

ESTUDOS DE VARIAÇÕES DIMENSIONAIS E ERROS EM PROCESSOS DE USINAGEM EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS PARA PRODUÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

Ricardo Vieira dos Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, R. do Ervateiro, 129, Curitiba-PR, engricardovs@hotmail.com

Paulo André de Camargo Beltrão

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Av. Sete de Setembro, n.º 3.165, Curitiba-PR, beltrao@cefetpr.br

Resumo. *O objetivo deste trabalho é mapear processos de usinagem de peças complexas e estudar suas cadeias dimensionais e as variações causadas por acúmulo de desvios dimensionais entre os estágios de operação. O mapeamento tem por objetivo possibilitar trabalhar com estas cadeias de forma que se possa obter uma confiabilidade no processo e, conseqüentemente, nas dimensões das peças, ou seja, um processo estável. Isto faz com que haja menor necessidade de controle de qualidade por parte da empresa, ou seja, investimentos em instrumentos de medição e treinamento de mão de obra, para que haja uma maior garantia na qualidade das peças produzidas.*

Palavras Chave: *Cadeias Dimensionais, Estudo de Capabilidade de Processo, Acúmulo de Erros em Usinagem, Tipos de Erros em Usinagem, Usinagem em Múltiplos Estágios*

1 INTRODUÇÃO

A existência de produção em série de peças complexas¹, faz com que haja a necessidade do desenvolvimento de linhas produtivas com vários estágios, pelos quais as peças são transformadas durante seu processo produtivo. Como a usinagem é um dos principais processos produtivos existentes, sua aplicação em produção em série é elevada, devido à gama de peças que utilizam-se deste processo para obter as características necessárias.

Como existem diversas etapas num processo de usinagem de peças complexas, é possível que sejam geradas variações dimensionais em cada estágio. E estes podem ser transferidos entre os estágios, ocasionando o acúmulo dos mesmos, causando, nestes casos, distorções dimensionais na peça final, o que pode ser catastrófico, tendo impacto diretamente nos custos do processo produtivo, na qualidade da peça e também na imagem da empresa. Desta forma, o estudo das variações dimensionais e suas causas é importante pois busca-se reduzir ou minimizar a possibilidade de ocorrência de desvios dimensionais através da transferência mínima deles entre os diversos estágios de usinagem na fabricação de peças complexas. A existência destas cadeias e seus desvios dimensionais pode, em alguns casos, causar falhas ou refugos nas peças, o que é indesejável em qualquer processo produtivo.

A análise das variações em múltiplos estágios é tratada neste estudo sob a ótica das cadeias dimensionais, sendo propostas soluções para controlá-las. Para isto baseia-se no mapeamento de maneiras com as quais as variações dimensionais possam ser eliminadas ou

¹ Peças complexas são produtos cuja fabricação necessita de mais de uma fixação na máquina ferramenta para ser fabricado.

controladas para que, entre os estágios, também chamados de operações, o acúmulo dos desvios seja mínimo. O controle destas cadeias será demonstrado a seguir, sendo que são apresentados algumas linhas de trabalho envolvidas e alguns métodos que podem auxiliar na maneira como podem ser feitas definições dos pontos no processo e as formas de atuar a serem aplicadas nestes pontos.

As linhas de usinagem nas quais os estudos são feitos pertencem a uma fábrica multinacional instalada na região metropolitana de Curitiba e são de produtos já consagrados no mercado nacional e de produtos novos a serem lançados. Desta forma pretende-se atingir o objetivo principal do estudo que é a determinação das melhores condições de trabalho com foco na qualidade exigida por cada peça.

2. METODOLOGIA

Para analisar os acúmulos de variações dimensionais entre os estágios de fabricação será utilizada a análise por Cadeias Dimensionais (Balakshin, 1971, Huang, 1996) que é um método simples e prático. Outros métodos podem ser utilizados para esta análise tais como o método de Fluxo de Variação (Stream of Variation), que usa matriz homogênea de transformação, que demanda mais trabalho para ser gerada. Ambos os métodos objetivam obter a magnitude do acúmulo de desvios dimensionais entre os estágios de usinagem. Para fazer a análise de tolerâncias, com o objetivo de determinar quais os intervalos dimensionais em que se deve trabalhar durante o processo de usinagem, aplicado ao método da Cadeia Dimensional, utiliza-se o Método de Análise Estatística. Este foi escolhido por possibilitar o uso dos Estudos de Capabilidade (Jain, 2003, Filho, 2003), que são comumente usados em atividades de usinagem como método de avaliação de qualidade do processo. Outros métodos tais como o do Pior Caso e o de Monte Carlo (baseado no Método Estatístico), também são descritos na literatura.

Como método auxiliar também será utilizado neste estudo o das Cartas de Tolerâncias (Zhang 1996, Csillag, 1992) que é uma forma facilitar a visualização e a magnitude de tolerâncias envolvidas no processo. Elas podem também auxiliar em decisões que precisam ser tomadas durante o desenvolvimento e controle do processo de usinagem.

Finalmente para o estudo de erros em processos de usinagem será utilizado o modelo proposto por Huang (1996) para permitir a verificação, identificação e classificação dos pontos onde pode haver possibilidade de desvios em cada estágio.

2.1. Teoria das Cadeias Dimensionais

Segundo Huang (1996) as cadeias dimensionais podem ser definidas como "uma série consecutiva de dimensões inter-relacionadas que formam um circuito fechado". As cadeias dimensionais também pode ser chamada de cadeias de tolerâncias.

O princípio básico de uma cadeia dimensional é a existência de apenas um membro em toda a cadeia que é dependente dos outros membros. Isto não impede de haver várias cadeias numa determinada peça usinada, mas como exposto, cada uma destas terá apenas uma dimensão dependente das outras. Esta dimensão dependente é chamada de membro de conclusão (Balakshin, 1971).

Existem também os outros membros como o membro inicial onde inicia-se a cadeia e geralmente é aquele o qual está relacionado à referência de usinagem². Os outros membros intermediários são chamados de membros componentes.

É importante ressaltar que as cadeias dimensionais podem não ser apenas de dimensões lineares, mas também de dimensões angulares, o que é muito importante por exemplo na construção de máquinas, dispositivos de fixação ou no planejamento de processos de usinagem.

² Referência de usinagem é a característica, como uma face ou furo, na qual o dispositivo de usinagem orienta a peça, e que geralmente é de onde partem as dimensões aplicadas no setup da máquina.

Como notação usaremos para cada membro de uma cadeia dimensional a identificação de uma letra maiúscula seguida de um número. Esta notação indica cada um dos componentes da cadeia, como por exemplo A_6 , ou seja a cadeia dimensional A e o membro número 6. Quando temos mais de uma cadeia a letra de identificação deve ser outra.

Como exemplo temos uma peça mostrada na figura (1), na qual a face M é usada como referência de usinagem, e há uma operação de furação para o furo S, gerando as dimensões A_1 e A_2 da cadeia dimensional sendo a face N obtida por fresamento gerando a dimensão A_3 . Observe que A_1, A_2 e A_3 são gerados diretamente pelo processo de usinagem, porém a dimensão A_4 é dependente destas dimensões, ou seja, ele é o membro de conclusão da cadeia, e podemos dizer que A_1 é o membro inicial da cadeia. Huang (1996).

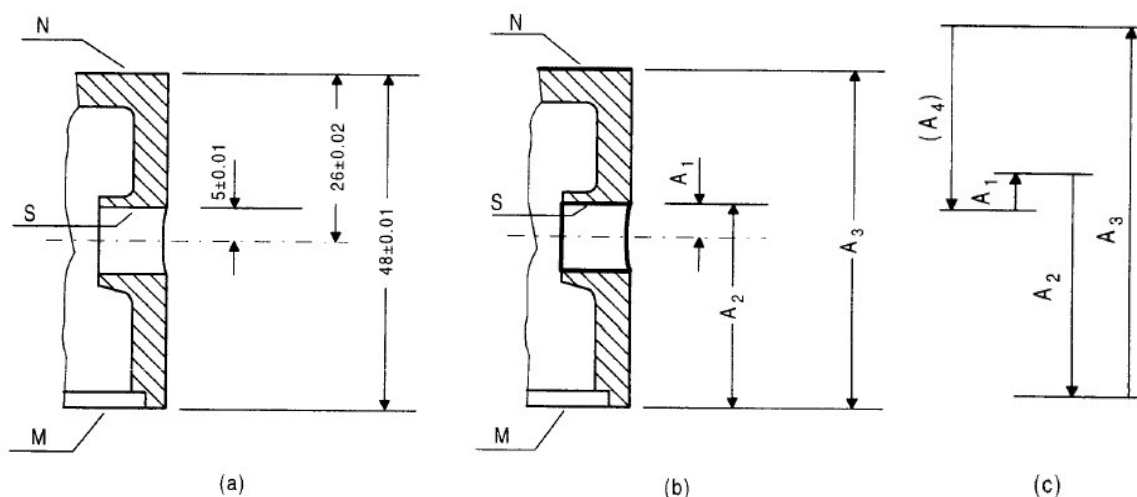


Figura 1. Huang (1996) Sumário dos conceitos de cadeias dimensionais (a) desenho da peça, (b) processo de usinagem e (c) cadeia dimensional.

2.2. Capabilidade do Processo

Os estudos estatísticos de processos de usinagem são consagrados nas indústrias como um método de identificação de variações dimensionais através de controle dimensional das características das peças. O método mais usado para controlar estas variações são os estudos de capacidade de processo.

Estes estudos geram índices que são as medidas da capacidade do processo de atingir as dimensões exigidas pelo desenho da peça, ou pelo processo de usinagem.

A capacidade de processo C_p é calculado pela equação (1). (Filho, 2003, Novaski, 1994, Jain, 2003)

$$C_p = \frac{LS - LI}{6\sigma} \quad (1)$$

Onde o LS é o limite superior de engenharia³ ou de controle⁴, o LI é o limite inferior de engenharia³ ou de controle⁴ e σ é o desvio padrão da amostragem obtida.

A capacidade de processo será a forma adotada para controlar os vários membros da cadeia dimensional, com o objetivo de fazer com que o membro de conclusão tenha uma dispersão dimensional controlada, ou seja, o índice de capacidade (C_p) alto.

³ Limite superior e inferior de engenharia são aqueles que são lidos em desenho.

⁴ Limite superior e inferior de controle são aqueles que são determinados por alguma necessidade do processo.

A variação dos membros da cadeia dimensional gera, cada um, uma distribuição que, por exemplo, pode aproximar-se para uma distribuição Gaussiana, e assim, como mostra a figura (2), a resultante será a distribuição mostrada para o membro de conclusão. O que se observa é que há um acúmulo de tolerâncias até este membro, ou seja, para controle do valor do membro de conclusão deve-se controlar os membros intermediários.

2.3. Análise de Tolerância pelo Método Estatístico para Cadeias Dimensionais

A análise das tolerâncias deve ser feita adotando os membros da cadeia em sua medida média, e seu desvio padrão conforme o processo adotado. Sabe-se que o processo conterá o menor erro caso as tolerâncias de controle tenham amplitude maior que seis vezes o valor do desvio padrão (6σ) da distribuição das medidas obtidas no processo, o que possibilita determinar o valor objetivo para o desvio padrão dividindo a tolerância total por 6σ .

Caso tenhamos como variáveis de entrada os dados de tolerâncias estatísticas de um processo, que são a média e o desvio padrão, então as variáveis de saída podem ser calculadas utilizando-as, ou seja, pode-se determinar a média e o desvio padrão de saída do processo.

Sendo $A_y = f(A_1, \dots, A_n)$, e y representa o membro de conclusão da cadeia, A_i , $i = 1, \dots, n$, excluindo apenas o membro de conclusão. As médias e desvios padrão dos outros membros da cadeia são denotados por μ_y ($\mu_{A_1}, \dots, \mu_{A_n}$, $\sigma_{A_1}, \dots, \sigma_{A_n}$) e σ_y ($\mu_{A_1}, \dots, \mu_{A_n}$, $\sigma_{A_1}, \dots, \sigma_{A_n}$). Desta forma, as equações que geram a média e desvio padrão de y em função a tolerância são calculados por:

$$A_y = A_1 + A_2 + \dots + A_n \quad (2)$$

$$\sigma A_y = \sqrt{\sigma^2 A_1 + \sigma^2 A_2 + \dots + \sigma^2 A_n} \quad (3)$$

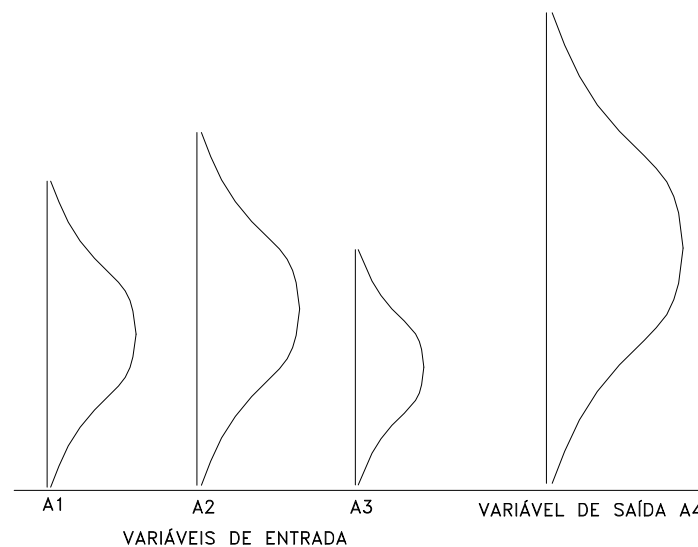


Figura 2. Distribuição dos membros da cadeia dimensional, mostrando o resultado do membro de conclusão. Khare (2001).

2.4. Método das Cartas de Tolerâncias

O Método das Cartas de Tolerâncias é uma boa ferramenta para alocar e analisar tolerância em produtos e processos de fabricação.

Os passos envolvidos para a construção das cartas de tolerâncias, para a análise, podem ser sumarizados assim:

- Listar todas as dimensões de peça final e suas tolerâncias;
- Achar as cadeias dimensionais envolvidas com as dimensões da peça, conforme o processo de usinagem;
- Alocar tolerâncias a cada elo da cadeia do item anterior.

Este método necessita de um trabalho cuidadoso e este trabalho será usado apenas como auxílio para determinar as cadeias dimensionais. Os passos listados são baseados em Zhang (1996) e Csillag (1992).

Numa cadeia dimensional, este tipo de representação gráfica é útil para fazer os estudos do comportamento do processo, e os resultados que estão sendo obtidos, além de poder orientar quais seriam algumas possíveis soluções para diminuição de variação.

2.5. Tipos de Erros em Usinagem

Existem duas formas principais de ocorrerem erros de usinagem em peças, os erros aleatórios, que não se repetem e não tem uma causa possível de ser encontrada, e os erros determinísticos, que ocorrem regularmente. Usualmente, esta última forma de erro pode ser controlada, pois consegue-se mapear sua magnitude e orientação.

Segundo Huang (1996), os erros determinísticos de usinagem podem ser classificados conforme alguns tipos:

- Tipo I – são erros que ocorrem quando a peça é localizada e fixada no dispositivo. Os erros incluem localização da peça errada, distorção da peça na fixação e os erros operacionais.
- Tipo II – são erros relacionados apenas ao dispositivo. A maior parte dos erros deste tipo ocorrem por falta de precisão geométrica e/ou dimensional do dispositivo. Os outros são causados pela deformação do dispositivo quando as forças de fixação são aplicadas. Quando a rigidez do dispositivo é baixa, o mesmo irá se deformar devido ao efeito da gravidade, forças de fixação e forças de corte.
- Tipo III – são erros que ocorrem na localização e fixação do dispositivo na mesa da máquina. Estes erros são similares ao do tipo I, exceto que o tipo I é apenas relacionado à peça e ao dispositivo, e o do tipo III é relacionado ao dispositivo e a mesa da máquina.
- Tipo IV – são erros relacionados à máquina ferramenta. Os erros causados por falta de precisão geométrica e/ou dimensional, rigidez, robustez e deformação térmica da máquina ferramenta.
- Tipo V – são erros relacionados com a ferramenta de corte. Estes são causados pela falta de precisão geométrica e/ou dimensional da ferramenta de corte e desgaste da mesma.
- Tipo VI – são erros relacionados à peça. Ocorrem principalmente pela deformação da peça devido tensões internas causadas pela usinagem.
- Tipo VII – são erros que ocorrem quando a referência de setup não coincide com a referência de projeto da peça. Isto é devido ao fato de algumas vezes as peças não podem ser usinadas utilizando as referências dadas em desenho, tendo algumas vezes que obter dimensões apresentadas indiretamente. Isto gera acúmulo de erros dimensionais e geométricos nas cadeias dimensionais. Este tipo de erro pode ser eliminado no planejamento de setup.

A figura (3) mostra o esquema de como os tipos de erros são relacionados. Para que estes sejam eliminados ou reduzidos podem ser implementadas algumas ações preventivas durante o planejamento e/ou na implementação do processo ou corretivas durante os processos em atividade.

Alguns problemas sempre serão decorrentes de controle contínuo, como por exemplo, o desgaste das referências que orientam a peça no dispositivo de fixação. Também existe o desgaste das ferramentas que devem ser trocadas seguindo critérios que são definidos de várias maneiras, como por exemplo, pelo acabamento superficial que a ferramenta gera na peça ou também por um determinado número de peças usinadas. Liu (2001) discute mais sobre as fontes de erros existentes

no conjunto máquina ferramenta, ferramenta de corte, dispositivo de fixação e peça e como controla-las.

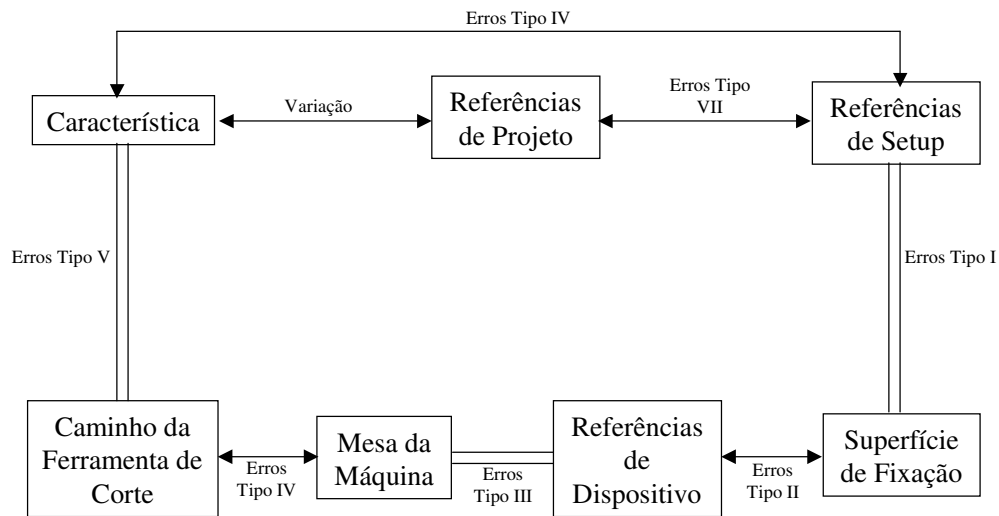


Figura 3: Erros envolvidos no processo de usinagem, Huang (1996)

3. EXEMPLO DE USINAGEM EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS

Neste ponto será usado um exemplo simples, o qual podem ser feitas várias análises. A peça adotada é um cabeçote de motor de um cilindro, usado em cortadores de grama, que contém os seguintes estágios:

- Operação 10 – A peça referencia-se por três pontos de apoio na parte bruta de fundição, Com fresas rebaixadoras são usinados os assentos de cabeças do parafusos e de montagem da vela do motor. A máquina usada neste caso é especial e semelhante a uma furadeira múltipla que usa todos os assentos em um único avanço. A figura (4-a) esquematicamente ilustra o plano de setup da peça, conforme descrito.
- Operação 20 – a peça referencia-se por três assentos de parafuso, que formam um plano, para que seja usinada a face de combustão da peça. Nesta operação que é obtida a principal característica do produto que é o volume da câmara de combustão. A figura (4-b) esquematicamente ilustra o plano de setup da peça, conforme descrito

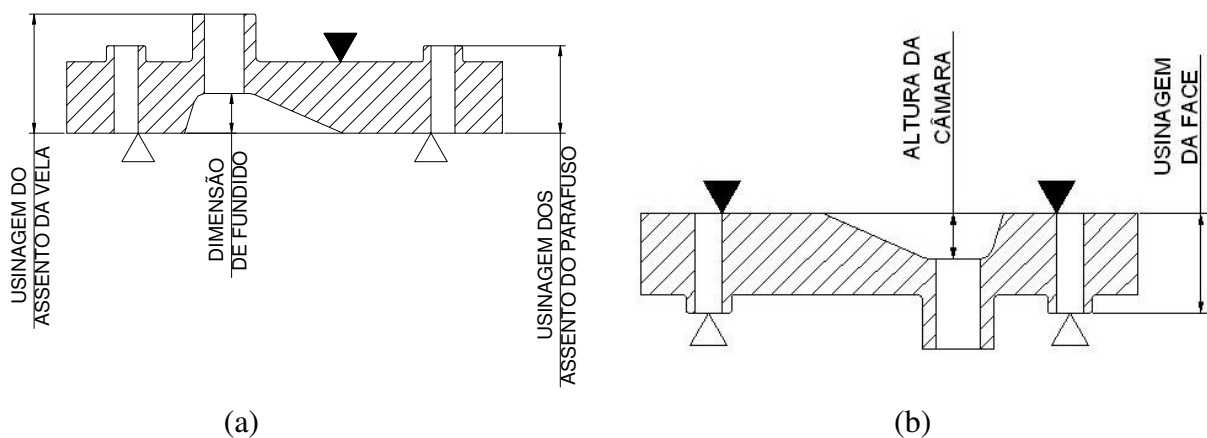


Figura 4: Plano de Setup da (a) operação 10 e (b) operação 20 do cabeçote

Podemos fazer a carta de tolerâncias para esta peça, que fica:

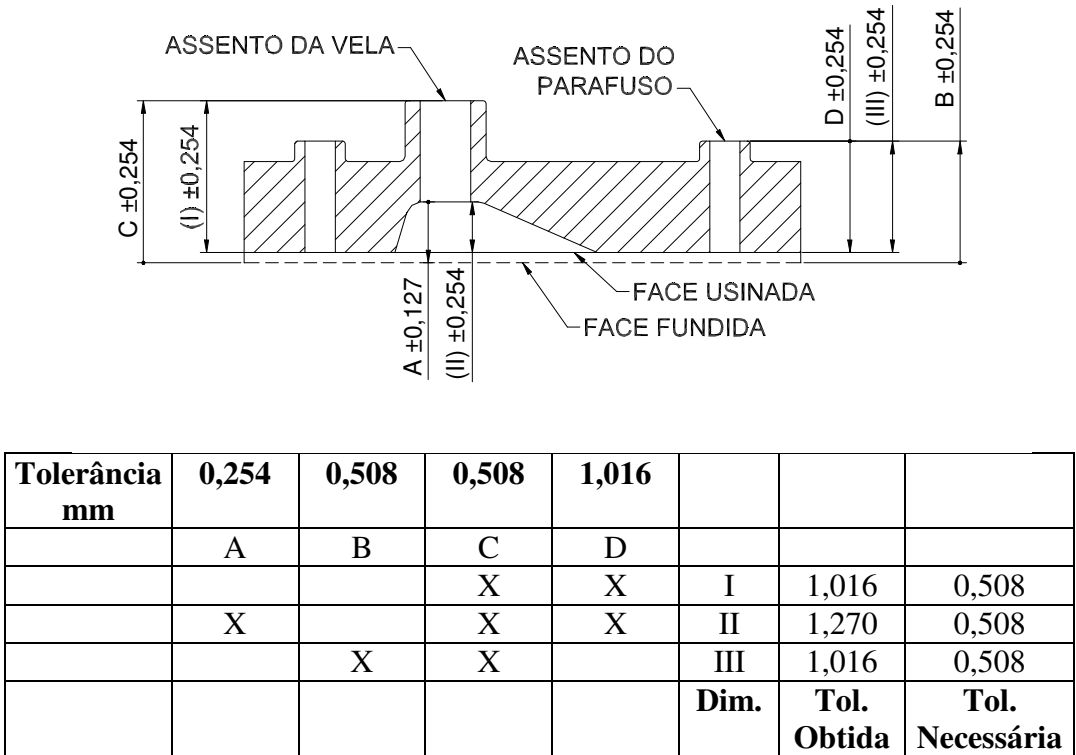


Figura 5: Carta de Tolerâncias do Cabeçote

Verifica-se com esta carta, que as tolerâncias de trabalho são muito maiores que as requeridas, ou seja, há uma demanda de maior controle, possibilitando uma grande quantidade de refugos. Obtém-se pelo processo de usinagem que foi apresentado a cadeia de dimensões que gerará a dimensão (II), na figura (5) e mostrada na carta de tolerâncias, usando a denotação A_4 , como apresentamos na figura (6).

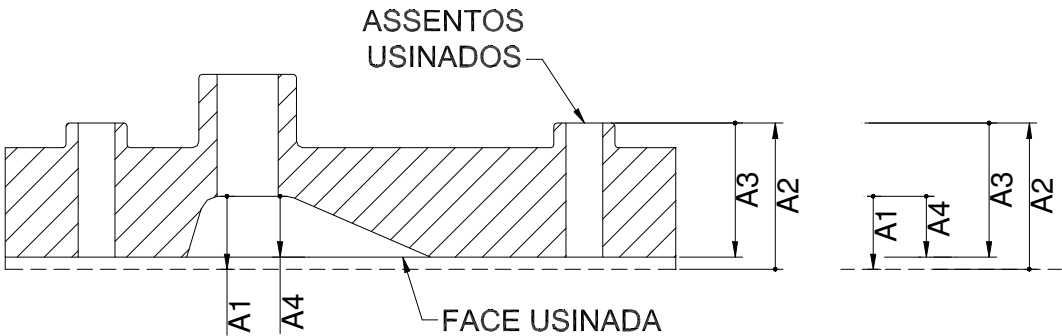


Figura 6: Cadeia Dimensional do Cabeçote para a dimensão que representa o volume da câmara de combustão A_4

Para a cadeia dimensional obtida temos a seguinte equação (4).

$$A_4 = A_3 + A_1 - A_2 \tag{4}$$

Fazendo uma análise de tolerâncias pelo método estatístico podemos obter as tolerâncias e a capacidade deste processo, necessária em cada dimensão da cadeia, para que sejam obtidas as maiores garantias de qualidade da peça. Para tanto serão adotadas algumas hipóteses, como a de que o membro de conclusão A_4 deverá ter um índice C_p maior ou igual a 1,33, o que pode ser dito como um processo altamente capaz, conforme Kapadia (2000), ou seja, supondo que o processo está centralizado, então a média das dimensões componentes da cadeia formarão a média do membro de conclusão, conforme é evidenciado pela Equação (5), e assim obtém-se a média de A_4 que fica:

$$\mu A_4 = \mu A_3 + \mu A_1 - \mu A_2 \quad (5)$$

Para analisar a variação de tolerâncias por este método é necessário descobrir qual é o desvio padrão do membro de conclusão, para isto aplica-se o $C_p=1,33$ e a tolerância para o membro de conclusão A_4 dada na figura (5):

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad \sigma = \frac{0,508}{6 \cdot 1,33} = 0,0636 \quad (6)$$

Com isto pode-se atuar na expressão envolvendo os desvios padrões dos membros da cadeia:

$$\sigma A_4 = \sqrt{\sigma A_1^2 + \sigma A_2^2 + \sigma A_3^2} \quad (7)$$

Agora existe apenas uma equação com duas incógnitas, ou seja, tem-se a liberdade de determinar qual será o membro da cadeia que pode utilizar a maior tolerância, e conseqüentemente o que tem menor também. Porém, deve-se observar que o desvio padrão dos membros que compõe a cadeia deve ser menor que o desvio padrão do membro de conclusão, pois a equação (7) mostra que se algum termo de sua segunda parte for maior que o da primeira tem-se uma raiz de número negativo, evidenciando que cada membro da cadeia deve ter menor dispersão estatística que o membro de conclusão. A escolha de quais as tolerâncias de trabalho dependem de uma análise das várias possibilidades desde os erros de usinagem que podem ocorrer, como também a facilidade de controlar os membros da cadeia dimensional, além do custo envolvido para adotar as soluções que controlarão as dimensões destes membros.

Como exemplo, supondo que A_4 deva ter um índice C_p de 1,33, e supondo que A_2 tenha um índice C_p de 3,0, ou seja, σ fica igual a 0,0282, e se propusermos um índice C_p igual a 2,0 para o membro A_3 , cujo valor de σ fica igual a 0,0423. Aplicando estes valores de σ dos membros da cadeia na equação (7) obtém-se para A_1 o seguinte desvio padrão 0,0383 e conseqüentemente teremos o seguinte índice C_p igual a 2,20.

Com estes índices calculado-se os limites inferior e superior de controle para cada dimensão, e devemos desta forma adotá-los como tolerâncias nos planos de inspeção da peça estudada. Por exemplo o membro A_1 terá uma amplitude de tolerância de 0,230mm, aplicando o desvio padrão encontrado à equação (1). Considera-se a amplitude de tolerância como a diferença entre os limites superior e inferior de controle.

Para controlar estes parâmetros foram adotadas algumas ações, frente aos problemas encontrados durante a análise do processo. Na tabela (1), estão listados as fontes de erros que foram encontradas e classificadas conforme Huang (1996). Também estão citadas as ações implementadas para a redução e/ou eliminação das fontes de erros, utilizando diretrizes de Liu (2001).

Estas ações tomadas foram de grande eficiência para que o processo alcançasse uma estabilidade. Por exemplo, a adoção de um novo dispositivo de usinagem foi a ação mais significativa, pois era o principal problema apresentado em uma das máquinas ferramenta, e a que gerava a referência para a cota mais crítica do produto. O índice de refugo do produto passou de uma situação de 15%, o que é inaceitável para 2%, o que ainda é alto, porém já houve um grande passo dado rumo à qualidade desejada.

Dentro de uma solução mais ampla deveria ser reduzido o número de membros da cadeia, e até eliminados alguns, sendo esta uma boa opção para não termos que trabalhar com índices Cp muito altos. Desta forma o custo de controle de qualidade será menor, necessitando menor precisão dimensional, e menor quantidade de controles, além de haver uma menor quantidade de refugos.

Tabela 1. Problemas Encontrados e Ações Tomadas

Tipo do Erro	Descrição do Problema	Ação Tomada
Tipo I	Dispositivo permitia movimento da peça durante a usinagem	- Diminuição de avanço de corte - Alterado sistema de Apoio do Dispositivo
Tipo II	Dispositivo não conseguia formar um plano confiável de trabalho	- Alterado sistema de Apoio do Dispositivo
Tipo I	Peça sofria deformação plástica em um dos apoios que formava o plano	- Maior Apoio no ponto de Apoio do Dispositivo - Alterado sistema de Apoio do Dispositivo
Tipo VI	Matéria prima apresentava muita variação	- Alterado sistema de Apoio do Dispositivo, para regiões com menores variações de fundido
Tipo IV	Portas Mandril da Máquina apresentam diferenças de altura, ou seja, necessita de alturas de ferramentas diferentes	- Programada a troca dos porta mandril
Tipo IV	Mandris avariavam-se e permitia a mudança de altura da ferramenta	- Adotado um Mandril com menor diâmetro
Tipo VII	Processo permitia erros entre estações	- Redução das tolerâncias de trabalho, conforme determinado pela análise da Cadeia Dimensional

4. CONCLUSÕES

Quando é necessária maior qualidade em produtos industriais é comum serem verificadas muitas ações para criar meios de medição e detecção, com o intuito de eliminar ou segregar os erros de fabricação, porém pouco é feito no sentido de prevenir os problemas, minimizando os desvios dimensionais de produção. Este trabalho tem o intuito de verificar que com ações, que até podem ter um custo grande, pode haver maior estabilidade do processo.

Para a eficácia destas ações o importante é mapear corretamente as causas corretas dos erros de usinagem, para que as ações sejam realmente eficazes. A classificação dos tipos de erros de usinagem descritos são uma boa forma de orientar a detecção das causas reais destes, além de orientar as ações de melhorias necessárias.

Os estudos de capacidade que são um instrumento muito eficaz de controle de processo, servem neste caso de ferramenta para medidas reais do processo, facilitando e otimizando a avaliação. Porém durante o desenvolvimento adotou-se uma dispersão de medidas centralizadas para os membros da cadeia dimensional e esta é uma situação ideal, e nem sempre real, por isso deve-se ter cuidados em relação a este tipo de consideração.

Também pôde-se verificar que a prevenção é feita de forma incorreta, controlando e verificando variáveis dimensionais menos importantes, ou que são apenas consequência de uma série de dimensões, como foi demonstrado pelo método das cadeias dimensionais. A aplicação de um controle de membros da cadeia e a diminuição da quantidade de membros são ações que podem ser aplicadas para que se alcance a qualidade exigida pela peça e conseqüentemente maior controle de processo, além de poder ser diferencial no mercado para uma maior satisfação de clientes destes produtos industriais.

5. REFERÊNCIAS

- Balakshin, B., 1971, "Fundamental of Manufacturing Engineering", Mir Publishers, Moscou, 574p
- Csillag, J.M., 1992, "How to Increase the Value of Manufactured Parts", International Conference of the Society of American Value Engineers SAVE Annual Proceedings, pp 109-121.
- Filho, J.M.C e Teixeira, C.R., 2003, "Simulação da Capabilidade do Processo na Usinagem", Revista Máquinas e Metais, Aranda Editora.
- Huang, S.H., Zhang, H, 1996, "Use of Tolerance Charts for NC Machining", Engineering Design and Automation Journal, John Wiley and Sons, pp 91-104.
- Jain, A. et al, 2003, "Process Capability Analysis For Production Tolerance Assignment in Discrete Part Manufacturing", Tese de Mestrado submetida a Division of Research and Advances Studies of the University of Cincinnati.
- Kapadia, M., 2000, "Measuring your Process Capability", Quality & Productivity Journal, Symphony Technologies.
- Khare, R., 2001, "Appropriate Tolerancing for Improved Profits", Quality & Productivity Journal, Symphony Technologies.
- Liu, Q., Huang, S.H., 2001, "Predictions of Component Dimensional and Geometric Accuracy Through Manufacturing Error Synthesis", Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXIX, pp 525-532.
- Novaski, O. 1994, "Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica", Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 119p.
- Zhang, H.C., Huang, S.H. e Mei, J., 1996, "Operational Dimensioning and Tolerancing in Process Planning: Setup Planning", International Journal Production Res., Vol. 34, nº 7, pp 1841-1858.

6. DIREITOS AUTORAIS

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

STUDIES OF DIMENSIONAL VARIATION AND ERRORS IN MULTI-STAGES MACHINING PROCESS IN PRODUCTION OF COMPLEX PARTS

Ricardo Vieira dos Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, R. do Ervateiro, 129, Curitiba-PR, engricardovs@hotmail.com

Paulo André de Camargo Beltrão

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Av. Sete de Setembro, n.º 3.165, Curitiba-PR, beltrao@cefetpr.br

Abstract: *The objective of this paper is to map machining process of complex parts their dimensional chains and variation of dimensions caused by deviation of tolerances in planned or implemented machining operations. The study has the purpose to allow that in these chains reliable par' could be obtained, resulting in stable production processes. This will let these production processes in companies less demanded for quality control tools as they does now, henceforth, investing less in measurement tools and in labour, to guarantee the quality of its products.*

Keywords: *Dimensional Chains, Study of Process Capabilities, Machining Errors Accumulation, Machining Errors Pattern's, Multi-Stage Machining Processes*