

PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Qualidade de um produto
- Parâmetros geométricos (dimensão, forma, acabamento superficial, etc.),
- Parâmetros físicos (condutividade elétrica, térmica e magnética, etc.),
- Parâmetros químicos (resistência à corrosão, etc.)
- Parâmetros mecânicos (dureza, resistência à fadiga, etc.).
- Determinados pelo projetista
- Parâmetros reais \leftrightarrow Parâmetros definidos no projeto \Rightarrow Qualidade da peça.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- *Precisão de usinagem* = grau de coincidência entre os parâmetros macro-geométricos (dimensão e forma) de uma peça
- *Qualidade da superfície* = grau de coincidência entre os parâmetros micro-geométricos reais (acabamento superficial)
- Erro de usinagem = diferença entre os parâmetros de uma peça usinada e aqueles de uma peça perfeita (absolutamente precisa) especificada no desenho.
- Limites de tolerância



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Precisão de usinagem de superfícies da peça:
 - Precisão de dimensões de superfícies (p.ex. precisão dos diâmetros de superfícies cilíndricas e esféricas, ângulos de cones)
 - Precisão de formas de superfícies (p.ex. planicidade, circularidade, cilíndricidade)
- Precisão de usinagem de posições relativas entre superfícies:
 - Precisão das dimensões entre superfícies (p.ex. a distância entre dois planos paralelos ou entre os centros de dois furos)
 - Precisão de relações posicionais entre superfícies (p.ex. paralelismo e perpendicularismo entre dois planos ou dois eixos)
- Rugosidades

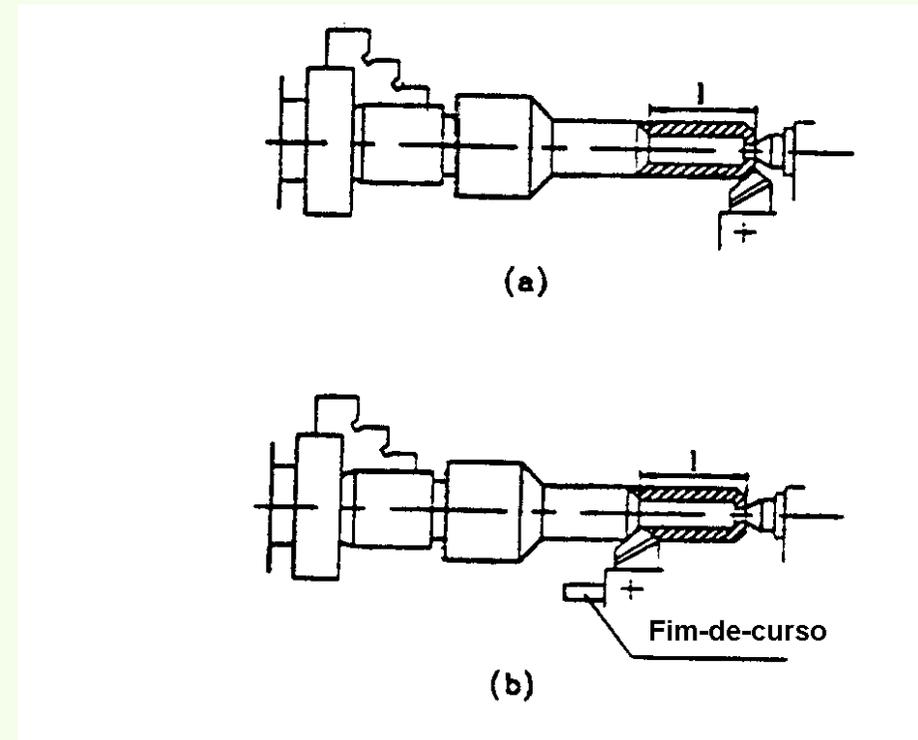


PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- **Métodos para Obter a Precisão Dimensional Exigida**

- (a) Tentativas

- baixa eficiência, e não é adequado para um volume de produção elevado.
 - a máquina-ferramenta não precisa ser preparada anteriormente.
 - o efeito da variação dimensional da matéria-prima (forma, tamanho, dureza, etc.) pode ser reduzido nas operações de usinagem.

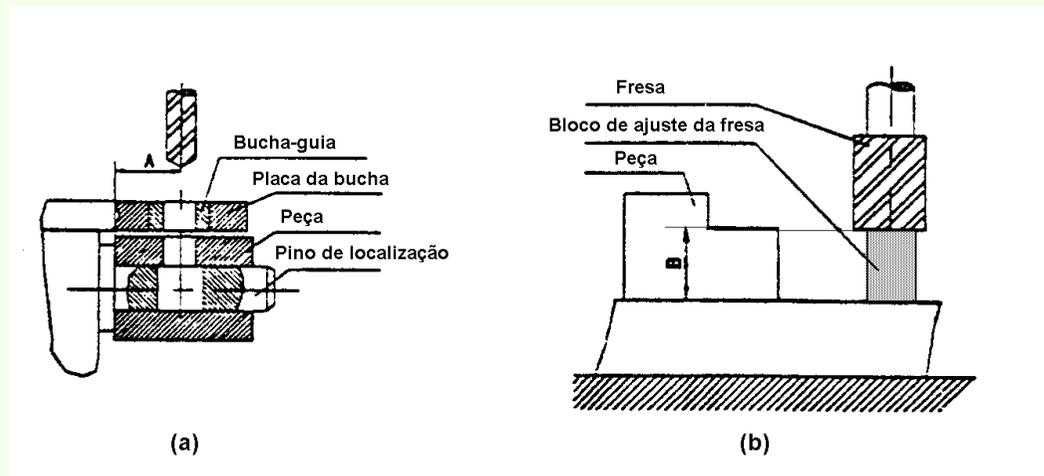


PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- **Métodos para Obter a Precisão Dimensional Exigida**

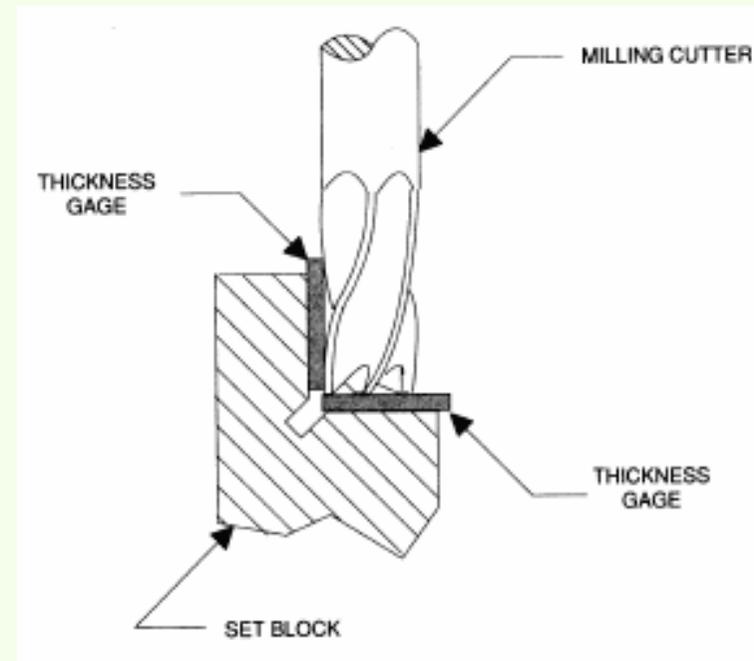
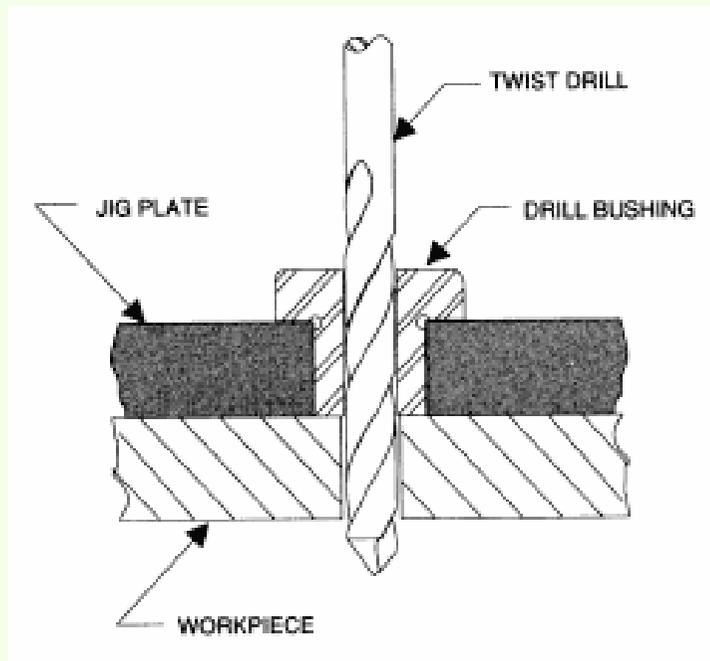
- (b) Método da dimensão automática

- ◇ Uso de ferramentas de dimensão e forma fixas
 - ◇ Usinagem em máquinas presetadas.
 - ◇ Uso de dispositivos guia.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Métodos para Obter a Precisão Dimensional Exigida
 - (b) Método da dimensão automática



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- **Métodos para Obter a Precisão Dimensional Exigida**

- (b) Método da dimensão automática

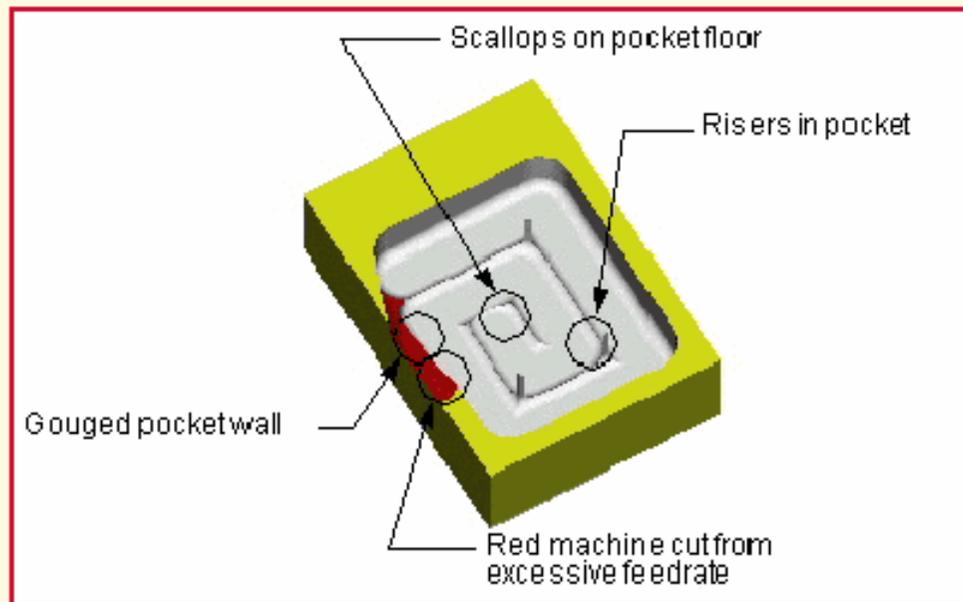
- ◇ Uso de máquinas de Comando Numérico.

- alta eficiência na produção,
 - fornece a possibilidade de alocação racional de mão-de-obra na tarefa difícil de preparação (“set-up”) da máquina,
 - pré-requisito para a realização da automação de processos de usinagem.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- **Métodos para Obter a Precisão Dimensional Exigida**
 - (b) Método da dimensão automática
 - ◇ Uso de máquinas de Comando Numérico.



Erros de programação revelados por simulação volumétrica NC



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- **Fatores que Causam Erros de Usinagem:**

- Preparação imprecisa da máquina:

posições precisas das peças em relação à máquina (disp.fix.)

+

posições corretas das ferramentas em relação à máquina

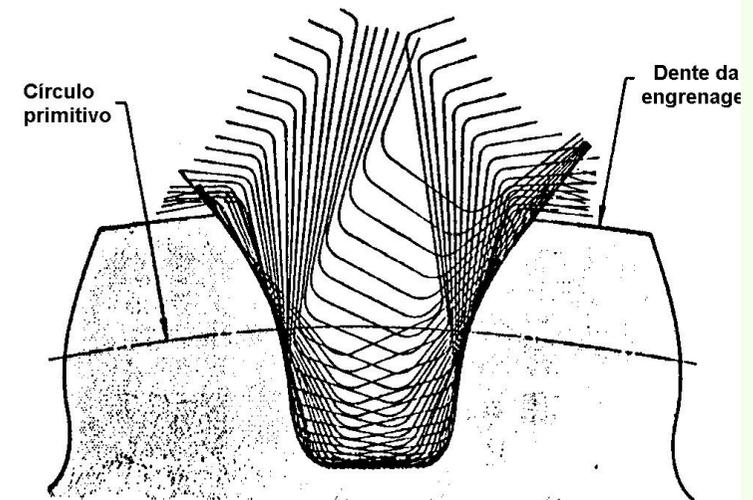
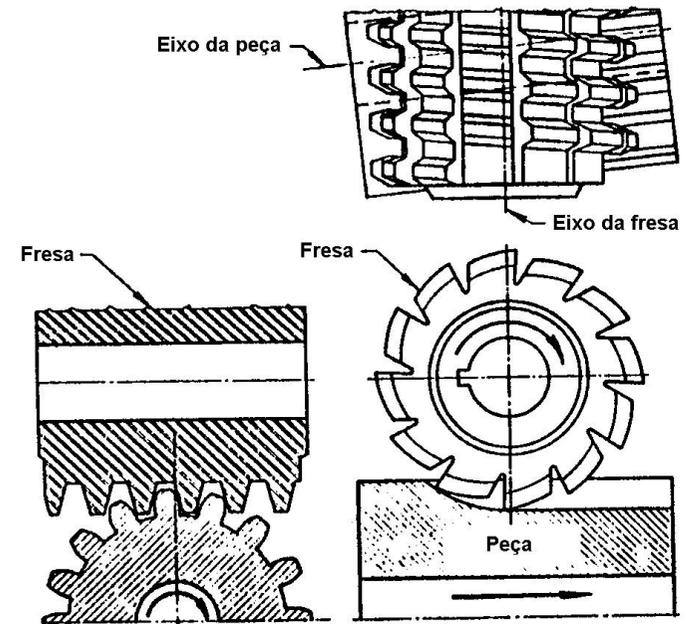
=

posições relativas entre as ferramentas e as peças

- Fixação imprecisa da peça.
- Processos de usinagem.

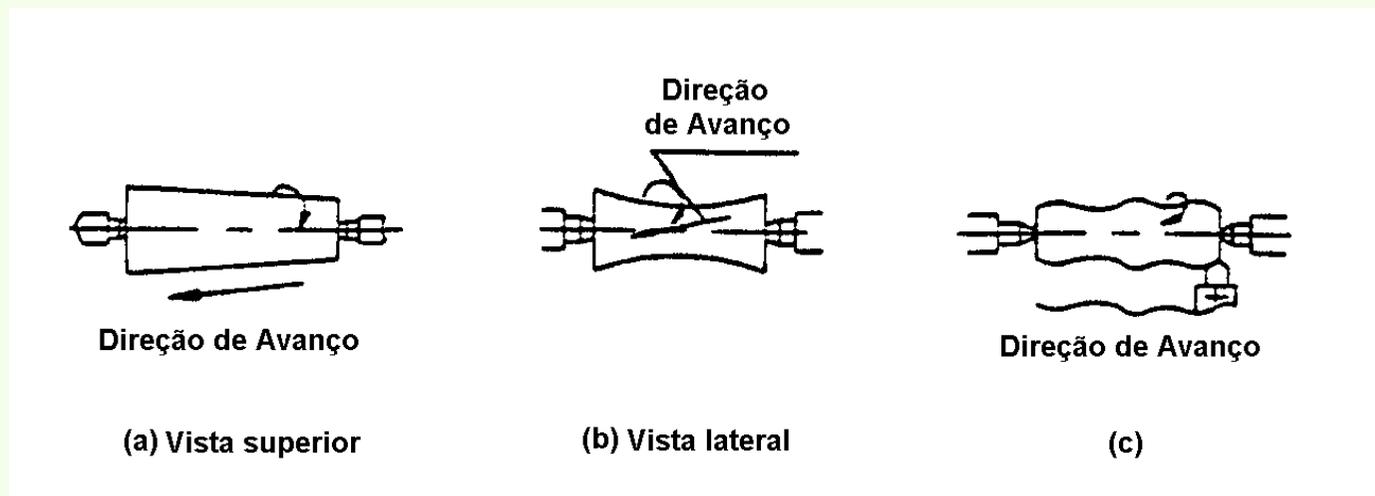


- **Fatores que Causam Erros de Usinagem:**
 - Imprecisão Teórica
 - Processo Pfauter (fresamento com fresa caracol)



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- **Fatores que Causam Erros de Usinagem:**
 - *Imprecisão Geométrica de Máquinas e Ferramentas*
 - fabricação imprópria e/ou desgaste.



Erros causados por imprecisões entre o barramento e o eixo de rotação da peça no torneamento



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- **Fatores que Causam Erros de Usinagem:**
 - *imprecisão das ferramentas.*
 - ◇ Usinagem com ferramentas de tamanho fixo, como brocas, alargadores, bedames e brochas.
 - ◇ Usinagem com ferramentas de forma em operações de torneamento, fresamento e retificação.
 - ◇ Parâmetros de geometria ou forma de ferramenta de tornear ⇒ desgaste da ferramenta será maior do que o esperado



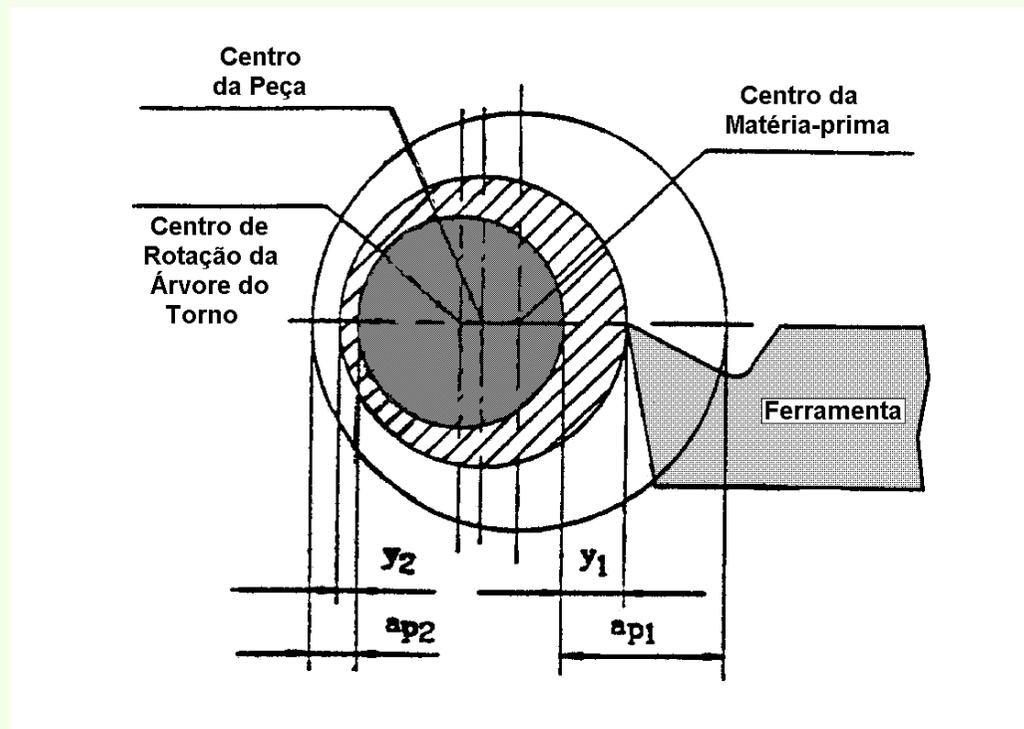
PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- **Deformação do Sistema de Usinagem sob forças externas:**
 - ◇ Um sistema de usinagem \Rightarrow *máquina, dispositivo de fixação, ferramenta e peça* (“MFFP”, ou “MFTW” em inglês).
 - ◇ Deformação no sistema de usinagem sob as forças de corte, fixação, gravitacionais e inerciais altera a posição relativa entre a ferramenta e a peça que foi presetada corretamente, e portanto causa erros de usinagem.
 - ◇ A rigidez de um sistema MFTW = capacidade deste sistema de resistir à ação de uma força externa causando deformação \Rightarrow quociente entre a força radial exercida sobre a peça (perpendicular à superfície da peça), e o deslocamento da aresta de corte em relação à superfície da peça, medida na mesma direção da força.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Variação da força de corte:

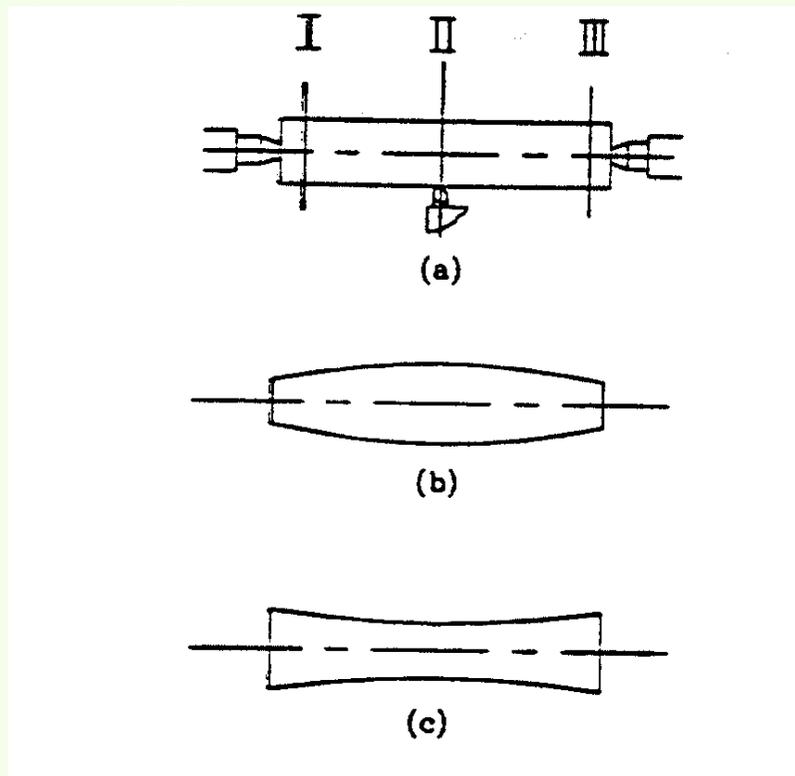


Reprodução do erro



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Variação da posição de atuação da força:

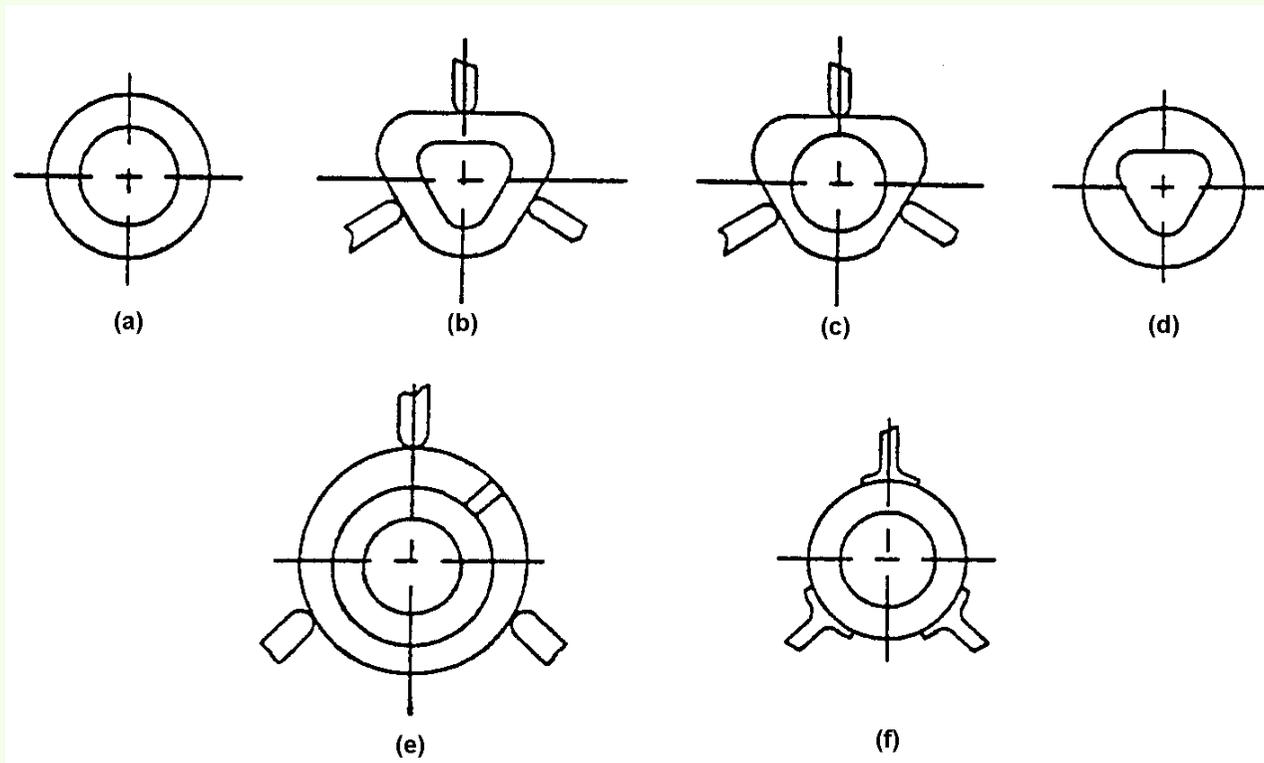


*Erros de forma
causados pela
variação da rigidez
ao longo da peça*



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Efeitos de outras forças externas:



*Erros de forma
causados por
forças de fixação*



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Deformação Térmica de Sistemas de Usinagem:

- Ferramenta:

◇ dilatação da ferramenta:

$$\xi = \xi_{max} (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_c}})$$

- onde: τ_c = constante relativa à massa da ferramenta, ao calor específico, à área da seção do corpo da ferramenta, e o coeficiente de transferência de calor (em minutos)
- $3 < \tau_c < 6$ minutos.
- Na usinagem contínua, $\tau = 4\tau_c$ ($\xi = 0.98\xi_{max}$).



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Deformação Térmica de Sistemas de Usinagem:

- Peça:

- $\Delta L = a \times L \times \Delta t$

onde:

- ΔL - deformação térmica da peça (mm)
 - a - coef. exp. linear do material da peça (para o aço, $a = 1,17 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)
 - Δt - aumento da temperatura da peça ($^{\circ}\text{C}$)
 - L - dimensão da peça na direção da deformação térmica (mm)



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

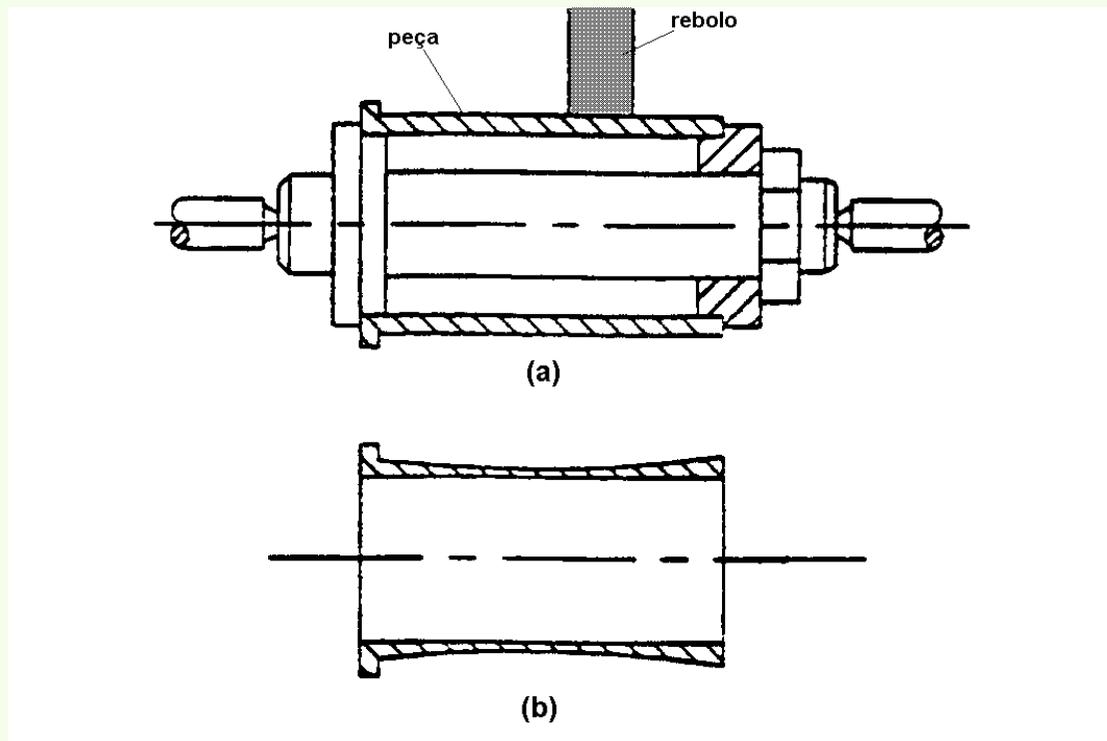
- Deformação Térmica de Sistemas de Usinagem:
 - Na retificação de uma superfície cilíndrica de uma luva com diâmetro externo de 112mm, a temperatura da peça aumenta de 18°C até 37°C uniformemente, então a deformação térmica pode ser calculada como se segue:

$$\Delta d = 1,17 \times 10^{-5} \times 112 \times (37-18) = 0,025mm$$



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Deformação Térmica de Sistemas de Usinagem:



*Erro de forma
causado pela
deformação
térmica quando da
retificação de uma
lufa de paredes
finas*



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Deformação da Peça Devido a Tensões Internas:
 - Processos a quente (p.ex. fundição, forjamento, soldagem)
 - ◇ diferentes taxas de resfriamento em vários pontos, e a transformação na estrutura metalográfica do material.
 - Processos a frio (p.ex. usinagem, estampagem).
 - ◇ deformação plástica da peça a baixa temperatura, e também devido ao calor da usinagem.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Estado de equilíbrio
 - ◇ Se uma camada de metal é removida (p.ex. por usinagem), estas tensões internas são redistribuídas, causando distorções na peça.
 - ◇ Tensões internas na camada superficial $>$ limite de ruptura \Rightarrow trincas
 - * arranjo de operações apropriadas de tratamento térmico (especialmente antes ou depois de operações de desbaste)
 - * dividir de forma apropriada os processos de usinagem em estágios
 - * seleção de parâmetros apropriados de usinagem



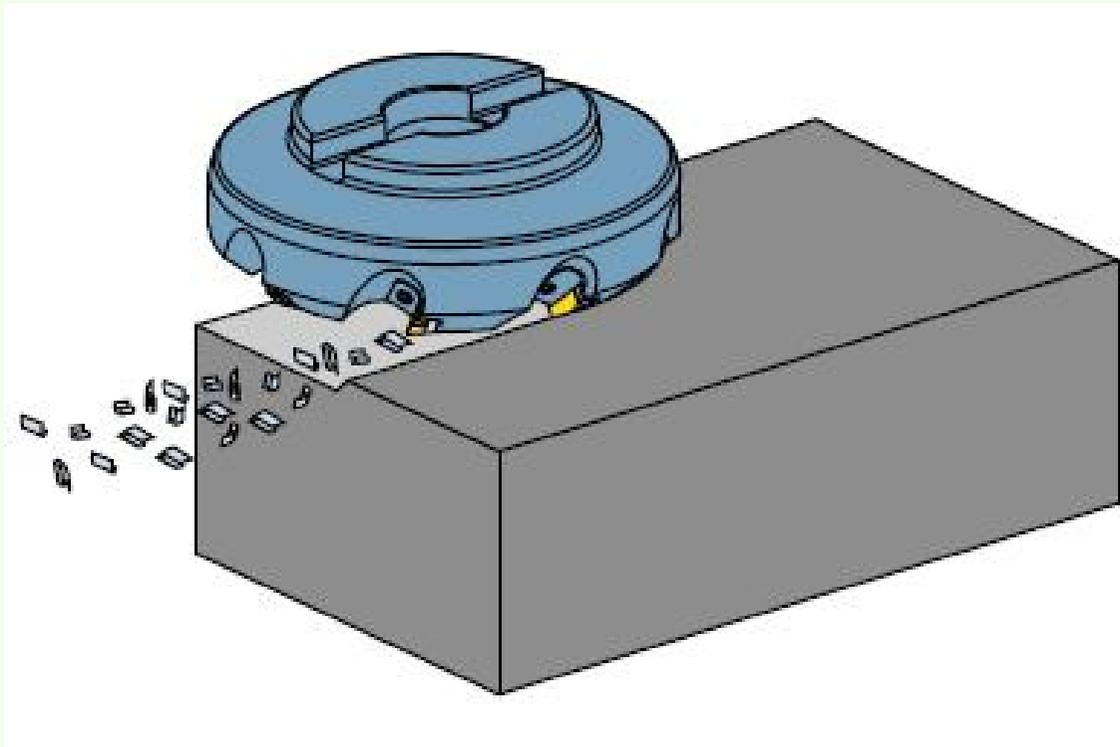
PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Erros de Medição
 - imprecisão dos instrumentos, medições executadas de forma inadequada, influência da temperatura ambiente.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Exemplo de Parâmetros de Precisão e Erros no Fresamento

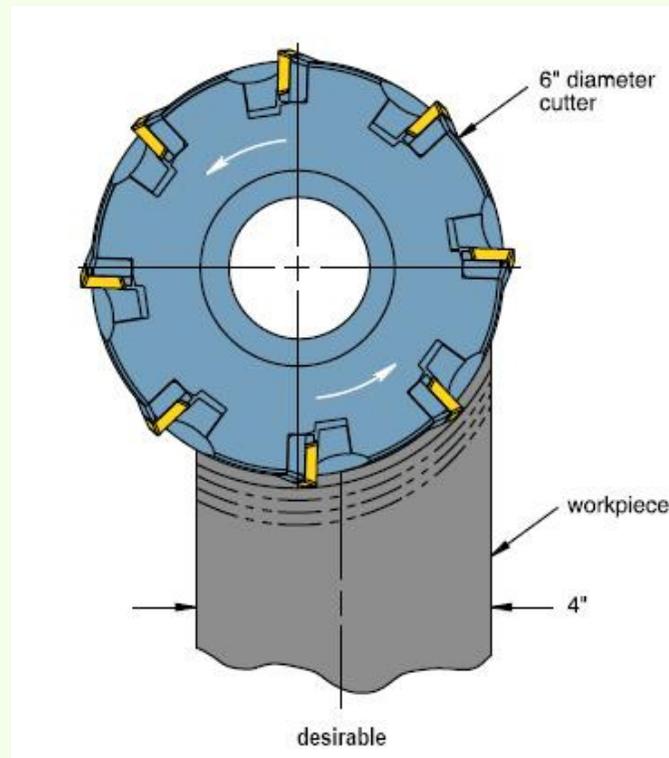


Um exemplo do processo de fresamento



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Exemplo de Parâmetros de Precisão e Erros no Fresamento

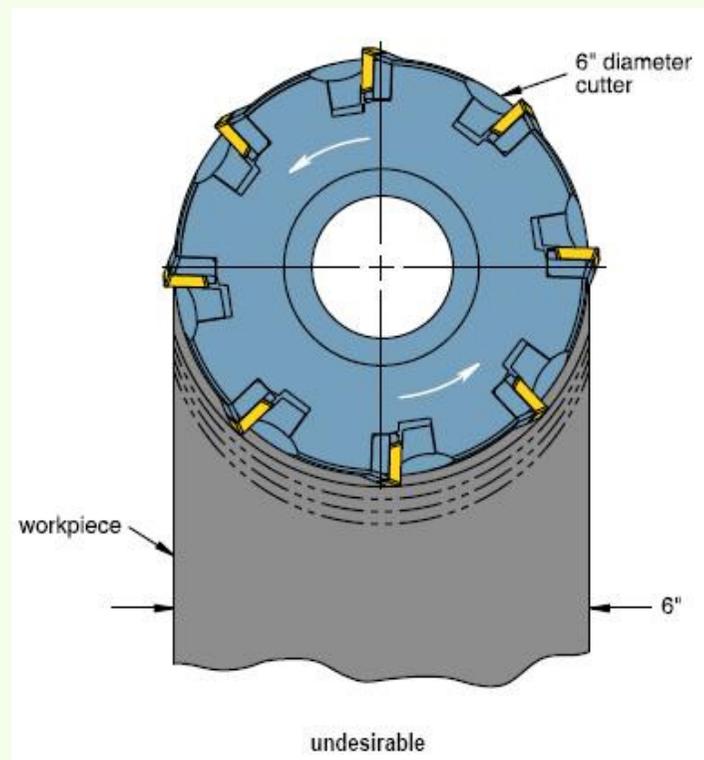


Diâmetro adequado da fresa



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Exemplo de Parâmetros de Precisão e Erros no Fresamento



Diâmetro inadequado da fresa (igual à largura da peça):

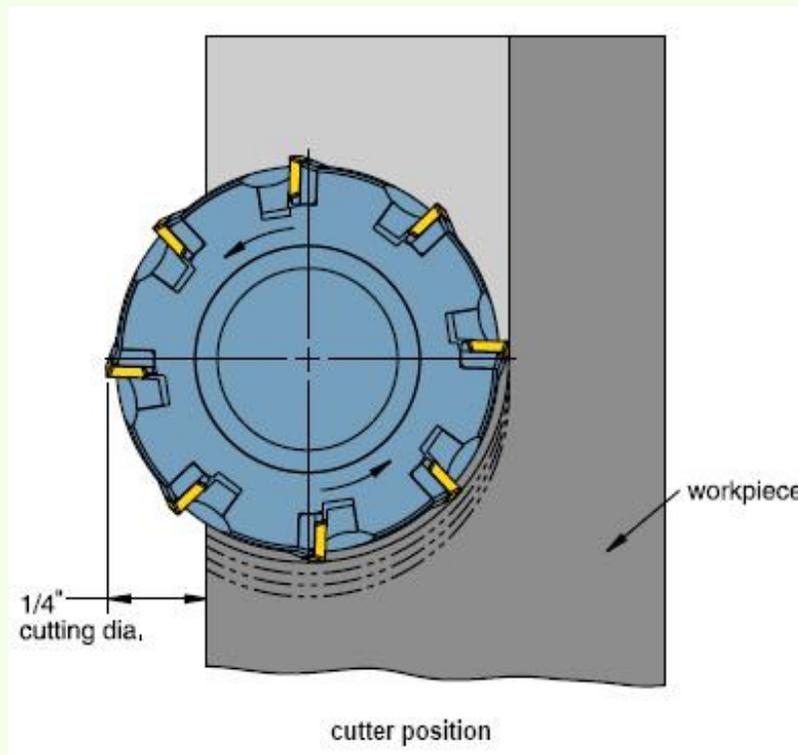
(1) cavaco fino (não levam o calor gerado) → falha prematura da ferramenta;

(2) encruamento nas áreas de entrada e saída da peça.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Exemplo de Parâmetros de Precisão e Erros no Fresamento

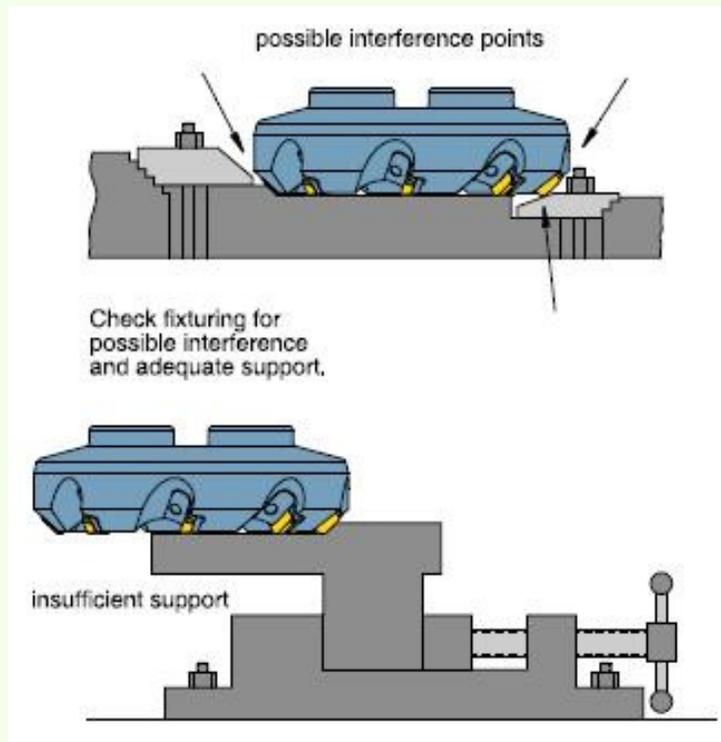


*Diâmetro e
posicionamento
adequado da fresa*



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Exemplo de Parâmetros de Precisão e Erros no Fresamento

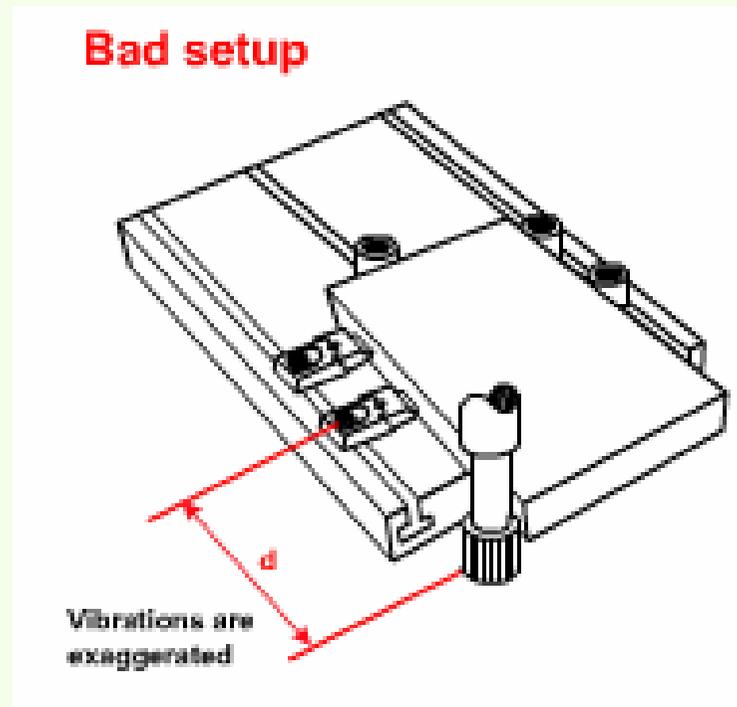


Situações ilustrando problemas na fixação de peças prismáticas para efetuar operações de fresamento



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

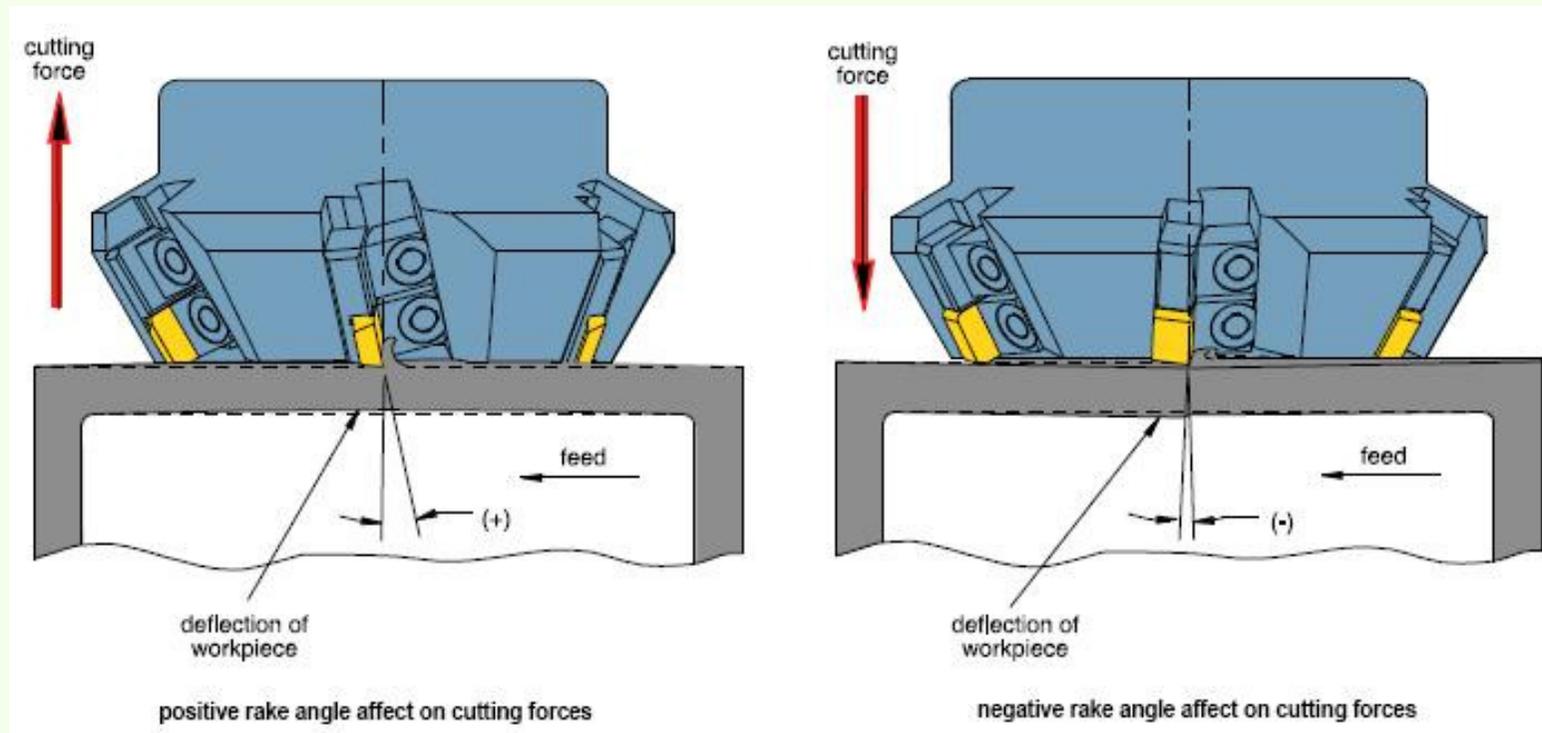
- Exemplo de Parâmetros de Precisão e Erros no Fresamento



Situações ilustrando problemas na fixação de peças prismáticas para efetuar operações de fresamento



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM



Efeito do ângulo de saída nas forças resultantes do processo de fresamento



Planejamento do Processo
Assistido por Computador - CAPP



João Carlos E. Ferreira
GRIMA, Dep. Eng. Mecânica, UFSC
<http://www.grima.ufsc.br>



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

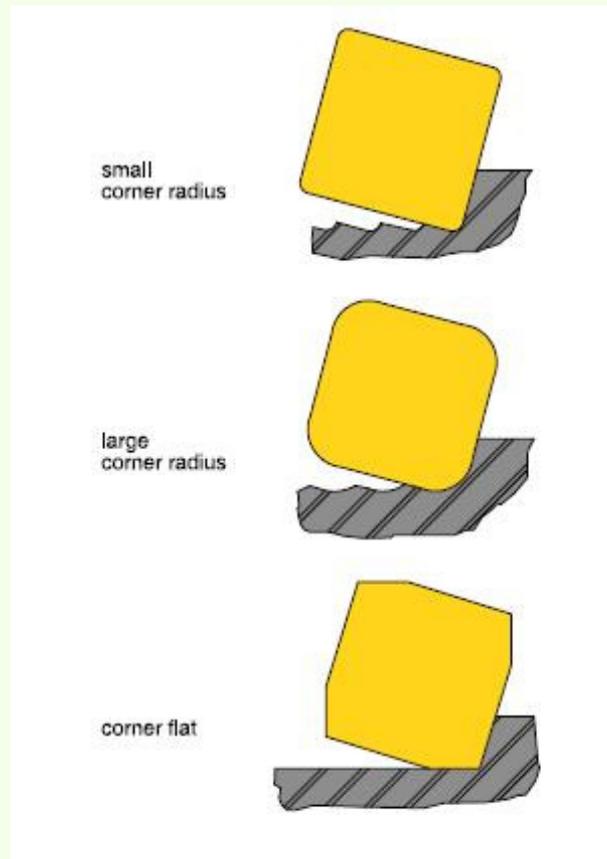


Figure 1: Larger insert corner radii or flats produce finer milling finishes.

Efeito do raio de quina na rugosidade superficial no processo de fresamento



**Planejamento do Processo
Assistido por Computador - CAPP**



João Carlos E. Ferreira
GRIMA, Dep. Eng. Mecânica, UFSC
<http://www.grima.ufsc.br>



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- **Métodos para Determinar a Precisão de Usinagem:**
 - Erros *sistemáticos*.
 - ◇ Furos de 10mm de diâmetro ← alargador de 10,02mm de diâmetro
 - Erros *aleatórios*.
 - ◇ Furos de 10mm de diâmetro ← alargador de 10,00 mm de diâmetro
 - * variações irregulares dos tamanhos dos furos produzidos antes desta operação, as variações na dureza da peça, e muitos outros fatores.
 - ◇ método estatístico.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Controle de Qualidade:
 - ◇ Inspeção 100% é lenta, cara, e não elimina todas as peças defeituosas.
 - ◇ Operadores sofrem fadiga; e os instrumentos de medição desgastam-se mais frequentemente.
 - ◇ O risco da passagem de peças defeituosas é variável e de magnitude não definida, enquanto que através do procedimento de amostragem este risco pode ser calculado.
 - ◇ Fusíveis ou palitos de fósforo não podem sofrer inspeção de 100%
 - ◇ A inspeção tem um custo, e não agrega valor ao produto que foi produzido de acordo com as especificações.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Manufatura intercambiável → peças a serem montadas devem ser selecionadas aleatoriamente de um grande número de peças.
 - ◇ Um equilíbrio deve ser estabelecido entre o custo de manufatura e a facilidade de montagem.

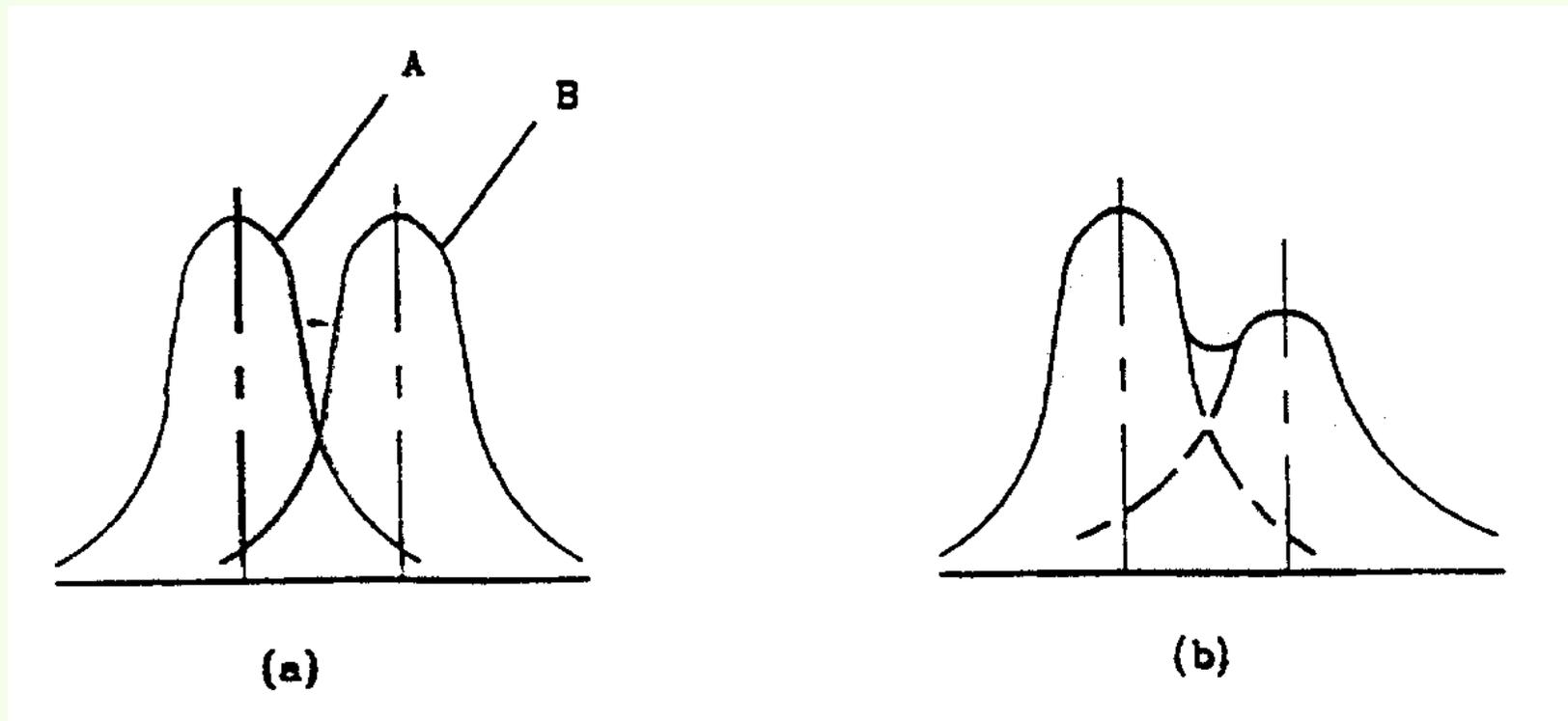


PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Análise Estatística de Erros de Usinagem:
 - ◇ Modelos matemáticos descrevendo curvas de distribuição reais são construídos.
 - ◇ De acordo com a teoria da probabilidade, a curva de distribuição é a soma de um elevado número de variáveis independentes, e sempre aproxima-se à *distribuição normal*.
 - ◇ Já foi provado que durante a operação de usinagem em máquinas automáticas, com uma baixa taxa de desgaste, e também sem nenhum fator predominante afetando a precisão de usinagem, que a distribuição das dimensões da peça após a usinagem apresenta-se segundo a *distribuição normal*.
 - ◇ erros sistemáticos $\rightarrow \neq$ distribuição normal.



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM



Influência de erros sistemáticos constantes na curva de distribuição



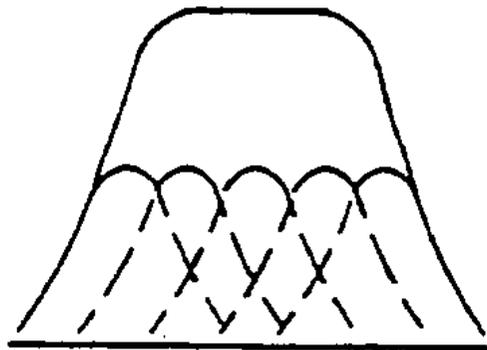
Planejamento do Processo
Assistido por Computador - CAPP



João Carlos E. Ferreira
GRIMA, Dep. Eng. Mecânica, UFSC
<http://www.grima.ufsc.br>

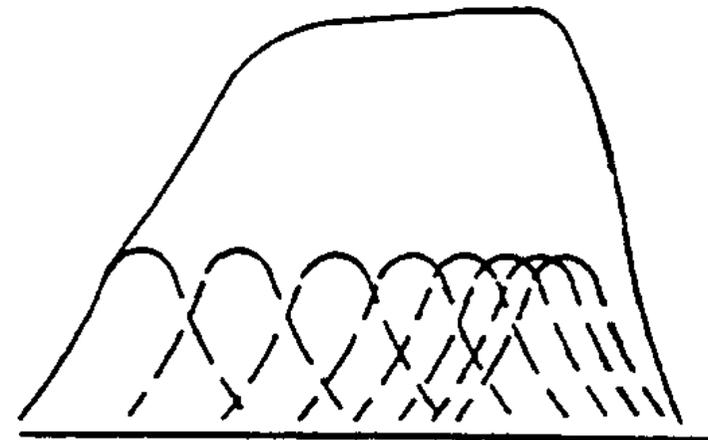


PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM



(a)

Desgaste da ferramenta



(b)

Deformação térmica



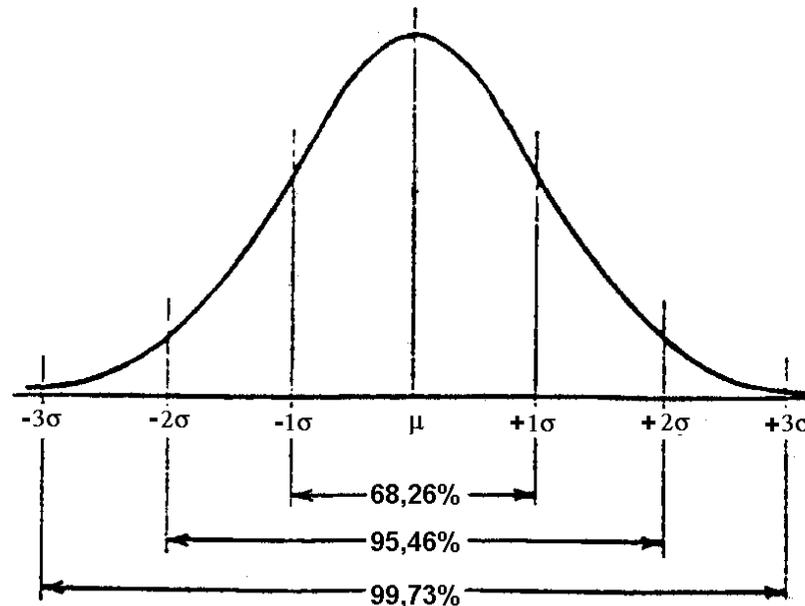
Planejamento do Processo
Assistido por Computador - CAPP



João Carlos E. Ferreira
GRIMA, Dep. Eng. Mecânica, UFSC
<http://www.grima.ufsc.br>



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM



Porcentagem das áreas da curva de distribuição normal



Planejamento do Processo
Assistido por Computador - CAPP



João Carlos E. Ferreira
GRIMA, Dep. Eng. Mecânica, UFSC
<http://www.grima.ufsc.br>



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Capacidade do Processo:
 - Estudo da capacidade aplica-se a um processo, máquina: ou dispositivo de inspeção
 - Capacidade de qualquer máquina ou processo for *superestimada* \Rightarrow perda financeira imediata e contínua
 - Capacidade de qualquer máquina ou processo for *subestimada* \Rightarrow capital foi gasto adquirindo-se capacidade excedente e não pode ser investida em outros lugares.

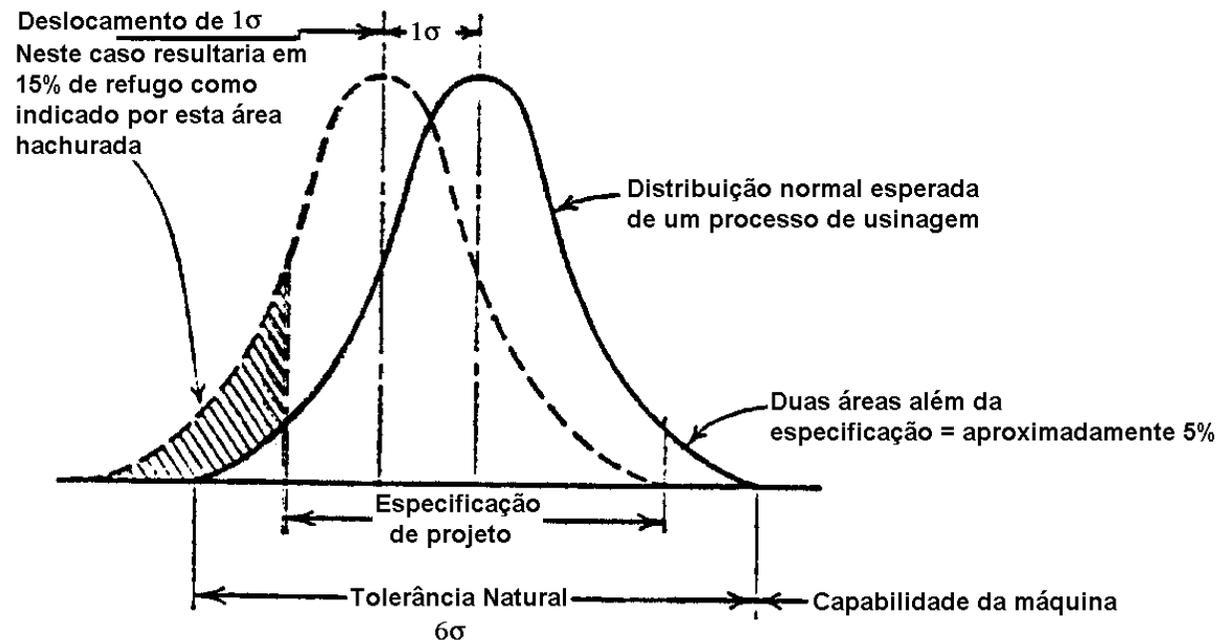


PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Aplicações:
 - Seleção de máquinas baseadas na sua capacidade em relação aos requisitos de produto
 - Máquinas com faixas do processo ≤ 50 a 75% da tolerância da peça, permitindo um controle razoável das variações e uma pequena quantidade de desgaste para que procedimentos econômicos de manutenção possam ser estabelecidos.



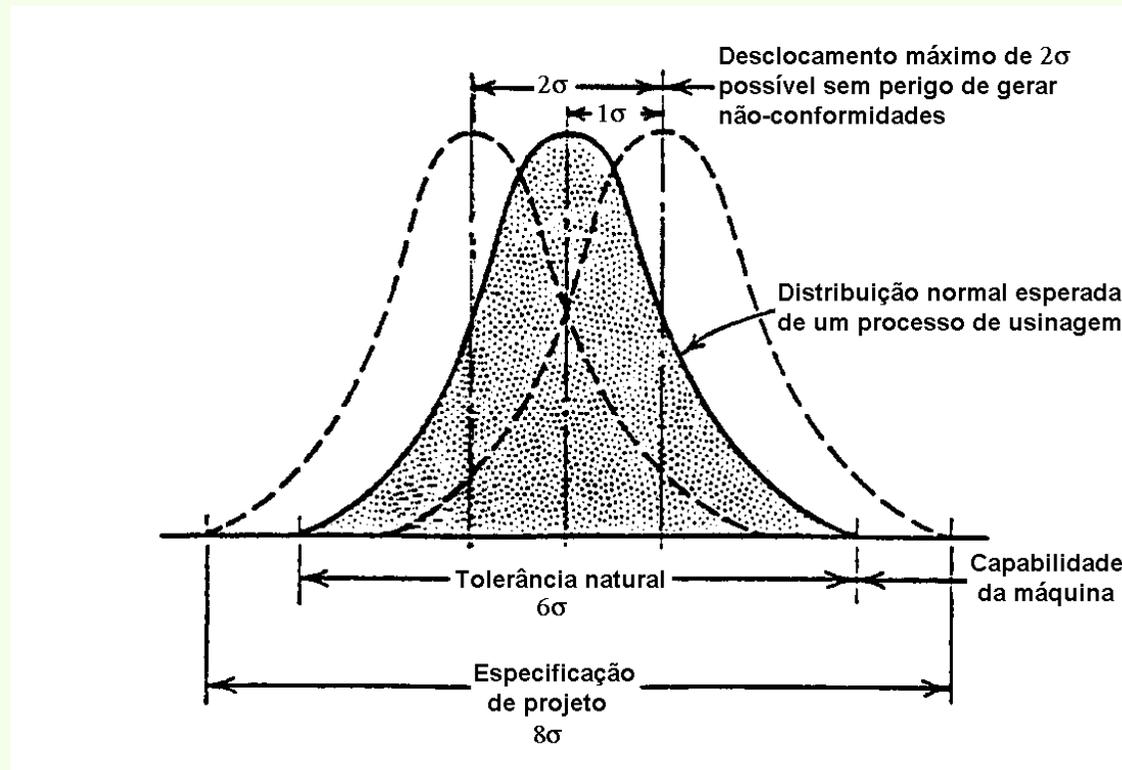
PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM



Condição onde a especificação da peça é menor que a capacidade da máquina ou processo



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM



Condição onde a especificação da peça é maior que a capacidade da máquina ou processo



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Estabelecimento de programas de manutenção preventiva:
 - ◇ Estudos de capacidade de máquina contínuos → estabelecer agendas de manutenção preventiva.
 - ◇ Capacidade da máquina ↓ devido ao desgaste ⇒ novas agendas
 - ◇ Máquina próxima de manutenção ou substituição não deve ser selecionada



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- *Métodos para Determinar Capacidades*
 - O uso da amplitude de dispersão R como fator determinante (método da amplitude)
 - O uso da média \bar{X} e da amplitude R como fatores determinantes (método da média).
 - A tolerância natural encontrada por estes dois métodos é a estimativa 6σ para a máquina ou processo no teste.



DIAGRAMA FREQUÊNCIA-AMPLITUDE

Pc # 09320 Date 8-24-60
 Pc.Name Pistão
 Job # 8-21 Tag # 2
 Job qty 300 Oper # 20
 OK by _____
 Dept. _____ Mach # _____

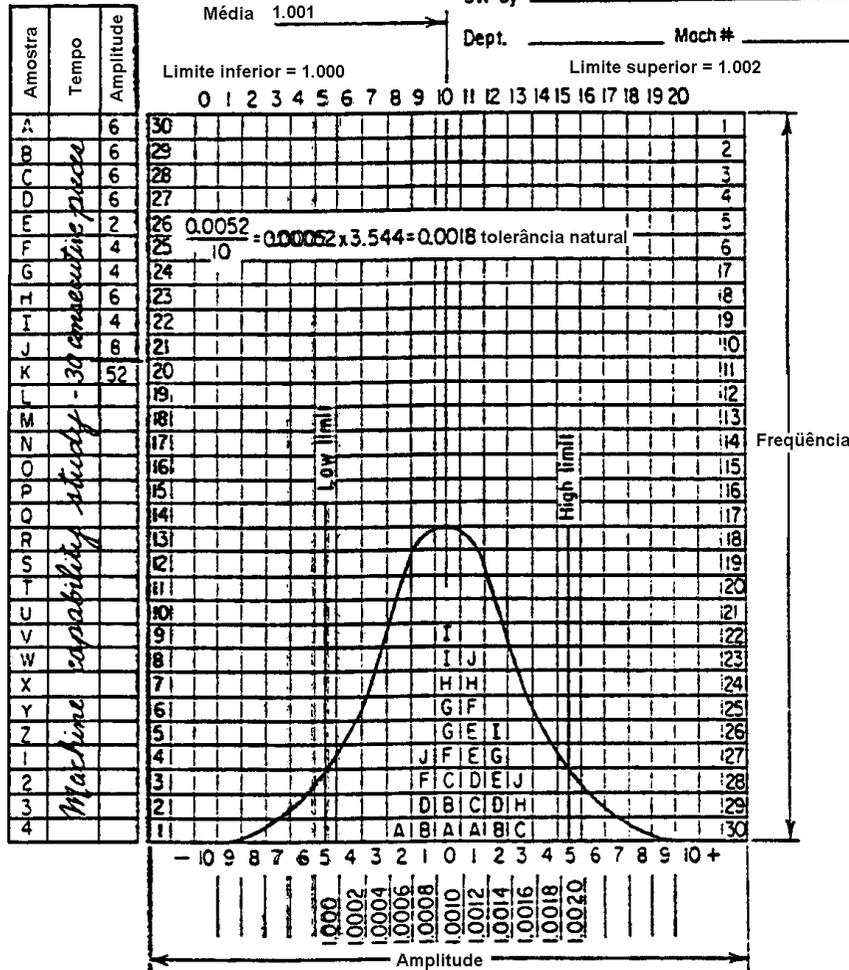


Gráfico de análise de médias e faixas



Planejamento do Processo
 Assistido por Computador - CAPP



João Carlos E. Ferreira
 GRIMA, Dep. Eng. Mecânica, UFSC
<http://www.grima.ufsc.br>



Código da peça 09320 Dimensão 1.000'' - 1.002'' Data 26/6/1992

TEMPO	NÚMERO DA AMOSTRA	VALORES					(S) SOMA	\bar{X} MÉDIA	(R) AMPLITUDE
		1	2	3	4	5			
	A	1.0006	1.001	1.0012	-	-	3.0028	1.0009	.0006
	B	1.0014	1.0008	1.001	-	-	3.0032	1.0011	.0006
	C	1.0016	1.0012	1.001	-	-	3.0038	1.0013	.0006
	D	1.0008	1.0012	1.0014	-	-	3.0034	1.0011	.0006
	E	1.0014	1.0012	1.0012	-	-	3.0038	1.0013	.0002
	F	1.001	1.0008	1.0012	-	-	3.0030	1.0010	.0004
	G	1.0014	1.001	1.001	-	-	3.0034	1.0011	.0004
	H	1.0016	1.0012	1.001	-	-	3.0038	1.0013	.0006
	I	1.0014	1.001	1.001	-	-	3.0034	1.0011	.0004
	J	1.0008	1.0016	1.0012	-	-	3.0036	1.0012	.0008
TOTAIS								10.0114	.0052
MÉDIAS								\bar{X} 1.00114	\bar{R} .00052

Diagrama de médias e amplitudes

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{X} + A_2 \bar{R} = 1.00114 + (1.023 \times .00052) = 1.00167$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{X} - A_2 \bar{R} = 1.00114 - (1.023 \times .00052) = 1.00061$$

$$UCL_R = D_4 \bar{R} = 2.574 \times .00052 = .00144$$

$$LCL_R = D_3 \bar{R} = 0 \times .00052 = 0$$

$$\text{Tolerância natural} = (UCL_{\bar{X}} - LCL_{\bar{X}}) \sqrt{n} = (1.00167 - 1.00061) \sqrt{5} = .00184$$



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

Tamanho da Amostra n	A_2	D_3	D_4	d_2
2	1,880	0	3,268	1,128
3	1,023	0	2,574	1,693
4	0,729	0	2,282	2,059
5	0,577	0	2,114	2,326
6	0,483	0	2,004	2,534
7	0,419	0,076	1,924	2,704
8	0,373	0,136	1,864	2,847
9	0,337	0,184	1,816	2,970
10	0,308	0,223	1,777	3,078
11	0,285	0,256	1,744	3,173
12	0,266	0,284	1,717	3,258
13	0,249	0,308	1,692	3,336
14	0,235	0,329	1,671	3,407
15	0,223	0,348	1,652	3,472

Fatores para o cálculo dos limites de controle e capacidade de máquina



No. da peça 09320

Cota 1.000-1.002

Data 26/8/1992

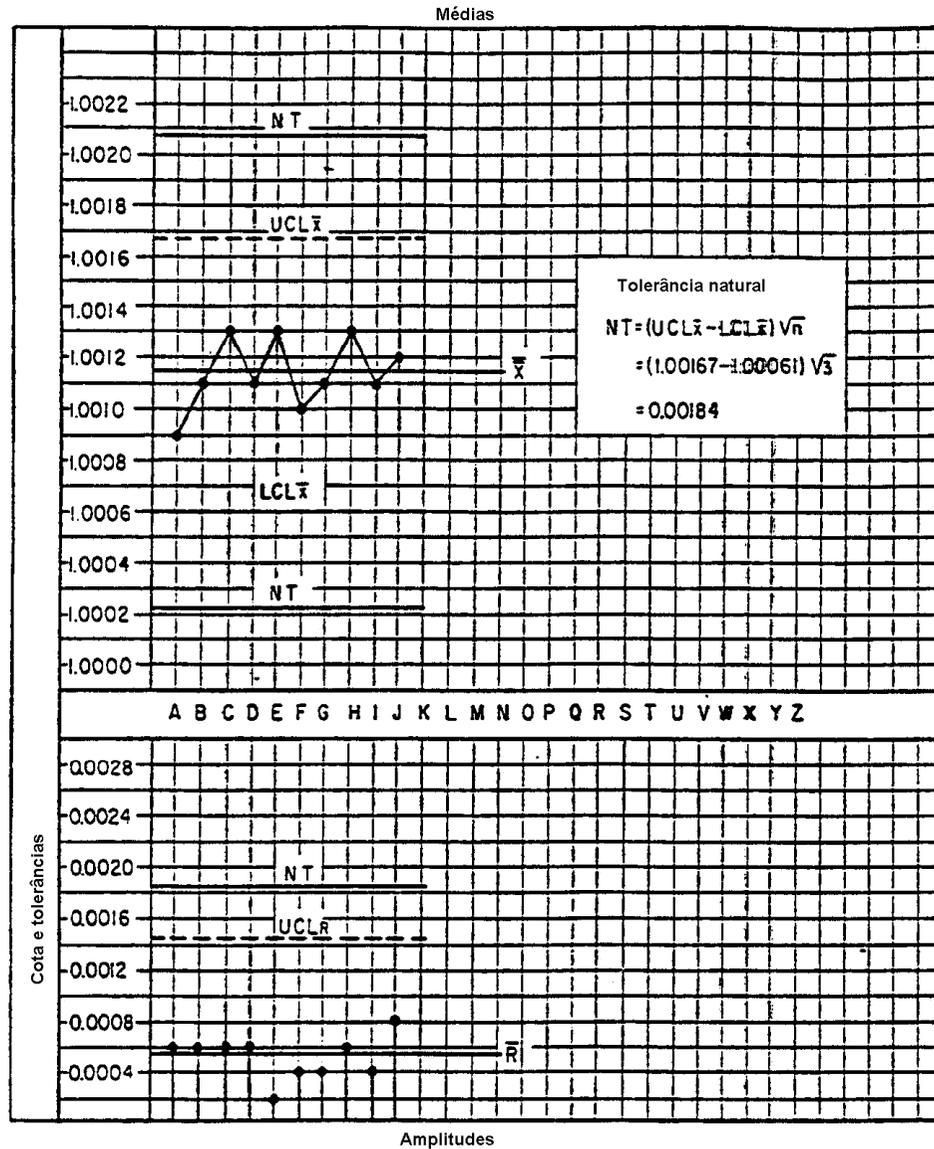


Gráfico de análise de médias e amplitudes



Planejamento do Processo
Assistido por Computador - CAPP



João Carlos E. Ferreira
GRIMA, Dep. Eng. Mecânica, UFSC
<http://www.grima.ufsc.br>



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Índices de Capabilidade do Processo: C_p
 - Processo considerado estável \Rightarrow média do processo centrada no valor nominal da faixa de tolerância (isto é, na média do projeto da peça):

$$C_p = \frac{LTS - LTI}{6\sigma}$$

$C_p > 1,33$ ou $1,5$ ou $1,66$



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Índices de Capabilidade do Processo: C_{pk}
 - Processo não necessariamente estável:

$$C_{pk} = \text{Min} (C_{ps}, C_{pi})$$

$$C_{ps} = \frac{LTS - \bar{x}}{3\sigma}$$

$$C_{pi} = \frac{\bar{x} - LTI}{3\sigma}$$



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Índices de Capabilidade do Processo:

Valor de C_p ou C_{pk}	1,00	1,20	1,30	1,33	1,66	2,00
C_p : ppm fora da tolerância	3000	300	100	<60	<1	<10 ⁻⁵
C_{pk} : ppm acima ou abaixo da faixa de tolerâncias	1500	150	50	<30	<1	<10 ⁻⁵



PRECISÃO E ERROS DE USINAGEM

- Exercício: Para uma determinada peça, a especificação de uma cota de projeto é de $20^{\pm 0.3}$ mm. Tem-se à disposição três máquinas, cujos dados a respeito da média das médias e média das amplitudes estão tabelados abaixo.

<i>Máquina</i>	<i>Média das médias</i>	<i>Média das amplitudes</i>
A	20	0,27
B	20,1	0,16
C	20,02	0,10
Número de amostras = 12, Tamanho da amostra = 4		

Faça uma análise de quais destas máquinas é a mais conveniente para a obtenção daquela cota de projeto.

