

## FORMULAÇÃO E APLICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA A SÍNTESE DAS TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS COM BASE NO TEMPO DE FABRICAÇÃO POR PEÇA

José Eduardo Ferreira de Oliveira, jefoliveira@cefet-rj.br<sup>1</sup>  
Noemia Gomes de Mattos de Mesquita, mesquita.noemia@gmail.com<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Av. Maracanã, 229, Maracanã, Rio de Janeiro - RJ, Brasil

<sup>2</sup>Escola Técnica SENAI Santo Amaro – Manoel de Brito. Av. Norte, 539 – Santo Amaro, Recife - PE

**Resumo:** *O objetivo deste trabalho é apresentar um novo modelo matemático para a síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas, através da programação linear, com base na incerteza de medição, ou na incerteza da máquina-ferramenta, tomando-se como função objetivo a minimização do tempo necessário à geração da dimensão. Os modelos adotados até então para tal objetivo, levam em consideração apenas a variabilidade do processo e os coeficientes de capacidade do mesmo, o que exige a fabricação de uma quantidade de peças, que dependendo do processo, pode ser expressiva.*

**Palavras-chave:** *tolerância dimensional, programação linear, síntese de tolerâncias, usinagem*

### 1. INTRODUÇÃO

Durante o processo de toleranciamento funcional, ou seja, durante a determinação das tolerâncias para cada dimensão de uma dada peça, com base nas exigências funcionais da mesma, num grande número de casos, o somatório dos afastamentos das dimensões parciais difere do afastamento da dimensão total que é resultante da soma das dimensões parciais. Quando tal situação ocorre, há a necessidade de se ajustar as tolerâncias parciais de modo que o somatório dos afastamentos superiores das dimensões parciais seja igual ao afastamento superior da dimensão total, bem como que, a soma dos afastamentos inferiores das mesmas dimensões parciais seja igual à soma do afastamento inferior da dimensão total. Uma das formas de se realizar tal ajuste é através da otimização das tolerâncias via programação linear. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar um novo modelo para a síntese das tolerâncias dimensionais fazendo uso da programação linear e considerando-se como função objetivo o tempo necessário para gerar uma dada superfície, a qual deverá ser toleranciada. As equações de restrição, por sua vez, consideram a incerteza de medição da dimensão a ser toleranciada ou a incerteza das máquinas-ferramenta capazes de gerar a referida dimensão, de acordo com o ISO GUM (Gum, 2003). Os modelos matemáticos existentes consideram apenas a variabilidade dos processos e os coeficientes capacidade dos mesmos ( $C_p$ ,  $C_{pk}$ ,  $C_{pm}$ ), o que dependendo do processo, poderá gerar a fabricação de uma quantidade acentuada de peças antes de aplicar tais modelos. Por outro lado, os modelos atuais consideram como função objetivo a minimização dos custos para a geração das dimensões de uma certa peça. Será apresentada ainda neste trabalho uma aplicação do modelo aqui proposto num processo de fabricação de um eixo por torneamento.

### 2. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA A SÍNTESE DE TOLERÂNCIAS DETERMINÍSTICAS CONSIDERANDO-SE A INCERTEZA DA MÁQUINA-FERRAMENTA OU DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Usualmente, um projetista seleciona as tolerâncias com base na sua experiência e na funcionalidade do produto (Kussiak et al, 1995). Então, um estreitamento das tolerâncias é usado para compensar a carência de conhecimento da fabricação, bem como da utilização e da medição.

Há dois processos básicos a considerar em tolerância de projeto (Kussiak et al, 1995 e Teeravaraprug, 2002):

- a análise e
- a síntese.

Na “análise de tolerância”, as tolerâncias componentes são especificadas e a variação do conjunto resultante é calculada. Já a “síntese de tolerâncias” envolve a alocação do conjunto de tolerâncias especificado, dentro das dimensões componentes de um conjunto, para assegurar uma produção específica.

Uma outra maneira de se explicar tal situação, é quando, por exemplo, se determinam as tolerâncias componentes e a tolerância da dimensão total, separadamente. Quando as tolerâncias componentes são somadas, percebe-se que a mesma apresenta-se diferente da tolerância da dimensão total, quando na verdade, deveriam ter o mesmo valor. Neste caso, pode-se utilizar a programação linear para otimização das tolerâncias componentes, de tal maneira que o somatório das mesmas seja igual à tolerância da dimensão total. A literatura que trata de síntese de tolerâncias tem sido bastante estudada (Voelcker, 1993; Juster, 1992 e Chase et al, 1991) e dentro deste contexto, duas categorias de objetivos têm sido usadas no projeto de tolerâncias:

- a minimização do custo direto de fabricação, isto é, o projeto de tolerâncias em função do custo e
- a minimização da sensibilidade de tolerâncias de acordo com variações nos processos de fabricação e ambiente de serviço, isto é, o projeto de tolerâncias em função da qualidade e da confiabilidade.

Por sua vez, os métodos de projeto de tolerâncias são classificados como:

determinístico ou  
probabilístico (estatístico, estocástico)

Entre os métodos determinísticos, a programação linear e a programação não linear têm sido freqüentemente usadas. A programação inteira em síntese de tolerâncias discretas foi usada pela primeira vez por Ostwald et al (1977). O trabalho de Monte et al (1982) é uma extensão da programação inteira apresentada por Ostwald et al (1977) para resolver uma larga escala de problemas de toleranciamento determinístico utilizando a programação linear. Kim et al (1988) propuseram uma aproximação pseudo-booleana para determinar as tolerâncias em função do mínimo custo de geração da superfície.

Partindo-se do pressuposto que a tolerância tem uma dependência do processo de fabricação, e usando a programação linear, Kussiak et al (1995) propuseram o seguinte método para composição de tolerâncias determinísticas:

Minimizar

$$y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeita a

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq T_k \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (3)$$

$$x_{ij} = 0,1 \quad (\text{zero ou um}) \quad \forall i, j \quad (4)$$

onde:

y = função objetivo que representa a função custo direto de fabricação;  
 $c_{ij}$  = custo de fabricação do processo j usado para produzir a dimensão i;  
 $t_{ij}$  = variação normal três sigma do processo j usado para produzir a dimensão i;  
 $T_k$  = tolerância da dimensão total da respectiva cadeia dimensional;  
 $x_{ij} = 1$  se o processo j é selecionado para a dimensão i, e 0 caso contrário;  
m = número de tolerâncias dimensionais e  
n = número de processos utilizáveis para produzir a dimensão i.

A eq. 1 minimiza o custo direto de fabricação. A eq. 2 garante que o somatório das tolerâncias parciais não exceda a tolerância da dimensão total. Já a eq. 3 assegura que apenas um processo seja selecionado para gerar cada tolerância. A eq. 4, por sua vez, é fundamental para garantir que  $x_{ij}$  seja zero ou um.

O modelo matemático proposto no âmbito deste trabalho para a síntese de tolerâncias determinísticas é apresentado a seguir:

Minimizar

$$y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

Sujeita a

$$\sum_{i=1}^m Z_i \leq T_f \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n e_{ij} x_{ij} &\leq Z_1 \\ \sum_{j=1}^n e_{2j} x_{2j} &\leq Z_2 \\ &\vdots \\ \sum_{j=1}^n e_{ij} x_{ij} &\leq Z_i \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Z_1 &\leq b_1 \\ Z_2 &\leq b_2 \\ &\vdots \\ Z_i &\leq b_i \end{aligned} \quad (9)$$

$$x_{ij} = 0-1 \quad (10)$$

onde:

$y$  = função objetivo que representa o tempo total para se fabricar a peça;

$a_{ij}$  = tempo gasto para a geração da dimensão “i”, utilizando-se a máquina-ferramenta ou o processo “j”;

$x_{ij} = 1$  (um) se a máquina-ferramenta ou o processo “j” for selecionado para gerar a dimensão “i” e 0 (zero), caso contrário;

$T_f$  = afastamento da tolerância funcional limite ou tolerância funcional total;

$e_{ij}$  = incerteza expandida oriunda do sistema de medição ou incerteza da máquina-ferramenta;

$Z_i$  = valor do afastamento da tolerância funcional da dimensão “i”;

$m$  = número de dimensões que serão trabalhadas na peça;

$n$  = número de máquinas-ferramenta ou processos utilizados para a geração das dimensões da peça;

$b_1, b_2, \dots, b_i$  = afastamento das tolerâncias funcionais de cada dimensão específica

Fundamentalmente existem três diferenças entre este método e o método proposto por Kusiak e Feng (Kussiak et al, 1995):

- na função objetivo, eq. 5, as variáveis  $a_{ij}$  podem representar não apenas o custo direto para geração da dimensão “i”, como também pode ser o tempo total para a geração dessa mesma dimensão;
- o conjunto de eq. 8 e 9 não existem nos modelos anteriormente citados e
- a variação normal três sigma do processo “j”, utilizado para produzir a dimensão “i” ( $t_{ij}$ ), foi substituído pela variável  $e_{ij}$  que representa a incerteza expandida de medição ou incerteza da máquina-ferramenta, dependendo de qual delas seja maior, oriunda do sistema de medição e do sistema de fabricação.

### 3. APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO CONSIDERANDO-SE A FUNÇÃO OBJETIVO REPRESENTANDO O TEMPO TOTAL PARA A GERAÇÃO DE CADA UMA DAS DIMENSÕES DA PEÇA

A fim de exemplificar o modelo proposto, será apresentado um exemplo de composição de tolerâncias determinísticas para o processo de torneamento cilíndrico externo, muito comum na prática. Considere o eixo da figura 1, onde são apresentadas três superfícies distintas: 1, 2 e 3, cujas dimensões correspondentes apresentam-se com as respectivas cotas funcionais.

Os dados de projeto, fabricação e medição necessários ao equacionamento matemático via programação foram gerados através de programa computacional denominado SGF (Sistema de Gerenciamento da Fabricação), desenvolvido no âmbito deste trabalho.

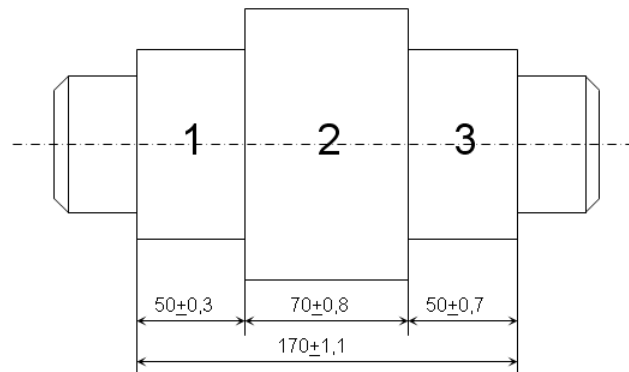


Figura 1. Eixo obtido por torneamento com suas respectivas tolerâncias dimensionais funcionais

O material do referido eixo é o aço ABNT 1038, que foi pré-fabricado por um processo de conformação mecânica, possuindo um sobremetal de 2 mm. Para a usinagem desta peça, dispõe-se de uma ferramenta de corte com seu porta-ferramenta, conforme apresentado nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Dados referentes à ferramenta de corte

|                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Referência                  | SNGN 12 04 08 TxL           |
| Espessura                   | 4,762 mm                    |
| $r\epsilon$                 | 0,8 mm                      |
| Tipo                        | ABNT P-20                   |
| Número de arestas cortantes | 8                           |
| Formato                     | Quadrada 12,700 x 12,700 mm |

Tabela 2. Dados referentes ao porta-ferramentas

|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| Dimensões         | 25 x 25 x 150 mm |
| Ângulo de saída   | -6°              |
| Ângulo de folga   | 6°               |
| Ângulo de posição | 75°              |
| Ângulo de ponta   | 90°              |

Para a execução da referida peça, dispõe-se de três tornos, cujas características são apresentadas nas tabelas 3, 4 e 5. Com relação ao processo, a tabela 6 apresenta os dados de entrada necessários para a otimização do mesmo.

**Tabela 3. Dados referentes ao TORNO 1**

|                    |  |
|--------------------|--|
| Rotações (rpm)     | 25, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250 e 2000  |
| Avanços (mm/volta) | 0,310; 0,316; 0,332; 0,334; 0,340; 0,351; 0,362; 0,368; 0,394; 0,395; 0,402; 0,434; 0,442; 0,451; 0,457; 0,465; 0,482; 0,485; 0,491; 0,526; 0,543; 0,553 e 0,574 |
| Potência (kW)      | 4,5 (6,11 cv)  |
| Rendimento (%)     | 80   |

**Tabela 4. Dados referentes ao torno Imor (TORNO 2)**

|                    |  |
|--------------------|--|
| Rotações (rpm)     | 65, 105, 170, 390, 610 e 1000  |
| Avanços (mm/volta) | 0,333; 0,334; 0,355; 0,394; 0,395; 0,420; 0,459; 0,485; 0,490; 0,573 e 0,579 |
| Potência (cv)      | 3  |
| Rendimento (%)     | 70   |

**Tabela 5. Dados referentes ao torno Romi (TORNO 3)**

|                    |  |
|--------------------|--|
| Rotações (rpm)     | 50, 80, 125, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 1000, 1600, 2500  |
| Avanços (mm/volta) | 0,042; 0,047; 0,057; 0,068; 0,073; 0,094; 0,104; 0,119; 0,135; 0,166; 0,187; 0,229; 0,250; 0,299; 0,338; 0,416; 0,470; 0,520; 0,620; 0,730 |
| Potência (cv)      | 7,5  |
| Rendimento (%)     | 75   |

**Tabela 6. Dados de entrada referentes ao processo de confecção do eixo**

|  |                            |
|--|----------------------------|
| Máximo valor do parâmetro Rt ( $\mu\text{m}$ ) [20]  | 25                         |
| tempo de troca da ferramenta (min)   | 1,5 para todas as máquinas |
| tempo de preparo para o torno Nardini (min)  | 22                         |
| tempo de preparo para o torno Imor (min)   | 25                         |
| tempo de preparo para o torno Romi (min)   | 23                         |
| tempo de aproximação e afastamento da ferramenta (min)   | 0,5 para todas as máquinas |
| tempo secundário (min)   | 0,7 para todas as máquinas |
| salário homem, incluindo os encargos sociais (R\$/hora)  | 3                          |
| salário máquina para o torno Nardini (R\$/hora)  | 15                         |
| salário máquina para o torno Imor (R\$/hora)   | 18                         |
| salário máquina para o torno Romi (R\$/hora)   | 15                         |
| custos gerais indiretos (R\$/peça)   | 0,3                        |
| custo do inserto (R\$)   | 15,00                      |
| custo do porta-ferramenta (R\$)  | 92                         |
| custo da matéria-prima (R\$/kg)  | 3,14                       |
| densidade do material da peça ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )   | 7800                       |
| parâmetro KSI da equação de Kienzle  | 199                        |
| parâmetro I-z da equação de Kienzle  | 0,74                       |
| vida do porta-ferramenta em número de fios de corte, até sua possível inutilização                   | 500 arestas                |
| Incerteza expandida do eixo longitudinal (eixo Z) do torno 1 (mm) com fator de abrangência $k = 2,0$ | 0,014                      |
| Incerteza expandida do eixo longitudinal (eixo Z) do torno 2 (mm) com fator de abrangência $k = 2,0$ | 0,032                      |
| Incerteza expandida do eixo longitudinal (eixo Z) do torno 3 (mm) com fator de abrangência $k = 2,0$ | 0,010                      |

Os coeficientes da fórmula de Taylor expandida para a usinagem do referido material com a ferramenta são apresentados na tabela 7.

**Tabela 7. Coeficientes da fórmula de Taylor expandida para a referida usinagem [21]**

| Material      | C      | E       | F       | G       | H      |
|---------------|--------|---------|---------|---------|--------|
| Aço ABNT 1038 | 910,64 | -0,3297 | -0,0366 | -0,3808 | 0,8936 |

Os diâmetros iniciais para cada uma das dimensões são respectivamente:

dimensão 1 – 100 mm;  
 dimensão 2 – 150 mm e  
 dimensão 3 – 100 mm.

Com relação a estes diâmetros, as dimensões 1 e 3 trabalharão a uma velocidade periférica de 3,5 m/s. Considerando-se o sistema furo base com ajuste móvel, pode-se adotar para tais dimensões, o conjunto H7/g6, cuja tolerância é igual a 0,021 mm, com um afastamento superior igual a -0,012 mm e um afastamento inferior igual a -0,033 mm. Para a dimensão 2, a única restrição é que o acabamento superficial (Rz) não exceda 25 µm. Neste caso, a tolerância dimensional não poderá exceder 0,050 mm. As dimensões relacionadas ao diâmetro serão, portanto:

dimensão 1 -  $100_{-0,032}^{-0,011}$  mm;  
 dimensão 2 -  $150_{-0,025}^{+0,025}$  mm e  
 dimensão 3 -  $100_{-0,032}^{-0,011}$  mm.

Para a escolha do sistema de medição adequado foi utilizado o módulo de medição do SGF, cuja tela principal é apresentada na figura 2. Com base nos três critérios listados a seguir:

- a máxima incerteza expandida de medição deverá ser igual a ¼ da tolerância da respectiva dimensão a ser medida, uma vez que o valor de 25% encontra-se na faixa utilizada de 10% a 33%, e normas internacionais consideram suficiente o valor de ¼ (Rolim, 2003);
- o erro de exatidão máximo deverá ser igual a ¼ da tolerância e
- a máxima resolução adotada deverá ser igual a 1/6 da tolerância.

Caso todas as três condições sejam simultaneamente atendidas, o sistema de medição é considerado apto, e, no caso do paquímetro, emite a seguinte mensagem: O PAQUÍMETRO É UM SM APTO. Partindo-se destes princípios, o instrumento de medição selecionado para medição da peça da figura 1, foi um paquímetro digital com faixa nominal de 0 – 200 mm, menor divisão de 0,01 mm e exatidão de + 0,02 mm, conforme indicado pelo fabricante. A incerteza expandida de medição é igual a 0,01 mm e o respectivo fator de abrangência é igual a 2,0.

A incerteza do processo para cada uma das dimensões, em cada máquina, é apresentada na tabela 9. A temperatura média em que as medições foram realizadas foi de (19,7+1)°C. É importante salientar que o SGF utiliza o critério de Chauvenet para a exclusão de valores que, porventura, se desviem expressivamente dos valores do conjunto, ou seja, o software automaticamente se encarrega de excluir valores que não atendam a esse critério, recalculando a média das indicações e a incerteza de medição.

**Tabela 8. Valores medidos em para cada uma das três dimensões, geradas em cada máquina-ferramenta.**

|                 | Torno 1             | Torno 2             | Torno 3             |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Dimensão 1 (mm) | 50,00; 50,02; 50,00 | 50,00; 50,02; 50,01 | 49,99; 49,99; 49,99 |
| Dimensão 2 (mm) | 69,98; 70,01; 70,02 | 70,02; 70,00; 70,03 | 70,01; 70,01; 70,00 |
| Dimensão 3 (mm) | 50,01; 50,01; 50,00 | 50,02; 50,02; 50,00 | 50,00; 50,00; 50,00 |

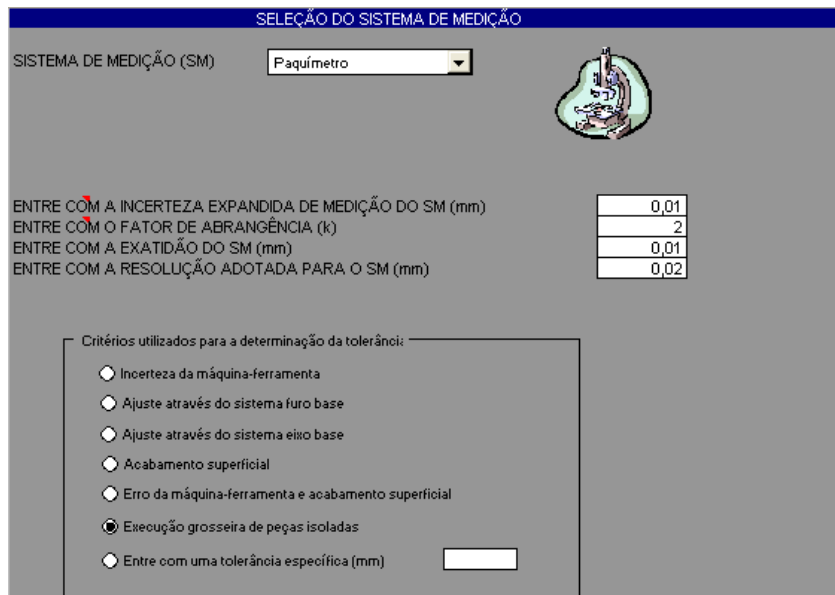


Figura 2. Tela principal do módulo de medição do SGF

Uma vez medidas todas as dimensões de peças fabricadas em cada uma das máquinas-ferramentas, o SGF calcula a incerteza expandida de medição, cujos valores estão apresentados na tabela 9. Como a incerteza de medição é superior à incerteza da máquina-ferramenta, os valores da tabela 9 serão utilizados no equacionamento matemático via programação linear.

Tabela 9. Valores da incerteza expandida de medição

|                 | Torno 1 | Torno 2 | Torno 3 |
|-----------------|---------|---------|---------|
| Dimensão 1 (mm) | 0,02    | 0,02    | 0,02    |
| Dimensão 2 (mm) | 0,05    | 0,03    | 0,02    |
| Dimensão 3 (mm) | 0,02    | 0,02    | 0,02    |

A incerteza expandida relatada na tabela 9 foi obtida através de uma incerteza combinada, multiplicada por um fator de abrangência k, fornecendo assim, um nível de confiança de aproximadamente 95%.

Utilizando-se o SGF foram determinados os parâmetros ótimos de fabricação para a confecção de cada uma das dimensões em cada máquina-ferramenta disponível. As tabelas 10 e 11 apresentam os menores tempos para a geração de cada dimensão.

Tabela 10. Tempos necessários à geração das dimensões 1 e 3.

| Máquina-ferramenta | Tempo direto para a geração da dimensão (min) |
|--------------------|---|
| Torno 1            | 0,46  |
| Torno 2            | 1,26  |
| Torno 3            | 0,47  |

Tabela 11. Tempos necessários à geração das dimensões 2.

| Máquina-ferramenta | Tempo direto para a geração da dimensão (min) |
|--------------------|---|
| Torno 1            | 0,97  |
| Torno 2            | 1,76  |
| Torno 3            | 0,89  |

A figura 3 apresenta a representação dos tempos e incertezas necessárias ao equacionamento matemático utilizando a programação linear, para a síntese das tolerâncias dimensionais.

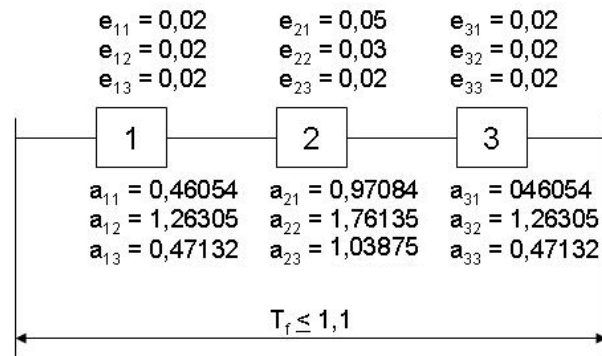


Figura 3. Representação dos parâmetros necessários à síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas

O equacionamento matemático para o referido problema é então:

MIN  
 $0.46054X_{11} + 1.26305X_{12} + 0.47132X_{13} + 0.97084X_{21} + 1.76135X_{22} + 1.03875X_{23} + 0.46054X_{31} + 1.26305X_{32} + 0.47132X_{33}$

ST  
 $Z1 \leq 0.3$   
 $Z2 \leq 0.8$   
 $Z3 \leq 0.7$   
 $Z1 + Z2 + Z3 \leq 1.1$   
 $0.02X_{11} + 0.02X_{12} + 0.02X_{13} - Z1 \leq 0$   
 $0.05X_{21} + 0.03X_{22} + 0.02X_{23} - Z2 \leq 0$   
 $0.02X_{31} + 0.02X_{32} + 0.02X_{33} - Z3 \leq 0$   
 $X_{11} + X_{12} + X_{13} = 1$   
 $X_{21} + X_{22} + X_{23} = 1$   
 $X_{31} + X_{32} + X_{33} = 1$   
 END  
 GIN X11  
 GIN X12  
 GIN X13  
 GIN X21  
 GIN X22  
 GIN X23  
 GIN X31  
 GIN X32  
 GIN X33

A tabela 12 apresenta os resultados do referido equacionamento. O programa computacional utilizado foi o LINDO (Linear Interactive aNd Discrete Optimizer) que pode ser acessado diretamente do SGF. A figura 4 apresenta a peça com o toleranciamento otimizado.

Tabela 12. Resultado da otimização

| Variável | Valor |
|----------|-------|
| X11      | 1     |
| X12      | 0     |
| X13      | 0     |
| X21      | 1     |
| X22      | 0     |
| X23      | 0     |
| X31      | 1     |
| X32      | 0     |
| X33      | 0     |
| Z1       | 0,02  |
| Z2       | 0,05  |
| Z3       | 0,02  |



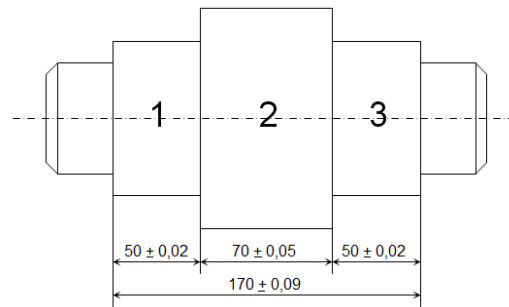


Figura 4. Toleranciamento dimensional otimizado

#### 4. CONCLUSÃO

Através dos estudos realizados neste trabalho é possível concluir que a síntese de tolerâncias determinísticas envolve a determinação de várias variáveis que vão desde o projeto até a medição, até os parâmetros de fabricação.

O modelo matemático apresentado neste trabalho reflete estas três fases ligadas ao produto: projeto, fabricação e medição, pois o toleranciamento inicial envolve questões como o ajuste, o acabamento superficial, a incerteza da máquina ferramenta e o tipo de acoplamento. Já o ajuste das tolerâncias, ou seja, a síntese das tolerâncias envolve todos os parâmetros de processo refletidos na condição da máxima produção, ou seja, considerando-se o menor tempo para a geração de cada superfície, bem como na incerteza do sistema de medição ou da incerteza da máquina-ferramenta.

Analisando-se a tabela 12, constata-se que os valores que tiveram resultado 1, ou seja, valores que devem ser adotados foram: X11, X21 e X31. Isto significa que as dimensões 1, 2 e 3 deverão ser feitas com o torno 1. Por outro lado, os valores de Z1, Z2 e Z3 representam os valores de tolerância dimensional para as dimensões 1, 2 e 3, respectivamente. Portanto, a dimensão 1 terá tolerância de  $\pm 0,02$  mm, a dimensão 2 de  $\pm 0,05$  mm e a dimensão 3 de  $\pm 0,02$  mm. Os tempos apresentados nas tabelas 10 e 11 não consideram o tempo de preparação das máquinas-ferramenta. Para o modelo proposto neste trabalho, há a necessidade de se poucas peças em cada máquina-ferramenta, ao contrário do modelo que trabalha a variabilidade  $3\sigma$  do processo.

Os modelos matemáticos existentes para a síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas consideram apenas a minimização dos custos diretos para a geração de cada uma das dimensões da peça. No entanto, o modelo apresentado neste trabalho que considera a minimização dos tempos necessários à geração de cada uma das dimensões passa a ser uma alternativa muito interessante quando existe a perspectiva de se fabricar uma grande quantidade de peças com tempos escassos.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ISO GUM - Guia para a expressão da incerteza de medição – Terceira edição brasileira em língua portuguesa – Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, 2003.
- Kussiak, A. & Feng, C. “Deterministic tolerance synthesis: a comparative study”. *Computer-aided design*, vol. 27, nº 10, 1995.
- Teeravarapug, J. “Deterministic tolerance synthesis with a consideration of nominal values”. *Thammasat Int. J. Sc. Tech*, vol. 7, nº 1, January-April, 2002.
- Voelcker, H. A current perspective on tolerancing and metrology. *Proc. Int. Fórum Dimensional Tolerancing & Metrology ASME, USA (1993)*, pp 49-60.
- Juster, N. Modelling and representation of dimensions and tolerances: a survey. *Comput. Aided Dês. Vol 24 Nº 1 (1992)*, pp 3-17.
- Chase, K and Parkinson, A. A survey of research in the application of tolerance analysis to the design of mechanical assemblies. *Res. Eng. Des. Vol 1 Nº 3(1991)*, pp 23-37.
- Ostwald, P. and Huang, J. A method for optimal tolerance selection. *ASME J. Eng. Indust. Vol 109 Nº 4 (1977)*, pp 558-565.
- Monte, M. and Datsaris, P. Optimum tolerance selection for minimum manufacturing cost and other design criteria. *ASME technical paper 82-DET35 (1982)*, pp 1-9.
- Kim, S. H. & Knott, K. A pseudo-boolean approach to determining least cost tolerances. *International journal of production research. Vol 26, Nº 1, pp 157-167, 1988.*
- Rolim, T. L. Sistemática indicadora de método para a calibração de máquinas de medição por coordenadas. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2003.

#### 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## FORMULARIZATION AND APPLICATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SYNTHESIS OF THE DIMENSIONAL TOLERANCES USING THE MANUFACTURING TIME

***Abstract:** The objective of this work is to present a new mathematical model for the synthesis of deterministic dimensional tolerances using linear programming and considering the uncertainty in measurement or the uncertainty of the machine tool. The objective function in linear programming is the manufacturing time of each dimension. This model needs a small number of parts for the determination of final tolerances in comparison with the other existing models.*

***Key words:** dimensional tolerances, linear programming, tolerance synthesis, machining.*