES DA MÁQUINA PODEM SER FABRICADOS DE FORMA ECONÔMICA? FATOR ECONÔMICO É PREDOMINANTE NO DESENVOLVIMENTO DE qualquer PROJETO, em especial de máquinas-ferramentas

ERGONOMIA: COMO TODOS OS FATORES DE PROJETO PODEM SER COMBINADOS PARA PRODUZIR UMA MÁQUINA QUE PROPORCIONE SATISFAÇÃO PARA QUEM A OPERAR, REALIZAR SUA MANUTENÇÃO E FIZER OS REPAROS?

- É RECOMENDÁVEL mínimo de contato entre O OPERADOR e máquina, devendo o mesmo atuar mais como um supervisor do processo, do que como um elemento da operação.

MEIOS DE FABRICAÇÃO À DISPOSIÇÃO: COM QUE MEIOS DE FABRICAÇÃO VOCÊ PODE CONTAR?

- PARA CADA MÁQUINA DISPONÍVEL É RECOMENDÁVEL SABER:
 - PROCESSOS A QUE SE APLICA;
 - CAPACIDADE DE CARGA;
 - VOLUME DE TRABALHO (DIMENSÕES MÁQUINAS QUE PODEM SER OPERADAS);
 - ACESSÓRIOS E RECURSOS;
 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS (QUALIFICAÇÃO GEOMÉTRICA), QUAL OS ERROS QUE A MÁQUINA TEM E QUAL A INFLUENCIA DESTES NO RESULTADO DO PROCESSO.
 - QUALIFICAÇÃO DOS OPERADORES;
 - CUSTO MÁQUINA;
 - CUSTO HOMEM/MÁQUINA;
 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO DAS MESMAS;

LIMITES DOS MEIOS À DISPOSIÇÃO: O QUE VOCÊ PODE FABRICAR EM FUNÇÃO DOS MEIOS (HOMENS E MÁQUINAS) A SUA DISPOSIÇÃO?

- LIMITAÇÕES DE CADA PROCESSO A DISPOSIÇÃO;
- TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS E DIMENSIONAIS POSSÍVEIS DE SEREM OBTIDAS;
- QUALIDADE SUPERFICIAL QUE CADA PROCESSO A DISPOSIÇÃO PODE FORNECER;

CONTROLE DE QUALIDADE: OS COMPONENTES PODEM SER FABRICADOS COM UMA QUALIDADE CONSISTENTE NAS PEÇAS?

- OS RECURSOS METROLÓGICOS (DIMENSIONAIS, GEOMÉTRICOS E DE QUALIDADE SUPERFICIAL) DOS COMPONENTES A SEREM FABRICADOS DEVEM SER LEVANTADOS QUANTO A:
 - RECURSOS METROLÓGICOS A DISPOSIÇÃO (QUE INSTRUMENTOS EXISTEM, SEU ESTADO DE CONSERVAÇÃO E NECESSIDADE DE CALIBRAÇÃO, E QUAIS OS INSTRUMENTOS NECESSÁRIOS);
 - CAPACITAÇÃO DOS OPERADORES;
 - FACILIDADES ADEQUADAS (EX: SALA CLIMATIZADA) ;
 - OUTROS RECURSOS A SUA DISPOSIÇÃO (ONDE, COMO, QUEM E CUSTOS);

I.7 Tendências no Projeto de Máquinas-Ferramentas

O desenvolvimento de máquinas-ferramentas atualmente é fortemente favorecido pelo barateamento e aumento da capacidade de operação dos dispositivos eletrônicos, pelos novos tipos de acionamentos principalmente motores lineares, pelos desenvolvimentos na

engenharia de materiais que permitem a construção de estruturas mais estáveis dinamicamente sem o comprometimento de peso, melhoria dos sistemas de medição e nos elementos de máquinas. Esse favorecimento, aliado as demanda do mercado por máquinas capazes de produzir com máxima qualidade, no menor tempo possível, e com máxima flexibilidade de produção, tem levado ao desenvolvimento de máquinas-ferramentas que permitem a fabricação de peças com a maior gama de geometrias possíveis. Esses requisitos, gerados pelas demanda, também tem levado ao desenvolvimento de máquinas com a capacidades de produzirem peças com alta definição geométrica e dimensional, com ou sem alto grau de acabamento superficial. Isso permite dividir as tendências do projeto de máquinas-ferramentas em três grupos distintos, máquinas-ferramentas para alta velocidade de usinagem ou de corte – HSM/HSC, máquinas com máxima flexibilidade do tipo hexapot, e máquinas para usinagem de alta e ultraprecisão, apresentadas conforme a figura I.25.



Figura I.25 – Tendências no projeto de máquinas-ferramentas

No médio prazo existe a tendência de absorção das características das máquinas de alta velocidade de usinagem (HSM) pelas máquinas-ferramentas com máxima flexibilidade de produção, tais como as as máquinas de cinemática paralela ou hexapodes, dando origem, no futuro as máquinas Hexa-HSM.

CAPÍTULO -1

ESTRUTURAS DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

As estruturas de máquinas-ferramentas, também denominadas errôneamente de bases de máquinas, tem por função servir de superfície de montagem para todos os demais elementos que constituirão a máquina como um todo. Esses elementos podem ser guias, acionamentos, sistemas de medição e controle, dispositivos de segurança, sistemas hidráulicos ou pneumáticos, fiações, tubulações, sistemas de coleta e remoção de cavacos e fluidos, etc.

Atualmente o projeto de máquinas-ferramentas consiste basicamente na integração de subsistemas que podem ser adquiridos de diferentes fornecedores, não sendo necessário o domínio de todos os processos produtivos necessários à obtenção de uma máquina-ferramenta. Da estrutura à eletrônica de controle todos os elementos constituintes de uma máquina-ferramenta podem ser encomendados a terceiros ou encontrados comercialmente.

As figuras 1.1 e 1.2 representam os principais constituintes de um torno universal convencional e uma furadeira de coluna, nessas pode ser observado que existem inúmeros elementos comuns, exceto a estrutura.

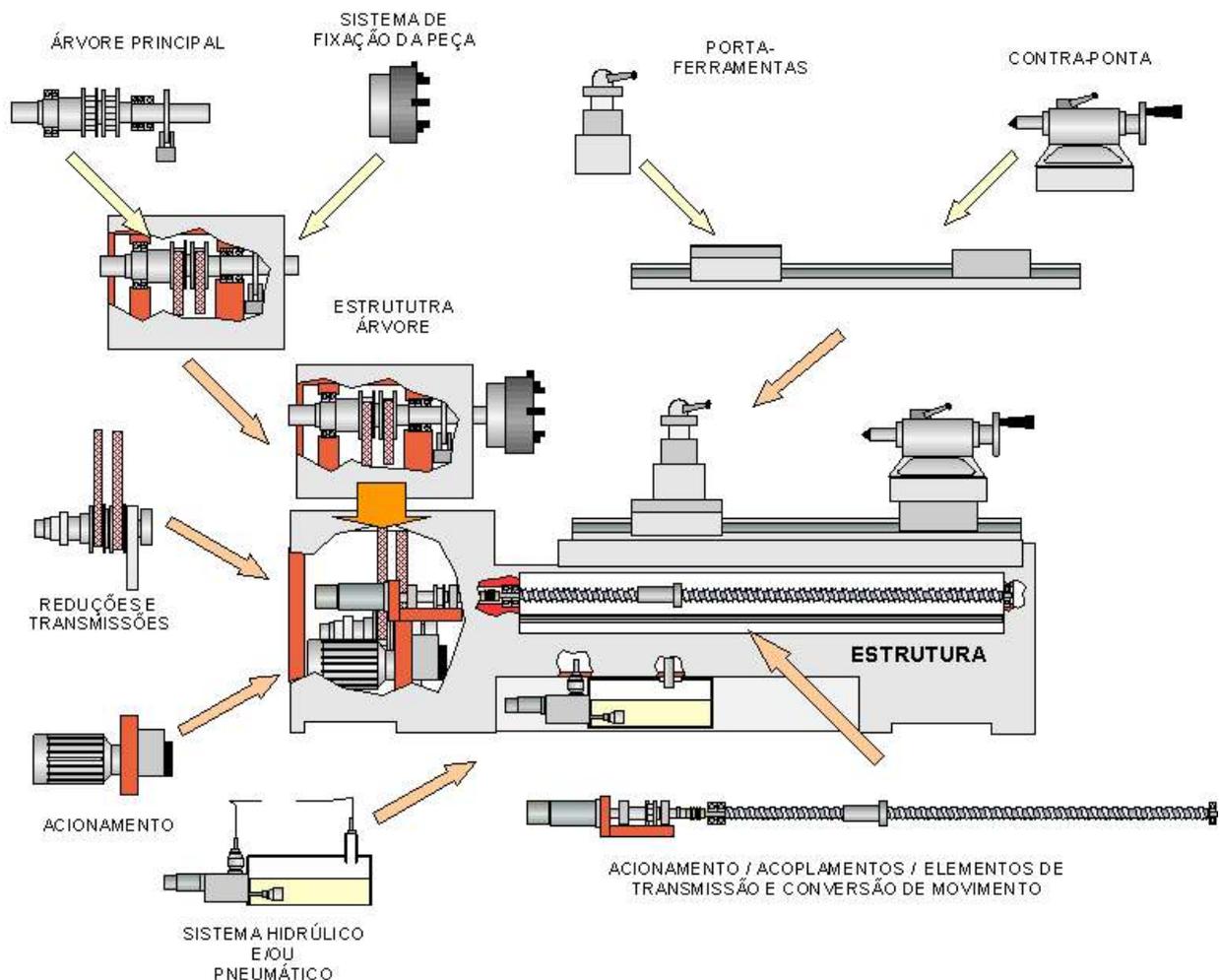


Figura 1.1 – Constituintes básicos de um torno universal convencional

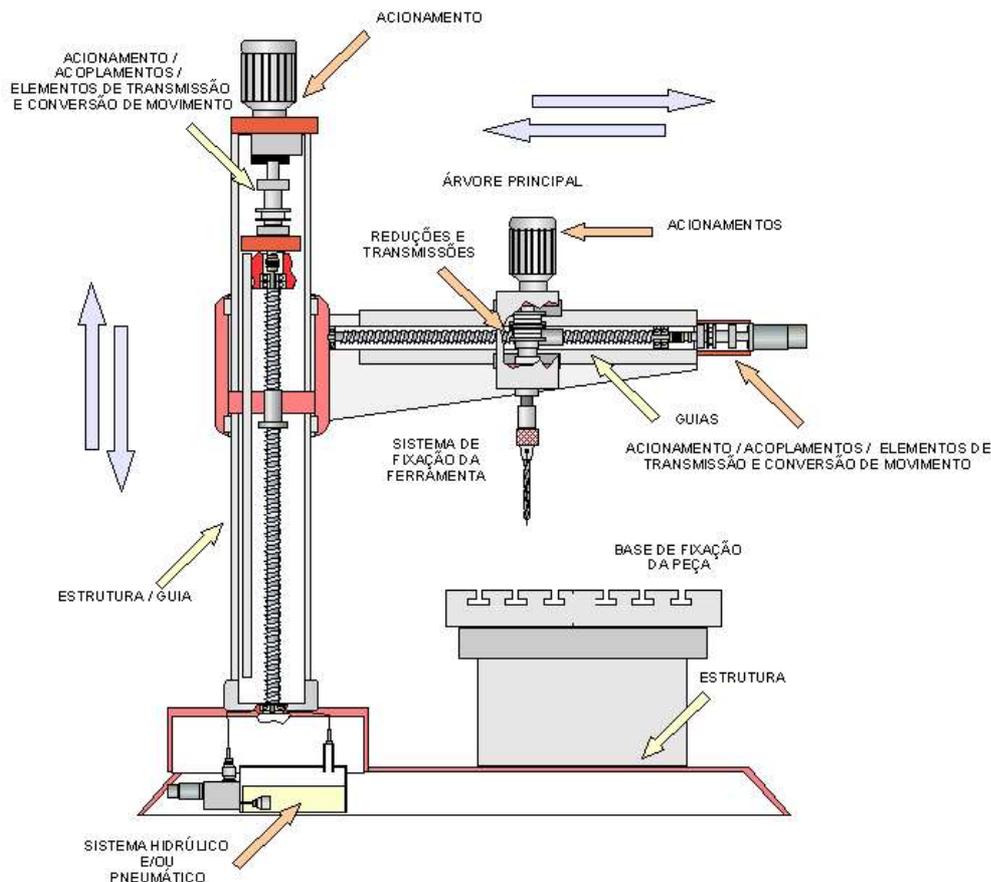


Figura 1.2 – Constituintes básicos de uma furadeira de coluna

O projeto de toda estrutura de máquina-ferramenta deve levar em conta os aspectos dos elementos fornecidos por terceiro, contudo esse deve atender os seguintes requisitos:

- rigidez estática;
- rigidez dinâmica;
- estabilidade térmica;
- estabilidade química;
- facilidade de manipulação;
- acessibilidade aos componentes internos; e
- custo.

Como regra geral para o projeto de estruturas de máquinas-ferramentas, recomenda-se que a mesma quando dimensões tais que tornem sua manipulação dificultada, quer por seu tamanho, quer por seu peso, essa seja dividida em estruturas menores. A divisão em estruturas menores implica em maior facilidade de transporte, contudo deve-se tomar cuidado com referências de montagem, como de forma a garantir exatidão geométrica da máquina sem a necessidade de dispositivos de ajustagem complexos.

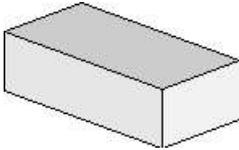
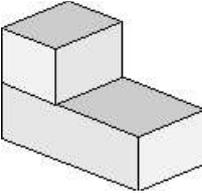
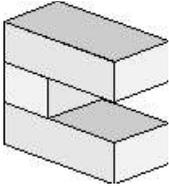
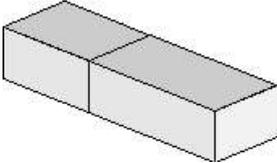
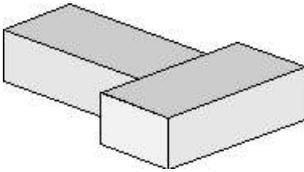
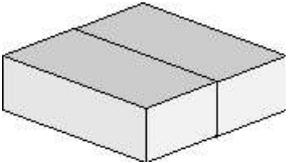
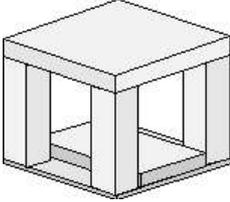
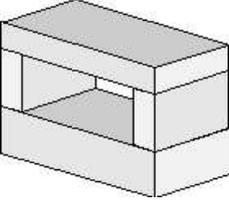
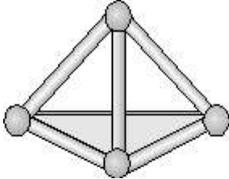
1.1 Arranjos de estruturas de máquinas-ferramentas

O arranjo de estruturas de máquinas-ferramentas independe do material ou da construção interna da mesma, contudo o arranjo é fortemente dependente da:

- cinemática do processo;
- da opção construtiva da máquina; e
- dos limites dos processos de fabricação com relação ao material a ser empregado.

Os arranjos mais comuns encontrados em máquinas ferramentas são apresentados na tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Arranjos mais comuns de estruturas de máquinas-ferramentas

<i>Simples</i>	<i>L</i>	<i>C</i>
		
<i>i</i>	<i>T</i>	<i>H</i>
		
<i>Cubo vazado</i>	<i>Portal</i>	<i>Tetraédrica</i>
		

Os arranjos básicos apresentados na tabela 1.1 podem ser traduzidos para máquinas específicas nas tabelas 1.2, 1.3 e 1.4. Com base nestas tabelas, pode ser verificado que para uma mesma configuração cinemática podem ser obtidas diversas soluções, através do arranjo dos constituintes básicos. Contudo, estes diferentes arranjos permitem que se obtenham configurações de máquinas específicas para cada aplicação.

Tabela 1.2 – Arranjos de específicos de máquinas-ferramentas (Adaptados de Weck, 1992)

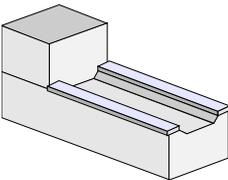
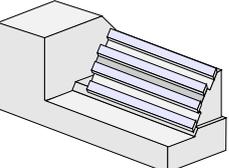
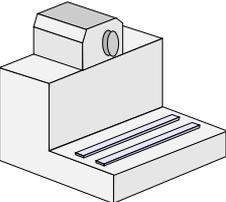
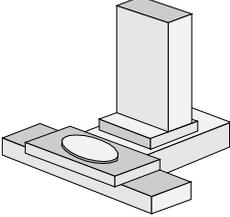
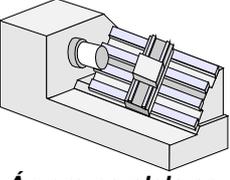
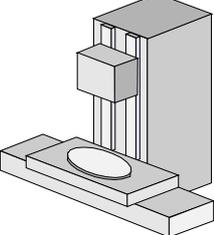
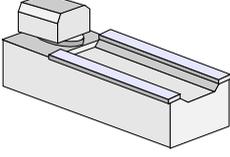
<i>Forma da estrutura</i>	 <i>Plana</i>	 <i>Inclinada</i>	 <i>Frontal</i>	 <i>Coluna</i>
<i>Movimento relativo entre peça e ferramenta</i>	 <i>Árvore paralela ao chão</i>	 <i>Árvore perpendicular ao chão</i>	 <i>Árvore com pivotação ao plano do chão</i>	

Tabela 1.3 – Arranjos de específicos de fresadoras (Adaptados de Weck, 1992)

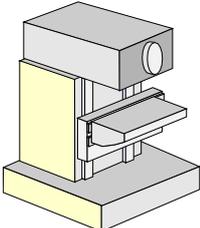
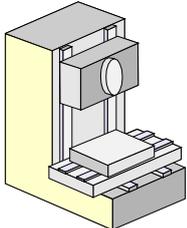
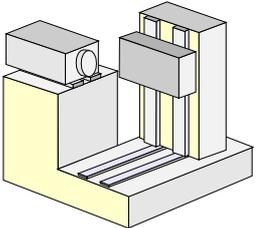
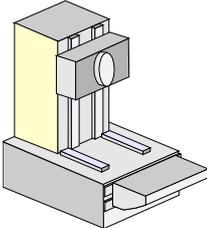
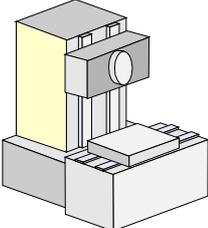
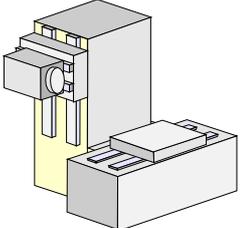
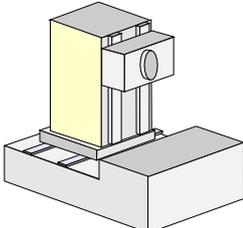
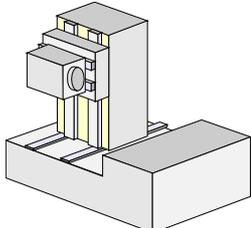
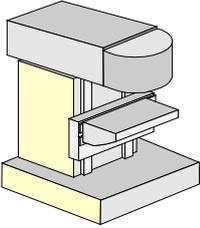
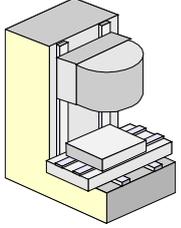
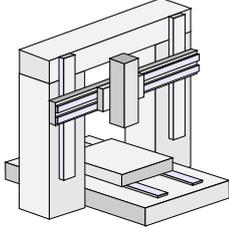
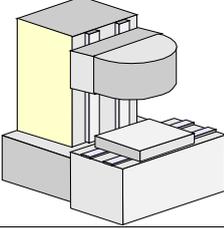
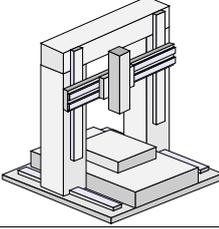
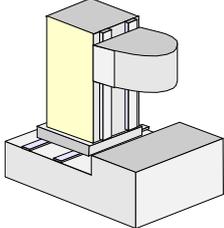
		<i>Forma da estrutura</i>		
		<i>Console</i>	<i>Bancada</i>	
<i>Quantidade de eixos na estrutura da árvore</i>	<i>um</i>			
	<i>dois</i>			
	<i>três</i>	-----		

Tabela 1.4 – Arranjos de específicos para fresadoras (Adaptados de Weck, 1992)

		<i>Forma</i>		
		<i>Console</i>	<i>Bancada</i>	
<i>Quantidade de eixos na estrutura da árvore</i>	<i>um</i>			
	<i>dois</i>			
	<i>três</i>			

1.2 Considerações quanto a Rigidez Estática e Dinâmica de Máquinas-Ferramentas

No projeto da estrutura de máquinas-ferramentas o requisito rigidez é muito mais importante do que o requisito capacidade de carga, isto porque os esforços gerados durante a usinagem, e suas conseqüentes deformações são, em geral, bem inferiores aos limites admissíveis para vários materiais.

O conceito de rigidez se divide em estático e dinâmico, e esse é utilizado como parâmetro de desempenho ou de projeto. Em muitos casos o conceito de rigidez estrutural serve também de parâmetro de comparação em máquinas-ferramentas. A rigidez estática é estabelecida tomando a relação entre a carga e a deformação (equação 01), ao passo que a rigidez dinâmica toma os mesmos parâmetros como sendo função da freqüência (equação 02).

$$k = \frac{F}{\delta_n} \quad (1.01)$$

$$k(\omega) = \frac{F(\omega)}{\delta_n(\omega)} \quad (1.02)$$

onde: k = rigidez

F = força aplicada ou carregamento

δ_n = deslocamento

ω = freqüência

O problema de rigidez não se resume ao quanto a máquina-ferramenta como um todo irá se deformar sob a ação de cargas estáticas, tais como o peso da peça, esforços de usinagem. Este problema também é caracterizado pelo quanto a máquina irá se deformar quando sujeita a vibrações sob a ação de forças inerciais, e carregamentos dinâmicos.

1.2.1 Considerações Estáticas

O requisito de rigidez estática se caracteriza principalmente, em termos das deformações resultantes dos esforços aplicados sobre a máquina-ferramenta, sendo as mais importantes aquelas causadas por carregamentos flexivos e torcionais. Esses carregamentos são importantes pois geralmente resultam em desalinhamentos e deslocamentos dos elementos guias, ocasionando assim inexatidões na máquina. A origem dessas deformações são principalmente decorrentes do:

- a) peso das partes móveis;
- b) peso das peças de trabalho;
- c) forças de usinagem;
- d) gradientes térmicos.

Secundariamente ainda podemos encontrar deformações oriundas de montagens errôneas de partes da máquinas, em geral devido a torques excessivos em parafusos, nivelamento incorreto, entre outras.

O primeiro passo para determinar a rigidez estática de uma máquina-ferramenta, e conseqüentemente os deslocamentos que esta pode sofrer em função dos carregamentos a que é submetida, está em definir a rigidez. A rigidez estática pode ser definida de duas maneiras, a primeira por intermédio de uma secante entre a origem e o ponto de interesse, figura 1.4 a, e a segunda por meio de uma reta tangente passando pelo mesmo ponto, figura 1.4 b.

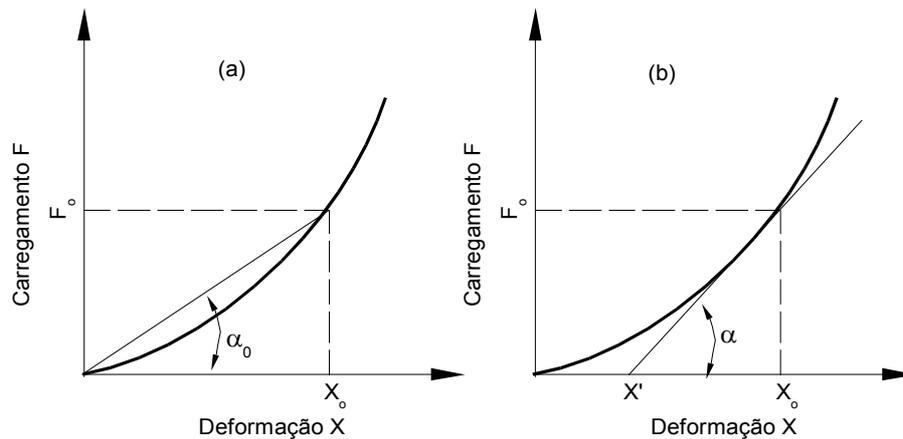


Figura 1.4 – Definições de rigidez (Weck,1997)

Com base na figura 1.4 (a) podemos definir rigidez através do método secante como:

$$k = \left(\frac{F}{X}\right)_{F_0} = \left(\frac{F_0}{X_0}\right) \text{ (N/mm)} \tag{1.03}$$

$$k = \tan \alpha_0 \tag{1.04}$$

Segundo a figura 1.4 (b) a rigidez segundo o método da tangente pode ser definida como:

$$K^y = \left(\frac{dF}{dX}\right)_{f_0} = \frac{F_0}{X_0 - X'} \text{ (N/mm)} \tag{1.05}$$

$$K^z = \tan \alpha \tag{1.06}$$

A flexibilidade **d** é obtida de maneira recíproca pelo inverso da rigidez,

$$d = \frac{dX}{dF} = \frac{1}{k} \tag{1.07}$$

sendo que a flexibilidade total é obtida através da soma do inversos das rigidezes de cada constituinte da máquina, contudo essa associação depende de como os elementos estão montados na máquina. A forma como os diversos elementos estão montados na máquina-ferramenta define se as rigidezes irão atuar de forma paralela ou seriada. Dessa forma é possível obter a flexibilidade total por:

$$d_{tot} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3 + k_4} + \dots \tag{1.08}$$

onde as características de rigidez dos elementos contituíntes é fornecida pelas associações, conforme:

$\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_m}\right)$ representa uma associação em paralelo, e

$\left(\frac{1}{(k_3 + k_4 + \dots + k_m)}\right)$ para as associações em série.

O ponto de carregamento em máquinas-ferramentas é dado pelo contato entre peça e ferramenta, a partir desse ponto todos os carregamentos são transmitidos para a árvore, seus mancais, suas guias e estrutura, assim como esses se transmitem para a peça, dispositivos de fixação e novamente para as guias e estrutura. Esse caminho percorrido pelos esforços do processo é determinar o fluxo de força da máquina. A figura 1.5 da apresenta a visão do fluxo de força em uma mandriladora.

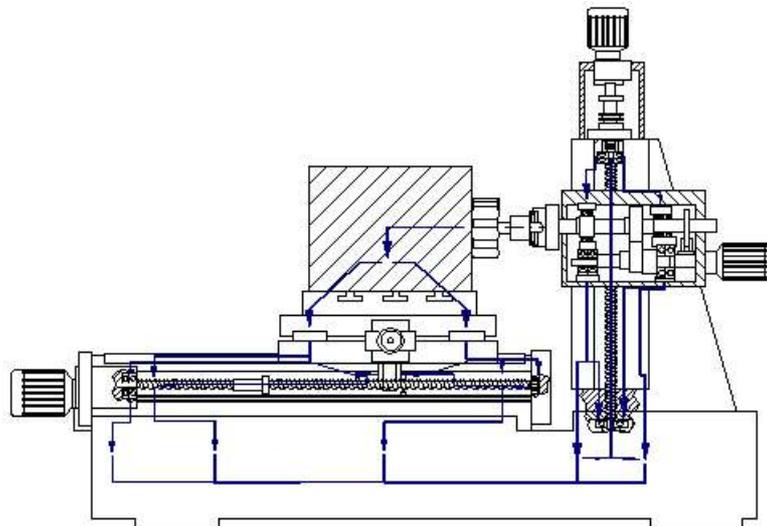


Figura 1.5 – Fluxo de carga em uma mandriladora

Um exemplo de uma análise de deformações estáticas em uma mandriladora de coluna é apresentada na figura 1.6. Nessa é montada uma haste no local da ferramenta e sobre ela são aplicados carregamentos de 40.000N nas direções coordenadas, representados por F_x , F_y e F_z .

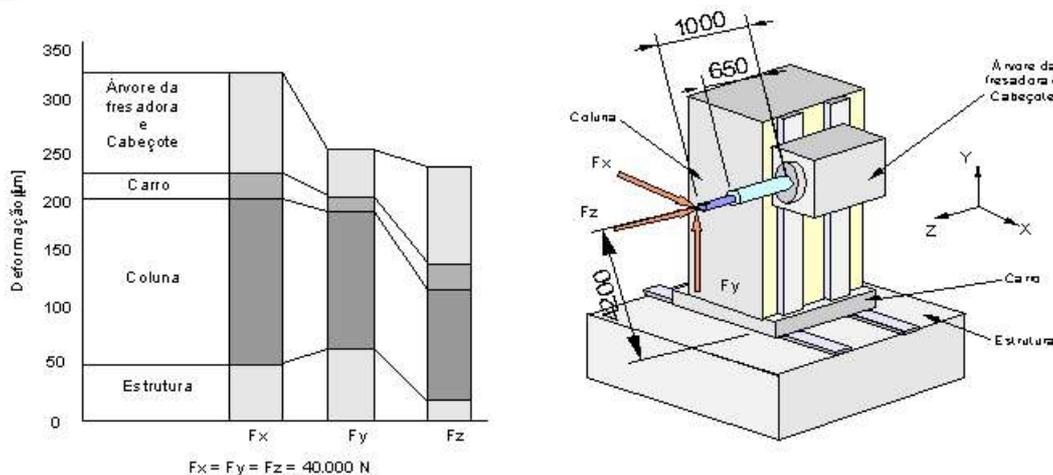


Figura 1.6 – Exemplo de uma análise de deformação estática (Weck, 1997)

A figura 1.6 permite observar o quanto cada parte da estrutura da máquina está se deformando em função dos carregamentos aplicados, além de como cada parte apresenta comportamento em função de sua rigidez estrutural. A figura 1.7 apresenta uma complementação a figura anterior, nesta são apresentadas duas estruturas de fresadoras, uma com formato em C e outra com formato em O, com mesma cinemática e submetidas ao mesmo esforço, contudo apresentando resultados diferentes quanto a deformações. Com base na figura 1.7 pode-se concluir que uma estrutura com configuração em O apresenta menores deformações, principalmente na região de trabalho o que não compromete a qualidade geométrica do trabalho.

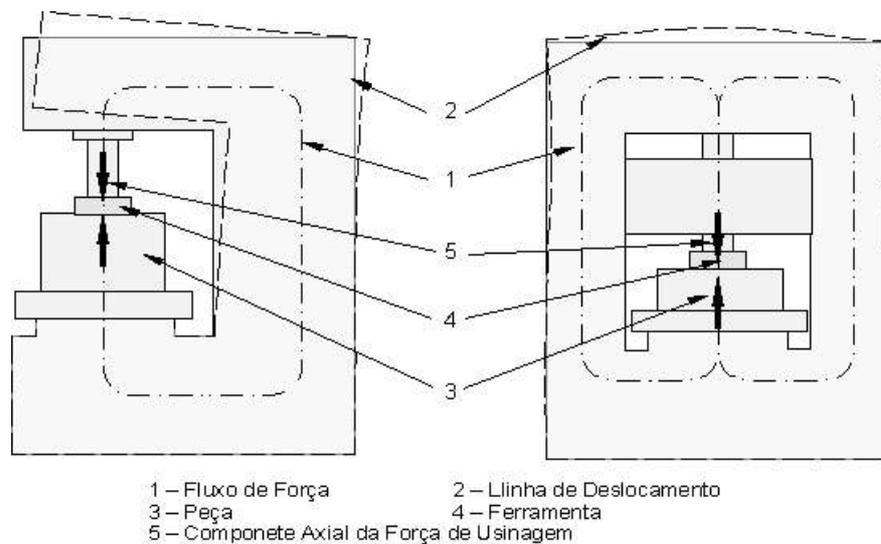


Figura 1.7 – Deformações em função do tipo de estrutura (Weck, 1997)

Uma avaliação analítica das características estáticas dos componentes da estrutura é possível quando sua geometria não for muito complexa, e quando os carregamentos são de flexão ou torção. No entanto o uso de modernas ferramentas de projeto, permitem que os sistemas CAD e de análise numérica troquem informações, possibilitam que análises mais complexas sejam realizadas. Neste caso a escolha da geometria da estrutura ficaria limitada somente pelos processos de fabricação, transporte e montagem.

O problema de rigidez estrutural pode ser minimizado com a escolha de uma geometria adequada para a estrutura. O desenvolvimento da configuração interna da estrutura deve ser feita tomando-se como base os conhecimentos de mecânica dos sólidos e resistência dos materiais. A tabela 1.3 e as figura 1.8 e 1.9 apresentam algumas considerações para a seleção da configuração geométrica mais apropriada. Valores para outras geometrias de perfil podem ser obtidos em livros de elementos de máquinas, resistência dos materiais ou mecânica dos sólidos.

Tabela 1.5 – Comparação entre perfis de seção aberta e fechada

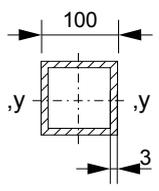
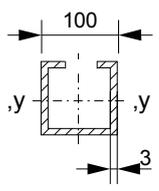
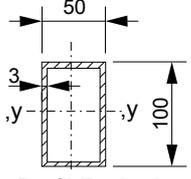
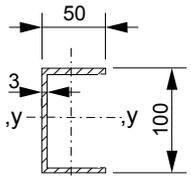
Perfil	Carga (kg/m)	I_{y-y} (cm ⁴)	W_{y-y} (cm ³)	I_t (cm ⁴)	W_t (cm ³)
 Perfil Fechado	9,1	183	36,5	274	56,5
 Perfil aberto	9,1	193	36,5	0,35	1,2

Tabela 1.5 – Comparação entre perfis de seção aberta e fechada (continuação)

Perfil	Carga (kg/m)	I_{y-y} (cm ⁴)	W_{y-y} (cm ³)	I_t (cm ⁴)	W_t (cm ³)
Perfil Fechado / Fechado	1:1	1:1	1:1	783:1	47:1
 Perfil Fechado	6,8	112	22,4	86,6	27,4
 Perfil Aberto	4,4	91,4	18,3	0,2	0,65
Perfil Fechado / Fechado	1,5:1	1,2:1	1,2:1	433:1	42:1

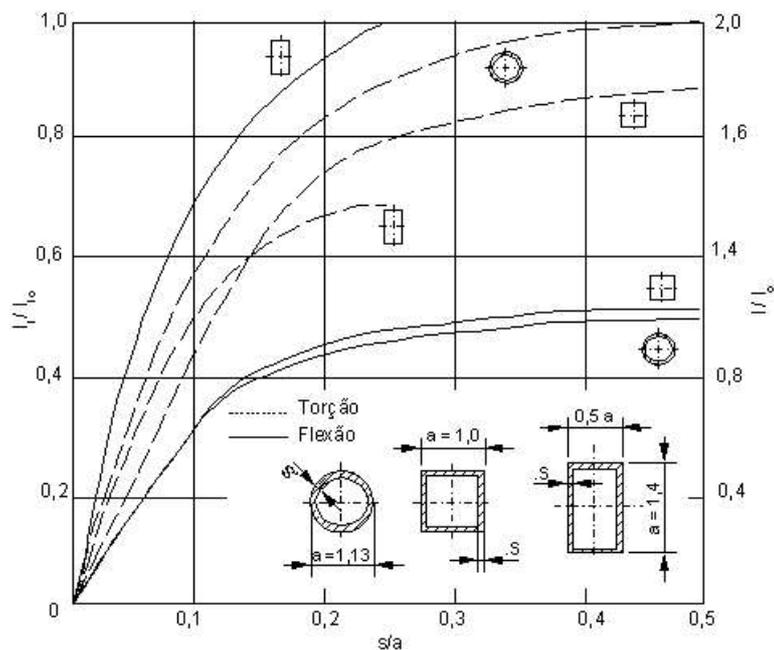


Figura 1.8 – Momento de inércia estrutural de Torção e Flexão para perfis circulares, quadrados e retangulares

onde: I_t = momento de inércia torcional do perfil qualquer
 I_{t0} = momento de inércia torcional do perfil de seção circular
 I = momento de inércia do perfil
 I_o = momento de inércia do perfil de seção circular

$$I_{t0} = \frac{\pi a^4}{32} \tag{1.09}$$

$$I_o = \frac{\pi a^4}{64} \tag{1.10}$$

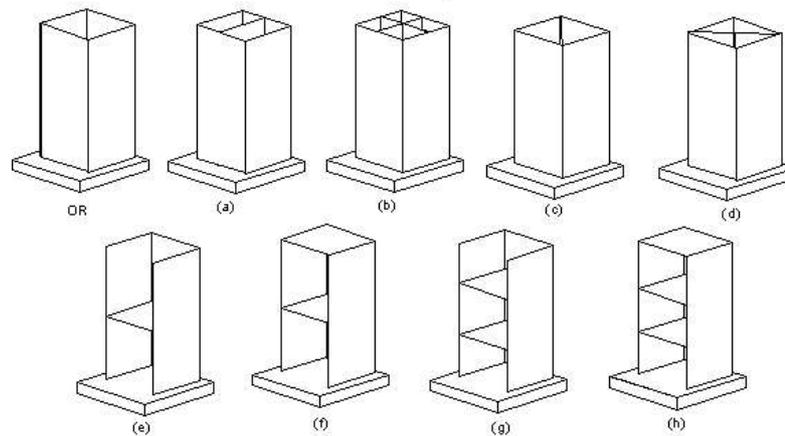


Figura 1.9 – Diferentes formas de reforços para o projeto de colunas de máquinas

Da mesma forma reforços podem ser adicionados a estrutura como forma de aumentas sua resistência a torção e flexão. No caso da aplicação de carregamentos torcionais , todas as formas de reforços que podem reduzir os graus de deformação da seção através do aumento da rigidez. Com excessão das placas finais reforços longitudinais e diagonais entram nessa categoria. Para colunas de máquinas as quais estão sujeitas simultaneamente a carregamentos de flexão e torção, reforços duplos na diagonal longitudinal com uma placa no final dão o melhor resultado.

A Tabela 1.6 apresenta as possíveis variações no projeto de estrutas longitudinais de máquinas-ferramentas.

Tabela 1.6 - Variações no projeto de estrutas longitudinais de máquinas-ferramentas

Diagonal Vertical				
Diagonal Vertical				
Horizontal				
Horizontal / Vertical				
Horizontal / Vertical				

1.2.2 Considerações Dinâmicas

Na utilização de máquinas-ferramentas geralmente são encontradas vibrações. Estas dão origem a ondulações na superfície usinada, conseqüência da variação da secção de usinagem, que gera variações na força de corte, as quais prejudicam a vida da ferramenta e da máquina (Koenigsberg e Tlusty, 1970; Rognitz, 1968; Weck, 1984).

O processo de vibrações auto excitadas na usinagem de metais é apresentado na figura 1.10, trata-se de um sistema fechado, dividido em duas partes fundamentais, o processo de usinagem e o sistema vibratório máquina, a esses somam-se também a mútua interação entre as duas partes.

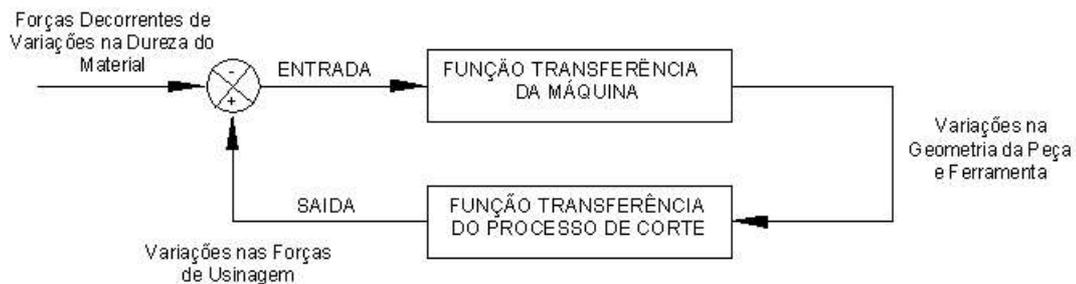


Figura 1.10 - Diagrama básico de vibrações (Koenigsberg e Tlusty, 1970)

Sob certas condições de usinagem, principalmente em operações com pequena largura de usinagem, como as encontradas em usinagem de ultraprecisão, não são admitidas vibrações e o processo é denominado de usinagem estável.

As vibrações encontradas durante o processo de usinagem convencional provem do sistema máquina, basicamente ruído de engrenagens, rolamentos, *stick-slip* em guias, suportes de ferramentas sub-dimensionados, ferramentas em demasiado balanço, etc.. Desta forma as vibrações provenientes do sistema máquinas influenciam diretamente as vibrações do processo, tais como o mecanismo de formação de cavaco, formação de gume postiço, separação de lamelas, dentre outros. Isto indica que a vibração entre a ferramenta e a peça influencia o processo de usinagem causando a variação da força de usinagem, a qual atua sobre o sistema de vibração da máquina, realimentando a vibração entre ferramenta e peça, o que geralmente leva ao colapso do processo (Koenigsberg e Tlusty, 1970).

Assim, podem ser considerados três grupos de parâmetros que influenciam a ocorrência de vibrações:

- a) aquelas provenientes do processo de usinagem,
- b) aquelas provenientes do sistema vibratório máquina e
- c) aquelas de orientação do processo de usinagem com relação ao sistema vibratório da máquina (Koenigsberg e Tlusty, 1970; Welbourn, 1970).

A essas somam-se ainda as vibrações provenientes do meio, transmitidas das fundações, aquelas oriundas de engrenamentos, entre outras. Como resultado, a escolha das condições de corte para uma operação de usinagem em particular, é freqüentemente limitada por diversos fatores. Sendo que a escolha da condição ótima relaciona-se com o acabamento superficial, a vida da ferramenta e ao desempenho da máquina. Para máquinas-ferramentas de projetos diferentes, as limitações para usinagem estável são diferentes (Stoeterau, 1996).

O processo de vibrações tem sido estudado com a intenção de primeiramente criar regras, de forma a escolher quais as condições de usinagem podem ser utilizadas, e secundariamente regras para o projeto de máquinas-ferramentas estáveis (Stoeterau, 1996).

Quando se tem por objetivo usinar componentes com rugosidade $R_t < 200$ nm (superfícies espelhadas) a soma de todas as amplitudes das vibrações do sistema deve ser inferior a este valor. Isto exige uma concepção diferente de máquina-ferramenta e do processo de usinagem. As fontes de ruído de máquina devem ser eliminadas, e as fontes do "processo" devem ser minimizadas.

A eliminação das fontes de vibrações provenientes da máquina-ferramenta se dá pelo despojamento desta de engrenagens, guias de escorregamento mal lubrificadas, mancais de rolamento, e ainda minimizando-se o comprimento em balanço das ferramentas, e dimensionando adequadamente o suporte da ferramenta de corte.

O ruído proveniente do "processo" pode ser minimizado através da diminuição da seção de usinagem, do atrito entre o flanco da ferramenta de corte e a peça de trabalho, bem como entre a face da ferramenta de corte e o cavaco, utilizando-se ferramentas com geometria adequada e corretamente afiadas. O material da peça deve apresentar um mecanismo de formação de cavaco contínuo para que garantir um processo de usinagem estável.

O problema da rigidez dinâmica pode ser em parte atenuado com a escolha dos materiais que formarão a estrutura, com uso de dissipadores de energia e isoladores de vibrações.

A estrutura de máquinas-ferramentas pode ser considerada como sendo um sistema vibratório com infinitos graus de liberdade. Isso ocorre como consequência de uma distribuição não uniforme de massas e variações na rigidez da estrutura. Algumas peças ou componentes representam massas e outras representam molas, alguns elementos ainda podem atuar como dissipadores de energia, ou seja, amortecedores.

Do ponto de vista prático deve-se considerar um número finito de graus de liberdade, e se concentrar nos primeiros modos de vibrações e nas freqüências mais baixas, pois são justamente esses que carregam mais energia, e amplitudes de vibrações. Maiores amplitude de deslocamento e energias são mais fáceis de serem controladas no projeto da estrutura.

Na análise de vibrações algumas simplificações podem ser assumidas, entre as quais:

- o sistema vibratório máquina é considerado linear, apesar de não o ser;
- As direções das forças de corte são constantes;
- A componente de força é dependente somente das vibrações na direção da normal da força de corte;
- Os valores da força de corte dinâmica varia proporcionalmente e instantaneamente com o deslocamento vibratório; e
- Não há relação entre a freqüência e as ondulações na superfície da peça, exceto quando se considerar usinagens no campo do sub-micrométrico.

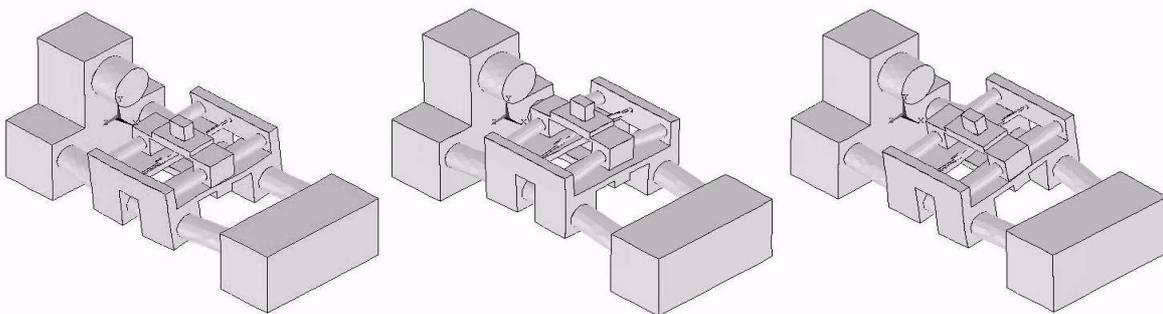


Figura 1.11 – Simulação dinâmica de uma máquina-ferramenta por FEM (Stoeterau,1999)

1.2.3 Formas de Análise de Rigidez em Máquinas-Ferramentas

A primeira forma de estimar a rigidez estática e dinâmica de uma máquina-ferramenta ainda na fase de detalhamento do projeto é através do método analítico, utilizando os recursos da mecânica dos sólidos e vibrações.

A validação dos resultados analíticos pode ser feito através de meios experimentais com a aplicação de forças simulando os carregamentos de usinagem medindo em vários pontos pré-determinados os deslocamentos produzidos. Por norma essas verificações devem ser feitas com a máquina em condições próximas as condições de trabalho, ou seja aquecida em com carregamento simulando uma peça de trabalho.

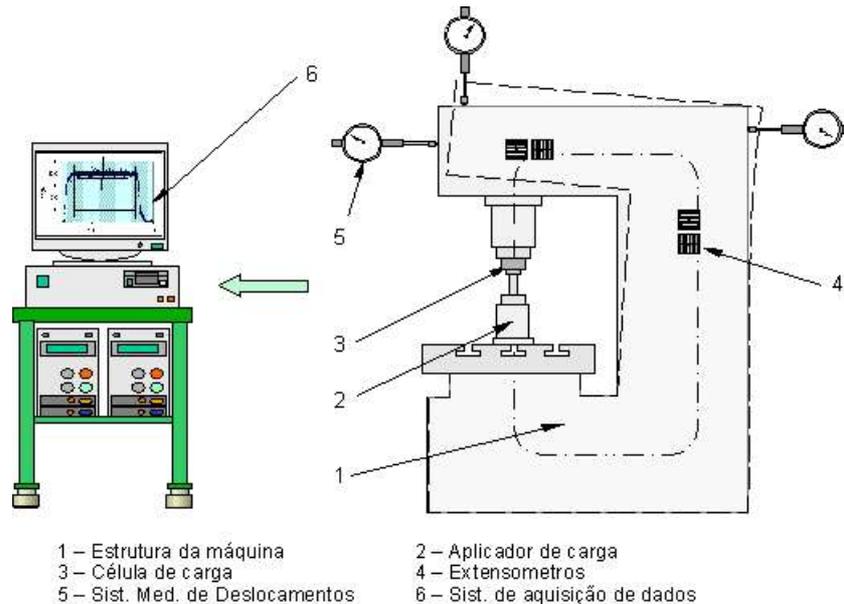


Figura 1.11 – Análise estática de estruturas de máquinas-ferramentas

Estaticamente a análise da rigidez pode ser feita por meio do uso de sistemas hidráulicos, células de cargas, relógios comparadores e extensômetros, ou outros transdutores de força e deslocamento. O uso desses transdutores e equipamentos requer um pouco de conhecimento de metrologia, integração de sistemas, aquisição de sinais e computação, além do conhecimento sobre os equipamentos específicos a serem utilizados. Essa pode ser feita pelo método impulsivo ou pelo método da excitação forçada, ambos provêm o mesmo resultado. Contudo, recomenda-se a utilização do método impulsivo somente para situações onde as inércias envolvidas sejam pequenas, pois o método dificilmente proveria a energia necessária para excitar a estrutura de uma máquina-ferramenta de forma adequada. Quando as massas a serem excitadas forem de grande monta a escolha do método de análise dinâmica deve cair para o método da excitação forçada, visto que a energia necessária deve ser propiciada por um excitador eletrodinâmico apropriado.

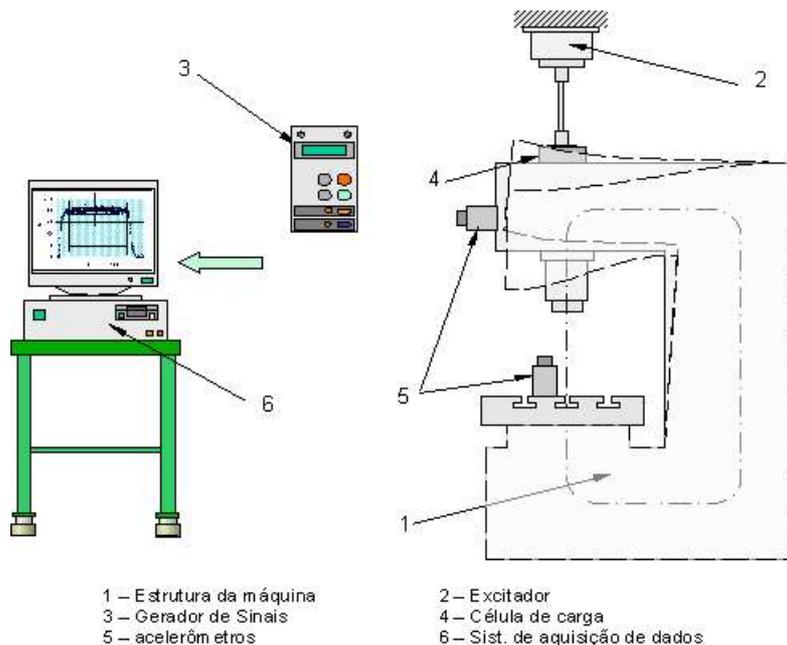


Figura 1.12 – Análise dinâmica de estruturas de máquinas-ferramentas

1.2 Materiais para Estrutura de Máquinas-Ferramentas

Segundo Kegg (1986), atualmente o projeto de máquinas-ferramentas está fortemente influenciado por duas grandes áreas:

- mudanças nos materiais usados pelos clientes externos em seus produtos;
- mudanças nos materiais utilizados na fabricação de máquinas-ferramentas.

A essas vêm a se somar à transformação das necessidades de precisão geométrica, dimensional e de qualidade superficial.

De uma forma geral, as estruturas de máquinas-ferramentas são fabricadas em ferro fundido e aço. Mais recentemente, com o desenvolvimento da ciência dos materiais, passou-se a utilizar produtos com baixo coeficiente de dilatação térmica como, por exemplo, o zerodur (cerâmica vítrea), aços especiais tais como o Invar^o, além de granitos sintéticos, concreto polimérico, cerâmicas, aços alta liga, entre outros materiais.

Máquinas-ferramentas destinadas à fabricação de precisão de maneira geral, como as destinadas a indústria óptica apresentam uma longa tradição no uso de estruturas de granito. Esta mesma experiência foi mais tarde utilizada nas máquinas destinadas à usinagem de ultraprecisão.

1.2.1 Ferro Fundido

O uso do ferro fundido em máquinas-ferramentas é largamente difundido, remontando aos séculos XVIII e XIX, sendo tomado praticamente como regra entre os fabricantes em todo o mundo. Sendo o material tradicionalmente utilizado na fabricação de componentes estruturais de máquinas-ferramentas.

Seu baixo custo aliado ao domínio das técnicas de fundição, seu peso, tornam sua trabalhabilidade tanto na fundição quanto em operações de usinagem posteriores, fazendo-o um material muito atrativo aos projetistas de máquinas. Em geral utilizam-se ferro-fundidos cinzentos, perlíticos do tipo A, com dureza próxima a 220 HB e resistência a tração de 25 kgf/mm². Contudo, deve-se garantir que a escolha do ferro-fundido permita que o mesmo possa sobre tratamento térmico, e apresentar pequenas quantidades de ferrita e cementita livre, para facilitar operações de usinagem posteriores (Tlusty, 1975).

A estabilidade do ferro fundido depende principalmente de um resfriamento uniforme e lento após o vazamento no molde, o que por sua vez depende da forma como o molde foi projetado. Como regra deve-se permitir que o resfriamento se dê por tempo suficiente antes de expô-lo à temperatura ambiente. Visto que tal procedimento permite que uma uniformização das propriedades e microestrutura, características muito mais importantes do que a resistência mecânica em σ_1 .

Para estruturas, colunas de mesas e guias cruzadas de máquinas-ferramentas, assim como para desempenos, padrões de perpendicularismos e de rasqueteamento (*scraping masters*), uma das maiores fabricantes de máquinas de precisão, a empresa Moore Tools, utiliza-se de ferro fundido de grãos finos, mantendo um controle de qualidade rigoroso no resfriamento lento dos moldes de fundição (Moore, 1989).

1.2.2 Aços

O uso do aço na fabricação de estruturas de máquinas-ferramentas foi uma consequência natural da evolução do processo de redução do ferro no fim do século XIX e começo do XX. Maudslay, no século XIX, foi o primeiro a reunir sobre um único projeto o uso de ferro, aço e bronze, como principais materiais em estruturas de máquinas (Spur, 1979).

Seu emprego se dá tanto na forma de aço fundido quanto de aços planos laminados soldados. Para aplicação em máquinas-ferramentas de ultraprecisão, é prática comum utilizar aços-liga ou alta liga para proporcionar maior estabilidade térmica, além de prover a base de tratamentos de envelhecimento para alívio de tensões provenientes do processo de fundição ou soldagem (Moore, 1989; Slocun, 1992). Como exemplo podemos citar o *Large Optics Diamond Turning Machine* do LLNL -EUA, cujas estruturas foram fabricadas em aço INVAR[®].

1.2.3 Materiais Cerâmicos

As cerâmicas na indústria podem ser divididas em dois grupos (Trib et al. 1994):

- Cerâmicas de engenharia, as quais podem ser óxidas ou não, tais como Al_2O_3 , ZrO_2 e SiC , Si_3N_4 ;
- Porcelanas (silicatos-cerâmicos) geralmente utilizadas em aplicações domésticas, na indústria de elétrica e química.

Em máquinas-ferramentas, os principais tipos de materiais cerâmicos utilizados são alumina (Al_2O_3), aluminas reforçadas e carbonetos de silício, além de materiais especiais, tais como zerodur, o que não descarta o uso de silicatos cerâmicos em máquinas.

Os materiais cerâmicos, independente do grupo a que pertençam, apresentam muitas vantagens em relação aos materiais tradicionais, tais como aço, alumínio e granito. As principais vantagens do uso de materiais cerâmicos como elementos estruturais em máquinas-ferramentas estão na alta rigidez, estabilidade dimensional e térmica, resistência ao desgaste e química. Por outro lado, suas principais desvantagens estão na dificuldade de usinagem, elevado custo e baixa capacidade de amortecimento. Estas desvantagens podem ser contornada, através do uso de amortecedores e dissipadores estruturais, aumentando os custos (Stoeterau, 1995; Slocun, 1992; Trib et al. 1994).

Schellschmidt (1994) e Slocum (1992) estendem o uso de cerâmicas não só à estrutura de máquinas mas também a outros elementos, tais como guias.

1.2.4 Concreto

O concreto é definido como um composto de areia, cascalho, pedra moída, ou outros agregados, unidos por uma massa pastosa de cimento e água. A mistura dos ingredientes, em proporções adequadas, forma uma massa plástica que pode ser fundida ou moldada em formas predeterminadas. Sendo que as principais propriedades do concreto são:

- **Trabalhabilidade** - É a capacidade do concreto de ser manipulado, transportado e depositado sem perda de suas propriedades físicas e mecânicas. Esta propriedade é dependente das proporções dos ingredientes e de suas características individuais.
- **Durabilidade** - Esta pode ser entendida como a capacidade de, em condições de serviços, resistir à ação do tempo, ação química e ao desgaste.
- **Resistência à ação do tempo** - A desintegração do concreto pela ação do tempo é causada principalmente pela fadiga resultante do congelamento e descongelamento e pela expansão e contração, sob restrições, resultante de exposição à água e variações de temperatura.
- **Resistência química** - A deterioração do concreto se deve em grande parte à reação química entre os alcali (elementos alcalinos, sais alcalinos, etc.) constituintes do cimento e os minerais componentes dos agregados do concreto.

O concreto como elemento estrutural em máquinas-ferramentas tem sido utilizado na Europa por alguns fabricantes de máquinas especiais, notadamente em estruturas e colunas. As vantagens do uso do concreto à base de cimento Portland, estão na abundante experiência acumulada por usuários e centros de pesquisa em todo o mundo, principalmente na engenharia civil, e em seu baixíssimo custo (de U\$ 60,00 a 80,00 /m³). O concreto como elemento estrutural em máquinas-ferramentas melhora sensivelmente a capacidade de amortecimento de vibrações (Stoeterau, 1995; Slocun, 1992; WIEKE et al., 1998; Sugishita et al., 1988; Rahman et al., 1987; Pazmandy, 19--).

1.2.5 Granito

O uso de granito como material para estrutura de máquinas-ferramentas teve origem nas máquinas ópticas. Em função do percentual de seus constituintes, o granito apresenta diversas denominações geralmente relacionadas com a cor predominante, como por exemplo granito preto, granito rosa, dentre outras.

A composição do granito aliada ao tamanho de grão determinam a qualidade do granito natural. A grande vantagem da utilização de granito natural está na estabilidade dimensional (térmica) e dinâmica, e na inexistência de tensões internas (Stoeterau, 1995).

Composição do granito:

- quartzo (duro, brilhante, com fratura em concha);
- feldspato orthoclase (comumente rosado, sem estrias, com faces regulares);
- feldspato plagioclase (comumente branco, ou quase, com boas faces de clivagem, que são freqüentemente estriadas);
- anfíbólio e/ou biotita.

O granito natural tem se mostrado um material alternativo ao ferro fundido e ao aço. Suas principais vantagens são (Knoll et al., 19--):

- elevado módulo de elasticidade;
- baixa densidade;
- estabilidade de longa vida;
- baixo coeficiente de dilatação térmica;
- permite alto grau de acabamento superficial;
- estabilidade química.

Outras vantagens podem ser listadas quanto ao uso de granito em máquinas-ferramentas (Knoll et al., 19--):

- permite o uso da concepção de máquinas modulares;
- não necessita de moldes;
- não necessita de pinturas protetivas;
- visualmente agradável quando apresenta superfície polida;
- fácil de limpar e manter.

1.2.6 Granitos Sintéticos e Concretos Poliméricos

Granito sintético ou concreto polimérico é um compósito que normalmente consiste de uma proporção escolhida com exatidão entre o material de enchimento e o ligante. Em engenharia mecânica usa-se principalmente silicato ou granito como material de enchimento, com diâmetro médio de até 8 mm. A proporção entre ligante (resina epoxi) e material de enchimento (SiO_2) é usualmente de 10% e 90% (dependendo da aplicação e do comportamento requerido do dispositivo, estas taxas podem variar). A mistura destes elementos resulta em uma substância que, colocada em moldes, passa por um processo de cura – uma reação química que causa um pequeno aquecimento. Antes do início do processo de cura, os moldes já cheios são posicionados em um equipamento vibratório para que haja uma maior compactação do material. Após aproximadamente 24 horas é obtida uma resistência à compressão de 130 MPa. Suas vantagens frente ao granito natural estão na melhoria da capacidade de amortecimento e na facilidade para obtenção de formas. No entanto, não é simples conseguir um elevado grau de empacotamento, durante a fabricação deste material.

Dependendo da qualidade e da quantidade de peças requeridas, são usados moldes em aço ou madeira, os quais devem ser preparados com um agente desmoldante. Se for necessário que combinem aço ou ferro com concreto polimérico, as partes metálicas podem ser fixadas aos elementos deste durante a fundição ou por meio de uma operação de ligação posterior (König, 1991; Stoeterau, 1995; Slocun, 1992; Wieke, 1998; NN-1).

1.2.7 Outros Materiais

Uma série de outros materiais podem ser utilizados na fabricação de máquinas ferramentas

TABELA 1.1 - CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS MATERIAIS UTILIZADOS em máquinas-ferramentas

MATERIAL	ν	E (GPa)	ρ (mg/m ³)	a (mm/m/°C)	K (W/m/°C)	C _p (J/kg/°C)	σ (MPa)		
							Comp.	Tração	Flexão
AÇO CARBONO	0,29	200	7,9	11,7	60	465	---	270	---
AÇO INOX (18-8)	0,31	190	7,6	17,2	16,2	500	---	310	---
ALUMÍNIO (6061)	0,33	68	2,7	23,6	167	896	---	255	---
BRONZE (C24.000)	0,34	111	8,0	19,9	120	375	---	125	---
FERRO FUNDIDO	0,21	100	7,1	11	52	420	---	270	---
GRANITO	0,10	19	2,6	6	1,6	820	300	---	20
LATÃO (C26.000)	0,32	106	8,4	17,1	355	415	---	275	---
METAL DURO	---	550	14,5	5,1	108	---	5000	---	2200
POLÍMEROS	VÁRIOS TIPOS PODEM SER UTILIZADOS								

1.2.8 Fabricação de Estruturas de Máquinas-Ferramentas

A fabricação de estruturas de máquinas-ferramentas é uma função direta do material a ser utilizado. Materiais como ferro fundido, aço, cerâmicos, granitos sintéticos e concreto, de forma geral, são fundidos em moldes apropriados.

Ferro fundido e aço geralmente são vazados em moldes de areia (Dieter, 1987), ao passo que o concreto pode ser fundido em moldes de madeira ou metálicos. Materiais do tipo cerâmicos ou granitos sintéticos também podem ser vazados em moldes de madeira, gesso, metálicos ou em diversos tipos de materiais poliméricos (ex.: borracha de silicone). Em todos os processos onde haja vazamento em moldes, deve-se tomar cuidado quanto ao resfriamento ou cura. Este cuidado permite fabricar uma estrutura isenta de bolhas, trincas ou porosidade excessiva. A eliminação de bolhas ou outras falhas que possam resultar em concentrações de tensões internas, má aglutinação, propriedades não uniformes e deformações residuais posteriores deve ser prevista antes do processo de fundição. A principal diferença entre a utilização de ferro fundido, aço e concreto em relação aos materiais cerâmicos e granitos sintéticos, está na necessidade dos últimos de terem uma preparação mais elaborada, com uma seleção prévia dos tamanhos de grãos constituintes do pó, adição de aglutinantes, fundição e compactação para posterior aplicação de pressão ou tratamento térmico.

O processo de fundição pode ser realizado de modo que a estrutura seja sólida ou provida de cavidades que permitam o aumento da rigidez estrutural, passagem de tubos e fixações para outros elementos da máquina, além de possibilitar a dissipação de calor e vibrações.

As estruturas de granito são fabricadas por processo de usinagem integral, através da usinagem com serras ou fios diamantados diretamente na pedra em bruto, para posterior ajustagem por retificação e lapidação (Stoeterau, 1995). Outra forma de fabricação de estruturas de granito é a fabricação modular. Nesta, os diversos blocos em que a estrutura é dividida são fabricados em separado, com os mesmos sendo posteriormente unidos por meio de parafusos ou adesivos especiais.

Quando da utilização de aço laminado em chapas, a estrutura é obtida por meio de uniões soldadas a partir de partes previamente recortadas. As estruturas assim obtidas apresentam boas características de amortecimento e rigidez (Weck, 1992).

1.2.9 Seleção de Materiais para Estrutura de Máquinas-Ferramentas

A seleção de uma estrutura, engloba não só seu arranjo e material, mas também suas dimensões, forma de sustentação, facilidade transporte e manipulação, experiências anteriores, etc..

As informações proporcionadas neste item, em especial pelos dados da matriz de comparação (tabela 2.9), permitem a seleção um arranjo simples em granito, sem levar em conta as dimensões e a forma de sustentação, pois estes pontos serão abordados na fase de dimensionamento da estrutura. A opção por uma estrutura simples em granito foi realizada em função da relação custo-benefício, das características do granito, das limitações para fabricação e manipulação de outras formas e materiais. Outro ponto relevante na escolha de estrutura simples em granito foi a experiência acumulada pelo grupo com desenvolvimentos anteriores, os quais se utilizaram desta configuração

CAPÍTULO - 2

ÁRVORES DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

A denominação árvore de máquina serve para caracterizar o conjunto de elementos responsáveis por prover movimento rotativo a peça ou à ferramenta. As árvores são elementos complexos que necessitam de um projeto apurado e um dimensionamento correto, pois grande parte de todos os esforços gerados no processo de usinagem são absorvidos por seus mancais, principalmente naquelas onde se empregam ferramentas de geometria definida. A esse requisito somam-se as necessidades de se ter uma exatidão de giro elevada, e uma estabilidade dinâmica apropriada. Atualmente, as modernas máquinas-ferramentas de comando numérico são dotadas de uma ou mais árvores principais, podendo ainda contar com o recurso de ferramentas ativas, as quais nada mais são do que que são árvores secundárias montadas no porta-ferramentas. O uso de ferramentas ativas combinado com a possibilidade de realização de posicionamento angular controlado na árvore principal, levou a essas máquinas a realizarem operações de torneamento e fresamento combinados, permitindo tanto a geração de peças de revolução complexas, quanto peças prismáticas, o que adiciona importância ao requisito de precisão de posicionamento da árvore.

2.1 Especificações para Árvores de Máquina-Ferramentas

O desenvolvimento de todos e qualquer projeto sempre é acompanhado de especificações, não sendo diferente no caso de árvores para máquinas-ferramentas. Para essas, os principais requisitos, ou especificações são:

- Potência na árvore, essa deve ser o suficiente tanto na condição de pico quando a nominal, e deve estar disponível de forma contínua;
- Máxima capacidade de carga radial e axial;
- Máxima velocidade, de preferência de forma contínua;
- Tipo, forma e dimensões do sistemas de fixação;
- Transmissão da potência e velocidade: por meio de correia ou motor integrado;
- Precisão de giro;
- Rigidez estática;
- Comportamento dinâmico com ou sem carga; e estabilidade térmica.

Apesar desses critérios parecerem óbvios para o projeto de árvores de máquinas-ferramentas, eles apresentam uma necessidade de serem otimizados, e como consequência representam dificuldades no projeto. Como forma de se obter o melhor projeto, pode-se observar que muitos dos critérios acima apresentados são contraditórios, e eventualmente durante o desenvolvimento do projeto deverão ser alcançadas soluções de compromisso.

A máquina-ferramenta em si também apresentará requisitos restritivos ao desenvolvimento de árvores, algumas de ordem técnica, tais como o espaço disponível para montagem, o curso a ser movimentado, as condições de montagem e ajustagem, a complexidade técnica, inércias a serem movidas, entre outras. Também existem requisitos de caráter mais subjetivo, tais como as demandas de mercado, o *design*, a ergonomia e o custo.

O custo, um dos mais importantes requisitos em qualquer desenvolvimento, demanda considerações mais complexas, afetadas por inúmeros fatores que diretamente atuam no projeto final de uma árvore. Como exemplo, podemos citar a precisão de giro, a qual é afetada diretamente pela qualidade dos mancais, os quais tem um aumento de custo exponencial com a melhora da classe de precisão. O mesmo acontece com uma eventual mudança com relação ao tipo de mancal a ser empregado, mancais de elementos rolantes tem um custo muito inferior quando comparados com o dos mancais hidrodinâmicos/ hidrostáticos, aerostáticos ou magnéticos, contudo, dificilmente os mancais de rolamentos conseguem atingir a precisão de giro, a suavidade de movimentação e a velocidade de giro de alguns dos anteriores.

Árvores muito sofisticadas, capazes de atender a todos os requisitos impostos a elas, não seriam aceitas em máquinas-ferramentas de baixo custo, tanto por razões puramente psicológicas, quanto de mercado, ou seja, custo. Nessa situação pode ocorrer o comprometimento dos ganhos reais, passíveis de serem obtidos pela montagem de uma árvore sofisticada, em função dos outros sistemas constituintes da máquina-ferramenta. Desta forma, somente o desenvolvimento de máquinas-ferramentas modernas pode justificar os altos custos associados ao projeto de árvore mais complexas e capazes. Assim, a capacidade de remoção de uma máquina-ferramenta, exatidão de giro, e nível de vibrações, podem ser transcritos sob a forma de produtividade e qualidade da peça fabricada, critérios que são diretamente associadas a qualidade da árvore.

2.2 Classificação das Árvores de Máquinas-Ferramentas

A classificação usual divide as árvores de acordo com sua capacidade de absorver os esforços gerados no processo de usinagem. Essa classificação se ajusta muito bem quando consideramos somente o torneamento convencional, não abrangendo as árvores para fresamento, retificação, furação, etc.. Mesmo considerando somente a condição de torneamento, os avanços da tecnologia ocorridos nos últimos 30 anos, tem levado a introdução do conceito da árvores para trabalhos de precisão e de alta velocidade. Podendo as árvores serem classificadas quanto:

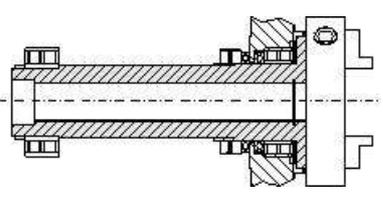
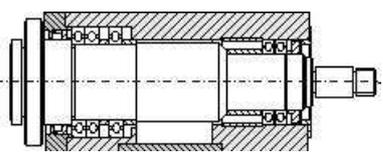
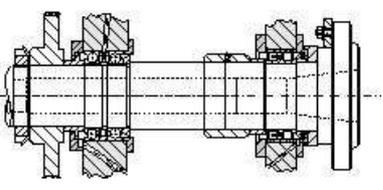
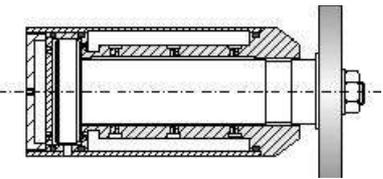
- ao tipo de esforços a que estarão submetidas:
 - Árvores para trabalho pesado;
 - Árvores para trabalhos médios;
 - Árvores para trabalhos leves.
- ao precisão de trabalho
 - Árvores de precisão normal;
 - Árvores de precisão;
 - Árvores de ultraprecisão.
- Quanto a velocidade de trabalho:
 - Árvores de baixa velocidade (0 a 2000 rpm);
 - Árvores de média velocidade (2000 a 10.000 rpm)
 - Árvores de alta velocidade (acima de 10.000 rpm)
- Quanto aos esforços na operação:
 - Árvores para esforços predominantemente axiais;
 - Árvores para esforços predominantemente radiais
 - Árvores para esforços axiais / radiais;
 - Árvores para esforços intermitentes ou cíclicos.

Essa classificação define tanto o tipo de mancais que podem ser empregados, quanto o arranjo que esses podem assumir. A escolha do tipo de mancal a ser empregado depende não só da capacidade de carga que esse terá de suportar, mas também do tipo e das direções dos esforços principais, das velocidades a serem empregadas, da exatidão de giro requerida, da suavidade do movimento, do torque a que será submetida, do calor gerado durante a operação e conseqüentemente do tipo de refrigeração, da forma do acionamento, entre outros.

Dentro do conceito de árvores para trabalhos de precisão, onde os esforços gerados são relativamente muito menores, os requisitos de rigidez, suavidade de movimento e precisão de giro são predominantes sobre a capacidade de carga. Esse tipo de árvore leva a soluções de projeto bem diferentes das que se apresentam, quando se considera o processo convencional de torneamento. Ainda dentro do conceito de árvores de precisão, estão incluídos não só aquelas destinadas aos trabalhos de alta-precisão e ultraprecisão, mas também aquelas destinadas ao uso em retificação, ou outros processo de acabamento com ferramentas de geometria não definida.

O conceito de árvores de alta velocidade, onde os esforços de usinagem em teoria são menores do que os gerados nas condições convencionais, os fatores rigidez e balanceamento são mais críticos do que, novamente, o fator de capacidade de carga. Contudo, convém lembrar que no caso de árvores para aplicações em HSC/HSM as potências disponíveis são muito maiores. A tabela 2.1 apresenta os principais tipos de árvores de máquinas-ferramentas, seus principais esforços e requisitos.

Tabela 2.1 – Requisitos para os principais tipos de árvores de máquinas-ferramentas

Aplicação	Esforços principais		Requisitos		
	direção	intensidade	capacidade de carga	velocidade	rigidez
Torneamento 	Y ↑ Z →	alta	alta	baixa (até 2.000 rpm) média (≈ 6.000 rpm) alta (< de 8.000 rpm)	alta
Furação 	Z →	média	média/baixa	baixa (até 800 rpm) média (≈ 2.000 rpm) alta (< de 5.000 rpm)	alta
Fresamento 	Y ↑ Z →	alta	alta/média	baixa (até 1.500 rpm) média (≈ 8.000 rpm) alta (< de 8.000 rpm)	alta
Retificação 	X ↑ Y →	baixa	baixa	baixa (até 5.000 rpm) média (≈ 20.000 rpm) alta (< de 50.000 rpm)	Muito alta

2.3 Principais componentes para o projeto de árvores de máquinas-ferramentas

Os principais componentes necessários ao desenvolvimento de uma árvore de máquina-ferramenta, seja essa de alta velocidade ou não, são:

- Forma de acionamento: por elementos de transmissão ou integrado a árvore
- Tipo de acionamento da árvore: tipo de correia (plana, em V, dentada, etc.), do motor a ser integrado (assíncrono, CC com ou sem escovas, turbina, etc.), capacidade, dimensões, potência, torque, velocidades
- Mancais: tipo, qualidade, montagem e forma de lubrificação
- Eixo da árvore, incluindo o sistema de fixação da ferramenta ou da peça
- Geometria da árvore; tipo, montagem, capacidade, forma de montagem, fixação e ajustagem

Os cinco aspectos relacionados acima serão abordados de maneira a comparar vantagens e desvantagens de diferentes soluções de projeto, não se atendo ao aspecto específico de dimensionamento. Esses aspectos relacionados ao dimensionamento, podem ser encontrados na literatura sobre elementos de máquinas, em catálogos de fabricantes, como no caso de mancais de rolamento. Tópicos como correias, acionamentos, sistema de fixação da ferramenta ou peça, serão tratados de forma mais específicas nos capítulos subseqüentes.

2.4 Rigidez

As árvores de máquinas-ferramentas devem ser projetadas tendo como requisito principal a obtenção da máxima rigidez possível, independente do tipo de mancal a ser utilizado em sua concepção. Como na maioria das aplicações as árvores são dotadas de mancais de elementos rolantes, recomenda-se, assim, que esses tenham o maior tamanho possível, dentro das restrições de dimensões impostas pela máquina em si. Entretanto a seleção não deve comprometer os requisitos de velocidade, aceleração e vida útil, sendo que esses devem ser sobredimensionados quanto a relação entre carga/vida útil.

De modo geral, a intensidade e direção das forças geradas nos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, e/ou a carga máxima estimada para as peças, no caso do torneamento e as características de precisão exigidas nas peças a serem fabricadas, determinam a escolha do tipo de mancais a serem utilizados. Mancais de elementos rolantes proporcionam uma rigidez muito boa, a qual pode ser otimizada com pré-tensionamento adequado. Mancais de elementos cerâmicos apresentam maior rigidez do que os de elementos metálicos e possibilitam a operação em velocidades muito maiores, ao passo que mancais a filme fluido tem sua rigidez associada a um projeto e fabricação cuidadosos. Mancais magnéticos permitem a obtenção de rigidez infinita, principalmente pela ação da malha de controle sobre os campos magnéticos de sustentação do mancal, o que possibilita compensação em tempo real dos deslocamentos provocados pela variação das forças sobre a ferramenta.

As árvores de máquinas-ferramentas atuam como um sistema de viga bi-apoiada, sob o ponto de vista estático, e como um conjunto massa mola amortecedor para representar a condição dinâmica, conforme a figura 2.1. Essas simplificações permitem que considerações estáticas e dinâmicas sejam feitas ainda na fase de projeto preliminar.

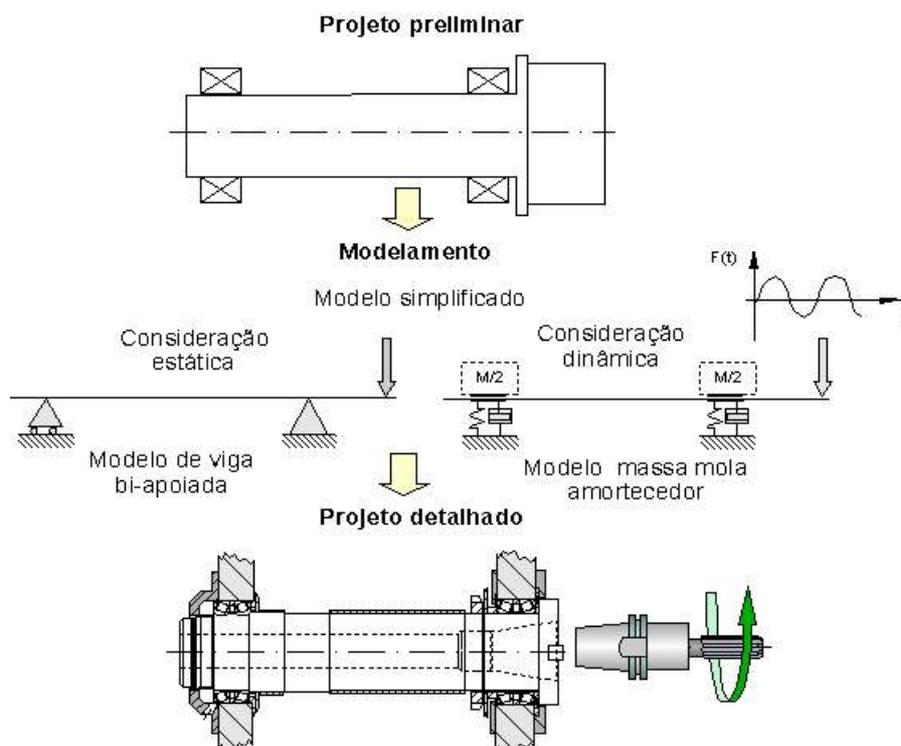


Figura 2.1 – Considerações sobre o projeto de árvores de máquinas-ferramentas

As simplificações apresentadas na figura 2.1 são válidas para a análise teórica de árvores de máquinas, independente da aplicação a que se destinam. Dessa forma, a figura 2.1 representa tanto uma condição de torneamento em balanço, quanto a de um fresamento, de forma a não condicionar a análise do projeto de árvores de máquina aquelas destinadas ao torneamento.

Uma melhor compreensão da influência das dimensões de projeto, de uma árvores de máquinas-ferramentas, sobre o desempenho da mesma, pode ser feita através do conceito de Largura Máxima de Corte (b_{max}). O valor de b_{max} representa a máxima largura de usinagem que uma árvore pode suportar durante uma torneamento transversal com um bedame, operando sob as mesmas condições de velocidade de corte, material de peça e ferramenta, avanço, e dimensões máxima da peça sem que haja vibração. A figura 2.2 apresenta três árvores de configurações distintas onde são apresentadas os valores obtidos para b_{max} .

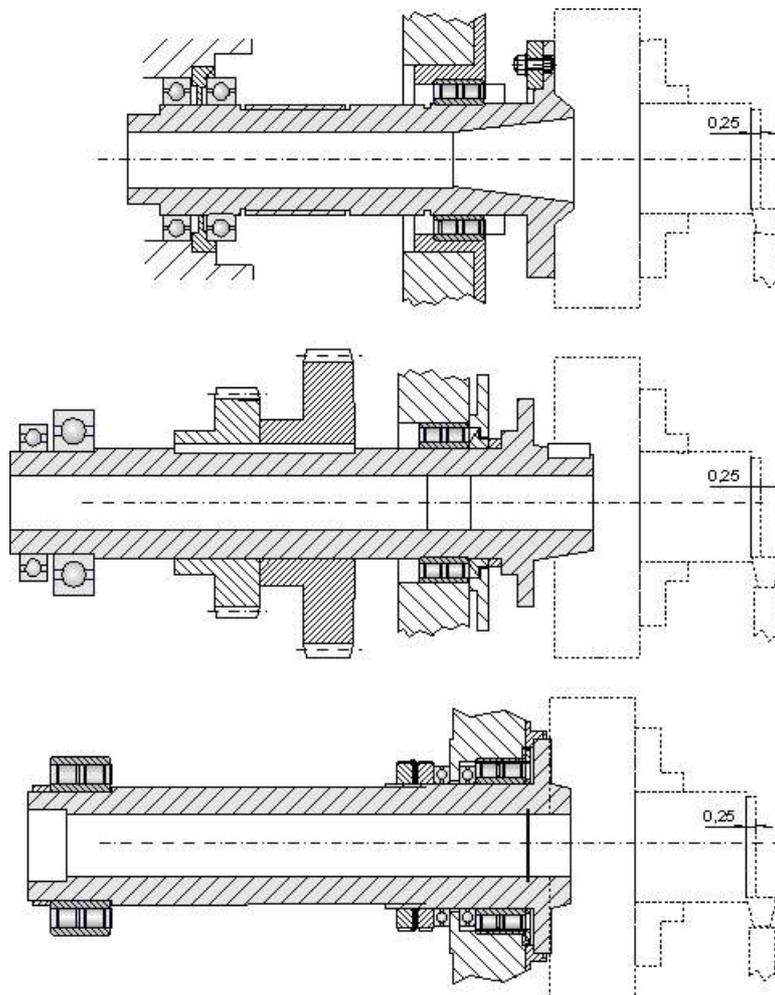


Figura 2.2 - Valores obtidos para b_{max} para três árvores de configurações distintas.

2.5 Considerações sobre árvores dotadas de mancais de elementos rolantes

Os mancais para árvores de máquinas-ferramentas podem ser configurados seguindo-se a recomendação europeia ou americana. O uso da denominação Europeu (EU) ou Americano (AM) pode ser justificada pelo fato de que uma boa parte dos fabricantes estão localizados em ambos os continentes, conforme visto no capítulo 1. A recomendação europeia utiliza-se da montagem de rolamentos duplos de roletes cilíndricos ou rolamentos de contato angular, na extremidade próxima ao sistemas de fixação da peça ou ferramenta, conforme a figura 2.3a. A recomendação americana utiliza rolamentos de rolos cônicos, conforme a figura 2.3b. Na prática ambos os sistemas se assemelham em termos de desempenho, capacidade de carga e rigidez, sendo que as únicas diferenças sendo provavelmente observadas no aspecto amortecimento e limite de velocidade.

Para todos os tipos de construção é recomendado o uso de rolamentos das séries mais leves, ou seja aqueles que para um mesmo diâmetro interno tenham os menores diâmetros externo e largura. A recomendação do uso de séries mais leves se explica pela menor inércia, e o menor número de elementos rolantes e conseqüentemente menor resistência ao movimento.

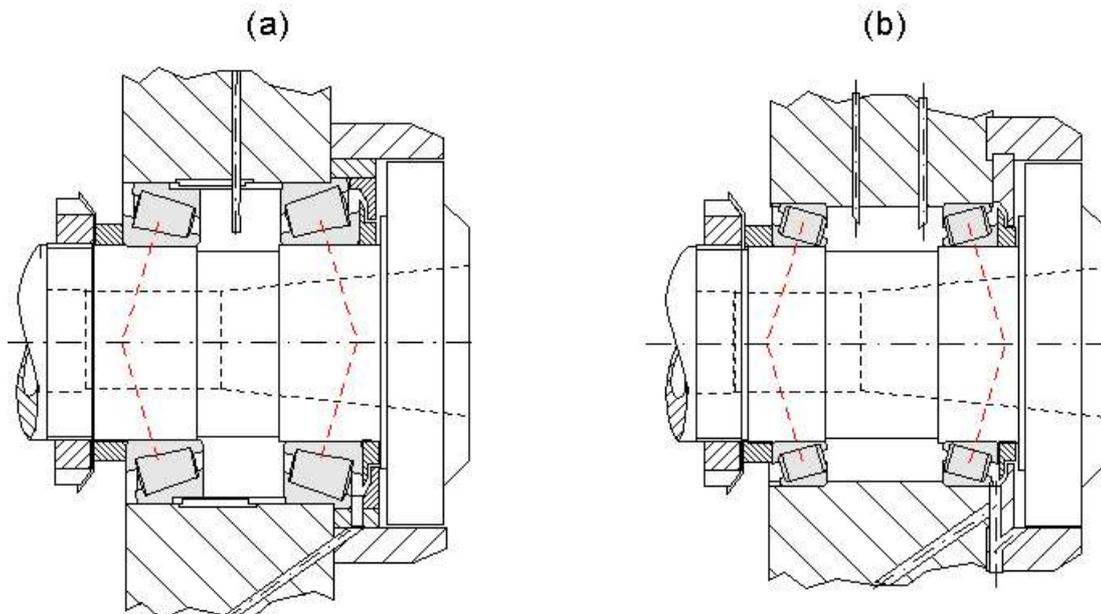


Figura 2.3 – Configuração de mancais segundo as recomendações AM e EU

2.5.1 Determinação da distância ótima entre os rolamentos

A distância ótima entre rolamentos é determinada em função da rigidez na extremidade da árvore, levando em consideração todas as variações de esforços que essa extremidade pode sofrer durante o processo de usinagem, e as conseqüentes deformações induzidas nos mancais. A determinação da distância ótima inicia-se definindo-se um diâmetro para o mancal na extremidade A (d_A), próxima a sistema de fixação da peça ou ferramenta, conforme a figura 2.4. Apesar da figura apresentar uma situação típica para o torneamento, todas as considerações aqui aplicadas são válidas para os demais processos, a mais de considerações específicas que os mesmos possam exigir.

A aplicação das equações características da mecânica dos sólidos na situação apresentada na figura 2.4 não é de todo um trabalho complexo, apesar dos carregamentos serem variáveis em função das forças de usinagem, peso próprio da peça, o qual varia com a remoção de material, todos esses parâmetros podem ser estimados empiricamente pelas equações de força e momento característico de cada processo, ou mesmo por valores experimentais. Esses valores de forças e momentos quando devidamente aplicados na posição 0, permitem que sejam calculados os deslocamentos v_y e v_x na extremidade da árvore em função das características geométricas do eixo (d_a , d_b , d_i , d_n), pois os deslocamentos v_x e v_y são função dos momentos de inércias, e da rigidez transversal e torcional das seções do mesmo.

A atual disponibilidade de programas de análise estrutural para computadores pessoais, baseados em elementos finitos ou similares, permitem que essa análise seja feita em modelos de vigas simples. Essas análises permitem não só a obtenção dos deslocamentos, mas também a seleção de rolamentos, otimização das seções do eixo, e até mesmo a análise dinâmica do eixo em rotação, com um grau de detalhamento e precisão não possíveis de se alcançar em cálculos manuais.

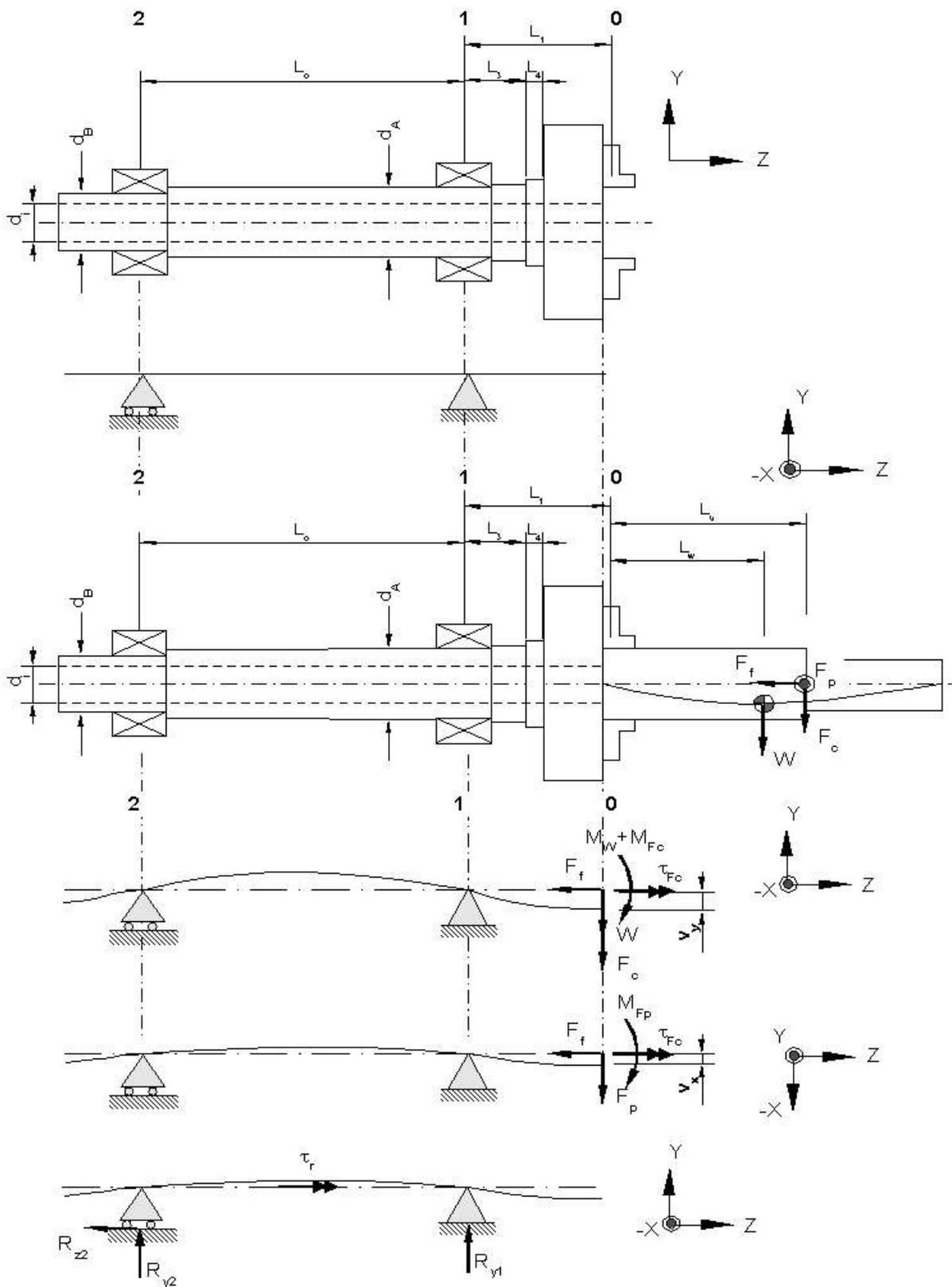


Figura 2.4 – Exemplo dos esforços e reações para uma árvore de tornos

Com base nas figura 2.4 temos:

F_c = força de corte

F_f = força de avanço

F_p = força passiva

M_w = momento gerado pela força força peso, varia em função da quantidade de material removido e deslocamento do centro de gravidade.

M_{fc} = momento gerado pela força força de corte, varia em função de L_u

M_{fp} = momento gerado pela força força passiva, varia em função de L_u

τ_{Fc} = torque gerado pela força de corte, varia em função do diâmetro torneado.

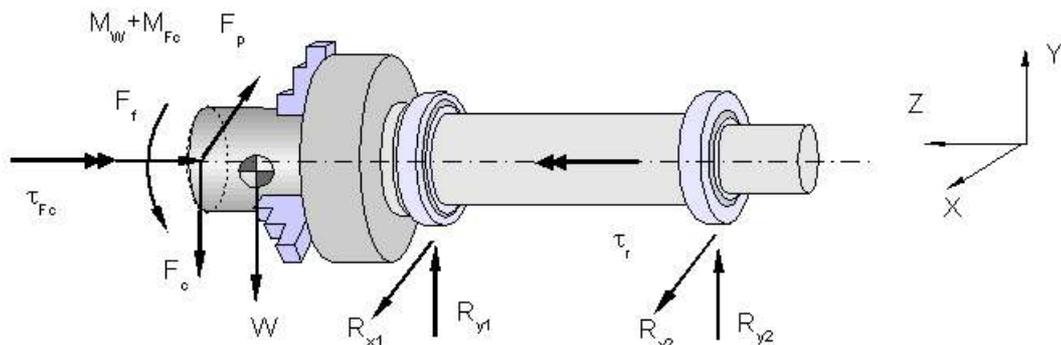


Figura 2.5 – Esforços e reações sobre os mancais de uma árvore para torneamento

Do mesmo modo as reações para o processo de furação podem ser observadas na figura 2.6. Nesta observa-se que as direções principais das reações sobre os mancais estão no sentido axial (eixo Z), o que determina a mudança do tipo de mancais. Árvores de múltiplo emprego que permitem operações as mais diversas possíveis, tais como fresamento, furação, mandrilamento e torneamento necessitam de cuidados extra na determinação do tipo e amplitude dos esforços, bem como as reações que esses produzem. Da mesma forma as árvores de múltiplo emprego devem ter um sistemas de mancais adequados a absorver os mais variados esforços, nas mais variadas direções.

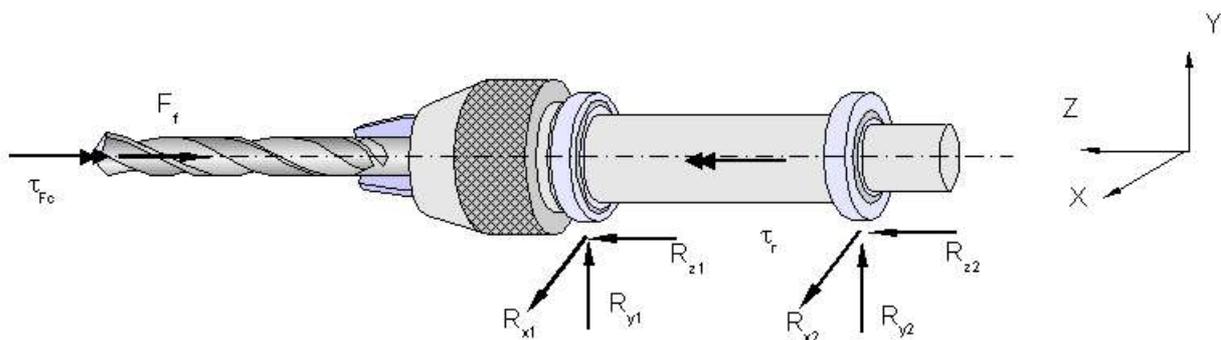


Figura 2.6 – Esforços e reações sobre os mancais em uma árvore de furadeira

Apesar das considerações apresentadas acima serem para a determinação da distância ótima entre mancais de rolamento, as mesmas podem ser aplicadas aos outros tipos de mancais utilizados em árvores. Essa extensão deve ser cuidadosa, deve considerar as características de rigidez e capacidade típica de serem aplicadas a cada mancal. Mancais de um mesmo tipo, como os de rolamento, tem características diferentes para configurações diferentes.

2.6 Considerações sobre árvores dotadas de mancais a filme fluido

Árvores dotadas deste tipo de mancais apresentam exigências de exatidão giro e suavidade de movimento muito maiores do que aquelas encontradas em árvores dotadas de mancais. Por não terem o mesmo grau de padronização do que o encontrado nos mancais de elementos rolantes, os mancais a filme fluido têm um projeto específico para cada aplicação, sendo que em geral o maior limitante é o espaço disponível para instalação, e a necessidade de equipamentos para armazenamento, bombeamento, recolhimento, resfriamento e filtragem do fluido. A figura 2.5 apresenta exemplos de árvores de máquinas com mancais a filme fluido, onde é possível se observar alguns diferentes arranjos e tipos de configurações de mancais, capazes de absorverem carregamentos axiais, radiais e combinados.

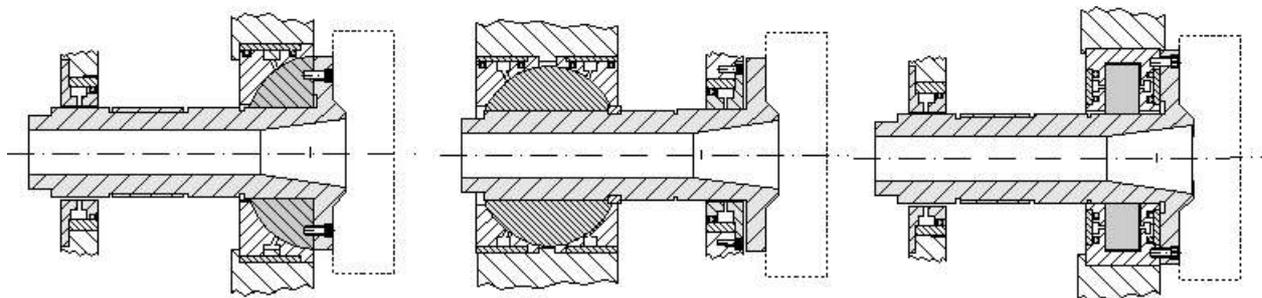


Figura 2.5 – Exemplos de árvores com mancais a filme fluido

2.7 Seleção do tipo de árvore de máquina

A seleção do tipo de árvore de máquina mais adequado depende de uma série de fatores, sendo que a primeira consideração a ser feita diz respeito ao tipo de processo usinagem em que a mesma será utilizada. Árvores para furadeiras precisam de elevada exatidão de giro, e maior capacidade de absorção de esforços axiais do que radiais. Árvores para fresadoras deve levar em conta a necessidade de absorção de choques dinâmicos, característicos do processo. Retificadoras devem proporcionar em suas árvores elevada exatidão de giro, nível de vibrações muito baixos, além de velocidades de rotação muito elevadas.

A essas considerações básica para a seleção da árvore mais adequada, devem ser somadas as especificações de projeto e o tipo de emprego em que serão utilizadas. As tabelas 2.1 a 2.3 apresentam recomendações para seleção de mancais em função dos esforços nos principais processos de usinagem, e orientação para a seleção de mancais.

Tabela 2.1 – Recomendações para escolha de mancais para árvores

Processo	Esforços principais			Tipos de mancais			
	Z	X	Y	Escorregamento	Rolamento	Filme Fluido	Magnético
Torneamento	X	X			XXX	XX	X
Furação	X			X	XXX	XX	
Fresamento		X	X		XX	X	XXX
Retificação		X	X		X	XXX	

Onde: X – recomendado com restrição
 XX – recomendado
 XXX – altamente recomendado

Tabela 2.2 – Comparação entre os tipos de mancais para árvores de máquinas-ferramentas

	<i>mancais de rolamento</i>	<i>hidrodinâmicos</i>	<i>hidrostáticos</i>	<i>aerostáticos</i>	<i>magnéticos</i>
Velocidade	XXX	XXX	XXX	XXXX	XXXX
Durabilidade	XXX	XXX	XXXX	XXXX	XXXX
Precisão de giro	XXX	XXX	XXXX	XXXX	XXXX
Amortecimento	X	XXX	XXX	XX	XXX
Rigidez	XXX	XXX	XXXX	XX	XXX
Vida do lubrificante	X	XXX	XXXX	X	----
Atrito	XX	XXXX	XXXX	X	X
Preço	X	XXX	XXX	XX	XXXX
Onde: XXXX = muito elevado XXX = elevado XX = médio X = baixo ---- = não aplicável					

Tabela 2.3 – Relação entre tipo de mancal e os principais processos de usinagem (Weck, 1990)

	<i>mancais de rolamento</i>	<i>hidrodinâmicos</i>	<i>hidrostáticos</i>	<i>aerostáticos</i>	<i>magnéticos</i>
Fresamento	XXX	XX	XXX	X	X
Fresamento em alta velocidade	XX	XXX	XXX	XX	XXX
Retificação cilíndrica interna	XX	XXX	XXX	XXX	XXX
Retificação cilíndrica externa	XX	XXX	XXX	XXX	XXX
Torneamento	XXX	XXX	XXX	XX	XXX
Onde: X – recomendado com restrição / não recomendado XX – recomendado XXX – altamente recomendado					

CAPÍTULO - 3

MANCAIS

A orientação cartesiana do espaço aplicada ao movimento de um corpo, possibilita um movimento relativo que pode ser expresso em termos de graus de liberdade. Ao todo existem seis graus de liberdade possíveis que podem ser aplicados a um corpo, esses são denominados de translação nas direções coordenadas X, Y, Z e as respectivas rotações a, b, c sobre esses.

Com base na definição acima de graus de liberdade para corpos no espaço, tanto mancais quanto guias lineares podem ser definidos como elementos de máquinas que apresentam um movimento relativo entre seus elementos constituintes. No caso dos mancais o padrão do movimento relativos é de rotação, ao passo que nas guias o padrão é linear.

Os mancais podem ser definidos como sendo todos os elementos onde o movimento de translação em qualquer direção deve ser minimizado, se não proibido, deixando livre a rotação somente em torno de um eixo. Da mesma forma, o termo guia passa a definir todos os elementos onde um movimento de translação é desejado, com restrições ao movimento de rotação. Simplificando, os mancais podem ser definidos como os elementos de máquina onde o componente fixo permite ao eixo ter somente um grau de liberdade, sendo que o movimento relativo entre as partes é de rotação. Tal definição, contudo, torna-se muito limitada quando a comparamos com o amplo espectro de utilização dos mancais.

Outra forma de definir mancais, trata esses como sendo o elemento de máquina que normalmente permite somente um grau de liberdade. Estes elementos de máquinas permitem apenas movimentos de rotação, os quais envolvem a transmissão ou absorção de forças radiais e/ou axiais (figura 3.1).

Existem mancais específicos para suportar carregamentos predominantemente radiais e axiais, porém muitos são capazes de suportar cargas em ambas as direções. Isto leva a uma grande variedade de princípios de soluções para mancais. Apesar de muitos dos vários tipos de mancais serem diretamente aplicados em máquinas-ferramentas, quer em guias ou árvores, alguns mancais, tais como as barras de tensão, também conhecidos como mancais de mola ou mancais de deformação, apresentam características que os tornam únicos em aplicações de precisão, ou em dispositivos e acessórios.

A classificação dos mancais requer dois parâmetros distintos:

- a direção preferencial do carregamento (figura 3.1);
- a forma de sustentação (figura 3.2).

Quanto à direção do carregamento, os mancais se dividem em:

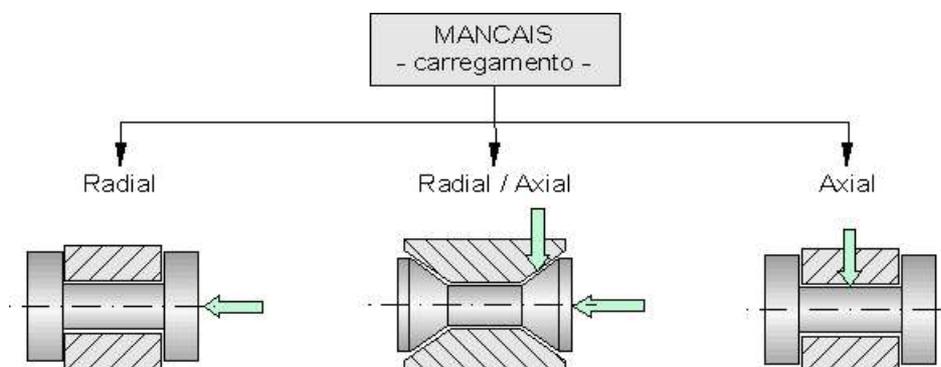


Figura 3.1 - Classificação dos mancais quanto ao carregamento

Quanto à forma de sustentação, os mancais são classificados conforme a figura 3.2.

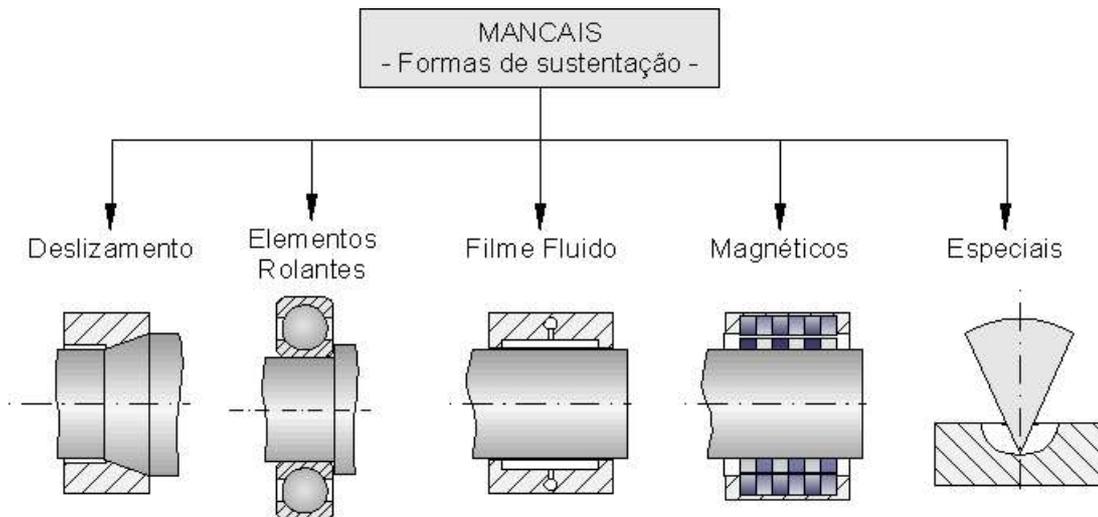


Figura 3.2 - Classificação dos mancais quanto à sustentação

3.1 Mancais de Deslizamento

Os mancais de deslizamento, também conhecidos como mancais de escorregamento ou de buchas de deslizamento, foram os primeiros tipos de mancais utilizados pelo homem. Nesses, as superfícies com movimento relativo estão em contato direto, podendo ou não ter lubrificação. Davidson (1972) os subdivide de acordo com a forma de contato entre as superfícies em deslizamento. Podemos ter mancais de deslizamento radiais, axiais, mancais de deslizamento com geometria cônica, com eixo esférico e pivotados, entre outros. As buchas de deslizamento não são muito utilizadas em máquinas-ferramentas, exceto em guias, sendo seu uso restrito a alguns mecanismos finos e aplicações especiais (Stoeterau, 1992).

Os mancais de deslizamento se caracterizam por apresentarem um elevado atrito entre os componentes com movimento relativo, e tendem a engripar. Por outro lado, os mesmos apresentam elevada precisão de giro, podendo encontrar aplicações muito específicas em máquinas-ferramenta. Em geral esse tipo de mancal é pouco utilizado em máquinas-ferramentas, quase sempre em máquinas simples, ou em dispositivos de precisão, onde as velocidades relativas e as temperaturas sejam baixas.

3.2 Mancais de Elementos Rolantes

Mancais de elementos rolantes ou de rolamento, apesar de apresentarem um projeto e um cálculo dimensional extremamente complexo, são o tipo de mancal antifricção mais largamente utilizado em mecanismos de precisão, tanto pela forma simplificada de cálculo e seleção posta a disposição pelos fabricantes, quanto pelo nível de padronização encontrado no mercado. Nestes mancais, as superfícies com movimento relativo são separadas por um elemento rolante, o qual pode ser esférico, cilíndrico, cônico, na forma de barril ou de agulha. Nestes, os carregamentos são absorvidos pela deformação elástica de contato dos elementos rolantes junto aos anéis. Por isso, seu campo de utilização é limitado tanto pela rigidez possível de se obter quanto pelo baixo ou inexistente amortecimento, o que diminui sua precisão no deslocamento (Davidson, 1972; Davidson, 1981).

Como consequência de não se dispor de elementos rolantes com exatamente as mesmas dimensões geométricas, o mancal de rolamento não gira em torno de um eixo, e sim em torno de uma órbita. Desta forma, mancais de elementos rolantes são divididos em classes de precisão e classificados quanto ao tipo de carregamento que podem absorver. Conforme o tipo de carregamento a que estão submetidos, os mancais antifricção são denominados de mancais radiais, axiais ou radiais/axiais, conforme a figura 3.2.

Mancais de elementos rolantes são empregados em uma grande variedade de estruturas, sendo que podem ou não ser miniaturizados, mas devem satisfazer um ou ambos dos seguintes requisitos:

- a) fácil movimentação;
- b) mínimo atrito (Stoeterau, 1992).

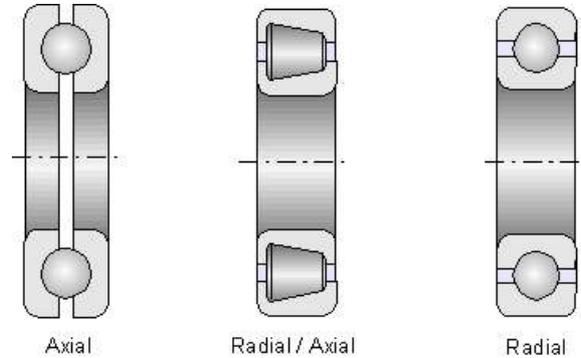


Figura 3.3 - Tipos de mancais de elementos rolantes

Em geral, os mancais de elementos rolantes são fabricados inteiramente em aços especiais, podendo também ser produzidos com pistas em teflon ou material polimérico. Mais recentemente, começaram a aparecer comercialmente mancais de elementos rolantes fabricados em cerâmica.

3.2.1 Seleção de Mancais de Rolamentos

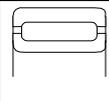
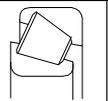
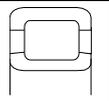
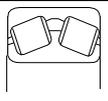
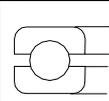
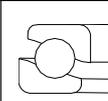
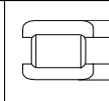
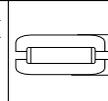
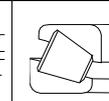
O dimensionamento de mancais de rolamento é um tópico consagrado na literatura de elementos de máquinas, podendo ser encontrado em diversos livros, e nos catálogos da maioria dos fabricantes de rolamentos. A tabela 3.1 apresenta os requisitos funcionais para as diversas configurações de mancais de rolamento, e esta serve de guia para a seleção de mancais principalmente para o projeto de árvores de máquinas-ferramentas.

Tabela 3.1 – Requisitos funcionais para mancais de elementos rolantes

Requito funcional	Forma do mancal de elementos rolantes							
	Mancais radiais							
Batimento radial	XXXX	XXXX	XXX	XXX	XXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
Batimento axial	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XX	X	XXX	XXX
Comp. angular	XXX	XX	XX	XX	XXXXX	XX	XX	XX
Alta velocidade	XXXXX	XXXXX	XXXX	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
Atrito de partida	XXXXX	XXXXX	XXXX	XX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
alta rigid. radial	XXXX	XXXX	XXXXX	XXXX	XXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
alta rigidez axial	XXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XX	X	XXXXX	XXXXX

Onde: XXXXX = excelente
 XXXX = muito bom
 XXX = bom
 XX = ruim
 X = muito ruim
 --- = não aplicável

Tabela 3.1 – Requisitos funcionais para mancais de elementos rolantes (Cont.)

Requito funcional	Forma do mancal de elementos rolantes								
	Mancais radiais				Mancais axiais				
									
Batimento radial	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	X	XXX	X	X	XXXX
Batimento axial	X	XXXXX	XX	XXX	XXXX	XXXX	XXXXX	XXXX	XXXXX
Comp. angular	XX	XX	XXXXX	XXXX	X	X	X	X	XXXXX
Alta velocidade	XXXX	XXXX	XXX	XXX	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXX	XXXX
Atrito de partida	XXXX	XXX	XXX	XXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXX	XXX
alta rigid radial	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	X	XX	X	X	XXXX
alta rigidez axial	X	XXXX	X	XXX	XXXX	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX

Onde: XXXXX = excelente
 XXXX = muito bom
 XXX = bom
 XX = ruim
 X = muito ruim
 --- = não aplicável

A seleção de mancais de pode ser feita através do fluxograma da figura 3.4, o qual apresenta a seqüência e as informações necessárias para a tomada de decisões na escolha dos mancais de elementos rolantes mais adequados as diversas aplicações e necessidades.

Na seleção de rolamentos por muitas vezes a consideração da vida de fadiga é tomada como único parâmetro para a escolha, contudo, considerações de espaço disponível para montagem, considerações no tocante a precisão de giro, de manutenção, de desgaste, de ruído, de custo envolvido. Em geral não existe um processo ou regras definidas para a seleção de rolamentos, o mesmo problema pode ter diversas soluções, no tocante a escolha de mancais, quando submetidos a equipes de projeto diferentes.

Diversos fabricantes de rolamentos tem disponibilizados programas computacionais que permitem a seleção de rolamentos, desde que o projetista tenha em mãos todos os parâmetros de projeto, algo que nem sempre é possível. Existem também programas computacionais que podem ser acoplados a sistemas CAD, contendo desenhos parametrizados dos diversos tipos de mancais de rolamentos permitido maior agilidade na escolha, desde que o projetista já tenha os parâmetros necessários, ou até mesmo, pré definido quais rolamentos podem ser utilizados.

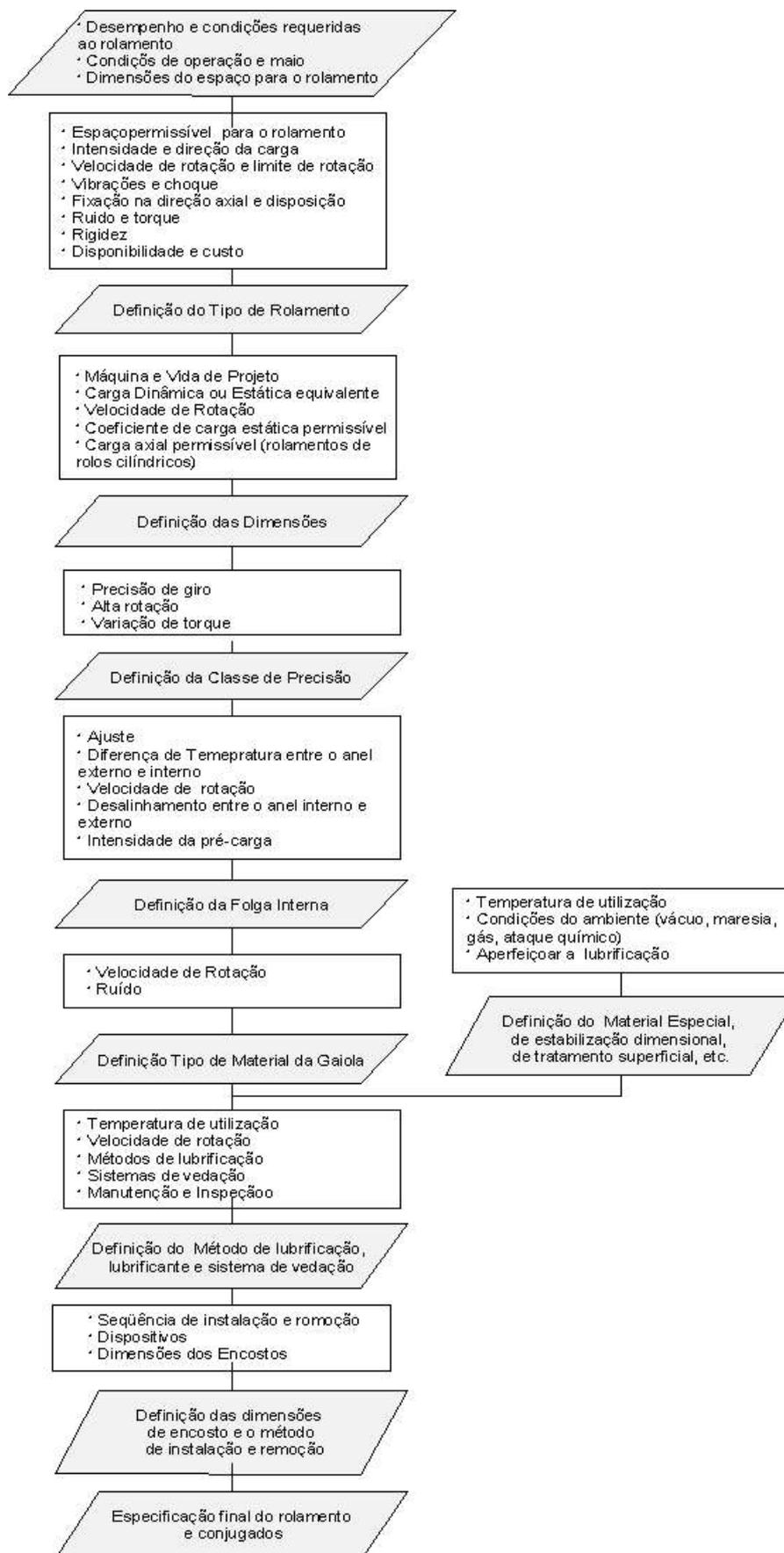


Figura 3.4 – Fluxograma para seleção de mancais de elementos rolantes

3.3 Mancais Lubrificados a Filme Fluido

Mancais com lubrificação com filme fluido são aqueles em que a separação entre as partes com movimento relativo é realizada por um filme fluido. Para aplicações usuais ou industriais, mancais com lubrificação a filme fluido são mais utilizados devido à sua longa vida e alta capacidade de carga. Dividem-se em dois tipos principais :

- os mancais **fluidodinâmicos**, que são aqueles cuja pressão da película de lubrificante que suportará a carga é dependente da velocidade tangencial do mancal;
- os mancais **fluidoestáticos**, que são aqueles em que as superfícies com movimento relativo são separadas por um filme lubrificante, forçado entre elas sob pressão, a qual é fornecida por uma bomba, ou compressor externo - figura 3.5 (Stoeterau, 1992).

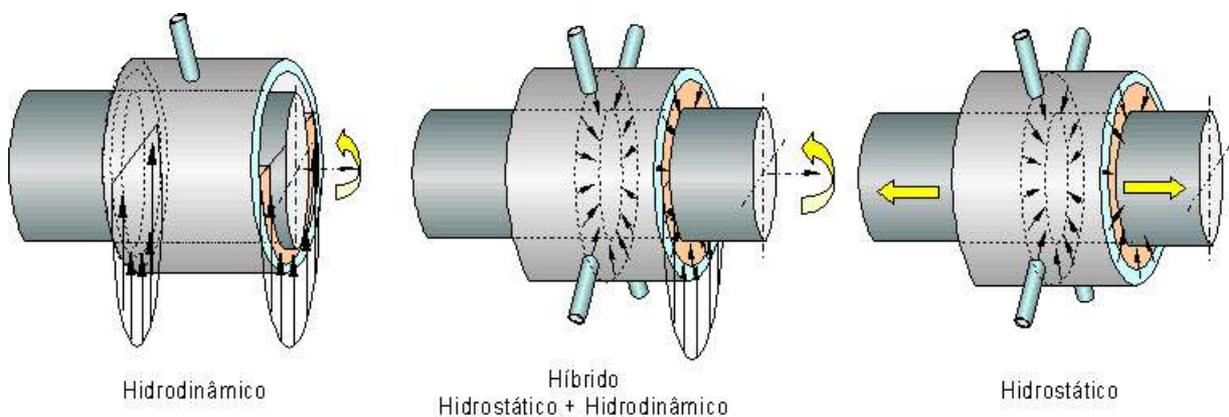


Figura 3.5 - Classificação quanto à forma de sustentação

Quanto ao tipo de fluido, estes podem ser divididos em:

- **Líquidos** - A utilização de líquidos como fluido lubrificante em mancais acarreta a perda das propriedades devido ao calor gerado quando em operação, formando um limitador de velocidade, o que torna necessária a utilização de sistemas de resfriamento para manter o fluido em uma temperatura pré-estabelecida. Dos vários fluidos já testados, o óleo tem se sobressaído, daí vindo a denominação mancal à óleo. Apesar da água apresentar melhores características, sua capacidade corrosiva a tornava pouco atrativa para uso industrial. Entretanto, o desenvolvimento de materiais cerâmicos para a construção de mancais tem permitido uma reavaliação do emprego de água como fluido em mancais hidrodinâmicos e hidrostáticos (Stoeterau, 1992) (Slocun, 2003).
- **Gases** - A utilização de gases como fluido lubrificante se deve a capacidade destes de manter suas propriedades mesmo a temperaturas elevadas, por apresentarem viscosidades muito menores do que as dos líquidos, o que abriu a possibilidade de se atingir velocidades mais elevadas. O uso de gases, principalmente ar, dispensa o uso de sistemas de coleta, retorno e resfriamento necessários aos mancais a líquido. Dos vários tipos de gases já testados, o ar tem sido o gás mais extensivamente utilizado. Portanto, as terminologias mancal a ar, e mancal aerostático tornam-se mais adequadas para designar este tipo de mancal.

3.3.1 Mancais Fluidoestáticos

Mancais fluidoestáticos, mais comumente denominados de mancais hidrostáticos a pressão de sustentação é fornecida por uma bomba. Indubitavelmente um efeito hidrodinâmico existe, e o mancal pode ser melhor descrito como um mancal híbrido. A figura 3.6 apresenta a classificação quanto ao tipo de restritor, e a figura 3.7 apresenta o organograma da família dos mancais hidrostáticos (Stoeterau, 1992).



Figura 3.6 – Classificação dos mancais hidrostáticos quanto ao tipo de restritor



Figura 3.7 – Classificação dos mancais hidrostáticos quanto ao carregamento

3.3.2 Mancais Fluido Dinâmicos

Os mancais hidrodinâmicos apresentam projetos bem desenvolvidos, com ampla aplicações em máquinas-ferramentas, porém em naquelas onde os requisitos de precisão são maiores os mancais com pressurização externa são mais recomendados devido à sua maior precisão de giro, sobressaindo-se os mancais aerostáticos (Stoeterau, 1992).

O uso de óleo como redutores de atrito em mancais vem desde os egípcios e babilônicos, contudo seu uso em mancais fluido dinâmicos em máquinas-ferramentas vem desde a revolução industrial. Por seguirem o mesmo princípio dos mancais utilizados em locomotivas, e outras máquinas da época o desenvolvimento do projeto e a pesquisa sobre esse tipo de mancais culminaram com os trabalhos de Reynold (1846) sobre lubrificação hidrodinâmica, entre outros.

Hirn, em 1854, falou do ar como possível lubrificante, sendo que o primeiro mancal a ar foi criado por Albert Kingsburry, em 1887 (Fuller, 1984).

Os mancais a ar, pressurizados externamente ou aerostáticos, oferecem muitas vantagens neste campo, sendo as mais conhecidas:

- atrito de partida nulo e atrito viscoso muito pequeno;
- geração de calor desprezível, mesmo a altas velocidades;
- ausência de desgaste, pois as peças do mancal não estão em contato;
 - pequeno erro médio de giro do mancal (excentricidade) devido à espessura do filme de ar ser da ordem de 5 a 50 mm;
 - possibilidade de fabricação inteiramente por meio de técnicas convencionais de usinagem, apesar das dimensões reduzidas da folga;
 - relativa independência da operação do mancal em relação à temperatura ambiente, pois a variação da viscosidade do ar é muito pequena com a da temperatura;
- livre de vibrações, quando comparado a mancais de esfera ou outros tipos;
- possibilidade de ser utilizado onde a contaminação dos materiais deve ser evitada;
- não há necessidade de equipamentos para coleta e retorno para uso posterior;
 - é permitido ao ar escapar livremente a partir do mancal e com isso as vedações de borracha, entre os elementos com movimento relativo, podem ser desprezadas. Isto é uma vantagem, quando até mesmo o menor atrito precisa ser evitado (Stoeterau, 1992).

Mancais lubrificados a ar são normalmente utilizados em aplicações que exigem altas velocidades e precisões, sendo a qualidade final do trabalho diretamente dependente dos níveis de vibrações inerentes ao sistema da máquina como um todo.

Embora muitas das vantagens acima se apliquem igualmente aos mancais aerodinâmicos, estes têm encontrado pouca utilização em máquinas-ferramentas e instrumentos de medição. Isto pode ser atribuído ao fato de que tanto máquinas-ferramentas quanto instrumentos de medição geralmente operam em velocidades muito variáveis para se obter rigidez e capacidade de carga adequadas a este tipo de mancal. Uma possível exceção ocorre em retificadoras de alta velocidade e em algumas furadeiras odontológicas (Stoeterau, 1992).

Mancais aerostáticos pressurizados externamente apresentam também um efeito aerodinâmico e o mancal pode ser melhor classificado como híbrido, quando empregados em aplicações com altíssima velocidade relativa entre as partes.

Como forma de prover um quadro balanceado, algumas desvantagens inerentes ao uso de mancais a ar com pressurização externa devem ser mencionadas. A principal delas é seu comportamento relativamente fraco em presença de forças com componentes dinâmicos, em função do amortecimento inerente ao filme de ar. Enquanto recentes trabalhos demonstram que o coeficiente de amortecimento dos mancais a ar pode ser maximizado por um projeto correto, os valores obtidos serão sempre menores quando comparados com aqueles dos mancais hidrostáticos a óleo, os quais, por outro lado, são preferidos para aplicações onde será necessário suportar elevados carregamentos. Por consequência, mancais aerostáticos apresentam a vantagem de operar tanto em baixa quanto em alta velocidade, apresentando um especial interesse para aplicações em ultraprecisão, onde os carregamentos são pequenos e não há a necessidade de capacidade de carga dos mancais hidrostáticos (Stoeterau, 1992).

3.4 Mancais Magnéticos

O funcionamento dos mancais magnéticos está baseado no princípio da atração ou repulsão mútua entre os pólos magnéticos (figura 3.8). Os campos magnéticos controlados mantêm o elemento com movimento relativo suspenso, sem que ocorra contato metal-metal. Deslocamentos resultantes de carregamentos externos são detectados por sensores que permitem a correção da posição através da manipulação dos magnéticos do mancal.

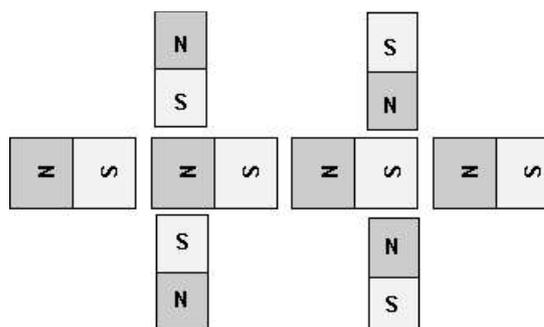


Figura 3.8 - Princípio de funcionamento dos mancais magnéticos.

Devido à excelente rigidez proporcionada por estes mancais, sua principal aplicação se dá em fusos de alta velocidade, onde pode-se atingir rotações entre 10.000 e 100.000 rpm. Apesar de nos mancais magnéticos não haver geração de calor por atrito mecânico entre as partes metálicas, esta se manifesta, e de forma excessiva, devido às correntes parasitas, o que torna necessário a utilização de refrigeração (Stoeterau, 1992).

A figura 3.9 apresenta uma visão de uma fresadora experimental em desenvolvimento no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina (LMP-UFSC), dotada de uma árvore com mancais magnéticos, com potência de 40kW e capacidade para 40.000 rpm. Nessa figura pode-se ainda observar a discrepância entre o tamanho do comando numérico e os armários da eletrônica de controle dos mancais magnéticos.

Figura 3.9 – Fresadora HSC dotada de árvore com mancais magnéticos

3.5 Seleção do mancal mais adequado

A seleção dos mancais é feita em função dos carregamentos típicos de cada processo de usinagem, e dos requisitos de projeto impostos a árvore, já discutidos previamente. Como forma de fornecer um painel balanceado entre os diversos tipos de mancais, um quadro comparativo das principais características destes é apresentado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Comparação entre os diversos tipos de mancais.

TIPO DE MANCAL	DE CONTATO		LUBRIFICADO A FILME FLUIDO		S/ CONTATO
	DESGLIZANTE	ELEM. ROL.	ÓLEO	AR	MAGNÉTICO
RIGIDEZ	4	3	4	3	5
AMORTECIMENTO	4	2	3	4	1
NÍVEL DE VIBRAÇÕES	1	3	4	4	3
CAPACIDADE DE CARGA	4	3	4	2	4
ATRITO ESTÁTICO	1	4	0	0	0
PRECISÃO DE GIRO	2	4	4	5	4
CUSTO	5	4	3	3	1
DESEMPENHO EM BAIXA VELOCIDADE.	4	4	5	5	4
DESEMPENHO EM ALTA VELOCIDADE	1	2	3	5	5
RESISTÊNCIA À BAIXA TEMPERATURA	4	4	4	5	4
RESISTÊNCIA À ALTA TEMPERATURA	1	2	3	4	3
RESISTÊNCIA À UMIDADE	2	4	4	4	3
GERAÇÃO DE CALOR	1	3	1	5	1
VIDA	1	3	4	5	5
CONFIABILIDADE	1	3	4	4	5

Onde: 5 – excelente,
 4 – bom,
 3 – moderado,
 2 – regular,
 1 – ruim e
 0 – não aplicável.

A tabela acima mostra que para cada aplicação existe um tipo de mancal que melhor se adapta, sendo a escolha uma função:

- da qualidade que se deseja obter;
- da velocidade de trabalho;
- das cargas envolvidas;
- do espaço disponível para instalação;
- dos custos (Stoeterau, 1992).

Weck et al. (1994), Bispink (1994) e Slocun (1992) compararam a aplicação de mancais aerostáticos, hidrostáticos e rolantes em árvores e guias, na precisão de usinagem. Estes concluíram que as árvores com sistemas de mancais aerostáticos e hidrostáticos apresentam melhores resultados em termos de precisão, para condições de usinagem com ferramenta de gume único, e na retificação de cerâmicas e vidros dúcteis. Porém as guias aerostáticas apresentam características inferiores se comparadas com as hidrostáticas nas mesmas condições.

A análise comparativa apresentada na tabela 3.1 aponta para a escolha de mancais aerostáticos como sendo a mais adequada aos requisitos de precisão de giro e características dinâmicas. Apesar de igualmente complexos em seu projeto e fabricação os mancais aerostáticos ainda assim são a melhor opção quando comparados aos mancais lubrificados a filme de óleo e magnéticos principalmente em função da complexidade associada a estes e o custo.

Os mancais de elementos rolantes só são recomendados quando pertencentes a classes especiais, difíceis de serem encontradas e de alto custo de aquisição. Apesar destas classes especiais de mancais de elementos rolantes permitirem a obtenção de bons resultados, sua utilização recai principalmente em aplicações onde não se justifique o emprego, ou o desenvolvimentos de mancais a filme fluido ou magnéticos.

Os mancais lubrificados com filme fluido encontram aplicações únicas em máquinas e equipamentos para alta e ultraprecisão. Os mancais hidrodinâmicos apresentam certas restrições de uso, em função da geração de calor e instabilidades provenientes da cavitação do óleo na folga de trabalho, além da necessidade da utilização de equipamentos de retorno e resfriamento de óleo, o que acarreta custos e espaços adicionais.

Mancais hidrostáticos, apesar do inconveniente da unidade de tratamento de óleo, apresentam excelentes características, enquanto que os mancais aerostáticos têm se firmado como os mais utilizados em máquinas-ferramentas para alta e ultraprecisão.

Os mancais magnéticos são apresentados como uma alternativa futura para as máquinas, devido à elevada rigidez, velocidade e capacidade de carga, porém o alto custo associado à complexidade da eletrônica e o excessivo calor gerado durante a operação ainda não os tornam atrativos para o momento.

CAPÍTULO - 4

GUIAS

As máquinas-ferramentas sempre necessitaram de elementos que permitissem a absorção de carregamentos e o movimento dentro de um padrão linear, realizando as mesmas funções dos mancais rotativos empregado nas árvores. O emprego de guias em máquinas-ferramentas, em especial em tornos, não apresenta uma referências histórica exata, mas os registros apontam que as mesmas já eram empregadas no século XV. Inicialmente fabricadas em madeiras, esse teve seu emprego até revolução industrial, onde foi substituído por ferros e aços fundidos.

As guias são definidas como elementos estruturais que permitem a um componente deslizar ao longo de outro em um padrão dado. Em guias lineares, o padrão de movimento é retilíneo e geralmente restrito a um grau de liberdade.

As guias são um dos elementos fundamentais, tal qual a árvore e outros sistemas, em uma máquina-ferramenta e constituem uma parte delicada da mesma, sendo responsáveis por guiar a ferramenta na região de corte. Como todas as demais partes de uma máquina-ferramenta, estas devem ser construídas suficientemente rígidas, para que as variações de forma que se originam da ação de forças estáticas e dinâmicas, ou dos movimentos, não venham a exceder limites estabelecidos, prejudicando tanto a exatidão geométrica quanto dimensional (Stoeterau, 1992).

4.1 CLASSIFICAÇÃO DAS GUIAS

As guias podem ser classificadas de quatro formas distintas:

- quanto à forma da seção transversal;
- quanto à forma de movimento;
- quanto aos graus de liberdade;
- quanto à forma de restrição à rotação ao longo do eixo de translação.

4.1.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À FORMA

Quanto à forma, as guias são classificadas em cilíndricas ou prismáticas. Independente da seção transversal ao eixo da guia, o elemento móvel pode envolvê-la completa ou parcialmente, o que complementa a classificação de forma através da denominação guia aberta ou fechada. O envolvimento completo assegura que este não seja arrancado da guia quando da translação por meio de uma rotação indesejada do elemento móvel (Stoeterau, 1992).

→ GUIAS CILÍNDRICAS

As guias cilíndricas são as formas mais simples de guias lineares e encontram várias aplicações em mecânica de precisão, tais como em unidades de disco flexíveis, impressoras e outros periféricos de computadores, bem como em máquinas-ferramentas e sistemas de medição (Stoeterau, 1992; Koenig, 1990; Thyer, 1994). Seu uso em sistemas de precisão remonta ao final do século XIX, com o desenvolvimento do comparador Rogers-Bond (figura 4.1) que, segundo a Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos, permitiu resolver o problema de medições exatas e uniformes. Este equipamento foi desenvolvido para resolver o problema de definição e reprodução do padrão polegada de dimensão, o qual apresentava variações entre os diversos fabricantes de máquinas nos Estados Unidos, em fins do século passado (Moore, 1989).

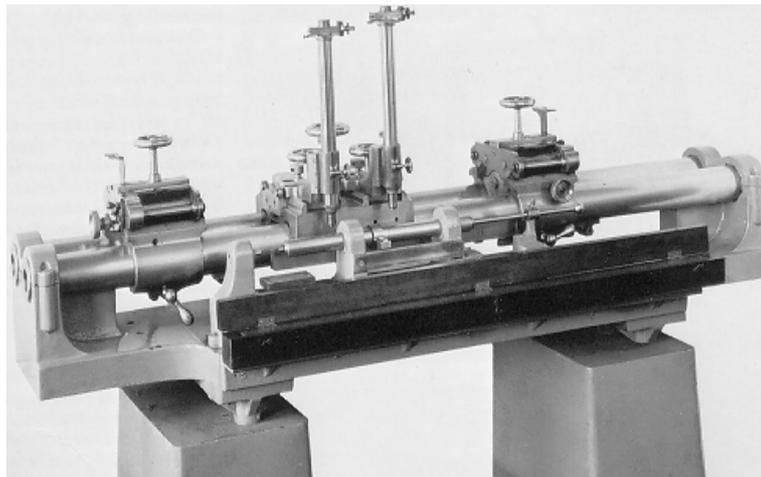


Figura 4.1 - Comparador Rogers-Bond com guias cilíndricas - século XIX (Moore, 1989)

→ GUIAS PRISMÁTICAS

As primeiras aplicações de guias prismáticas em duplo V em tornos são atribuídas ao francês Vaucanson, cerca de 1765, mas só encontraram grande aceitação no século seguinte, por intermédio de Maudslay, em 1800 - figura 4.2 (Moore, 1989; Thyer, 1991).

As guias lineares de seção transversal prismática ou angular foram, e ainda são, amplamente utilizadas em máquinas-ferramentas, e suas formas construtivas variam de fabricante para fabricante. Observando a evolução das máquinas-ferramentas através dos anos, podemos concluir que estas quase sempre se utilizaram de guias prismáticas para absorção de forças, independente da posição plana ou inclinada. O deslizamento entre o carro-porta-ferramentas e as guias é garantido por um filme lubrificante, que tanto pode ser líquido quanto sólido (Stoeterau, 1992).

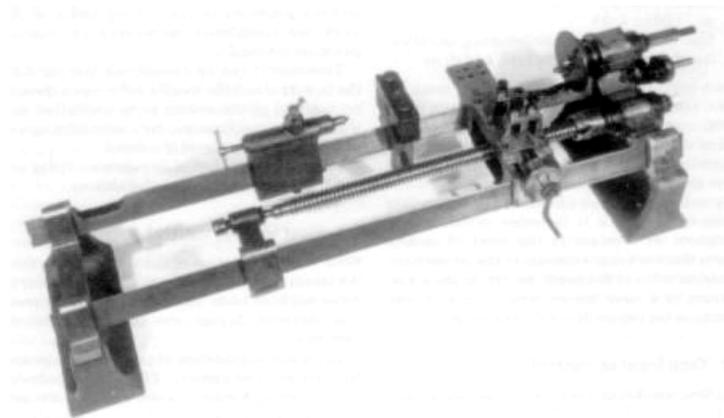


Figura 4.2 – Torno de Maudslay, início do sec. XIX (Moore, 1989)

4.1.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DESLIZAMENTO

Com relação à forma de deslizamento, as guias podem ser classificadas em:

- guias de deslizamento;
- guias de elementos rolantes;
- guias fluidostáticas (óleo, água, ar, etc);
- guias de elementos elásticos; e
- guias de levitação magnética.

4.1.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AOS GRAUS DE LIBERDADE

Para um elemento móvel com deslocamento relativo linear sobre uma guia, na direção x , temos até seis, conforme a figura 4.3, (sendo cinco indesejados e classificados como erros de movimento) os quais são:

- **rolamento** - representa rotação em torno do eixo - X ;
- **guinagem** - representa rotação em torno do eixo - Y ;
- **arfagem** ou **cambamento**, representa rotação em torno do eixo - Z ;
- **deslocamento** na direção X ;
- **deslocamento** na direção Y ;
- **deslocamento** na direção Z (Stoeterau, 1992).

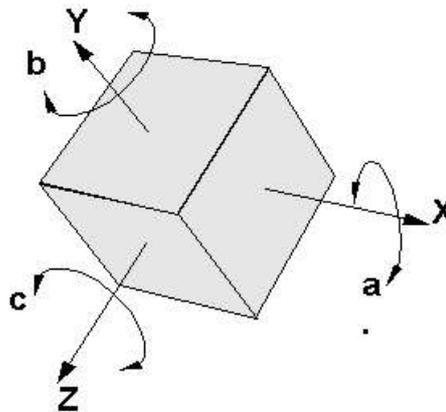


Figura 4.3 - Referências para classificação dos graus de liberdade segundo a norma ISO-230

4.1.4 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À FORMA DE RESTRIÇÃO

As guias podem ser ainda classificadas com relação à prevenção contra a rotação do elemento móvel em torno do eixo de translação. Esta prevenção pode ser por meio de restrição interna ou externa.

4.2 GUIAS DE DESLIZAMENTO

As guias de deslizamento, também denominadas de guias de escorregamento, são amplamente utilizadas em máquinas-ferramentas entre outros sistemas mecânicos. Contudo essas tem sido preteridas as guias de elementos rolantes em função a uma série de desvantagens que apresentam. As guias de deslizamento são caracterizadas por elevado atrito dinâmico, resultante do movimento de escorregamento relativo entre a guia, parte fixa, e o carro, parte móvel, e a presença de *stick-slip*.

O *stick-slip* é ocasionado por uma inconstância da força de atrito, motivada por outras variáveis tais como, distância, tempo e velocidade, o que leva a variações amplas de velocidade em sistemas constituídos por corpos em escorregamento sob a ação de uma força constante. Na maioria dos sistemas práticos de escorregamento, essas flutuações na velocidade de escorregamento são consideradas um sério problema, principalmente sob a óptica da dinâmica de controle, o que não as tornam a melhor escolha para sistemas que exigem movimento suave e posicionamento preciso.

O processo de *stick-slip* pode ser classificado em:

- **Stick-Slip irregular ou deslocamento controlado**, onde em uma situação típica de escorregamento, envolvendo um corpo (chamado cursor) fixado a um suporte estacionário através de uma mola, e outro (uma placa) em movimento com uma velocidade constante v , conforme a figura 4.4.

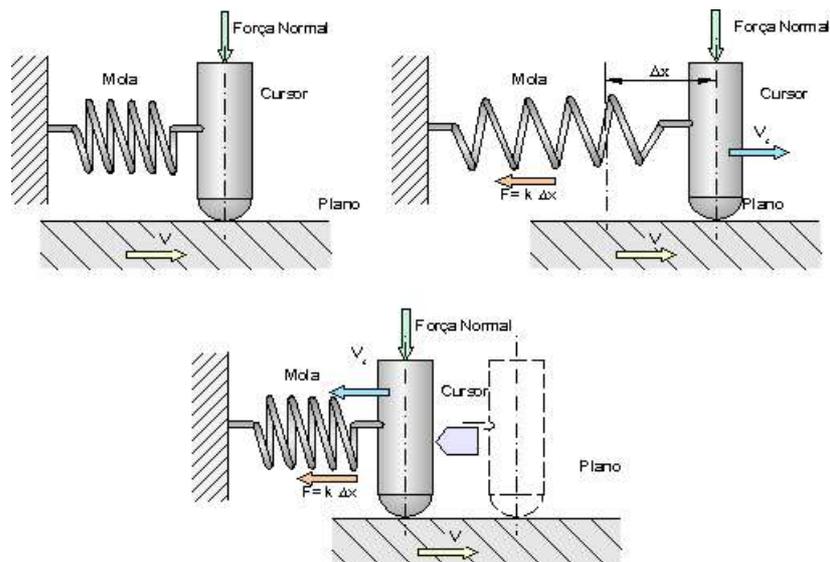


Figura 4.4 – Representação de um sistema de atrito típico

Considerando-se que a velocidade é suficientemente baixa, de tal modo que o cursor não apresente dificuldade em acompanhar o movimento da placa, e que o amortecimento é desprezável. Desta forma a função força-deslocamento da mola, será uma linha reta com inclinação K através do ponto representativo de qualquer posição do cursor. Se o movimento inicia em B, o cursor se deslocará sobre a placa com velocidade constante até que o ponto C é alcançado, a força de atrito cai bruscamente. Nesse ponto a energia (força) acumulada na mola é superior à força de atrito e, por sua ação, o cursor escorrega (*slip*) até o ponto D. Nesse ponto, área A_2 (força de atrito e deslocamento do cursor) é igual a energia de deformação acumulada na mola e transformada em energia cinética do cursor, e como a energia cinética foi totalmente usada, a força da mola é bem inferior à força de atrito, o cursor para (*stick*) em relação à placa e é arrastado por ela até que a força de mola, igualando-se à força de atrito, faça o movimento relativo reiniciar.

Um comportamento desse tipo é chamado *stick-slip* irregular, é ocasionado pela inconstância da força de atrito. Ocorre em superfícies metálicas cobertas por um filme lubrificante que pode ter sido parcialmente expulso. A flutuação ocorre porque o cursor atravessa, alternativamente, regiões cobertas pelo filme lubrificante e regiões onde ela está ausente.

Se a mola for construída com uma rigidez tal que sua inclinação, na figura 3.24, for maior que a máxima inclinação do gráfico força de atrito função do deslocamento, o *stick-slip* irregular será evitado.

- **Stick-Slip regular ou controlado pelo tempo**, esta é considerada a forma clássica do *stick-slip* e pode ocorrer sempre que o coeficiente de atrito estático é bem maior que o coeficiente dinâmico.

Considere-se uma situação de escorregamento em que a placa da figura 4.4 tem uma velocidade baixa quando comparada à máxima velocidade do cursor durante o escorregamento e que o amortecimento externo é desprezável. Esse modelo simples pode ser usado para explicar o *stick-slip* regular. Assuma-se que o coeficiente de atrito estático é função do tempo de contato, apresentando um comportamento como o mostrado na figura 4.5 e que coeficiente dinâmico permaneça constante.

Movimentando a placa com a velocidade v , a força de mola cresce com o tempo na razão $k v t$, o que pode ser registrado na figura 4.5 como uma reta a partir da origem, com inclinação kv/L . Energia elástica se acumula na mola mas a força da mola é insuficiente para vencer a força de atrito e o cursor permanece parado em relação à placa. Ao atingir o ponto A, ocorre escorregamento, a energia da mola é liberada e, como $\mu_d < \mu_e$, o escorregamento continua até o ponto B, situado a uma distância de reta de $m_d = \text{constante}$ igual à do ponto A. A

situação de equilíbrio, que ocorreria para força da mola = $\mu_d \cdot L$, foi ultrapassada e o cursor para, o que foi representado ao gráfico com o ponto C (a força da mola não é nula). Continuando o deslocamento da placa, um novo ciclo inicia e somente ocorrerá escorregamento em D, pois o cursor está parado e $\mu_e > \mu_d$. Finalmente, um estado de equilíbrio é alcançado.

Aumentando v ou k as linhas terão uma inclinação maior e o stick-slip terá uma amplitude menor.

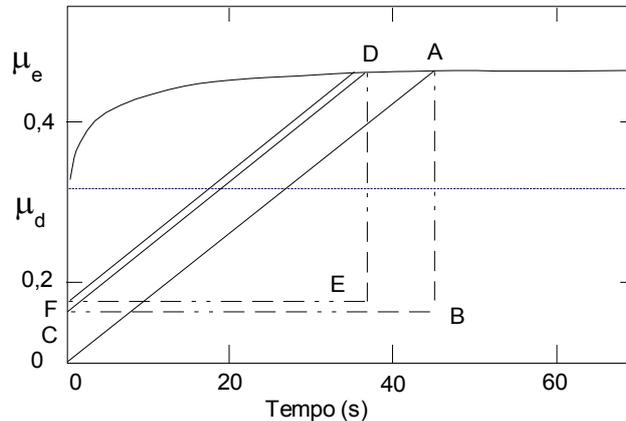


Figura 4.5 – Coeficiente estático em função do tempo de repouso.

Em geral são as guias de escorregamento construídas de forma integral a estrutura da máquina, o que é uma desvantagem sob o ponto de vista de fabricação e manutenção. Sua qualidade está associada a diversos fatores, tais como:

- par de material em contato (guias/carro)
- características do par tribológico guia/carro (dureza, qualidade superficial, presença de contaminantes, etc.)
- linearidade resultante do processo de fabricação
- qualidade superficial
- estado de desgaste
- tipo de superfície, gerada no acabamento
- forma de lubrificação,
- entre outras.

As guias de escorregamento necessitam de um processo de fabricação apurados, com frequência necessitam de operações de rasquetamento posterior a retificação. O rasquetamento é uma forma de remover picos de rugosidade, realizar correções pequenas correções geométricas, aumentar a capacidade de sustentação e prover meios de retenção de óleo lubrificante na superfície das guias. Essa necessidade de rasquetamento é um dos fatores de encarecimento das mesmas, pois é um processo manual, que necessita de técnicos altamente treinados.

As guias de deslizamento apresentam como características gerais:

- alto custo;
- alta rigidez;
- alta capacidade de carga;
- alto atrito;
- baixa capacidade de posicionamento;
- presença de stick-slip;
- baixas/médias características de linearidade;
- baixas velocidades de avanço;
- tendência a apresentar desgastes localizados;
- tendência a autotravamento;
- outras.

Tabela 4.1 – Principais tipos de guias de deslizamento

FORMA	CILÍNDRICAS			PRISMÁTICAS	
TIPO	ABERTAS				
RESTRIÇÃO	SEM	INTERNA	EXTERNA	SEM	COM
TIPO	FECHADAS				
RESTRIÇÃO	SEM	INTERNA	EXTERNA	SEM	COM

4.2.1 Dimensionamento de guias de deslizamento

O dimensionamento de guias de deslocamento é feito segunda a metodologia proposta por Rechetov (1943), esta é dividida nas seguintes etapas:

- Determinação das pressões normais cada face das guias
 - Determinação da pressão média específica em cada face das guias
 - Determinação da pressão máxima específica na face
 - Coparação dos valores calculados com o valor máximo da pressão específica calculada
- Determinação das pressões normais em cada face da guia

Para a determinação das forças normais resultantes em cada face de uma guia prismática de escorregamento é necessário saber a magnetude do carregamento P_y que atua sobre a mesma. P_y corresponde a soma de todos os carregamentos verticais que atuam sobre a guia, incluindo aí o peso próprio do carro, parcelas das forças de usinagem e os momentos resultantes da ação dos mesmos, conforme a figura 4.6. É recomendado impor um fator de segurança, visando atender casos onde as forças de usinagem tende a atingir picos muito maiores do que a usualmente encontrados no processo.

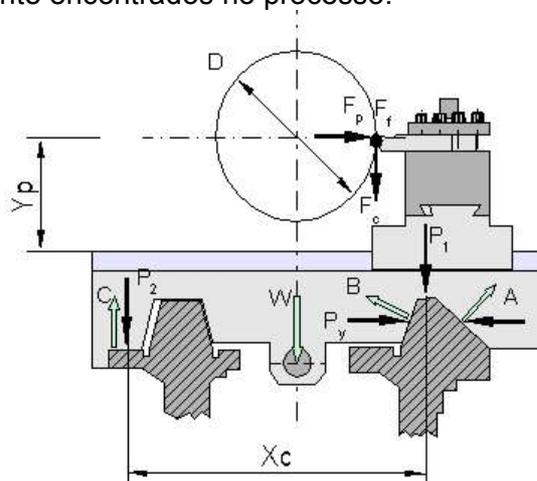


Figura 4.6 – Forças que atuam sobre as guias

Da mecânica estática temos que:

$$\sum M_z=0 \quad \sum M_y=0 \quad \sum M_x=0 \quad (4.2)$$

$$\sum F_z=0 \quad \sum F_y=0 \quad \sum F_x=0 \quad (4.3)$$

Do balanço de forças (Eqs. 4.2) e momentos (Eqs. 4.3) podemos determinar as reações A e B, com base na geometria apresentada na figura 4.7

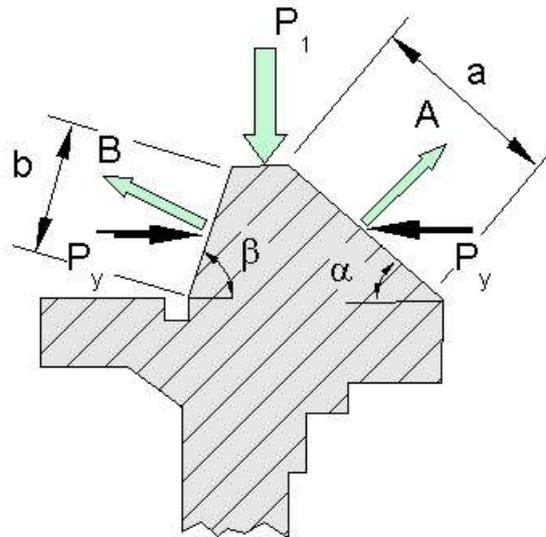


Figura 4.7 – Geometria na guia para determinação das reações A e B.

onde:

$$A = P_1 \text{sen } \alpha - F_p \text{cos } \alpha \quad (4.2)$$

$$B = P_1 \text{cos } \alpha - F_p \text{sen } \alpha \quad (4.3)$$

$$\frac{P_z}{2} \text{cos } \alpha > P_y \left(\text{sen } \alpha - \frac{Z_p}{y_c} \text{cos } \alpha \right) \Rightarrow \text{condição limite} \quad (4.4)$$

→ Determinação da pressão média específica em cada face da guia

$$P_1 = P_z \frac{X_c + D}{2} x_c + P_y \frac{Y_p}{y_c} \quad (4.5)$$

$$P_2 = P_z \frac{X_c - D}{2} x_c - P_y \frac{Y_p}{y_c} \quad (4.6)$$

Como $P_1, P_2 = f(Y_p, X_c)$ é possível determinar o diâmetro crítico que pode ser torneado, conforme mostrado no gráfico da figura 4.8.

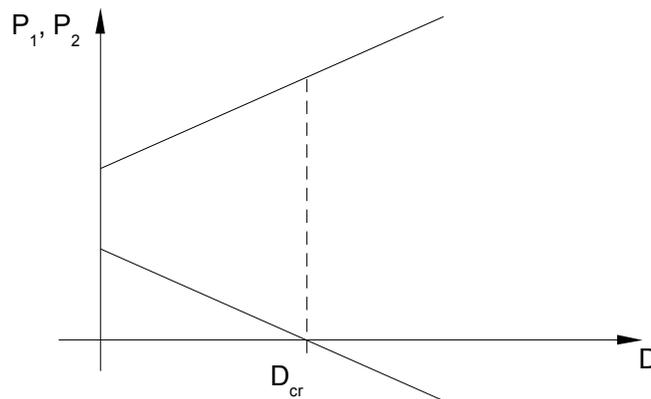


Figura 4.8 – Determinação do diâmetro crítico

4.3 Guias de Elementos Rolantes

Apesar do uso de sistemas baseados em elementos rolantes terem sido utilizados pelos Assírios a 1.100 A.C., o primeiro sistema de guias baseado em elementos rolantes lineares para uso em máquinas-ferramentas de que se tem notícias, foi desenvolvido por Gretsh e patentado na França em 1932. Tratava-se de uma guia com duas carreiras de esferas recirculantes montadas em um bloco que deslizava sobre um trilho com canais em forma circular (NN-2, 1994; NN-3,1999).

As guias de elementos rolantes em máquinas-ferramentas apresentam como principais vantagens:

- maior precisão de posicionamento;
- maior velocidade de avanço, permitindo um aumento de produtividade de 20 a 30%;
- exatidão pode ser mantida por longos períodos;
- Movimento sem *stick-slip*,
- fácil instalação e manutenção, e
- suavidade de movimento.

Os bons resultados apresentados pelas guias lineares com elementos rolantes devem-se às forças de suporte puramente elásticas, as quais são produzidas por deformação elástica de contato dos elementos rolantes. Contudo, estas guias apresentam um campo de utilização limitado, tanto pela rigidez possível de se obter, quanto pelo baixo ou inexistente amortecimento, o que diminui sua precisão no deslocamento (NN-2, 1994; NN-3,1999).

Além das classificações normais das guias em: relação à forma da seção transversal; à forma de movimento; aos graus de liberdade, e quanto à forma de restrição à rotação ao longo do eixo de translação, as guias de elementos rolantes ainda podem ser classificadas quanto a posição dos elementos em guias de elementos internos ou externos.

Tabela 4.2 – Principais guias de elementos rolantes internos

FORMA	CILÍNDRICAS			PRISMÁTICAS	
TIPO	ABERTAS				
RESTRIÇÃO	SEM	INTERNA	EXTERNA	SEM	COM

Tabela 4.2 – Principais guias de elementos rolantes internos (Cont.)

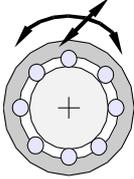
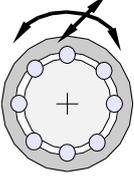
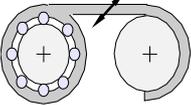
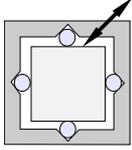
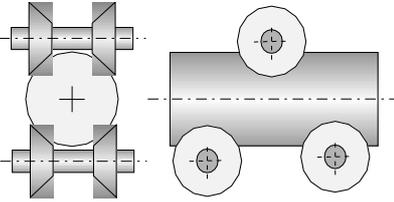
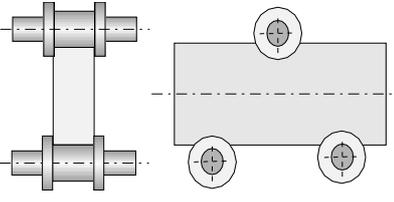
FORMA	CILÍNDRICAS			PRISMÁTICAS	
TIPO			FECHADAS		
RESTRIÇÃO	SEM	INTERNA	EXTERNA	SEM	COM
				-----	

Tabela 4.3 - Principais guias de elementos rolantes externos

TIPO	ELEMENTOS ROLANTES EXTERNOS	
	SEÇÃO CIRCULAR	SEÇÃO PRISMÁTICA
		
CUSTO	BAIXO	BAIXO
CAPACIDADE DE CARGA	MÉDIA/ALTA	MÉDIA/ALTA
FABRICAÇÃO	FÁCIL	FÁCIL
RIGIDEZ	MÉDIA	MÉDIA
AMORTECIMENTO	BAIXO	BAIXO
LINEARIDADE	MÉDIA	MÉDIA
DESGASTE	ALTO	ALTO

4.3.1 Dimensionamento de guias de elementos rolantes

O dimensionamento de guias de elementos rolantes é complexo, varia com a configuração da seção transversal da guia, número e tipo de elementos rolantes, existência ou não de recirculação nos elementos, forma dos canais, tipo de lubrificação, entre outros parâmetros de projeto. Apesar da padronização obtidas com os mancais de rolamentos, as guias de elementos rolantes encontradas comercialmente, diferem muito para cada fabricante, apresentando muitas variações de forma, número e tipo de elementos rolantes, o que dificulta a elaboração de procedimento para seu dimensionamento comuns a todos. A figura 4.9 apresenta um fluxograma para tomada de decisões no dimensionamento de guias de elementos rolantes, segundo as fabricantes NSK e THK.

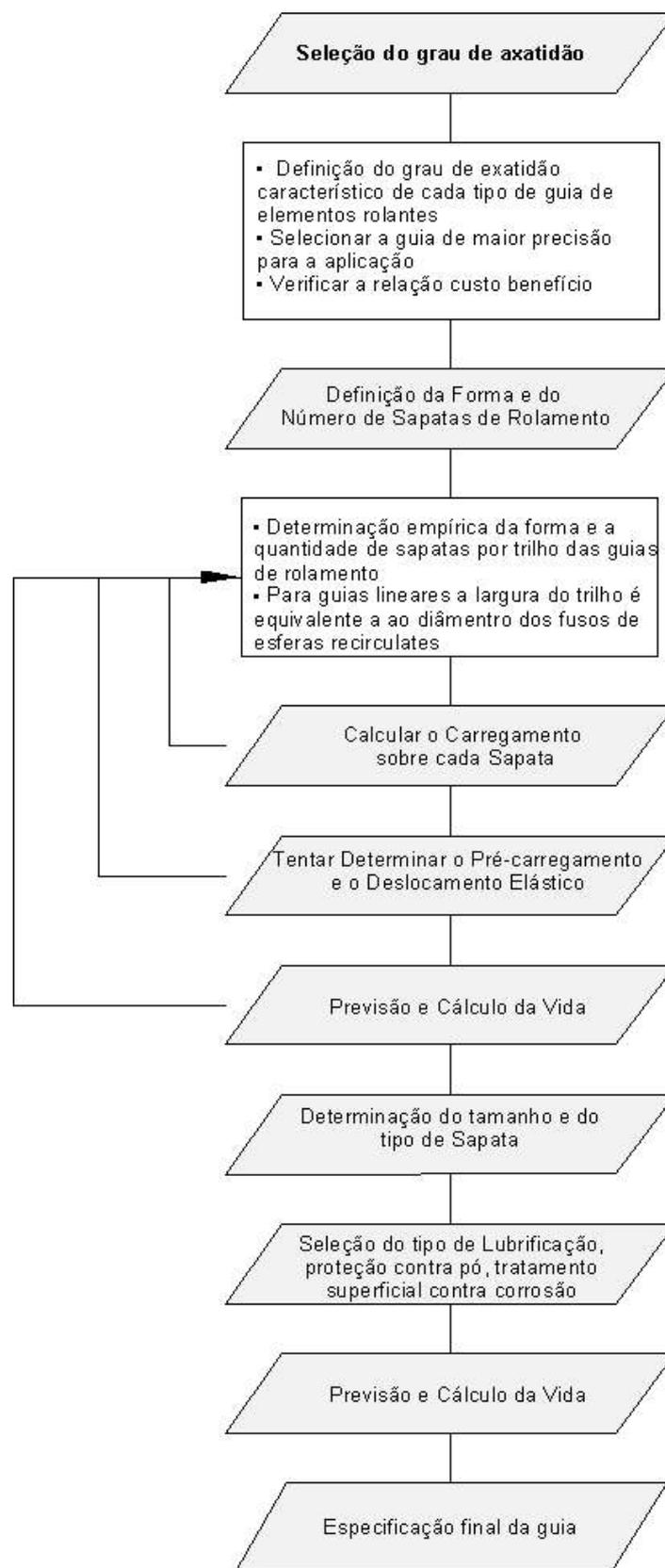


Figura 4.9 - Fluxograma para o dimensionamento de guias de elementos rolantes (NSK, 1997; THK, 1997)

4.4 Guias a filme fluido

As guias lubrificadas com filme fluido foram desenvolvidas como alternativas às guias de deslizamento e de elementos rolantes, como resultado da demanda por maiores precisões e velocidades de deslocamento.

As primeiras guias lubrificadas com filme fluido utilizavam-se de lubrificação hidrodinâmica, sendo aprimoradas a partir das guias de deslizamento com a adição de rebaixos que retinham o fluido lubrificante, formando bolsas de lubrificação. As guias hidrostáticas surgiram quando se percebeu que a lubrificação hidrodinâmica era falha e provocava instabilidade.

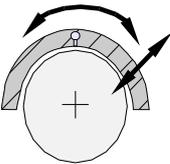
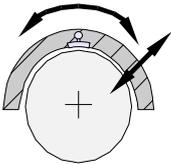
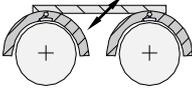
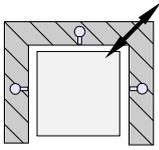
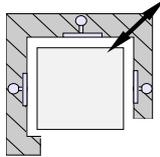
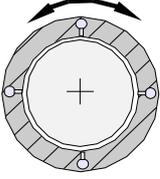
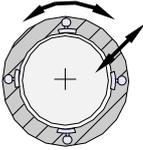
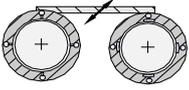
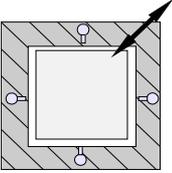
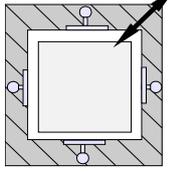
Os principais fluidos em uso atualmente são óleo e ar, e apresentam as mesmas vantagens e desvantagens, do seu emprego em mancais a filme fluido. Contudo, publicações recentes apontam para o uso de água como fluido lubrificante em guias e mancais. O uso da água como fluido lubrificante remonta aos trabalhos pioneiros de Maxwell. Apesar de suas vantagens frente aos óleos, esta foi preterida em relação aos últimos devido à corrosão associada a ela, problema só superado com a introdução de elementos de máquinas em materiais cerâmicos, naturalmente resistentes à corrosão.

As guias lubrificadas a filme fluido proporcionam características superiores, sendo as que mais se destacam:

- deslocamento suave, isento de *stick-slip*;
- possibilidade de deslocamentos rápidos;
- capacidade de carga alta para as guias a óleo e baixa para as guias a ar;
- elevada precisão de posicionamento, devido à inexistência de atrito;
- baixo amortecimento e elevada rigidez (Stoeterau, 1992).

Guias lubrificadas a filme fluido empregadas em máquinas-ferramentas e instrumentos de medição requerem um projeto específico e uma fabricação apurada, o que as tornam elementos caros.

Tabela 4.4 - Comparação das guias a filme fluido.

FORMA	CILÍNDRICAS			PRISMÁTICAS	
TIPO	PARCIAL				
REBAIXO	SEM	COM	RESTRI. EXTERNA	SEM	COM
					
TIPO	FECHADAS				
RESTRIÇÃO	SEM	INTERNA	EXTERNA	SEM	COM
					

4.4.1 Dimensionamento de guias a filme fluido

Guias a filme fluido apresentam projetos com características próprias que dependem de diversos fatores, as recomendações para dimensionamento de guias hidrostáticas estão no apêndice 3.

4.5 Guias especiais

Guias especiais ou mancais barra de tensão são aqueles capazes de realizar movimentos de rotação ou translação limitada, através da torção de uma barra de tensão. Os mancais barra de tensão e pivotados são amplamente utilizados em aplicações de mecânica de precisão, em especial aquelas que necessitam de pequenas rotações ou deslocamentos, ou onde os requisitos de paralelismo no deslocamento linear ou precisão no deslocamento angular são necessários.

Tabela 4.5 – Tipos de guias especiais

TIPO DEFORMAÇÃO	MOLA

4.6 Critérios de Seleção

Os parâmetros para comparação entre os diversos tipos de guias são apresentados a seguir, e são baseados nos principais requisitos funcionais utilizados na seleção, os quais são:

- custo;
- capacidade de carga;
- facilidade de fabricação;
- rigidez;
- repetibilidade de deslocamento, o que engloba a suavidade de movimento;
- Linearidade, ou precisão do deslocamento; e
- desgaste com o uso, o que define a frequência com que a guia deve sofrer manutenção para poder operar corretamente.

A seleção de uma guia deve ser fundamentada em uma série de fatores, tais como custo, dimensões disponíveis, curso, tipo de carregamento, grau de precisão desejado, tipo de movimento, ambiente de operação, entre outros. Em geral, embora existam maneiras construtivas diferentes, variando de fabricante para fabricante, as guias mantêm as concepções gerais apresentadas anteriormente, sendo as formas mais simples de guias lineares as de seção normal angular e as cilíndricas.

As guias de deslizamento ou com lubrificação hidrodinâmica, de forma geral, tem gradualmente cedido espaço para as guias de elementos rolantes, as quais proporcionam maiores velocidades de deslocamento, maiores exatidão de posicionamento e são mais fáceis de serem adquiridas ou selecionadas. Guias de escorregamento apesar de serem mais fáceis de serem projetadas apresentam um elevado *stick-slip*, são difíceis de fabricar e manter, muitas vezes necessitando de mestres rasqueteadores hábeis, para recuperá-las. Ao contrário das guias de escorregamento as guias de elementos rolantes atualmente são fornecidas nas mesmas

bases dos mancais de rolamento, contando com alto grau de padronização, e diversas classes de precisão e capacidade de carga, com a vantagem de serem mais fácil de serem instaladas, além da maior vida útil. Contudo para aplicações de exijam maior precisão guias de escorregametro ou com elementos rolantes ou pré-formados podem ser utilizadas com restrições pois as diferenças geométricas e dimensionais entre os elementos rolantes são uma importante fonte de vibrações e imprecisões durante o deslocamento.

Apesar das guias a filme fluido do tipo hidrostáticas necessitarem de um projeto específico, uma fabricação esmerada e uma montagem cuidadosa, a opção por este tipo de guias torna-se a mais atrativa quando para aplicações que exijam grande precisão, suavidade de movimento e elevada capacidade de carga como no caso de retificadoras, tornos de precisão e máquinas de medir por coordenadas.

CAPÍTULO - 5

CONVERSORES E TRANSMISSORES DO MOVIMENTO

Existe uma série de soluções mecânicas que permitem a conversão e transmissão do movimento desde sua fonte geradora até o ponto onde o movimento é desejado.

5.1 Elementos Transmissores de Movimento

A primeira forma de transmissão de movimento é através de engrenagens. O uso de engrenagem ainda é muito comum em máquinas de grande porte, porém na maioria dos casos as transmissões por engrenagens vêm cedendo espaço para as correias, principalmente as correias dentadas, também denominadas de polias sincronizadoras. O uso de polias sincronizadoras permite que transmissões de forças e movimentos sejam realizadas com alta rigidez, baixo erro de seguimento e baixo custo, se comparado com as engrenagens.

As principais formas de transmissão de movimento são:

- trens de engrenagens;
- engrenagens / sem-fim;
- engrenagens / cremalheiras;
- polias planas;
- polias em V;
- polias dentadas ou sincronizadoras;
- correntes
- rodas de atrito;
- outras

O dimensionamento dos principais elementos de transmissão de movimento é encontrado na literatura clássica de elementos de máquinas. Livros de Elementos de Máquinas de autores como Shigley, Nielman, entre outros, apresentam procedimentos detalhados para cálculo e dimensionamento dos mesmos. A esses somam-se uma série de catálogos de técnicos, manuais de auxílio ao projeto mecânico e catálogos fornecidos pelos fabricantes que estão a disposição para consulta.

Tabela 5.1 – Classificação dos elementos de transmissão de movimento

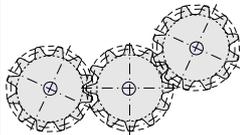
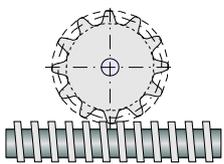
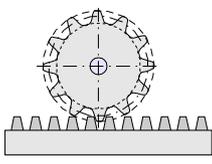
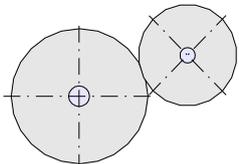
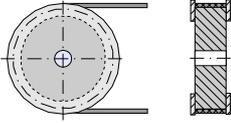
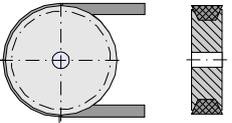
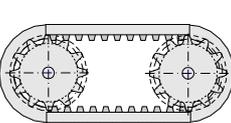
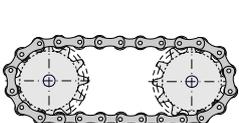
Tipo	Trens de engrenagens	Engrenagens / Sem-fim	Engrenagens / Cremalheiras	Rodas de atrito
Requisitos				
Custo	Médio	médio	baixo	alto
Vibrações	alto	médio	alto	baixo
Sincronismo do movimento	alto	alto	médio	alto
Trans.forças/torque	alta	alta	alta	baixa
Facilidade de manutenção	média	média	média	baixa
Vida útil	alta	alta	alta	alta

Tabela 5.1 - Continuação

Tipo	Polias			Correntes
	Planas	Em "V"	Sincronizadoras	
Requisitos				
Custo	baixo	baixo	baixo	baixo
Vibrações	baixo	médio	médio	alto
Sincronismo do movimento	médio	médio	alto	médio
Capacidade de transmissão de forças/torque	média	média	média	alta
Facilidade de manutenção	alta	média	média	alta
Vida útil	alta	alta	média	média

Um exemplo do uso de trens de engrenagens para a sincronização de movimento é encontrado nas máquinas-ferramentas convencionais, principalmente nos tornos onde há esta necessidade para fabricação de roscas. A Figura 5.1 apresenta dois tornos convencionais onde o primeiro (em cima) tem o sincronismo entre árvore e carro porta-ferramenta é realizado por trem de engrenagens, o segundo torno apresenta transmissão por correias dentadas e sincronismo por meio eletrônico com uso de CLP.

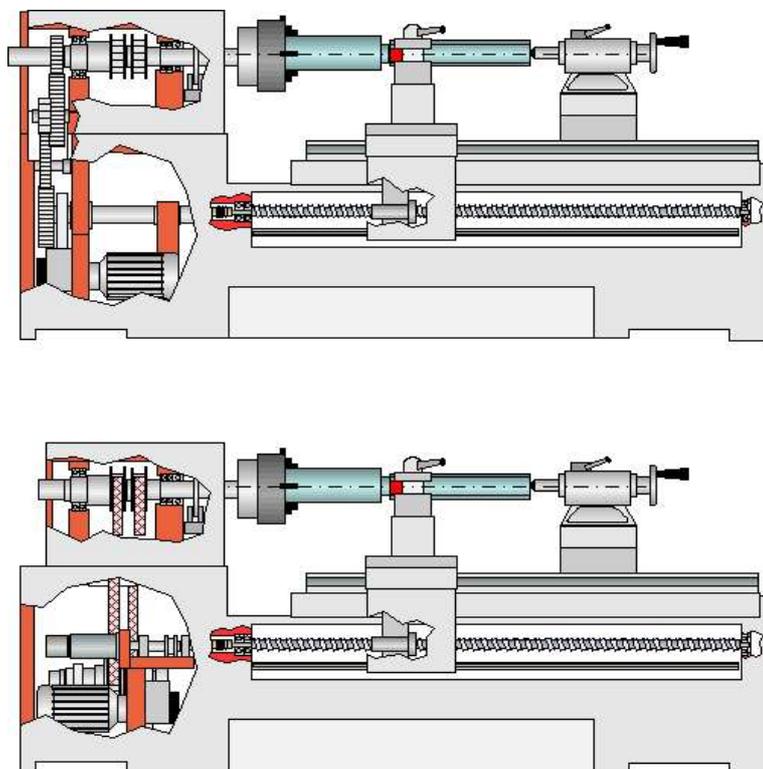


Figura 5.1 – Formas de sincronismo entre árvore e carro porta-ferramenta em tornos convencionais

5.2 Elementos Conversores de Movimento

A maioria dos acionamentos em máquinas-ferramentas são de ação rotativa. Com excessão do movimento rotação da árvore, a maioria dos deslocamentos sofridos tanto por parte da peça quanto pela ferramenta são de padrão linear. Essa diferença entre o movimento típico dos acionamentos e o padrão necessário para o movimento, leva a necessidade da conversão do movimento rotativo em linear. A conversão rotativo/linear é realizado por elementos de máquinas específicos, entre os quais podemos citar:

- pinhão/cremalheira;
- fusos trapezoidais;
- fusos de esferas recirculantes;
- fusos epicicloidais;
- fusos hidrostáticos;
- polias;
- rodas de atrito;
- entre outros.

Os fusos de maneira geral podem ser classificados quanto a forma do atrito entre castanha e parafuso em fusos de escorregamento, de elementos rolantes, epicicloidais ou hidrostáticos. As atuais máquinas-ferramentas controladas numericamente não permitem que haja folgas ou atrito excessivo nas castanhas dos fusos, o que leva a uma predominância dos fusos de esferas recirculantes. Os fusos de esferas recirculantes tem alcançado um padronização equiparada aquela encontrada nos mancais de rolamento, o que os toram os elementos de conversão mais comumente utilizados em máquinas-ferramentas.

Tabela 5.2 – Classificação dos elementos de conversão de movimento

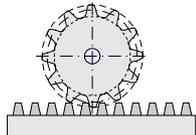
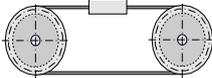
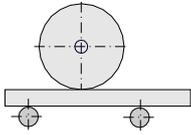
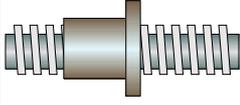
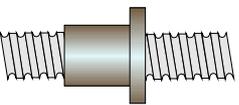
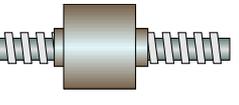
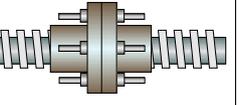
Tipo	Pinhão / Cremalheiras	Polias	Rodas de atrito	
Requisitos				
Custo	baixo	baixo	alto	
Vibrações	alto	baixo	baixo	
Exatidão no posicionamento	baixa	média	Muito alta	
Capacidade de transmissão de forças/torque	alta	baixa	Muito baixa	
Facilidade de manutenção	alta	alta	baixa	
Atrito	baixo	baixo	alto	
Vida útil	média	alta	baixa	

Tabela 5.2 – Classificação dos elementos de conversão de movimento (Continuação)

Tipo	Fusos			
	Trapezoidais	Esferas recirculantes	Epícicloidais	Hidroestáticas
Requisitos				
Custo	baixo	médio	alto	Muito alto
Vibrações	médio	baixa	bai	baixa
Exatidão no posicionamento	baixa	alta	alta	alta
Capacidade de transmissão de forças/torque	alta	alta	alta	alta
Facilidade de manutenção	média	média	baixa	baix
Atrito	alto	baixo	baixo	Muito baixo
Vida útil	média	alta	alta	Muito alta

5.2 Elementos para Acoplamento do Movimento

No projeto de máquinas-ferramentas e instrumentos de precisão, uma das tarefas consideradas mais difíceis é a de garantir o correto alinhamento entre eixo e acionamento. Independentemente dos cuidados no detalhamento do projeto, do uso de técnicas de ajustagem e uma fabricação esmerada, sempre haverá a necessidade de se compensar esse desalinhamento através do uso de acoplamentos.

Os acoplamentos são responsáveis pela realização das seguintes funções:

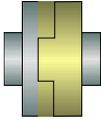
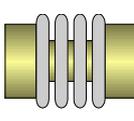
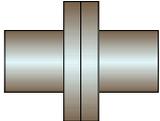
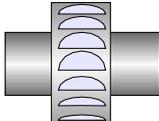
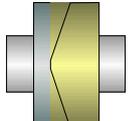
- unir eixos;
- transmitir movimentos;
- compensar desalinhamentos entre eixo motor e atuador (Davidson, 1972; Slocun, 1992; Krause, 2000; Slocun, 1988).

A compensação de erros de desalinhamento pode ser realizada dentro de certos limites. Existem diversos tipos de acoplamentos, que permitem compensar o desalinhamento em maior ou menor grau, compensando, ou não, também os erros de segmento. Os acoplamentos são classificados de acordo com seu princípio de ação em:

- permanentes,
 - rígidos;
 - flexíveis;
 - por atrito;
- não permanentes, também denominados de embreagens
 - hidráulicos;
 - magnéticos;
 - de forma.

Dependendo da magnitude do erro de desalinhamento, esses não podem ser corrigidos pelo simples uso de acoplamentos, necessitando de um reprojeto ou retrabalho na montagem, e em alguns casos até mesmo do uso de dispositivos de ajustagem que permitem a redução do desalinhamento para limites aceitáveis para o uso de acoplamentos. A tabela 6.3 apresenta a matriz de comparação para os principais tipos de acoplamentos utilizados em máquinas-ferramentas.

Tabela 5.3 - Classificação dos elementos de acoplamento do movimento

Tipo	Acoplamentos Permanentes		
	Rígidos	Flexíveis	Por Atrito
Requisitos			
Custo	5	3	3
Rigidez	5	5	4
Erro de segmento	5	4	3
Compensação do desalinhamento	1	5	1
Tipo	Embreagens		
	Hidráulicos	Magnéticos	Por Forma
Requisitos			
Custo	2	1	3
Rigidez	3	4	4
Erro de segmento	2	4	4
Compensação do desalinhamento	2	3	3

Onde: 5 - melhor e 1 - pior.

Dentre os diversos tipos de acoplamentos apresentados na tabela 5.3, os permanentes rígidos e de fricção não são recomendados por não permitirem compensação angular ou induzirem a erros de segmento. Assim, para acoplamentos permanentes os tipos flexíveis são os mais indicados.

Quando há necessidade de se empregar acoplamentos não permanentes, ou embreagens, estes tendem a ser do tipo mecânico de forma ou magnéticos. Ambos tendem a não promover erros de segmento ou induzir vibrações quando em operação (Davidson, 1972; Slocun, 1992; Krause, 1993; Slocun, 1988).

CAPÍTULO - 6

SISTEMAS DE CONTROLE

O sistema de controle, e sua respectiva eletrônica, é responsável por gerenciar todas as informações relevantes da máquina, sendo que essas podem ser divididas em informações primárias e secundárias. As informações primárias restringem-se ao controle dos movimentos principais da máquina, distribuídos entre a rotação da árvore e as translações dos eixos incluindo direção, aceleração e velocidade de avanço e tamanho dos deslocamentos. As informações secundárias levam ao controle das funções pertinentes ao controle dos sistemas auxiliares, tais como refrigeração, aspiração e transporte de cavaco, pressão nas linhas ar comprimido e fluido hidráulico, vácuo, temperatura e estado de deformação da estrutura, níveis de vibrações, potência consumida, etc., provendo ao usuário informações gerais sobre o estado da máquina e o andamento do processo. O sistema de controle serve de interface entre o usuário externo e a máquina. Esta pode atuar de duas formas distintas sobre o movimento:

- malha aberta, onde não há realimentação de posição e o deslocamento é controlado pelo número de pulsos enviados aos acionamentos;
- malha fechada, onde há a necessidade de se realimentar a malha com informações de posição, velocidade ou equivalentes, conforme a figura 2.17.

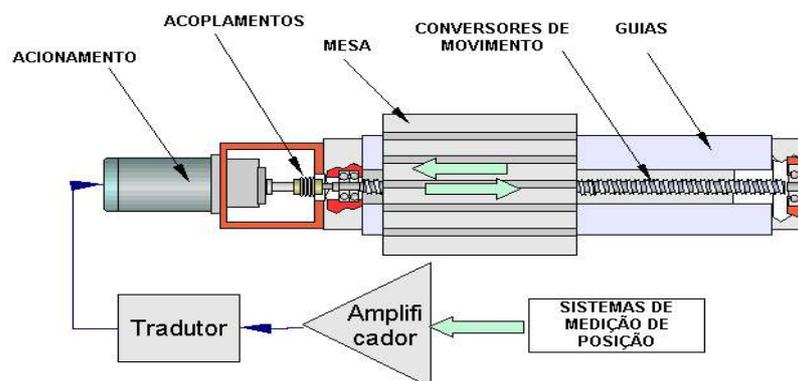


Figura 6.1 – Controle de acionamentos em malha aberta

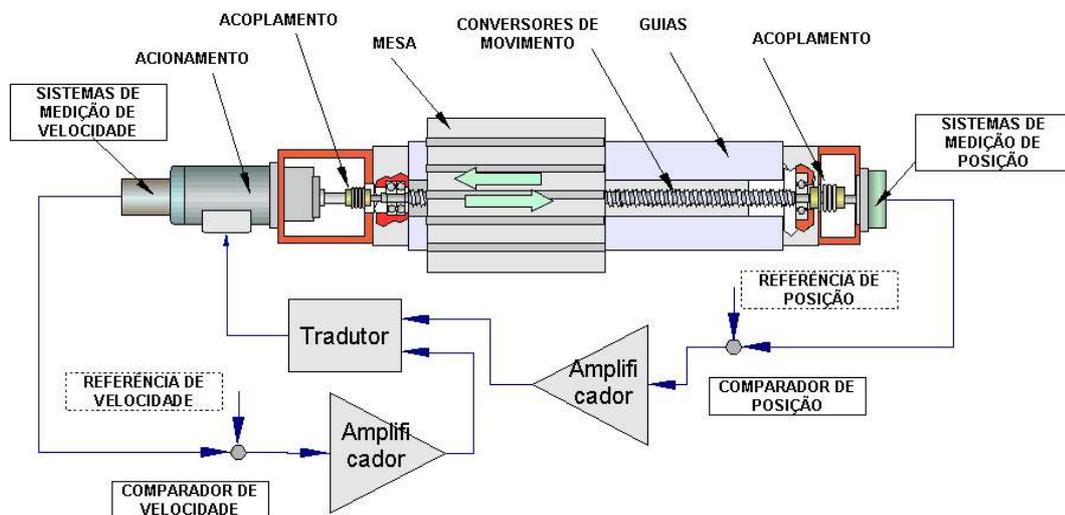


Figura 6.2 – Controle dos acionamentos em malha fechada

De forma geral os comandos podem ser adaptados em qualquer máquina-ferramenta desenvolvida para ser controlada numericamente. Os comandos podem ser classificados quanto:

- a) a forma como os parâmetros de controle são manipulados,
- b) a forma de processamento dos sinais, e
- c) quanto a sua autonomia com relação a máquina.

Com relação a forma como os parâmetros de controle são manipulados os comandos são denominados de abertos ou fechados, nos primeiros os parâmetros de controles são definidos especificamente para uma determinada máquina, não podendo ser alterados. Nesse caso em caso quando há à necessidade de se proceder alterações na máquina ou na malha de controle, é necessário se proceder alterações físicas no comando. Nos comandos de malha aberta as alterações na malha de controle, ou mesmo mudanças na estratégia de controle podem ser realizadas de forma mais fácil, até mesmo via programa, sem a necessidade de alteração no hardware do mesmo.

Quanto a forma de processamento de dados os comandos são classificados em analógicos e digitais.

De outra forma, os comandos também podem ser classificados como autônomos, quando a eletrônica está contida em um pacote auto-suficiente, ou dependente, quando montados como hospedeiros em outra plataforma, atuando de forma semi-independente e constantemente trocando informações com este.

A tabela 6.1 apresenta a matriz de comparação dos comandos, relacionando os tipos com a forma de avaliação dos mesmos.

Tabela 6.1 - Comparação dos comandos numéricos.

TIPO	ABERTO		FECHADO	
	AUTÔNOMO	DEPENDENTE	AUTÔNOMO	DEPENDENTE
CUSTO	5	4	3	2
Resolução de interpolação		5	5	5
Facilidade de programação	5	5	5	5
Flexibilidade de <i>HARDWARE</i>	5	4	3	2
Capacidade de armazenamento	3	4	5	5
Velocidade de processamento	4	4	5	5

Onde: 5 - melhor e 1- pior.

CAPÍTULO - 7

ACIONAMENTOS

Atualmente existe no mercado uma série de sistemas de acionamento para atender a maior parte das necessidades de projeto e fabricação de máquinas-ferramentas. Aqui serão apresentado e discutidos o dois tipos principais de acionamentos para máquinas-ferramentas, os quais são divididos de acordo com sua forma de atuação, em de **ação rotativa** e de **ação linear**.

7.1 ACIONAMENTOS ROTATIVOS

Acionamentos rotativos são os mais comumente encontrados em máquinas-ferramentas, sendo seu uso amplamente difundido entre os projetistas, tanto pela diversidade de oferta quanto pela facilidade de seleção. A aplicação destes acionamentos pode ser dividida entre os sistemas de posicionamento e de rotação da árvore.

Para o uso em árvores não há a necessidade de conversão de movimento, pois ambos apresentam movimento rotativo. Porém, em muitos casos existe a necessidade de se promover reduções (ou ampliações) no movimento, como forma de se adequar o torque ou velocidade de giro, por exemplo. Nestes casos o uso de correias, engrenagens, rodas de atrito, entre outras, se faz necessário.

Em máquinas-ferramentas controladas numericamente existem três tipos básicos de acionamentos rotativos, tanto em árvores como em sistemas de posicionamento.

7.1.1 Motores Assíncronos

Apesar de muita pesquisa estar sendo realizada ao longo das últimas décadas sobre o controle de motores assíncronos, estas ainda não apresentaram resultados que permitissem que os mesmos sejam utilizados em malhas de controle realimentadas. Contudo esse tipo de motor tem amplo emprego em árvores de máquinas e outras aplicações que não exijam um controle mais apurado.

O barateamento e a diminuição das dimensões dos variadores de frequência permitiu que os motores assíncronos possam ser utilizados em uma ampla gama de velocidades, com variações contínuas e sincronizadas, sem a necessidade de caixas de redução e seus trens de engrenagens.

Os parâmetros para seleção e dimensionamento de motores assíncronos é amplamente apresentado e discutido na disciplina de eletrotécnica geral do curso de graduação, não sendo assim necessário um aprofundamento no assunto.

7.1.1 Servomotores de Corrente Contínua - CC

São motores de alto desempenho empregados onde as condições de partida e parada devem ser realizadas de forma rápida e precisa. Nestes, o torque é controlado pela corrente de armadura ou pela corrente de campo e a velocidade, pela tensão.

7.1.2 Servomotores de Corrente Alternada - CA

Basicamente são motores de indução reversíveis, com fases e modificados para servo-operação. São encontrados em duas formas:

- servomotores de corrente alternada assíncronos;
- servomotores de corrente alternada síncronos.

7.1.3 Motores de Passo

Motores de passo são transdutores que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos discretos denominados de passos. Os motores de passo rotativos são classificados quanto às formas construtivas, as quais são:

- motores à relutância variável;
- motores a imã permanente;
- motores híbridos.

Tabela 5.1 – Comparação dos acionamentos rotativos

	SERVOMOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA CC		SERVOMOTORES DE CORRENTE ALTERNADA CA		MOTORES DE PASSO		
	COMUTAÇÃO MECÂNICA	COMUTAÇÃO ELETRÔNICA	ASSÍNCRONOS	SÍNCRONOS	RELUTÂNCIA VARIÁVEL	IMÃ PERMANENTE	HÍBRIDOS
CONTROLE	5	5	1	3	5	5	5
MANUTENÇÃO	5	5	0	0	5	5	5
CUSTO	5	5	5	3	5	5	3
DINÂMICA	4	4	4	4	4	4	4
TORQUE	4	5	4	4	3	3	4
CURSOS	5	5	5	5	5	5	5
Precisão de giro	5	5	2	2	3	3	5

Onde: 5 – excelente, 4 – bom, 3 – moderado, 2 – regular, 1- ruim e 0 – não aplicável.

7.2 ACIONAMENTOS LINEARES

Acionamentos lineares são aqueles em que o padrão de deslocamento é de translação, não havendo a necessidade de se introduzir elementos para conversão de movimento como, por exemplo, fusos. Existem poucos elementos de acionamento linear para aplicações em máquinas-ferramentas, dos quais podemos citar abaixo os principais:

7.2.1 Atuadores Hidráulicos/Pneumáticos

Os atuadores hidráulicos e pneumáticos apresentam como principal característica a capacidade de transmissão de elevadas forças, e seu uso em máquinas é bastante difundido. Apesar de pesquisas recentes já proporcionarem formas de controle de posição e velocidade em atuadores hidráulicos e pneumáticos, esses ainda encontram limitação quanto ao uso em máquinas-ferramentas, em função da dificuldade de controle de posicionamento. Contudo, para aplicações dedicadas, tais como torneamento e retificação longitudinal e faceamento, sua utilização é quase unânime em função da relação custo/benefício que oferecem (NN-3; Weingaertner, 1992).

7.2.2 Atuadores PIEZELÉTRICOS

O efeito piezométrico é uma propriedade de determinados materiais de gerarem uma diferença de potencial elétrica quando submetidos a deformações ou vice-versa, como, por exemplo, em cristais de quartzo. Este efeito é amplamente explorado em transdutores de pressão, força e deformação.

Os atuadores piezométricos têm ampla aplicação em sistemas que necessitem pequenos cursos de deslocamento e são muito usados no ajuste fino de ferramentas de corte em usinagem de ultraprecisão e na estabilização de sistemas ópticos.

Quanto à forma, estes podem assumir o formato de discos, barras e cilindros (Slocun, 1992), sendo que a figura 5.1 apresenta acionamentos piezométricos de diversas configurações. Atualmente as cerâmicas piezométricas têm substituído os cristais naturais, e podem ser sinterizadas de acordo com a forma que se deseja (Weck, 1992).

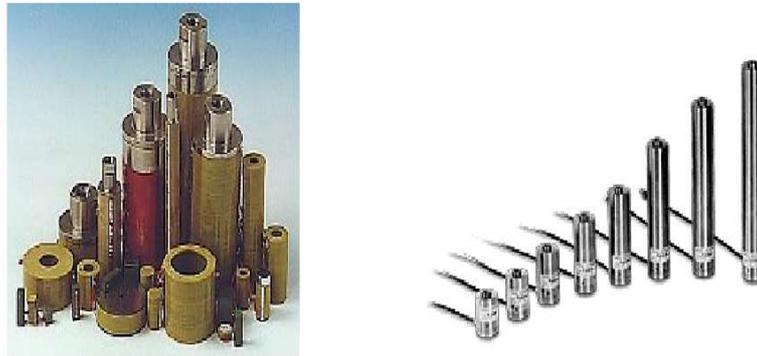


Figura 7.1 – Acionamentos piezeétricos (Physics Instrumente, 2000)

7.2.3 Motores Lineares

Motores lineares podem ser definidos como transdutores que transformam sinais elétricos em movimentos de translação. São projetados para executar movimento linear diretamente, sem a necessidade de acoplamentos mecânicos. Um motor linear pode ser melhor descrito como um motor rotativo tradicional que é aberto e realiza um movimento em linha. Ao contrário dos motores rotativos, onde os parâmetros de referência são velocidade angular e torque, nos motores lineares as componentes do movimento são referenciadas como força e velocidade de translação. A força atua ao longo do deslocamento da componente estacionária, a qual é denominada de estator ou padrão, enquanto que o elemento móvel é referenciado como translator ou cursor (Vasquez, 1994; Weck-2, 1992; NN-4; Krause, 2000).

Os motores lineares podem ser classificados em quatro tipos:

- Motores DC com escovas
- Motores assíncronos de indução
- Motores síncronos sem escovas; e
- Motores de passo linear.

Na prática, os motores lineares DC com escovas raramente são utilizados devido à sua deterioração mecânica (desgaste das escovas) e à conseqüente necessidade de manutenção. Os motores lineares assíncronos também não são utilizados, devido à sua dificuldade de controle.

As vantagens no emprego de motores lineares, em contraste com sistemas com atuadores e motores convencionais, podem ser assim resumidas:

- alta velocidade e aceleração;
- operação suave e alta precisão de posicionamento;
- alta gama de velocidades;
- sem limites de deslocamento;
- alta rigidez;
- simplicidade mecânica (não há necessidade de conversores de movimento);
- sem *backlash* mecânico;
- forças múltiplas em um mesmo estator.

Aplicações típicas:

- inspeção e teste de semicondutores;
- manipulação de materiais compósitos;
- dobramento de arames;
- produção de placas de circuitos impresso;
- mesas X-Y;
- posicionamentos em múltiplos estágios;

- manipuladores e movimentadores (*pick and place*);
- montagens automáticas;
- máquinas-ferramentas CNC;
- máquinas de gravação;
- máquinas de corte a laser;
- equipamentos de armazenagem, etc..

Cabe salientar que em algumas situações esbarra-se na dificuldade de obtenção destes elementos, quer pelo custo elevado, quer pelas restrições impostas pelos países de origem (Vasquez, 1994; Weck-2, 1992; NN-4; Krause, 2000).

7.2.4 Outras Formas de Acionamentos Lineares

Os itens anteriores foram apresentadas as formas mais usuais de acionamentos em máquinas-ferramentas ou sistemas de precisão. Contudo, no campo da nanotecnologia, outras formas também podem ser consideradas:

- ⇒ **Micrômetro manual** – são bastantes difundidos e podem proporcionar uma solução de baixo custo para muitos problemas de acionamento de precisão para cursos curtos e médios (Smith-Chetwynd, 1994; Davidson, 1972; Krause, 2000).
- ⇒ **Eletrorestrição** – baseado em um efeito similar ao efeito piezoelétrico, as cerâmicas eletrorestrições operam com gradiente de campo para gerar a tensão, que pode ser conceituada como uma deformação resultante (Smith-Chetwynd, 1994, Krause, 2000).
- ⇒ **Roda de atrito** – existem três grupos distintos de rodas de atrito. Um baseado no travamento por atrito, outro baseado na inércia de um objeto para superar as forças de atrito e um terceiro que compreende uma forma híbrida dos dois primeiros (Smith-Chetwynd, 1994; Slocun, 1992; Mizumoto et. al., 1995).
- ⇒ **Magnetoestrição** – princípio muito similar ao piezoelétrico, contudo a deformação é causada pela presença de um campo magnético.
- ⇒ **Magnetoelasticidade** – baseia-se na capacidade que todos os materiais magnéticos têm para alterar seu módulo de elasticidade na presença de campos magnéticos uniformes (Smith-Chetwynd, 1994; Krause, 2000).
- ⇒ **Ligas de memória mecânica** – algumas ligas, notadamente as de níquel e titânio, apresentam uma transformação de fase reversível entre a estrutura martensítica e austenítica, as quais têm propriedades elásticas muito diferentes (Smith-Chetwynd, 1994; Calister, Jr. 1994).
- ⇒ **Ligas bi-metálicas** – princípio muito utilizado em disjuntores de segurança, baseado na união de dois materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica, sendo o deslocamento proporcional à variação de temperatura (Smith-Chetwynd, 1994).
- ⇒ **Eletro-magnético** - os atuadores eletromagnéticos operam dentro do mesmo princípio dos solenóides com mola. Nestes a força é não-linear porém a facilidade de controle em malha aberta os torna atrativos para aplicações tais como travamento. Em aplicações que necessitem controle de posicionamento, estes não são aplicados (Smith-Chetwynd, 1994).
- ⇒ **Elestrostático** – baseado no princípio da atração entre corpos com diferença de potencial (Smith-Chetwynd, 1994).
- ⇒ **Relação de Poisson** - baseada na teoria da elasticidade dos materiais onde é possível se obter deslocamento, resultante de deformações, em função da aplicação de pressão.

7.3 Seleção e Conclusões

A primeira consideração relativa a seleção de acionamentos refere-se quanto a sua utilização, ou seja, como fonte de força de velocidade para a ação de corte como nas árvores, ou como meio de prover movimentação de carros, mesas, portais e afins. De forma geral é recomendado que a seleção de um acionamento, qualquer que seja a natureza do movimento, tenha como considerações primárias a suavidade (dinâmica) de movimento e a precisão de posicionamento, sem contudo se negligenciar fatores como potência e velocidade. A estas seguem o custo e definições de projeto tais como as forças necessárias, cursos, espaço de montagem, esforços envolvidos, quantidade de calor gerada, dentre outras.

Utilizando-se uma comparação simples para a análise dos diversos tipos de motores para acionamento, pode-se montar uma matriz de escolha ou seleção (tabela 4.3) para formar a base de tomada de decisões na escolha dos acionamentos.

Os acionamentos podem ser comparados com base nos seguintes requisitos:

- custo;
- força ou torque;
- utilização (árvore ou posicionamento de guias);
- curso;
- dinâmica (resposta a entrada, aceleração e desaceleração);
- facilidade de controle;
- exatidão do movimento, e
- padrão do movimento (rotativo ou linear).

Com base nos requisitos algumas considerações podem ser feitas.

- Sobre as aplicações em árvores de máquinas-ferramentas de ultraprecisão:
 - Os servomotores CC sem escovas são os mais apropriados, porém servo motores CA assíncronos e motores de passo com ímã permanente ou híbridos também podem ser utilizados.
- Sobre as aplicações de posicionamento:
 - Os motores rotativos de passo do tipo híbridos e os servomotores CC sem escovas são os mais adequados para esta função.
 - Acionamentos lineares são aplicados exclusivamente em posicionamentos de longo curso. Dentre os vários tipos apresentados, os motores lineares síncronos sem escovas e de passo linear são os mais indicados para cursos longos. Por outro lado, a literatura tem fornecido indicações de que o uso de rodas de atrito proporciona melhores resultados (NN-2; Sakai, 1994; Mizumot et. al. 1995).
 - Em aplicações de pequeno curso, ou microdeslocamentos, onde o uso de outros tipos de acionamentos não se justifica, quer por razões de controle, quer por razões de espaço físico, sistemas piezelétricos são os mais empregados (Smith-Chetwynd, 1994, NN-2; Slocun, 1992; Krause, 2000).

CAPÍTULO - 8

SENSORES PARA EMPREGO EM MÁQUINAS-FERRAMENTAS

O barateamento da eletrônica, associada a aumento na capacidade de processamento levaram a adoção de soluções eletrônicas onde antes somente se adotavam soluções mecânicas de alto custo. A eletrônica embarcada nas máquinas atuais permitem que essas sejam melhores, tenham melhor desempenho, sejam mais flexíveis, mais amigáveis, tenham maior confiabilidade à custos acessíveis. Isso se deve aos avanços da eletrônica de controle e aos sensores a ela associados.

Atualmente, existe uma ampla e variada gama de sensores que permitem a medição da maior parte das grandezas físicas conhecidas. Em máquinas-ferramentas os principais sinais são obtidos com sensores para a detecção de:

- força,
- potência efetiva,
- temperaturas,
- deformações,
- emissão acústica mecânica ou por via fluídica,
- vibrações,
- distâncias,
- outros

Todas estas informações podem ser medidas diretamente nos diversos sistemas que compõem a máquina. A melhor escolha dos sensores que serão utilizados depende da resolução que se deseja obter, das velocidades de movimentação, das funções da máquina que serão monitoradas, incluindo aquelas que atuam diretamente na segurança, e da necessidade, ou não, da incorporação de sistemas ativos de monitoramento.

Em máquinas-ferramentas dois tipos de sensores são utilizados:

- os passivos, tais como os sensores de fim de curso; e
- os ativos, utilizados para monitorar o comportamento das mais diversas variáveis durante o processo.

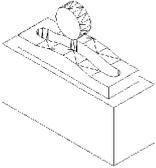
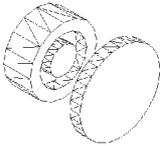
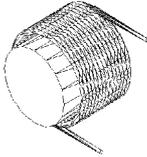
8.1 Sensores Passivos

Os sensores passivos são aqueles que informam o estado das variáveis do sistema, passando a fornecer um sinal de saída dual, proporcional a uma situação favorável ou não, pré estabelecida previamente. De forma geral os sensores passivos não realimentam o processo, não permitindo a compensação em tempo real do estado da máquina de forma a manter o processo estável. Esse tipo de sensor tem atuação muito limitada, normalmente interrompendo o processo quando os valores limites são ultrapassados, caso dos sensores de pressão, temperatura e fim de curso, em geral atuando diretamente na segurança da máquina, operador e processo.

8.1.1 Sensores de fim de curso

Os sensores de fim de curso têm por função evitar que, ante eventuais falhas do sistema de posição dos carros, os mesmos venham a provocar danos por choque na estrutura. Sua instalação geralmente é realizada aos pares, de forma seqüencial. O primeiro sensor determina o fim de curso, atuando sobre o controle no sentido de parar o movimento, sem contudo perder as informações de referência e de programação da máquina. O segundo sensor atua da mesma forma, porém sua atuação sobre o controle é tal, que interrompe toda e qualquer ação de movimento da máquina, desligando todos os sistemas e perdendo as informações de referência e programação.

Tabela 8.1 - Comparação dos sensores de fim de curso.

PRINCÍPIO	ELETEOMECÂNICO	CAPACITIVO	INDUTIVO	ÓPTICO-ELETRÔNICO
REQUISITOS FUNCIONAIS				
Custo	5	4	4	4
Vida útil	4	3	3	2
Eficiência	5	3	4	2

Onde: 5 – melhor e 1 – pior.

8.2 Sensores Ativos

Consideram-se sensores ativos aqueles que monitoram e realimentam a malha de controle, interferindo sobre os resultados finais do trabalho. Nesses podemos incluir também os sensores de pressão, temperatura, além dos de deformação, posição, corrente, tensão, velocidade, aceleração, torque entre outros. Entre os diversos tipos de sensores o de maior importância em máquinas-ferramentas são:

- os de posição, cujos sensores definem diretamente a resolução de posicionamento da máquina;
- os sensores velocidade, que são associados diretamente aos acionamentos e são utilizados para estabilizar a malha de controle.

Apesar de existirem diversos sensores de velocidade, tais como os comumente conhecidos resolvers, a realimentação de velocidade ou aceleração pode ser feita através de derivações ou integrações sucessivas do deslocamento no tempo. Normalmente para esse fim são utilizados sensores específicos para velocidade (tacogeradores) e aceleração (acelerômetros), quando se deseja realimentar a malha de controle com estas variáveis.

8.2.1 Sensores de posição

Medir segundo a norma ISO 1000 significa quantificar algo com relação a um padrão. Em máquinas-ferramentas, a comparação com o padrão do metro é traçável. Os deslocamentos lineares e angulares podem ser medidos com alta resolução.

As formas de medição podem ser classificadas de acordo com princípios físicos, sendo as mais comuns (Smith-Chetwynd, 1994; Weck, 1992; Slocun, 1992; Warnecke, 1984, Heidenhain, 19--):

- mecânica;
- fotoelétrica;
- indutiva;
- magnética;
- interferencial.

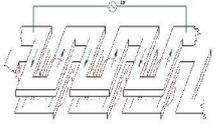
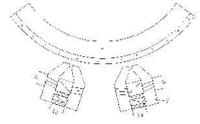
Em máquinas-ferramentas controladas numericamente há a necessidade de que os sistemas de medição sejam capazes de realimentar a posição ao longo de um deslocamento, o que descarta o uso de sistemas mecânicos tais como parafusos, nônio, parafusos diferenciais relógios comparadores e afins. Ocasionalmente os sistemas mecânicos de medição são empregados como elementos auxiliares para realização de pequenas correções e ajustes em sistemas e dispositivos mecânicos de precisão, tais como um porta-ferramentas.

Para as aplicações em máquinas-ferramentas a escolha do sistema deve seguir alguns requisitos básicos, tais como:

- resolução;
- faixa de operação;
- repetibilidade;
- velocidade de medição;
- estabilidade durante a operação;
- facilidade de montagem
- facilidade de ajustagem, e
- custo (Warnecke, 1984, Ernst, 1989).

O comum em máquinas-ferramentas NC é a utilização de somente um sistema de medição de posição para realimentação, podendo este ser feito por sensores diretos, em que a função transferência entre posição lida e posição real é direta (ex.: movimento linear/encoder linear), ou indiretos, em que há a necessidade de transformar o valor lido para valor real (ex.: movimento linear/encoder angular). Atualmente, em aplicações de alta e ultraprecisão, a realimentação de posição de forma única está sendo substituída por sistemas de dupla realimentação, ou realimentação em dois estágios. A realimentação em dois estágios tem se mostrado mais vantajosa, tanto do ponto de vista da confiabilidade quanto da precisão final possível de ser obtida. A dupla realimentação se divide em dois sistemas: um destinado ao posicionamento grosseiro (até 0,1 mm) e outro, ao posicionamento fino (>0,1 mm). A adoção de dois sistemas de realimentação pode ou não estar associada ao uso de dois sistemas de posicionamento distintos em um único eixo, como por exemplo no uso de uma combinação de motor de passo/fuso/encoder para macrod deslocamentos e sistema piezelétrico para microdeslocamentos. A realimentação em dois estágios permite um melhor controle do processo em alta e ultraprecisão, porém a um custo maior, devido a maior complexidade necessária ao sistema de controle (*software e hardware*) (Armstrong, 1994, Yonezawa, H.; Hirata, Y.; Sasai, H., 1990; Futami, S.; Furutani, A.; Yoshida, S. 1990; Moriyama, S.; Harada, T.; Takanashi, 1988).

Tabela 8.2 - Comparação dos sensores de posição rotativos ou angulares

DESLOCAMENTOS	ROTATIVOS			
	FOTOELÉTRICO	INDUTIVOS	MAGNÉTICOS	INTERFERÊNCIAL
				
RESOLUÇÃO	4	3	3	5
FAIXA DE OPERAÇÃO	5	5	5	5
REPETIBILIDADE	5	4	4	5
VELOCIDADE DE LEITURA	4	3	3	3
ESTABILIDADE	5	4	4	4
MONTAGEM E AJUSTAGEM	5	5	5	4
CUSTO	3	5	4	1

Onde: 5 – melhor e 1 – pior.

Tabela 8.3 -Comparação dos sensores de posição lineares

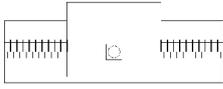
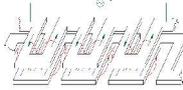
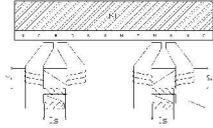
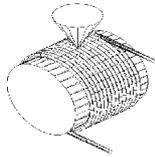
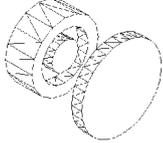
DESLOCAMENTOS	LINEARES		
	FOTOELÉTRICOS	INDUTIVOS	MAGNÉTICOS
			
RESOLUÇÃO	4	3	3
FAIXA DE OPERAÇÃO	4	4	3
REPETIBILIDADE	5	3	3
VELOCIDADE DE LEITURA	4	3	3
ESTABILIDADE	5	5	5
MONTAGEM E AJUSTAGEM	5	5	5
CUSTO	4	5	5

Tabela 8.3 -Comparação dos sensores de posição lineares (Continuação)

DESLOCAMENTOS	LINEARES		
	INTEFERÊNCIAL	RESISTIVO	CAPACITIVO
			
RESOLUÇÃO	5	3	4
FAIXA DE OPERAÇÃO	5	4	1
REPETIBILIDADE	5	3	3
VELOCIDADE DE LEITURA	3	3	1
ESTABILIDADE	3	4	2
MONTAGEM E AJUSTAGEM	3	5	5
CUSTO	2	3	4

Onde: 5 – melhor e 1 – pior.

8.3 Aspectos da integração Mecânica-Eletrônica

CAPÍTULO - 9

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM E DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

9.1 Introdução

Os principais fatores responsáveis por paradas não programadas nos processos convencionais de usinagem são decorrentes do fim de vida prematuro da ferramenta, quebra ferramenta e formação de cavacos irregular. Esses fatores são responsáveis por cerca de 50 a 60% do tempo parado, sendo fortes responsáveis pela perda de produtividade nos processos de usinagem. A esses fatores somam-se também a problemas de perdas de tolerâncias dimensionais, de formas e qualidade superficial.

A única forma de automatizar o processo, com garantia de aumento de produtividade, está na inserção de sensores que possibilitem o estabelecimento de uma malha de controle baseada nas relações de causa e efeito dos processos de usinagem. Como por exemplo podemos citar a progressão do desgaste das ferramentas, que tem como conseqüências o aumento das forças de usinagem, vibrações, temperaturas, má formação dos cavacos, perda de qualidade de forma, geométrica e piora na rugosidade.

Desta forma os sistemas de monitoramento tem como objetivos:

- maximizar os tempos principais,
- evitar o refugo de peças;
- evitar a necessidade de retrabalho de peças;
- reduzir ou eliminar os risco de colisões entre ferramenta e peças ou máquina, e
- eliminar problemas de imperícia de operadores e programadores
- detecção de colisões
- detecção de contato
- detecção de falta
- detecção de quebra
- monitoramento dos mancais da árvore
- detecção de desgaste
- balanceamento de peças
- detecção e limitação de desbalanceamentos
- monitoramento da condição de componentes da máquina ferramenta

As relações entre potência de corte e os parâmetros de corte são conhecidas há muito tempo, e serviram para estabelecer os primeiros parâmetros de controle do processo. As primeiras tentativas de monitorar o processo de usinagem foram feitas através do acompanhamento da potência consumida no acionamento principal, por meio da corrente elétrica consumida. Na prática bastava adicionar um amperímetro as conexões do acionamento e estabelecer um limite proporcional a potência máxima do mesmo. Contudo essa forma de monitoramento mostrou-se pouco eficiente, pois não permitia interagir diretamente sobre a máquina-ferramenta em caso de falha, e o principal instrumento da interface entre o sistema de monitoramento e a máquina ainda era o operador. O desenvolvimento das máquinas numericamente comandadas, e o forte impulso nudesenvolvimentode sensores nos anos 80, do século passado, permitiram o desenvolvimento de formas e estratégias de controle mais complexos, rápido e baratos, e principlamente transferindo a responsabilidade das tomadas de decisões do operador para o computador.

Desta forma os sistemas de monitoramento deve apresentar os seguintes requisitos:

- Velocidade de resposta - capacidade desse de interferir no processo de forma quase imediata
- devem ser autônomos e funcionais, ou seja, devem operar de forma independente do tipo de controle a que estão acoplados
- Compatibilidade com diversos sensores
- Processamento dos sinais dos sensores sem a necessidade de tratamento de sinal prévio ==> defasagem

Os modernos sistemas de monitoramento se valem de sensores eletrônicos de alta sensibilidade e confiabilidade, com saídas apropriadamente configuradas para interfacear com CLPs e CNCs. A figura 9.1 apresenta o diagrama funcional de um sistema de controle de processo segundo (Kluf, 1983 apud Pereira Filho, 2000).

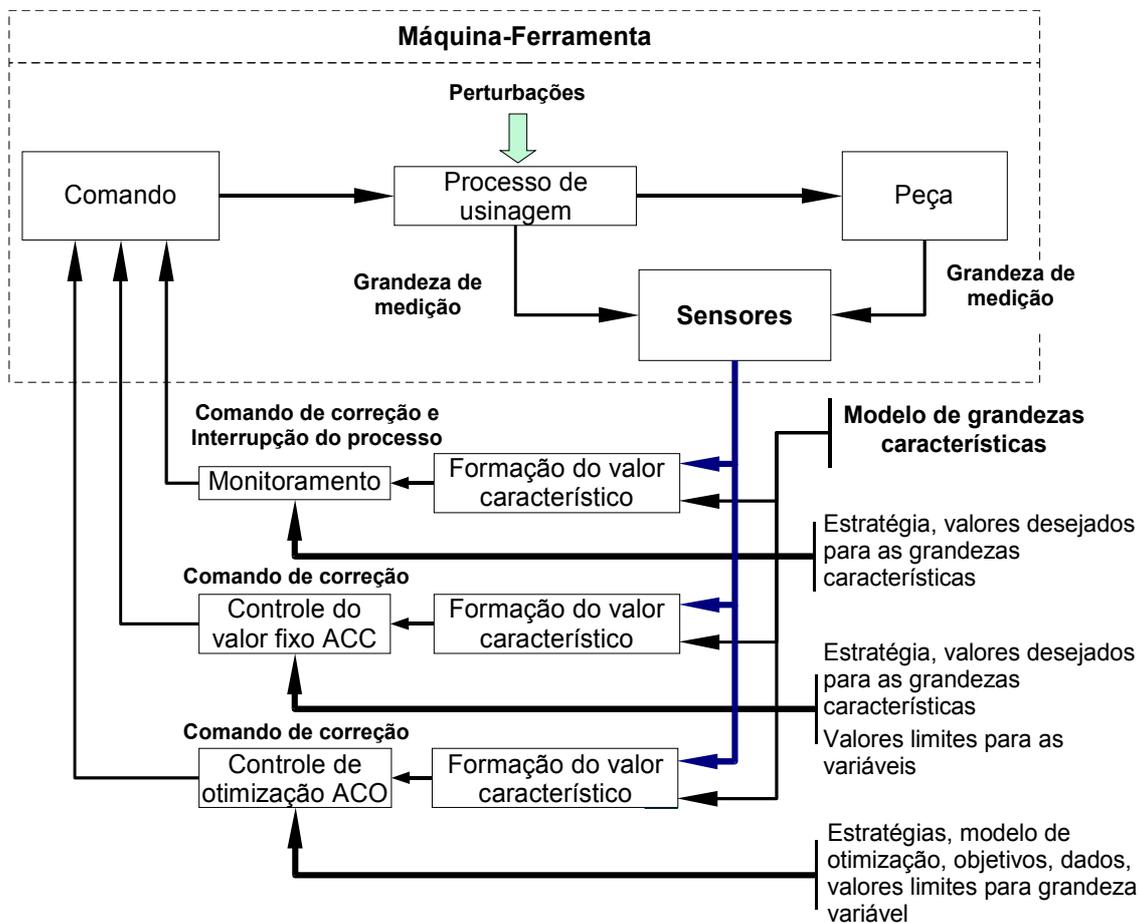


Figura 9.1 – Diagrama funcional de um sistema de controle de processo (Kluft apud Pereira Filho, 2001)

Atualmente os sistemas de monitoramento apresentam características modulares, compartilhando sensores e plataformas de processamento, podendo ser instalados em praticamente em qualquer máquina-ferramenta em produção, ou processo de atualização. Os modernos sistemas de monitoramento existentes no mercado monitoram não só o processo de usinagem, em particular o estado da ferramenta, mas são capazes também de monitorar toda a máquina. Essa capacidade ampla de monitoramento permite identificar a necessidade de manutenções preventivas, e até mesmo o diagnóstico *on-line* de máquina e processo levando a ações corretivas para a melhoria do processo.

9.1 Monitoramento em tempo real (RTM)

Um dos principais requisitos no desenvolvimento de um sistema de monitoramento é a capacidade desse de interferir no processo de forma quase imediata. A única forma de se alcançar esse objetivo é através de alta capacidade de processamento, e a realização desse em tempo real. Associado ao requisito de velocidade de resposta os sistemas de monitoramento modernos devem ser autônomos e funcionais, ou seja, devem operar de forma independente do tipo de controle a que estão acoplados. O requisito de autonomia também representa a capacidade desses de processarem informações recebidas de sensores sem a necessidade de tratamento de sinal prévio, o que demanda em defasagem dos sinais e interfaces específicas para a comunicação entre os módulos.

9.2 Forma de processamento do sinal

O reconhecimento de falha no processo é estabelecido através da comparação com um valor de referência, estabelecido para o ciclo de usinagem do componente

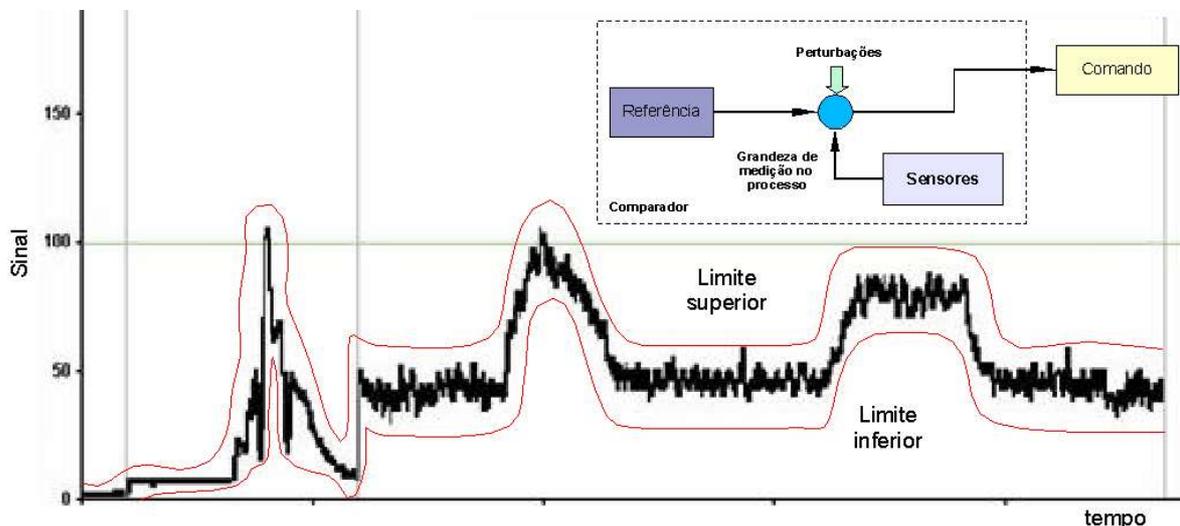


Figura 9.2 – Processamento do sinal (baseado em Klufft, 2002)

Reconhecimento de falha ocorre por sinais deslocados no tempo, amplificados ou reduzidos pela:

- quebra ou encurtamento da peça ou ferramenta
- Falta da ferramenta ou da peça
- Ferramenta ou peça errada

Indispensável para a detecção da quebra de ferramenta durante o desbaste de peças brutas no torneamento de peças fundidas e peças forjadas

- detecção da quebra da ferramenta em 5 ms
- parada total dos avanços depois da quebra da ferramenta após uma rotação da peça
- danos secundários minimizados de forma eficiente

O alarme é ativado se, para o tempo pré-estabelecido, o sinal ascendente ou descendente não passou pelo limite, conforme a figura 9.3

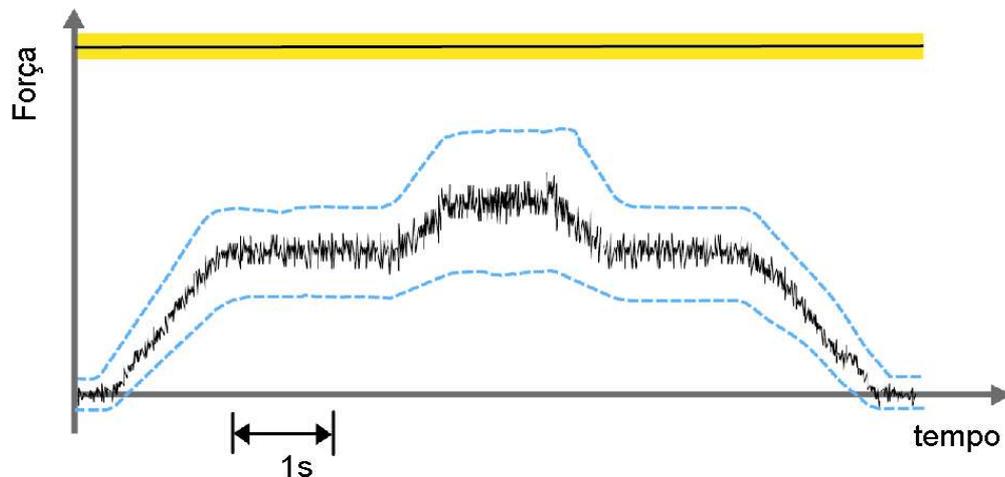


Figura 9.3 – Exemplo de ativação do sinal de alarme (Kluft, 2002)

O estabelecimento de limites dinâmicos no processamento do sinal permite:

- sempre numa distância ótima ao sinal de força
- detecção de quebra durante o desbaste no torneamento de peças brutas forjadas e fundidas
- ativo independentemente do ajuste dos limites

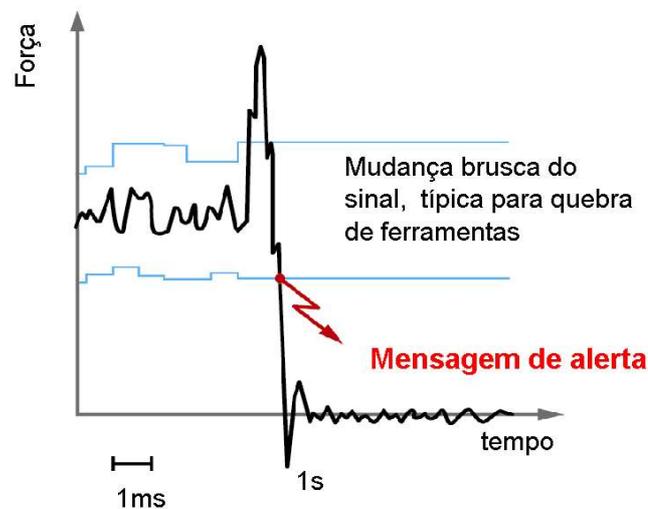


Figura 9.4 – Exemplo processamento de sinal com sobreposição do valor de referência (Kluf, 2002)

9.3 Monitoramento da árvore

As árvores de máquinas-ferramentas podem ser monitoradas com relação ao seu estado de operação, principalmente se levarmos em conta que todos os erros gerados nesta refletem-se diretamente na peça. Erros devido a desvios excessivos gerados pelos carregamentos (peça, ferramenta e esforços do processo), erros devido a desbalanceamentos, erros devido a perdas das características dos mancais, deformações geradas por temperaturas, entre outros podem ser monitorados e controlados de forma a melhorar os resultados da usinagem.

O monitoramento da árvore segue os mesmos princípios descritos anteriormente, sendo que as principais variáveis acompanhadas são:

- monitoramento de forças radiais e axiais
- monitoramento dos mancais da árvore
- detecção de desgaste
- balanceamento de peças
- detecção e limitação de desbalanceamentos
- monitoramento da condição de componentes da máquina ferramenta

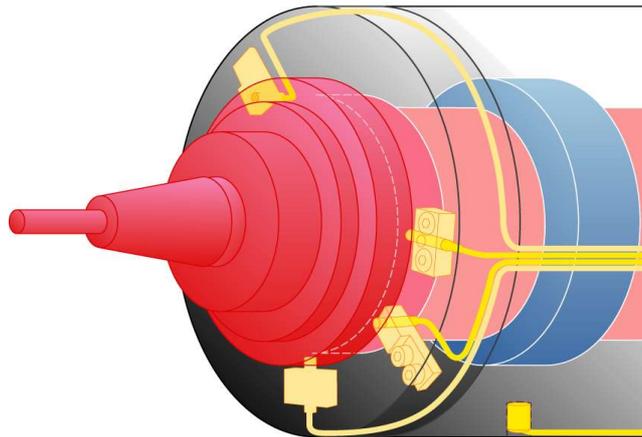


Figura 9.5 – Exemplo da colocação de sensores de força radiais e desbalanceamento em uma árvore de máquina-ferramenta (Kluft, 2002)

9.4 Outras formas de monitoramento

Visando a melhoria do resultado do processo de usinagem, outras formas de monitoramento podem ser implementadas individualmente ou de forma combinada a outras, sendo as principais delas:

- Medição na estrutura – esta tem por objetivo acompanhar o estado de deformação da estrutura da máquina em função dos esforços e da temperatura, e alimentar a matriz de compensação de erros do sistema de controle, mantendo a exatidão dimensional dos movimentos em tempo real e qualquer situação de funcionamento.
- Medição no porta-ferramentas– esta tem por objetivo as emissões de sinais diretamente fornecidas pelo processo.
- Medição nos acionamentos – esta tem por objetivo acompanhar a potência consumida no processo, pela medição da tensão e corrente consumidas durante o processo. Este procedimento foi uma das primeiras tentativas de monitoramento desenvolvidas, contudo falha quanto ao tempo de reação e exatidão das informações. Em combinação com outros sistemas de monitoramento este processo torna-se um complemento muito poderoso.

CAPÍTULO - 10

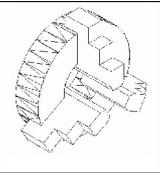
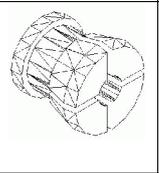
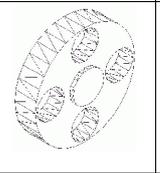
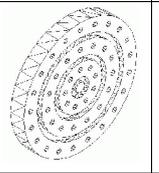
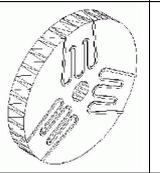
SISTEMAS DE FIXAÇÃO DE FERRAMENTAS E PEÇAS

10.1 Sistema de Fixação de Peças

O sucesso na fabricação de peças usinadas pode ser extremamente dependente do sistema de fixação utilizado para suportar a peça durante a usinagem (Chaloux,1984). A fixação deve ser utilizada de forma a não provocar deformações elásticas e, principalmente, plásticas na peça, como as provenientes do aperto de castanhas, pinças e parafusos. Os sistemas mais comuns são os dispositivos especiais (colagem, embutimento e outros), placas de vácuo, e placas magnéticas e térmicas (Köning, 1991; Chaloux,1984; Schroeter, 1997; Brehm, 1979)

A escolha de um sistema de fixação para uma máquina-ferramenta não significa que o mesmo será único, pois poderá ser trocado de acordo com o tipo de peça (forma geométrica) e as tolerâncias envolvidas. A tabela 10.1 apresenta uma comparação, para os principais requisitos funcionais, entre as formas de fixação da peça.

Tabela 10.1 - Matriz de comparação dos sistemas de fixação.

PRINCÍPIO FÍSICO	MECÂNICO				MAGNÉTICO	ADESÃO
	Placa	Pinça	Dispositivo	Placa de Vácuo		
REQUISITOS FUNCIONAIS						
CUSTO	5	4	2	2	3	4
DEFORMAÇÃO PEÇA	2	3	4	5	5	5
SUJEIÇÃO	5	5	5	3	4	3
ESTAB. DINÂMICA	2	3	4	4	3	3

Onde: 5 - melhor e 1 - pior.

Uma pinça apesar de ser relativamente mais barata, quando comparada a uma placa de castanhas, apresenta um custo maior quando adquirida na forma de conjunto. A fixação por meio de placa de vácuo apresenta limitações quanto a forma e comprimento, e se torna extremamente cara quando se deseja flexibilidade.

A tabela 10.1 permite uma comparação entre diversas formas de fixação, porém para cada forma que a peça a ser usinada, as necessidades de tolerâncias atribuídas a esta tornam o uso de dispositivos específicos a forma mais adequada para se atingir o melhor resultado (Gerchman, M. 1986; Tani, Y. 1992).

10.2 Sistema de Fixação de Ferramentas

A abrangência dos processos de usinagem tem como consequência uma ampla gama de tipos de ferramentas de corte. Apesar das variações existentes os requisitos básicos para um porta-ferramentas devem ser:

- os tempos de montagem devem ser minimizados;
- a máxima rigidez de montagem das ferramentas;
- a minimização dos comprimentos em balanço;
- a possibilidade de ajuste fácil da posição da ferramenta em relação ao eixo da peça;
- a intercambiabilidade entre os diversos tipos de ferramentas.

Apesar dessa diversidade as formas de fixação em grande parte são padronizadas. Os porta ferramentas são projetados de acordo com o tipo de máquina, sendo que a padronização e a flexibilidade na adaptação de ferramentas especiais são requisitos conflitantes, que andam lado a lado. A padronização, visando a racionalização de estoques e custo, tem levado a uma tendência de se utilizar cones ISO no maior número possível de aplicações.

A introdução dos sistemas HSK para fixação de ferramentas para usinagem de alta velocidade, tem levado a uma nova tendência de padronização.

Em usinagem de precisão, principalmente aquelas com ferramenta de diamante de gume único, convém adicionar mais um requisito ao porta-ferramentas:

- a capacidade de manter a ferramenta sempre normal na superfície, ou seja, na direção do plano de maior dureza do diamante.

O problema da adoção de porta-ferramentas com compensação de trajetória está na necessidade de sistemas de programação mais poderosos, além de representar a adição de mais um eixo a ser controlado. Desta forma, a tabela 2.25 apresenta a matriz de comparação dos porta-ferramentas.

Tabela 10.1 - Matriz de comparação dos porta-ferramentas.

	FERRAMENTA ÚNICA		MÚLTIPLAS FERRAMENTAS	
	COM COMPENSAÇÃO	SEM COMPENSAÇÃO	COM COMPENSAÇÃO	SEM COMPENSAÇÃO
CUSTO	2	5	1	4
RIGIDEZ	3	5	3	5
AJUSTE NA ALTURA	5	5	5	5

Onde: 5 - melhor e 1- pior.

CAPÍTULO - 11

NOÇÕES GERAIS SOBRE QUALIFICAÇÃO E ACEITAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

O projeto de uma máquina-ferramenta é avaliado em função da estabilidade e repetibilidade, como considerações primárias. A precisão, muito importante, pode ser melhorada até os limites impostos pela estabilidade e repetibilidade da máquina-ferramenta, através do mapeamento dos erros presentes, que podem ser devidamente corrigidos pelos comandos de movimentação (Slocun, 1992).

Wu e Ni (Wu, 1989) apresentam na figura 11.1 os dois principais tipos de erros encontrados em máquinas-ferramentas.

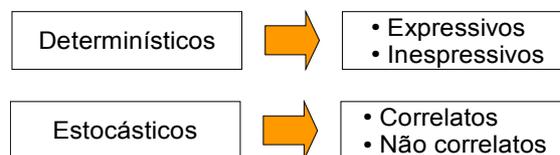


Figura 11.1 – Classificação dos erros em máquinas-ferramentas (Wu, 1989)

Ambas as formas de erros podem ser previstas ou mapeadas, permitindo compensá-las através de vários procedimentos, entre os quais se destacam:

- ⇒ melhora no projeto mecânico;
- ⇒ melhora no sistema de acionamento e controle;
- ⇒ melhora na estratégia de controle;
- ⇒ implementação de uma matriz de erros no controle;
- ⇒ implementação de um programa de mapeamento e previsão de erros.

A relação custo/precisão em máquinas-ferramentas é exponencial (Slocun, 1992; Weck, 1992; Paul, G; Beitz, W; 1996; Theyr, 1991; Sakai, 1984). Enquanto os erros forem sistemáticos ou repetitivos, e passíveis de serem medidos e armazenados, ações compensatórias podem ser tomadas, quer por meio de correção manual, quer por meio de sistemas computacionais.

As correções manuais podem ser efetuadas diretamente pelo operador, durante a elaboração do programa-peça. Este tipo de compensação leva a uma forte relação entre programador e máquina, visto que este deve ter um profundo conhecimento do processo e dos erros que a máquina pode introduzir neste. Por estas razões, a compensação manual torna-se um processo de elevado custo e risco, devido ao tempo exigido para um programador adquirir a experiência necessária, e ao empirismo envolvido. Esta metodologia pode ser sistematizada e implementada diretamente em sistemas CAD, o que diminui a influência do programador, reduzindo custos e tempo.

A compensação por meio de programas computacionais tem se mostrado um campo bastante fértil de pesquisa. Além da compensação simples, comum aos comandos numéricos tradicionais, atualmente o desenvolvimento de sistemas baseados em previsões de erros (modelamento estocástico), sistemas inteligentes (redes neurais e similares) ou da aplicação de técnicas de controle para o tratamento de erros em máquinas-ferramentas tem mostrado resultados muito promissores para um futuro próximo.

A evolução dos comandos numéricos e a introdução no mercado dos comandos digitais permitem que estes procedam aos cálculos de correção e efetuem as devidas compensações de movimentação, com precisão e velocidades muito superiores às realizadas até 1998 (Heidenhain-2, 1998).

A *International Standard Organization* (ISO) apresenta, na série de ISO 230, recomendações para testes de qualificação de máquinas-ferramentas (ISO 230-1,1996; ISO-230-2, 1988; ISO-230-4, 1988), a qual é dividida em:

- parte 1: precisão geométrica para máquinas operando sobre condições de não-carregamento ou acabamento;
- parte 2: determinação da precisão e repetibilidade de posicionamento de máquinas numericamente controladas;
- parte 3: avaliação dos efeitos térmicos;
- parte 4: testes de circularidade para máquinas numericamente controladas;
- parte 5: emissão acústica.

Embora os aspectos de qualificação de máquinas-ferramentas sejam regidos por normas (Spur, 1979) específicas, a avaliação de máquinas-ferramentas de ultraprecisão ainda se encontra em discussão. Porém, os conceitos gerais que regem os ensaios em máquinas-ferramentas comandadas numericamente podem ser estendidos às máquinas-ferramentas para usinagem de ultraprecisão.

Em função dos baixos esforços gerados no processo de usinagem de ultraprecisão (Köning, 1991; Ikawa, 1991; Tanigushi, 1994; Slocun, 1992; Schroeter, 1997), pode-se considerar o efeito de desgaste e deformação elástica da ferramenta como mínimos. Weck e Luderich (19--) mediram a influência da expansão térmica entre ferramenta e peça na usinagem de ultraprecisão, bem como os níveis de deformação resultantes desta expansão, que no nível nanométrico podem ter certa influência no resultado da usinagem.

Outra consideração a ser feita é quanto ao regime de usinagem, onde o processo nas condições de desbaste ou acabamento pode ser comparado às condições de acabamento fino no torneamento convencional. Estas considerações, por sua vez, permitem a aplicação das normas ISO 230, parte 1 e 2, para a qualificação do protótipo.

Slocum (1992) define que o erro resultante no gume da ferramenta em uma máquina-ferramenta pode ser modelado em termos de uma combinação dos erros individuais de diferentes elementos estruturais da mesma. Sob este mesmo aspecto Weck (1992) informa que a precisão em um trabalho produzido na usinagem sofre grande influência de:

- desvios no movimento relativo planejado entre a ferramenta ou o porta-ferramentas. (mesa) e a peça ou dispositivo de fixação (árvore);
- desgaste e deformações elásticas da ferramenta;
- deformações elásticas da peça e dos dispositivos de fixação.

Da mesma forma que o desgaste e a deformação elástica da ferramenta em usinagem de ultraprecisão são mínimos, uma correta escolha e dimensionamento do dispositivo de fixação pode levar a uma minimização dos efeitos das deformações elásticas da peça e dos dispositivos de fixação.

Com relação ao processo, pode-se concluir que, em usinagem de ultraprecisão, os desvios no movimento relativo entre o gume da ferramenta e a peça tendem a ser a fonte predominante de erros no resultado final do processo. Desta forma, no protótipo desenvolvido, estes desvios são provenientes da combinação dos erros de movimentação dos carros.

Assim, a qualificação do protótipo do ponto de vista de levantamentos dos erros geométricos, tem por objetivo descrever os desvios esperados dentro da área total de trabalho, de modo que a contribuição individual de todos os eixos com movimento possa ser avaliada e considerada. O objetivo é o mapeamento resultante possa proporcionar as informações necessárias para as correções, que poderão ser realizadas diretamente no elemento, conjunto ou sistema, ou indiretamente por meio de *software* (Martin, 1994).

Basicamente, a qualificação de uma máquina-ferramenta deve ser realizada tomando por base os resultados obtidos com:

- ensaio de perpendicularismo;
- linearidade;
- posicionamento;

a) aferição da velocidade e do incrementos de deslocamento

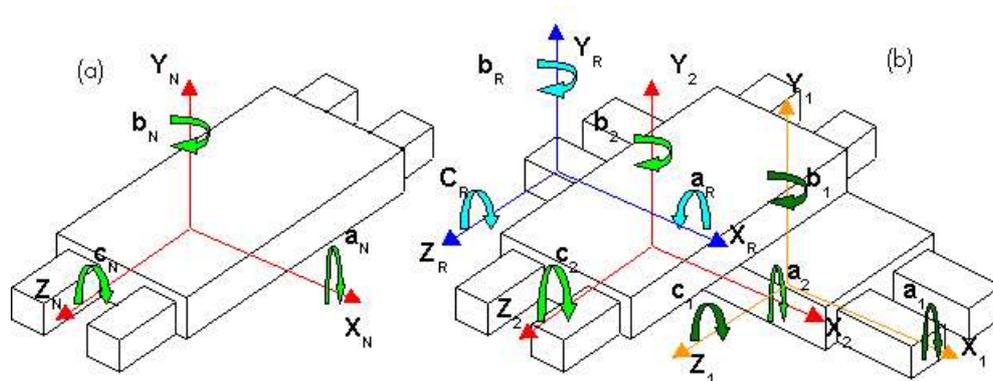


Figura 11.2 – Erros geométricos guias de máquinas (Slocun,1992;Weck,1992;Welborn, 1970)

Complementando a qualificação do protótipo, foram realizados ensaios dinâmicos visando a obtenção da curva-resposta em frequência para determinação das frequências naturais da estrutura.

11.1 Ensaios geométricos

Segundo especialistas da empresa Maho (MAHO, 1990), de forma geral tem-se constatado que, em centros de usinagem de pequeno e médio porte, os erros geométricos mais significativos são normalmente de posicionamento linear, histerese e de perpendicularismo entre eixos. Os erros de reticidade em máquinas novas geralmente apresentam valores muito pequenos, os quais tendem a se tornar mais expressivos com o passar do tempo. Isto se deve a problemas operacionais tais como: deficiências de lubrificação, colisões, carregamento excessivo, operação em uma única região de trabalho, comum em máquinas dedicadas, tais como as empregadas em linhas transfer.

Os erros de inclinação, em condições normais de operação, não constituem um grande problema devido às pequenas dimensões relativas do volume de trabalho (MAHO, 1990). A não-disponibilidade de uma rotina de correção bidirecional no CNC implementado no protótipo é um dos fatores que leva à adoção de ensaios unidirecionais.

Apesar das considerações dos especialistas da empresa Maho serem para centros de usinagem, também podem ser estendidas para os demais tipos de máquinas-ferramentas, de onde se conclui que:

- os ensaios de posicionamento linear, histerese e perpendicularismo podem ser suficientes para prover informações sobre as considerações gerais do comportamento geométrico da máquina;
- os ensaios de reticidade são importantes.

Ambas as formas de erros podem ser previstas ou mapeadas, permitindo compensá-las através de vários procedimentos

11.2. Ensaio de Precisão e Repetibilidade de Posicionamento

Os ensaios de precisão e repetibilidade de posicionamento devem ser realizados de acordo com a norma ISO 230-2 (1988), sendo que todas as recomendações da mesma devem ser seguidas. Durante os ensaios foram implementados os valores de correção para a rotina de compensação, se disponível no controle. Cada eixo coordenado da máquina devem ser avaliados tanto unidirecionalmente, com as aproximações sendo realizadas em ambas as direções do sentido do eixo, quando de forma sincronizada,

Ensaio de posicionamento multidirecional são mais relevantes quando se deseja proceder a uma correção simultânea de posicionamento de perpendicularismo. A correção multidirecional só é possível em comandos de última geração (Heidenhain-2, 19--; MAHO, 1990).

Para se proceder os ensaios é necessário o uso de equipamentos e operadores qualificados. Um exemplo de ensaios de qualificação utilizando laser interferométrico é apresentado figura 11.3 .



Figura 11.3 – Equipamento experimental dos ensaios de posicionamento (Stoeterau, 1999)

Os ensaios devem ser realizados ao longo dos cursos de todos os eixos. Em regiões específicas, próximas ao centro do plano de trabalho, os ensaios de posicionamento devem ser repetidos para várias condições de deslocamentos, ou seja, sob várias condições de avanço. Os ensaios para máquinas de pequeno porte tem como objetivo determinar as características do movimento em condições tipicamente encontradas em usinagem.

11.3 Ensaio de Perpendicularismo

O ensaio de perpendicularismo pode ser realizado por meios ópticos através de autocolimadores e Lasers ou por meio de padrões corpóreos, ou seja, utilizando-se um conjunto esquadro padrão e comparador. Os métodos utilizando-se elementos padrões são os mais usados na determinação de erros de retilidade e perpendicularismo. De operação simples e rápida, estes métodos fornecem resultados confiáveis e de baixo custo. As principais limitações decorrem do fato de que em muitos casos, estes padrões são difíceis de manusear e podem sofrer limitações por parte da máquina (ex.: dimensões, características construtivas, etc.). A figura 11.4 apresenta um exemplo de ensaio de perpendicularismo em um torno de ultraprecisão com dois eixos, utilizando-se padrões corpóreos.

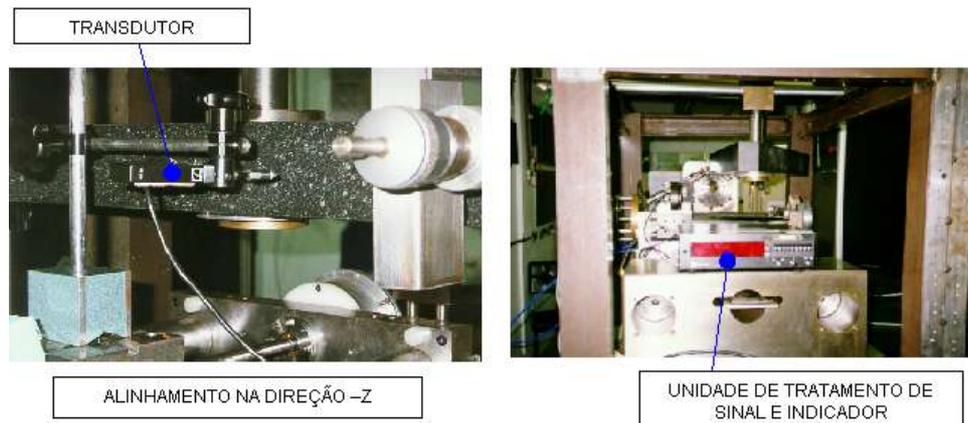


Figura 11.4 - Exemplo de ensaio de perpendicularismo (Stoeterau, 1999)

Os resultados obtidos apresentaram em ensaios de perpendicularidade, são expressos em termos de graus. A minimização deste erro pode ser feita através de um processo iterativo compreendendo ações mecânicas e medições. Tal processo permite que a redução do erro de perpendicularidade seja feita até que limitações mecânicas não permitiram avanços significativos na redução do erro.

11.4 Qualificação de árvores de máquinas-ferramentas

No desenvolvimento de máquinas-ferramentas parte da qualidade da máquina é definido pelo desempenho geométrico da árvore, este determina em grande parte o sucesso na obtenção de tolerâncias de forma, dimensionais e de qualidade superficial.

O desempenho geométrico de uma árvore de máquina-ferramenta pode ser expresso em termos de seis graus de liberdade, conforme a figura 11.5.

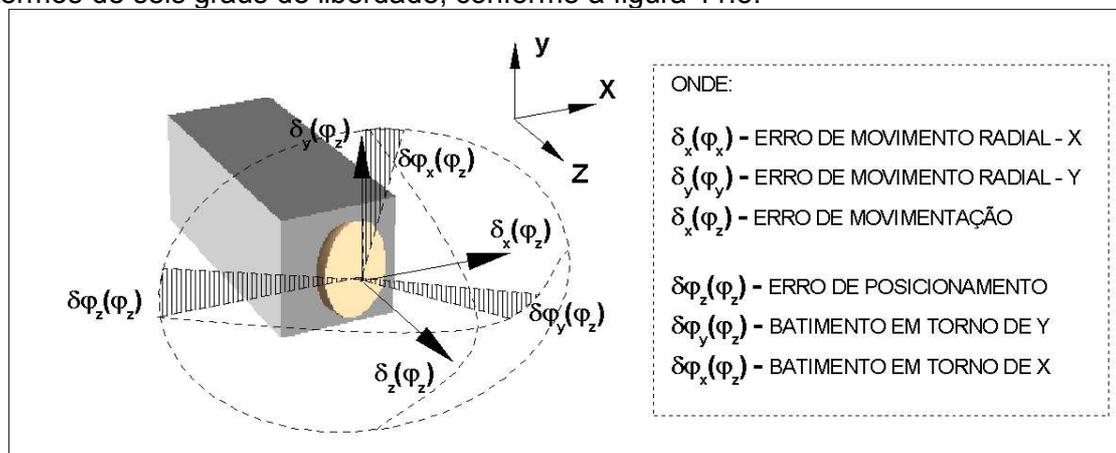


Figura 11.5 - Erros básicos de um eixo-árvore (Weck-2, 1992)

Com base na figura 11.5, pode-se observar que todos os movimentos aleatórios podem ser decompostos, tomando por base os desvios individuais descritos acima (Weck-2, Slocun, 1992;)

Os erros de movimentação nas direções radiais e axiais, e os erros de movimentação angulares não são de interesse do ponto de vista de precisão da peça. Weck *et alii* (Weck, 1991) definem que, em geral, a precisão de posicionamento de árvores de máquinas de precisão é um assunto meramente subordinado.

O fundamental na análise de árvores de precisão é definir qual a direção sensível mais importante durante a usinagem. A direção sensível, segundo Weck *et alii* (Weck, 1991), figura 7.13, é definida como o componente do movimento normal da superfície da peça a ser produzida, e movimentos não-perpendiculares à direção sensível apresentam nenhuma ou muito pouca influência sobre o resultado.

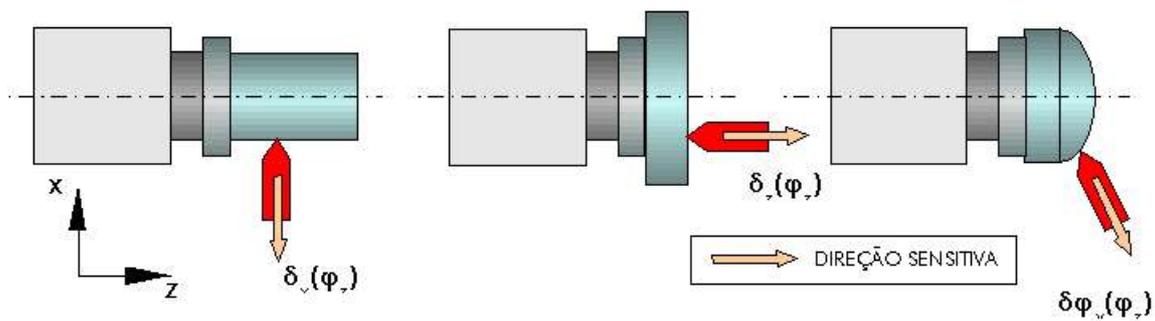


Figura 11.6 - Exemplos de direções sensíveis.

Como a direção sensível é uma função da peça a ser usinada, a geometria da mesma deve ser conhecida para se proceder a uma avaliação da árvore. Desta forma, na impossibilidade de se definir uma direção sensível preferencial, a qualificação da árvore foi realizada em função de erro de batimento axial e amplitude de deslocamento dinâmico (desbalanceamento).

Um dos possíveis requisitos levantados durante a fase conceitual do projeto é o de uma elevada precisão de giro da árvore, e esse é função direta do tipo de mancal selecionado e das condições de montagem e operação.

O erro de batimento da flange de fixação devem ser levantados utilizando-se preferencialmente um sistema de medição sem contato, com sensor indutivo de deslocamento com resolução adequada. O processo de minimização deste tipo de erro também deve ser iterativo, com sucessivas medições e ajustes mecânicos.

11.5 Vibrações

As vibrações na árvore é uma das principais fontes erro no processo, e esta é uma função:

- da forma como a árvore está montada na estrutura
- do acionamento
- dos mancais
- da peça
- do processo

De forma geral recomenda-se um balanceamento fino da árvore, e dependendo da peça um balanceamento do conjunto deve ser procedido.

Referências Bibliográficas

- ARMSTRONG, B. H.; DUPONT, P.; WIT, C. C. *A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for Control of Machines with Friction*. Automatica, v. 30, n. 7, p. 1.083-1.138, 1994
- BAFORCELLINI, F. A. Projeto Conceitual. EMC/UFSC, 2002. Apostila do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
- BISPINK, t. *Neue Wege zur Beurteilung Hochgenauer Vorschubantriebe für Ultrapräzisionsmaschinen*. RWTH. Aachen: Verlag Shaker Aachen, out. 1992.
- BREHM, R.; DUN, K. van; TEUNISSEN, J. C. G.; HAISMA, J. *Transparent Single Point Turning of Optical Glass*, Precision Engineering, 1979.
- CALISTER JR., W. D. *Material Science and Engineering, An Introduction*, 3ª Edição. John Wiley & Sons. 1994.
- CHALOUX, L. E. *Part Fixuring for Diamond Machinig*. In: SPIE, v. 508, p. 109, 1984.
- DAVIDSON, A. *Handbook of Precision Engineering - vol. 5*. McGraw Hill, 1972.
- DAVIDSON, A. *Handbook of Precision Engineering - vol. 5*. McGraw Hill, 1972.
- ERNST, A. *Digital Linear and Metrology – Position Feedback Systems for Machines and Devices*. Verlag Moderne Industrie AG & Co., 1989.
- FULLER, D. D. *Theory and Practice of Lubrication for Engineers*. John Wiley & Sons, 2ª edição, 1984.
- FUTAMI, S.; FURATANI, A.; YOSHIDA, S. *Nanometer Positioning and its Microdynamics*. Nanotechnology, v. 1, 1990.
- GERCHMAN, M. C.; YODEN, D. H. *An Evaluation of Ultra-precise Machine Tool Contouring Performance: The Low Sine Tracking (LAST) Test*. Progress in Precision Engineering (Proceedings of 6th International Precision Engineering Seminar – 2nd International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering). Springer Verlag, 1991.
- GRASSAM, N. S.; POWELL, J. W. *Gas Lubrificated Bearigs*. London Butter Worths, 1964.
- IKAWA, N.; et ali. *Ultraprecision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future*. In: CIRP. Anais. V. 40, fev. 1991.
- HEIDENHAIN -1. *Inkrementale Drehgeber ROD – Programm 78/79*. Catálogo
- ISO 230 - 4. *Test Code for Machine Tools, Part – 4, Circular Tests for Numerically Controlled Machine Tools*. 1988-11-01(E).
- ISO 230 - 1. *Test Code for Machine Tools, Part – 1, Geometric Accuracy of Machines Operating Under no Load or Finishing Condition*. 1996-07-01(E).
- ISO 230 - 2. *Acceptance Code for Machine Tools, Part – 2, Determination of Accuracy and Repeatability of Positioning of Numerically Controlled Machine Tools*. 1988-11-01(E).

- KEGG, R. *Influence of New materials Technology on Machine Tools*. 2° International Machine Tool Engineers Conferenve (IMEC), Kobe: nov. 1986.
- KLUFT, w. *Werkzeugüberwachungssystem für die Drehbearbeitung, Dissertation Th Aachen, 1983*
- KNOL, P. H.; SZEPESI, D.; HUIJBERS, M. *New Design Features of Fully Hidrostatic Ultraprecision CNC Turning Machine, Type Super Mikroturn CNC. N. D.*
- KOENINGSBERG, F.; TLUSTY, J. *Machine Tool Structures*. Pergamon Press, 1970.
- KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren - vol. 1*. VDI Verlag, 1990.
- KÖNIG, W.; et ali. *Diamond Machining Technology*. Aachen: maio 1991. Tutorial do 6° IPES/UME 2, IPT.
- MARTIN, C.A.; et. alii. Posicionador Linear de Ultraprecisão. Relatório PADCT, publicação interna do LMP-UFSC. 1994.
- MIZUMOTO, H., YABUYA, M.; SHIMUZU, T.; KAMIT, Y. *An Angstron-Positioning System Using a Twist-roller Friction Drive*. Precision Engineering, v. 17, n. 1, p/ 52-57, jan. 1995.
- MOORE, W. R. *Fundations of Accuracy*. TMSTC. 1989.
- MORIYAMA, S.; HARADA, T.; TAKANASHI, A. *Precision X-Y Stage with a Piezo Driven Fine Table*. Bulletin of Japan Soc. of Precision Engineering, v. 22, n. 1, mar. 1988.
- NN-1. *Motion & Control – Precision Machine Component*. Cat. n. E3151a 1995C-2, NSK, 1994.
- NN-2. *Machine Tool Performance Monitoring Systems*. In www.lionprecision.com, 1999
- NN-3. *A List of the Most important Type Dependent Geometric and Thermic Erros of Machine Tools*. MAHO AG BCR-90/0006, jun. 1990.
- NN-4. *Digital Control More Accurate, Repeatable then Analog NC*. In: [www.heidenhain .com / site.html](http://www.heidenhain.com/site.html)
- NN-5. MIKRO TURN (Ultra Precise Turning Machines). Catálogo HEMBRUG.
- NN-6. *Motion & Control – Precision Machine Component*. Cat. n. E3151a 1995C-2, NSK, 1994.
- NN-7. *Ultrapräzisionsmaschinen*. RWTH. Aachen: Verlag Shaker Aachen, out. 1992. Tese.
- PAUL, G.; BEITZ, W. *Engineering Design – a Systematic Approach*. Londres: Spring Verlag, 1996.
- PAZMANDY, P. *Schwingungsuntersuchug, Dhermaschinenbett Vergleich Graugusz / Betonwerkstoffe*. Universidade Técnica de Viena, 19--
- PEREIRA FILHO, I. da C. *Monitoramento da furação com brocas helicoidais inteiriças de metal duro*, dissertação de mestrado, UFSC, 2001
- PEREIRA, M.; Back, N. *Requisitos de Projeto: a Base para o Desenvolvimento de um Produto*. LMP/UFSC, 1996. Publicação interna.
- Phisics Instrumente, 2000

- RAHMAN, M.; MANSUR, M. A., AMBROSE, W. D.; CHUA, K. H. Design, Fabrication and Performance of a Ferrocement Machine Tool Bed. *International Journal of Machine Tools Manufacturings*, v. 27, n. 4, p. 431-442, 1987.
- ROGNITZ, H. *Maquinas Herramientas para el Trabajo de Materiales con Arranque de Viruta*. Editora Labor S.A., 1968.
- SAKAI, Y. *Ultraprecision Machine Tool*. Japan Society of Precision Engineering, v. 18, n. 2, jun. 1984.
- SCHELLSCHMIDT, T.; GUYENOT, V.; RISSE, S.; HEROLD, V. *Aerostatic Linear Guide Made of High Performance Ceramics*. Proceedings of the 2nd International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering. Aachen: maio 1994.
- SCHROETER, R. B. *Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro Infravermelho*. Florianópolis: UFSC, 1997. Tese de doutorado.
- SLOCUM, A. H.; et ali. *Design of Self-Compensated Water-Hidrostatic Bearings*. *Precision Engineering*, v. 17, n. 3, jul. 1995.
- SLOCUM, A. *Precision Machine Design*, Prentice Hall, New Jersey, 1992.
- SMITH, S. T.; CHETWYND, D. G. *Foundations of Ultraprecision Mechanism Design*. Gordon and Brech Science Publisher, 1994.
- SPUR, G.; STÖFERLE, Th. *Handbuch de Fertigungstechnik - vol. 3*. Viena: Carl Hanser Verlag, 1979.
- STOETERAU, R. L. *Comportamento Estático e Dinâmico de Mancais Aerostáticos Cilíndricos para Guias Lineares*. Florianópolis: UFSC, 1992. Dissertação.
- STOETERAU, R. L.; BACK, N. *Especificação e Princípios Básicos de Máquinas-Ferramentas de Precisão para Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida*. LMP/UFSC, 1996. Publicação interna.
- STOETERAU, R. L. *Desenvolvimento de um Torno CNC de Ultraprecisão para usinagem com Ferramentas de Gume Único*, Tese de Doutorado, UFSC, 1999
- SUGISHITA, H.; NISHIYAMA, H.; NAGAYASU, O; SHIN-NOU, T. *Development of Concrete Machine Center and Identification of the Dynamic and Thermal Structural Behavior*. CIRP. Anais. V. 37/1/1988.
- TANI, Y. *Application of Sintered Plastics to a Poraus Vaccun Chuck for Diamond Turnnig of Aluminium Magnetic Discs*. CIRP. Anais. Vol. 41, 1/1992.
- TANIGUSHI, N. *Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing*. CIRP. Anais. V. 32, fev. 1983.
- TANIGUSHI, N. *The State of the Art of Nanotechnology of Ultraprecision and Ultra-fine Products*. *Precision Engineering*, v. 16, n. 1, jan. 1994.
- THK Catalog, 1997

- THYER, G. E. Computer Numerical Control of Machine Tools. Nova Iorque: Industrial Press, 2ª edição, 1991.
- TLUSTY, 1975
- TRIB et al. 1994
- VASQUEZ, 1994
- WARNECKE, H. J.; DUTSCHKE, W. Fertigungs Me technik. Berlim: Springer Verlag, 1984.
- WECK, M. Handbook of Machine Tools -Vol. 1. Wiley Heyden Ltd.,1984.
- WECK, M. Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme, vol. 3. VDI-Verlag, 1992.
- WECK, M. Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme, vol. 4. VDI-Verlag, 1992.
- WECK, M.; LUDERICH, J. Influence of Thermal Expansion of the Cutting Tool on The Workpiece Accuracy during Diamond. N. D.
- WEINGAERTNER, W. L. Desenvolvimentos na Usinagem de Ultraprecisão. Florianópolis: UFSC, out. 1992. Monografia.
- WELBOURN, D. B.; SMITH, J. D. Machine-tool Dynamics – An Introduction. Cambridge at University Press, 1970.
- WHITEHOUSE, D. J. *Surface Metrology, Institute of Physics Publishing Ltda. 1994*
- WIEKE, H.; GROPP, H.; GESSLER, W. O concreto polimérico já é usado também em estruturas de dispositivos de fixação. Máquinas e Metais, Editora Aranda – ano XXXIV, n. 384, jan. 1998.
- WU, S. M.; NI, J. Precision Machining Without Precise Machinery. CIRP. Anais. V. 38/1/1989
- YONEZAWA, H.; HIRATA, Y.; SASAI, H. Positioning Table with High Accuracy and High Speed. CIRP. Anais. Vol. 39/1, 1990.