



**ANAIS DO  
VII CONGRESSO BRASILEIRO  
DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
UBERLÂNDIA - MINAS GERAIS

13 - 16 de dezembro de 1983

# **COBEM 83**

**VOLUME C**



**AMORTECEDORES E ACÚSTICA  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO  
PROJETO DE MÁQUINAS E COMPONENTES  
USINAGEM E CONFORMAÇÃO DE MATERIAIS  
COMPORTAMENTO DINÂMICO E ANÁLISE DE SISTEMAS MECÂNICOS  
OTIMIZAÇÃO  
VIBRAÇÕES**

|                                                                                   |                                                    |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| ANAIS                                                                             | <b>COBEM 83</b>                                    | PROCEEDINGS                                                                        |
|  | VII CONGRESSO BRASILEIRO DE<br>ENGENHARIA MECÂNICA |  |
| UBERLÂNDIA, 13 - 16 de dezembro de 1983                                           |                                                    |                                                                                    |
| TRABALHO<br>PAPER                                                                 | Nº C-23                                            | P.P. 223 - 232                                                                     |
|                                                                                   |                                                    | UFU                                                                                |

VARIAÇÃO DOS DESVIOS GEOMÉTRICOS E DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM FUNÇÃO DO DESVIO DIMENSIONAL EM OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO

Oswaldo Luiz Agostinho

Professor da Escola de Engenharia de São Carlos - USP  
FEC - UNICAMP  
Engenheiro de Fabricação de Equipamentos Clark Ltda

Arthur José Vieira Porto

Laboratório de Máquinas Ferramentas - EESC - USP

SUMÁRIO

Analisou-se a variação dos desvios aleatórios e sistemáticos que compõem o desvio total das características dimensionais, geométricas e de rugosidade superficial em uma peça fabricada em condições industriais. A operação de usinagem foi de torneamento. A fim de obter esses desvios, variaram-se as condições do sistema Máquina-Ferramenta-Ferramenta de corte-Dispositivo de fixação e localização à Peça obra (MFDP) além do ponto de verificação dos desvios na peça. Comprovou-se experimentalmente a participação desses desvios na composição dos desvios totais para as características de qualidade anteriormente citadas.

SUMMARY

The variation of the random and systematic deviations that compose the total deviation, on the dimensional, geometric and surface roughness quality characteristics was analyzed. In order to obtain these deviations, it was checked in several points of the part, changing also the machine tool-fixture-tool-workpiece (MFTW) system conditions. It has been proved the participation of these deviations in the composition of quality characteristics total deviation through the proposed method.

|             |         |
|-------------|---------|
| SYSNO       | 1660376 |
| PROD        | -000042 |
| ACERVO EESC |         |

### 1. Introdução

Sabe-se que [1] quando se executa uma operação qualquer do ciclo de fabricação de uma peça, qualquer característica de qualidade apresentará um desvio total com relação à seu valor nominal.

Entende-se por característica de qualidade uma característica que deve ser mantida na fabricação de uma peça. Assim, a dimensão, forma geométrica, posição entre as formas geométricas, textura superficial, composição metalúrgica ou química são características de qualidade.

Durante a fabricação de uma peça em um determinado estágio ou operação, influem conjuntamente na formação do desvio total  $w_t$  de uma característica de qualidade a máquina ferramenta, o dispositivo de fixação e localização da peça, o suporte porta ferramentas, a ferramenta de corte e a peça em bruto propriamente dita. Para facilidade, este sistema será definido como MFDP (Máquina ferramenta, Ferramenta de corte, Dispositivo de fixação e localização, Peça em bruto).

Na interação entre a cunha cortante da ferramenta e a peça, são desenvolvidas forças de usinagem, forças internas de resistência do material à remoção do cavaco, além de forças de atrito.

O equilíbrio de forças e momentos externos e internos introduz a interferência necessária no sistema MFDP para remoção da camada de material da peça.

Teoricamente, se não houvesse nenhuma variação nas formas e momentos atuantes no sistema MFDP, o equilíbrio seria mantido. Porém, devido à atuação de diversos fatores no sistema MFDP, o equilíbrio de forças não se mantém, obtendo-se deslocamentos adicionais da cunha de corte da ferramenta com relação às superfícies de referência da peça. Estes deslocamentos conduzirão a desvios nas dimensões e nas formas sendo usinadas.

Sabe-se que durante a operação, a força de usinagem é função da variação das condições de usinagem, da profundidade de corte, devido à variação das dimensões das peças em bruto, do material da peça, além do desgaste e perda do fio de corte das ferramentas.

A variação de usinagem causa deformações elásticas no sistema MFDP, assim como deslocamentos de certos elementos do sistema devido às folgas nos ajustes, e nas peças acopladas. Consequentemente, resultarem desvios nas formas geométricas e dimensões das superfícies usinadas.

Outros fatores de alteração devem ser considerados: desgastes das ferramentas de corte, aumento de temperatura do sistema MFDP durante a operação, vibrações, redistribuição de tensões internas.

A análise particularizada dos parâmetros de influência correspondente a cada componente do sistema MFDP na formação do desvio, conduz a resultados já estudados [1].

A equação geral para determinação do desvio total é:

$$w_t = D_Y + \sum_{i=1}^n \Delta \theta_S - \sum_{i=1}^p \Delta F_i - c + z\sigma_a \quad (1)$$

cujas composição é explicativa por:

$w_a = z\sigma_a$  = composição dos desvios provenientes da atuação dos fatores aleatórios no sistema MFDP. Os fatores aleatórios são definidos como aqueles que ocorrem durante um processo produtivo, sem qualquer lei de variação que os interrelacione, em grande número e de mesma ordem de grandeza, e independentes entre si. Os fatores aleatórios, quando influem na dispersão valor nominal da característica de qualidade, tendem a ser caracterizados por uma distribuição normal.

$$z = \text{coeficiente que determina a confiança}$$

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_{Y_S}^2 + \sigma_{\text{vibr}}^2 + \sigma_{\Delta P}^2 + \sigma_{\Delta \theta}^2 + \dots}$$

onde:

$\sigma_{Y_S}$  = desvio devido à rigidez do sistema MFDP

$\sigma_{\text{vibr}}$  = desvio devido às vibrações do sistema MFDP

$\sigma_{\Delta P}$  = desvio devido às variações da força de usinagem  $P_u$  com as condições de usinagem.

$\sigma_{\Delta \theta}$  = desvio devido à variação de temperatura da peça devido ao deslocamento da fonte de calor (Ponta de ferramenta ao longo da peça).

$w_{SV} = D_Y + \sum_{i=1}^n \Delta \theta_S$  = composição dos desvios provenientes dos fatores sistemáticos variáveis. Entende-se fatores sistemáticos variáveis, aqueles que fazem variar a característica da qualidade em função do tempo de usinagem ou do número de peças fabricadas através de uma lei conhecida. São eles:

$D_Y$  = desgaste dimensional da ferramenta

$\sum \Delta \theta_S$  = variações devidas às deformações térmicas.

com o tempo de operação ou com o número de peças fabricadas. Os desvios resultantes são determinados por soma algébrica,

ou isto é, levando-se em consideração o sinal de deformação.

$$\omega_{sc} = \sum_{i=1}^n \Delta F_i + \epsilon =$$

composição dos desvios provenientes da atuação dos fatores sistemáticos constantes. Entende-se como fatores sistemáticos constantes aqueles que só mudam seus valores após cada reajuste do sistema MFDP. São eles:

$\sum_{i=1}^n \Delta F_i$  = variações dimensionais devidas ao desvio da forma geométrica ideal, provindos dos desvios geométricos da máquina ferramenta.

$\epsilon$  = variações dimensionais resultantes dos desvios de localização e fixação da peça no dispositivo de fixação.

A equação(1) apresenta dificuldades de aplicação prática, apesar de ser analiticamente detalhada.

A obtenção de seus diversos fatores componentes é bastante difícil, podendo tornar-se quase impossível à medida que a operação vai se complicando em termos do sistema MFDP.

Para isso, de acordo com a proposição de Agostinho [1], estes desvios podem ser tratados conjuntamente, através de correlações estatísticas. A figura 1 mostra as principais grandezas a serem controladas.

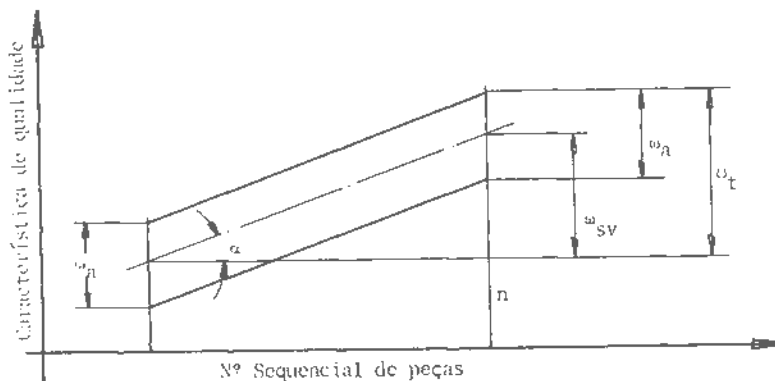


Figura 1: Desvio aleatório  $\omega_a$ , sistemático variável  $\omega_{sv}$  e total  $\omega_t$

onde  $\omega_a$  - desvio devido aos fatores aleatórios que atuam no sistema MFDP

$\omega_{sv}$  - desvio devido aos fatores sistemáticos variáveis que atuam no sistema MFDP

$\omega_t$  - desvio total

$\alpha$  - ângulo de inclinação devido aos fatores sistemáticos variáveis

$$\text{tem-se } \omega_t = \omega_a + \omega_{sv} \quad (2)$$

A confrontação experimental já foi feita para desvios dimensionais

[1] Agora, aplicar-se-á esta formulação em escala industrial, verificando-se além dos desvios dimensionais, também os desvios geométricos de batida radial (composição de desvios de excentricidade e circularidade) [5] e rugosidade superficial, na análise do desvio total  $\omega_t$ .

## 2. Parte experimental

A parte experimental foi realizada em escala industrial, na usinagem de uma peça típica de produção de Equipamentos Clark Ltda, Valinhos SP.

Para a definição do sistema MFDP, foram utilizados os seguintes parâmetros:

MÁQUINA: torno copiador George Fischer KIM -9-80.

FERRAMENTA DE CORTE: Desbaste : TNM 220408-GC 135 - P 35

Acabamento : KNUX 160415 - L12 S2 P 20

DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO: Ponto com mola (placa)

Pinça de fixação

Ponto fixo no carro móvel

PEÇA: Escolheu-se um eixo com as dimensões da Figura 2. O material do eixo é aço ABNT 5120.

A escolha da peça deveu-se a duas razões principais: a sua forma geométrica pouco variável, e possibilidade de verificação dos desvios em partes onde houvesse variação de rigidez do sistema MFDP. Escolheu-se três pontos para a coleta de dados: a secção mais próxima do dispositivo de fixação e localização (secção A), uma secção localizada no meio da peça (secção B), e, uma secção junto ao contraponto da máquina (secção C).

Foram realizados 3 ensaios cujas condições estão descritas na Ta-

bela 1 .

Tabela 1. Condições de realização dos ensaios

| Ensaio | Operação               | Rotação<br>(rpm) | Avanço<br>(mm/volta) | Prof.Corte<br>(mm) | Nº<br>Peças |
|--------|------------------------|------------------|----------------------|--------------------|-------------|
| 1      | Desbaste<br>Acabamento | 949<br>1500      | 0,35                 | 1,3                | 58          |
| 2      | Desbaste<br>Acabamento | 949<br>1500      | 0,35                 | 1,0                | 80          |
| 3      | Desbaste<br>Acabamento | 1795<br>2100     | 0,59<br>0,27         | 1,3                | 70          |

As peças foram numeradas sequencialmente em sua ordem de usinagem para permitir-se o cálculo do desvio sistemático. Para todos os ensaios, utilizou-se sempre uma ferramenta nova para cada primeira peça.

Os desvios de rugosidade superficial são medidas em  $R_a$  - Desvio Médio Aritmético; os desvios de batida radial são controlados assumindo-se o valor da concentricidade como variação no raio dos círculos concêntricos no ponto de medição.

Os valores encontrados nas tabelas 2, 3 e 4 para a secção C, representam a média dos valores das secções  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  da figura 2.

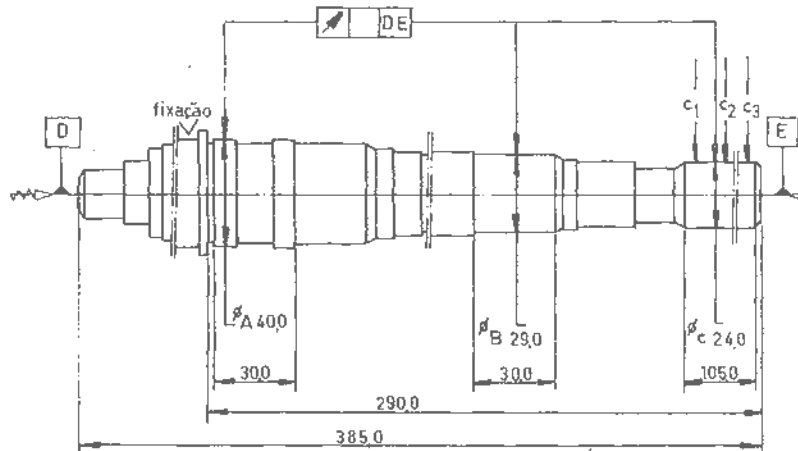


Figura 2. Eixo usinado com as indicações dos pontos de controle dos desvios.

### 3. Resultados

A correlação entre a dispersão aleatória  $\omega_a$  e a dispersão sistemática variável  $\omega_{sv}$  foi feita através de equacionamento estatístico [1] tal que:

- A declividade da reta regredida representa a variação da dimensão nominal, desvios geométricos e rugosidade superficial devidos à ação dos fatores sistemáticos variáveis.
- O intervalo de confiança da amostra representa a variação da dimensão nominal, desvios geométricos e rugosidade superficial devidos à ação dos fatores aleatórios.
- A confiabilidade estabelecida foi de 95%.

A formulação utilizada foi:

- Regresso linear da reta média

$$y_{calc} = \bar{y} + b(x - \bar{x})$$

- Intervalo de confiança da reta média

$$y_{calc_i} = \bar{y}(x_i - \bar{x}) \pm t_p S \sqrt{\frac{1}{x_i} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}}$$

- Intervalo de confiança da amostra

$$y_{calc_i} = \bar{y} + b(x_i - \bar{x}) \pm t_p S \sqrt{1 + \frac{1}{x_i} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}}$$

onde  $y$  - coordenada correspondente à dimensão medida

$x$  - número sequencial da peça usinada

$\bar{x}$  - peça correspondente ao meio da amostra

$n$  - número de peças usinadas

$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y}{n}$  - onde  $n$  = número total de peças

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$



$t_p$  = fator que relaciona a dispersão com a confiança  
 ( $t_p = 1,96$  para 95% de confiança)

$$S = \sqrt{\frac{S_{yy} - b S_{xy}}{n-2}} \quad \text{com } S_{yy} = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}$$

As tabelas 2, 3 e 4 mostram os valores obtidos.

Tabela 2. Desvios correspondentes ao diâmetro

| Ensaio | A                  |                    |                    | B                  |                    |                    | C                  |                    |                    |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|        | $\omega_a$         | $\omega_{sv}$      | $\omega_t$         | $\omega_a$         | $\omega_{sv}$      | $\omega_t$         | $\omega_a$         | $\omega_{sv}$      | $\omega_t$         |
|        | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ |
| 1      | 5,67               | 1,40               | 7,07               | 5,08               | 1,69               | 6,77               | 5,17               | 0,67               | 5,84               |
| 2      | 12,16              | 0,62               | 12,78              | 8,07               | 8,17               | 16,24              | 4,52               | 0,25               | 4,77               |
| 3      | 7,39               | 6,91               | 14,30              | 4,56               | 6,05               | 10,61              | 2,91               | 1,44               | 4,35               |

Tabela 3. Batida Radial

| Ensaio | A                  |                    |                    | B                  |                    |                    | C                  |                    |                    |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|        | $\omega_a$         | $\omega_{sv}$      | $\omega_t$         | $\omega_a$         | $\omega_{sv}$      | $\omega_t$         | $\omega_a$         | $\omega_{sv}$      | $\omega_t$         |
|        | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ |
| 1      | 8,51               | 0,51               | 9,02               | 8,10               | 0,11               | 8,21               | 7,70               | 0,29               | 7,99               |
| 2      | 7,76               | 0,32               | 8,08               | 9,57               | 3,71               | 13,28              | 6,57               | 0,26               | 6,83               |
| 3      | 8,43               | 0,72               | 9,15               | 8,98               | 0,99               | 9,97               | 5,92               | 0,11               | 6,03               |

Tabela 4. Rugosidade Superficial

| Ensaio | A                  |                    |                    | B                  |                    |                    | C                  |                    |                    |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|        | $\omega_a$         | $\omega_{sv}$      | $\omega_t$         | $\omega_a$         | $\omega_{sv}$      | $\omega_t$         | $\omega_a$         | $\omega_{sv}$      | $\omega_t$         |
|        | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ | $\frac{-2}{mm.10}$ |
| 1      | 0,127              | 0,030              | 0,157              | 0,137              | 0,120              | 0,258              | 0,131              | 0,068              | 0,199              |
| 2      | 0,089              | 0,030              | 0,119              | 0,105              | 0,011              | 0,116              | 0,147              | 0,057              | 0,204              |
| 3      | 0,048              | 0,003              | 0,051              | 0,044              | 0,008              | 0,052              | 0,097              | 0,003              | 0,100              |

#### 4. Conclusões

1) Os desvios geométricos de batida radial, assim como os desvios de rugosidade superficial, tiveram comportamento semelhante aos desvios dimensionais com relação aos desvios aleatórios  $\omega_a$ , desvios sistemáticos variáveis  $\omega_{sv}$ . Podem, portanto, ser analisados como parâmetro de qualidade, conforme previsão teórica já feita [1].

2) O trabalho conduzido a nível industrial, em máquinas de produção ao invés de máquinas de laboratórios, viabilizou, em princípio, a aplicação deste método [1] para determinação de tolerâncias em escala industrial.

3) A rugosidade superficial mostrou-se sensível à variação dos fatores sistemáticos variáveis, principalmente com o desgaste da ferramenta de corte. Os maiores valores ocorreram na parte central do eixo (ponto B) com valores menores avanços mm/volta de ferramenta [4].

4) A batida radial não se mostrou sensível aos efeitos dos fatores sistemáticos variáveis, os valores de  $\omega_a$  são sensivelmente maiores que os  $\omega_{sv}$ . Conclui-se que as variações geométricas da peça estão relacionadas principalmente às condições de rigidez e vibrações do sistema MFDP.

Os maiores valores são observados no ponto B em todos os ensaios, devido à pouca estabilidade desse ponto.

5) A dimensão mostrou-se sensível tanto aos desvios  $\omega_a$  quanto a  $\omega_{sv}$ . Devido as folgas do eixo árvore da máquina ferramenta, os valores dos desvios são equivalentes nas secções A e B; a secção C apresenta-se mais estável quanto à variação dos desvios.

### 5. Bibliografia

- [1] Agostinho, O.L. Algumas considerações sobre a formação da dispersão de características de qualidade em operações de usinagem. Unicam, 1979.
- [2] Leme, R.A.S. Curso de Estatística. Editora ao Livro Técnico, 1963.
- [3] Ferraresi, D. Usinagem dos Metais. Editora Edgard Blücher, 1970.
- [4] Balakshin, B. Fundamentals of Manufacturing Engineering. MIR Publishes - Moscou.
- [5] Agostinho, O.L.; Rodrigues, A.C.S.; Lirani, J.- Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões. Editora Edgard Blücher, 1972.