

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ATRIBUIÇÃO DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS DE PEÇAS MECÂNICAS

Rafael M. Burgos

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica
12.228-901 - São José dos Campos, SP, Brasil

Luís G. Trabasso

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica
12.228-901 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO. *A atribuição de tolerâncias dimensionais de peças mecânicas é uma tarefa típica da fase conceitual da engenharia de produto, que afeta diretamente a fase de fabricação. No entanto, essa tarefa é executada muitas vezes, sem a devida interação com a área de fabricação. Como consequência, os projetistas atribuem tolerâncias dimensionais mais apertadas do que o necessário ou que estejam além da atual capacidade fabril, ocasionando custos adicionais e atrasos no ciclo de desenvolvimento do produto. Esse trabalho apresenta um meio eficaz, computacional, para trazer aos projetistas ainda na fase conceitual do produto as informações necessárias da área de fabricação para que a atribuição de tolerâncias possa ser feita de forma otimizada.*

O trabalho apresenta um conjunto de procedimentos e rotinas computacionais para atribuição de tolerâncias dimensionais para peças mecânicas baseadas em normas técnicas e capacitação das máquinas de fabricação. Essas rotinas são escritas em Visual Basic[®], apresentam uma interface amigável para o usuário e é diretamente integrado no programa AutoCAD[®].

O resultado final do trabalho é a ferramenta computacional Projeto para Tolerâncias – Design for Tolerancing - a ser acrescida ao conjunto de habilitadores da tecnologia de informação que fazem parte do conceito de Desenvolvimento Integrado de Produtos (DIP).

Palavras-chave: Tolerâncias Dimensionais, Design for Tolerance, Engenharia Simultânea.

1. INTRODUÇÃO

As grandes transformações que a manufatura mundial, tem sofrido nos últimos anos vem obrigando as indústrias a agilizarem seus processos, desde o projeto conceitual até as fases de fabricação e montagem. Estas transformações tem sido provocadas pelas novas tecnologias que tem surgido, principalmente na área de informática, que facilitam o manuseio de informações e com isso tem possibilitado estas transformações, que tivera início com as informações alfanuméricas e culminaram com o surgimento dos programas de CAD/CAE/CAM.

Nos setores ligados à manufatura de produtos, percebe-se uma ênfase quase que exclusiva dada pelos responsáveis pelo projeto conceitual do produto à funcionalidade, relegando-se para segundo plano os aspectos de manufatura, montagem, e inspeção do produto. A visão tradicional nas organizações de manufatura responsabiliza sempre os setores de manufatura e controle de qualidade pelas não conformidades ocorridas durante a fabricação de um produto,

quando na maioria das vezes, essas não conformidades poderiam ser evitadas ainda na fase do projeto conceitual do produto, caso houvesse maior integração entre as diversas etapas do ciclo de vida do produto, quais sejam, concepção, engenharia do produto, engenharia de processos, manufatura, vendas e assistência técnica. Por isso, vê-se que tradicionalmente os esforços de melhoria da qualidade concentram-se nos setores de produção da empresa. Sabe-se, no entanto, que a etapa de manufatura de um produto está grandemente comprometida com as etapas anteriores de desenvolvimento de um produto.

Os principais motivos ou problemas para obter-se peças com as dimensões desejadas são: desgaste da ferramenta, desgaste e folgas nas máquinas, métodos de medições adotados, métodos de fabricação incorretos, instrumentos de medição não calibrados, etc.

Por estes motivos é necessário a utilização de tolerâncias dimensionais, e a especificação das tolerâncias nas dimensões de uma peça a ser fabricada tem um impacto significativo nos custos finais de produção. As tolerâncias muito apertadas podem resultar num aumento do custo do processo, enquanto que tolerâncias mais folgadas podem aumentar o desperdício e acarreta problemas na montagem.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

- 2.1.** Desenvolver uma ferramenta computacional para atribuição de tolerâncias dimensionais, dentro do conceito de Desenvolvimento Integrado de Produto.
- 2.2.** Integrar as técnicas de dimensionamento à programas computacionais de CAD – Computer Aided Design.
- 2.3.** Aplicação e desenvolvimento dos resultados em conjunto com indústrias afins.

3. DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE PRODUTO

De acordo com Bedworth (1991), foi mostrado que 70% do custo final de um produto é definido durante o estágio de sua concepção, através da escolha dos diversos materiais que irão compor o produto, das tolerâncias dimensionais e funcionais, acabamentos superficiais e outros . Pode-se ainda facilmente constatar que quaisquer mudanças após o estágio de concepção são caras e demoradas porque a documentação a respeito do produto já foi iniciada, e em alguns casos, um protótipo já foi construído. Além disso, as mudanças na fase do projeto do processo de manufatura não afetam grandemente o custo total de produção. A Figura 1 mostra a distribuição de custos através das várias etapas do ciclo do produto: notar que somente 20% dos custos de produção são afetados por mudanças nos estágios posteriores ao do projeto conceitual. Pode-se concluir também que o estágio de concepção do produto é aquele que produz o melhor resultado quando sobre ele se endereçam esforços com o objetivo de reduzir custos.

O estágio de projeto conceitual tem que adotar a vantagem de criar baixo custo do produto e do processo de fabricação simultaneamente. Essa é em essência, a proposta da Engenharia Simultânea, Engenharia Concorrente ou ainda, Desenvolvimento Integrado de Produto (DIP), ou seja, a integração do projeto do produto e planejamento do processo em uma atividade comum, simultânea. Também de acordo com a Fig. 1, pode-se constatar que o conhecimento do projeto na sua fase conceitual é muito pequeno. A abordagem da Engenharia Simultânea permite um conhecimento antecipado dos aspectos mais relevantes do projeto e uma melhor distribuição de custos durante o ciclo de vida do produto, como mostra a Fig. 2. Pode-se constatar nessa figura que o conhecimento de todos os aspectos do projeto ocorre mais cedo no processo.

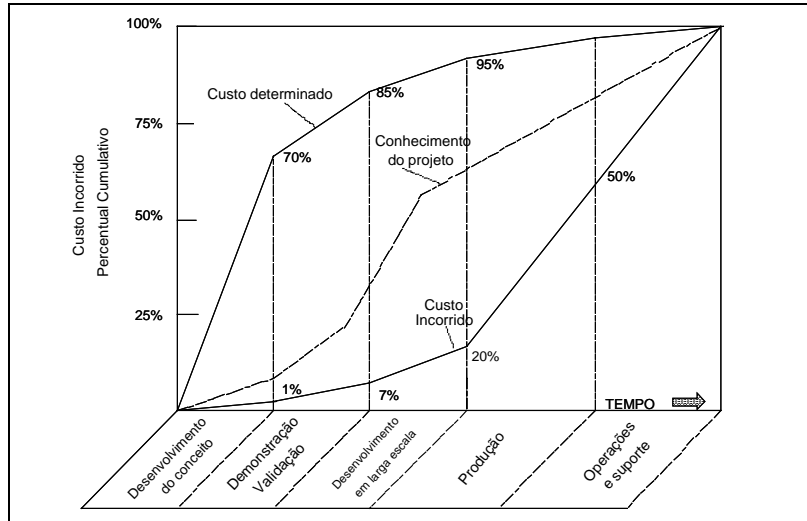


Figura 1 - Custos incorridos durante o ciclo de vida de um produto

O controle de custos é realizado na etapa de projeto conceitual, mas todos os setores da empresa tem a possibilidade de modificar o projeto antes que ele seja finalizado.

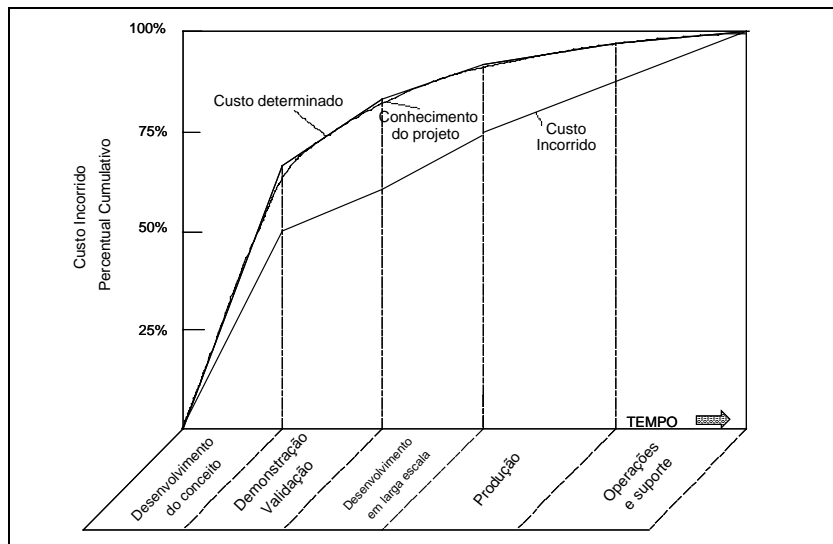


Figura 2 - Uma melhor distribuição de custos durante o ciclo de vida do produto.

Essa postura de atividades simultâneas se opõe frontalmente à forma clássica, serial de projeto, representada esquematicamente pela Fig. 3, na qual o fluxo de informação passa sob a forma de “pacotes” entre os vários setores da empresa.

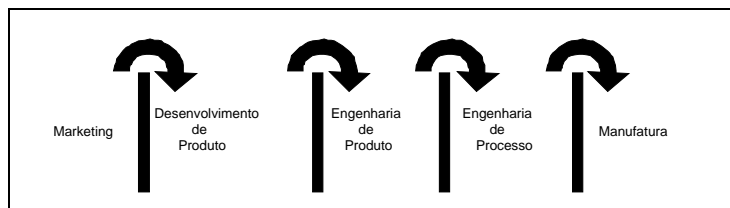


Figura 3 - A abordagem tradicional de Projeto

Esses setores são organizacionalmente isolados e muitas vezes o são fisicamente, de tal sorte que a interação entre eles é muito baixa. As conseqüências desse isolamento ou baixa interação entre os departamentos são bem conhecidas: Andreasen, (1987):

- Os dados do projeto são fragmentados, dificultando a manutenção de sua consistência ,
- O planejamento da produção, assistência técnica, confiabilidade são consideradas separadamente do processo do projeto. Qualquer mudança no projeto devido a esses aspectos são caras e demoradas.

O Desenvolvimento Integrado de Produtos tem como proposta detalhar o projeto enquanto simultaneamente desenvolve a capacidade de produção, de suporte de campo e qualidade. Para realizar essas atividades de forma simultânea, esse método faz uso de times multidisciplinares além das técnicas de projeto integrado.

O conceito de Engenharia Simultânea ou DIP é ilustrado na Fig. 4, onde o projeto do produto é abordado de uma forma integral e completa, operacionalizado através de times de projeto.

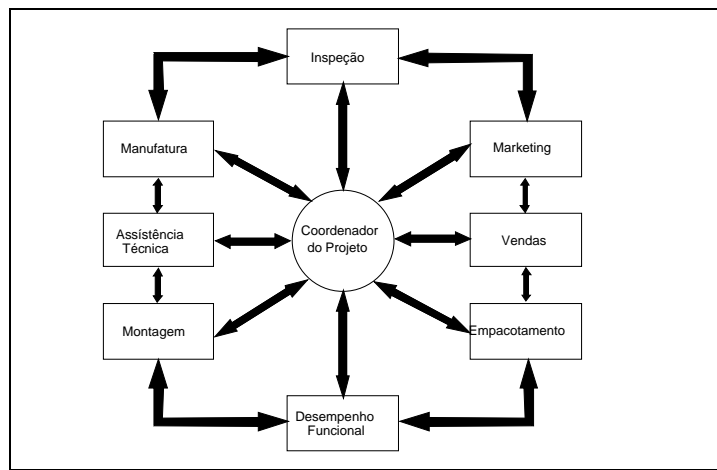


Figura 4 - O conceito de Engenharia Simultânea implementado através de times de multidepartamentais.

Alguns dos objetivos da Engenharia Simultânea são resumidos por Nevins (1989) como:

- Incluir todas as áreas de especialização como componentes participantes no esforço de projeto,
- Antecipar métodos de manufatura e montagem do produto e seus respectivos problemas desde o início do projeto conceitual,
- Reduzir o número de componentes do produto.

Para tornar o trabalho do time multidisciplinar eficiente e eficaz na execução de seu objetivo, são utilizadas várias técnicas ou métodos de projeto integrado ou simultâneo, entre eles:

- **DFM - Design for Manufacturing - Projeto para Manufatura**

Avalia as várias opções de projeto segundo os critérios de manufaturabilidade, isto é, qual alternativa de projeto é a melhor do ponto de vista de fabricação.

- **DFA - Design for Assembly - Projeto para Montagem**

Propicia a avaliação quantitativa da configuração mínima de componentes que um produto deve possuir, bem como a configuração do produto mais adequada para a montagem.

- **QFD - Quality Function Deployment**

Desdobramento da Função Qualidade - faz com que o ciclo de projeto seja orientado pelo atendimento dos requisitos iniciais propostos.

- **Método de Taguchi para Projeto Robusto**

Provê meios quantitativos para se avaliar tolerâncias dimensionais e funcionais segundo critérios de qualidade.

Cada uma dessas ferramentas tem em comum o fato de possibilitar medir a qualidade de projeto segundo vários critérios. A qualidade do projeto pode ser expressa como o número de componentes do produto, facilidade de montagem, tipos de tolerâncias pode ser encontrada em Agostinho *et al.* (1977), funcionalidade, etc. Do ponto de vista do conceito de Engenharia Simultânea, o projeto é considerado completo quando todas as áreas de especialização o aprovam. Isso significa que cada medida de qualidade foi satisfeita. A descrição detalhada de cada uma das técnicas mencionadas pode ser encontrada em Bedworth (1991) e Nevins (1989).

Recentes pesquisas tem mostrado porém que a utilização de tais ferramentas está muito aquém do que um mercado globalizado e competitivo exige atualmente. Entre as razões para esse fato encontram-se o desconhecimento de tais técnicas e interfaces com o usuário pouco amigáveis. Surge desse ponto a motivação dessa trabalho: implementar a ferramenta de atribuição de tolerâncias dimensionais em ambientes computacionais com interfaces amigáveis que permitam o aprendizado e a sua utilização de modo eficaz e eficiente.

4. MODELO PROPOSTO

A motivação desse trabalho surgiu da análise dos resultados de uma pesquisa realizada junto às empresas de manufatura discreta, onde ficou constatado que há a necessidade de integração de informações de manufatura ao projeto no que se refere à atribuição de tolerâncias dimensionais. A Associação Brasileira de Normas Técnicas –ABNT (1996) – mostrou-se interessada e disposta a colaborar com o projeto através de uma de suas comissões de estudo, a ABNT/CB-04.

O presente trabalho está baseado num banco de dados para tolerâncias dimensionais, ajustes e aplicações características, no qual se faz escolha das tolerâncias pela função; por sua vez, esse banco de dados é integrado a um programa de CAD (atualmente está sendo utilizado o AutoCAD[®]), de modo que seja acessível ao usuário de forma transparente. O objetivo desta integração é o de relacionar e manter uma ligação entre o projetista (fase conceitual) e a manufatura. O banco de dados foi desenvolvido no Excel[®], sendo um meio de codificar as informações existentes sobre atribuição de tolerâncias tanto na literatura, como nas práticas e experiências de uso corrente na empresa, da empresa, cadastrando-as computacionalmente e tornando-as disponíveis para o usuário no momento correto para a sua utilização.

Uma vez cadastrados, pode-se trabalhar com as tolerâncias num projeto desde a sua fase conceitual, podendo-se escolher o processo de fabricação da empresa mais adequado àquela aplicação, reduzindo o custo de fabricação e promovendo uma comunicação direta entre as áreas de projeto e a fabricação.

No modelo proposto, o conteúdo do banco de dados é constituído por: classes de tolerâncias, processos de fabricação da empresa e dados de desgaste de ferramentas.

A consulta ao banco de dados poderá ser realizada pelo projetista de duas formas distintas:

- a) Independente do aplicativo de CAD;
- b) Integrada ao aplicativo CAD, no momento em que for executada a função de dimensionamento.

Os conceitos que o programa supõe conhecidos pelo usuário são os seguintes:

Tolerância. É inexatidão admissível de fabricação e a diferença entre os valores máximos e mínimos admitidos para uma determinada dimensão.

Folga. É o valor da diferença entre os diâmetros efetivos do furo e do eixo, quando o primeiro é maior que o segundo.

Interferência ou Folga negativa. É o valor da diferença entre os diâmetros efetivos do furo e do eixo, quando o diâmetro do furo é menor que o do eixo.

Tolerância Unilateral. Quando a tolerância total referente ao diâmetro básico é numa só direção da linha zero. Exemplo: diâmetro 100-0,05 ou 100+0,05

Tolerância Bilateral. Quando é dividida em partes mais ou menos da linha zero. Exemplo:

$$100_{-0,025}^{+0,025} \quad 100 \pm 0,025$$

Furo Único. Este é comum para todos os ajustes de igual qualidade. Os eixos serão torneados maiores ou menores do que o furo para obter-se a folga ou o aperto desejado.

Eixo Único. Este é comum para todos os ajustes de igual qualidade. Os furos serão torneados maiores ou menores do que o eixo para obter-se a folga ou o aperto desejado.

Será mostrado a seguir uma seqüência de telas que simulam o trabalho de um projetista que esteja interagindo com o programa proposto. Na Fig. 5 pode-se ver que o projetista é solicitado a introduzir informações e fazer escolhas de ajustes e máquinas que serão utilizadas nos processos de fabricação das peças.



Figura 5 - Opções de escolha: Ajuste de Muita Precisão, Ajuste de Precisão, Ajuste Comum, Ajuste por Contração (ou a Quente) e Ajuste Indeterminado.

No banco de dados estão cadastrados os afastamentos superior e inferior, que estarão disponíveis a partir da escolha de uma das opções mostradas na Fig. 5, que são os possíveis ajustes entre duas peças: *Ajuste de Muita Precisão e de Precisão, Ajuste Comum, Ajuste por Contração (ou a Quente) e Ajuste Indeterminado.*

Suponha que o projetista tenha selecionado a opção *Ajuste Comum*, (selecionando o ícone na tela). Esta seleção abrirá outra janela que apresenta uma lista de opções, mostrada na Fig. 6: e *Ajuste Deslizante, Ajuste Semi-Rotativo, Ajuste Rotativo Forte e Ajuste Comum.*



Figura 6 - Opções de Ajustes: Deslizante, Semi-Rotativo, Rotativo Forte e Comum.

É importante notar que as várias opções são acompanhadas por suas respectivas descrições, o que facilita o trabalho de projetistas que ainda não tenham experiência nesse assunto.

Na seqüência das escolhas, a opção *Próximo*, abrirá outra janela que apresenta a Posição das Tolerâncias do sistema, onde deve ser escolhido o Índice Literal das Tolerâncias Furo e/ou Eixo (que corresponde à posição da tolerância em relação a linha zero), como mostrado na Fig. 7.



Figura 7 - Posição das tolerâncias do sistema: eixo e/ou furo.

As letras maiúsculas dos bancos de dados correspondem ao *Furo*; os campos que vão de *A* a *H* ficam acima da linha zero; os que vão de *M* a *ZC* ficam abaixo, como mostrado na Fig. 8; os campos *J*, *JS* e *K* são atravessados pela linha zero; a letra *H* indica o campo de tolerância, cuja diferença inferior é a linha zero (Furo Único) ou linha limite. As letras minúsculas dos bancos de dados correspondem ao *Eixo*; os campos que vão de *a* a *h* ficam abaixo da linha zero; os que vão

de k a zc ficam acima; os campos j e js são atravessados pela linha zero; a letra h indica o campo de tolerância, cuja diferença inferior é a linha zero (Eixo Único) ou linha limite.

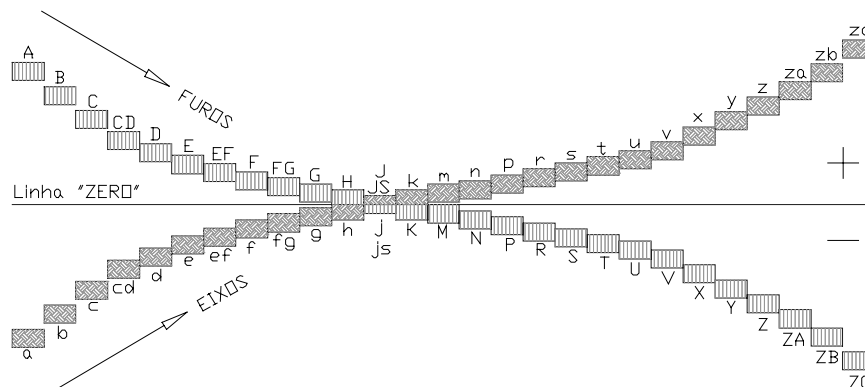


Figura 8 - Posição das tolerâncias do sistema: eixo e/ou furo na literatura.

Após a escolha do eixo e/ou furo seleciona-se a opção *Próximo*, que abrirá a janela mostrada na Fig. 9, e que nos mostra os Índices de Qualidade, ou seja, que nesta janela poderemos escolher os Índices Numéricos das Tolerâncias (corresponde ao valor da tolerância, ou seja, definido a qualidade de fabricação).

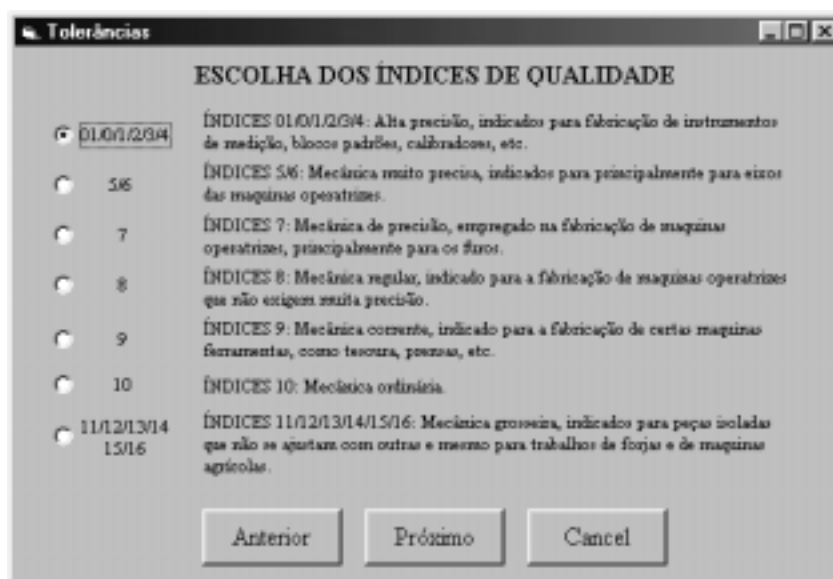


Figura 9 - Índices de Qualidade.

Os Índices de Qualidade, são números de 1 a 16, que correspondem, em cada posição, à Precisão ou a Qualidade de fabricação, ou seja, à maior ou menor tolerância exigida, conforme a cota nominal.

Continuando o processo de atribuição de tolerâncias, é apresentado ao projetista os tipos máquina ferramenta existentes na empresa, Fig. 10, e dessa forma é evitado o problema de

atribuição de tolerâncias que não podem ser obtidas com a configuração fabril atual. A decisão de terceirizar a fabricação de uma determinada pode estar baseada nessas escolhas.

Também o projetista terá a opção de escolher as tolerância contando com a capacidade de trabalho das máquinas disponíveis e ao mesmo tempo programando-as ou prevendo com uma certa antecipação o funcionamento das máquinas dentro da fábrica evitando gargalos e atrasos na produção e com isso conseguindo abaixar o custo da peça. Nesta janela temos também a opção de poder prever o custo da peça da peça trabalhada. Prevendo o tempo de usinagem e selecionando a opção *Custo* teremos uma previsão do custo final da peça acabada.

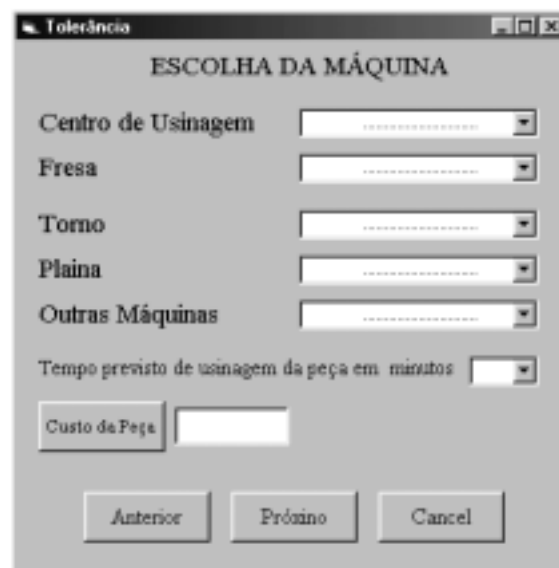


Figura 10 - Disponibilidade de máquinas-ferramenta da empresa.

5. Conclusões

Foi apresentado nesse trabalho a proposta de uma ferramenta computação que auxilia o projetista na tarefa de atribuição de tolerância dimensionais para peças mecânicas. Embora ainda esteja em desenvolvimento, essa ferramenta permite a integração das áreas de projeto e fabricação, implementando um dos objetivos da Engenharia Simultânea. O que foi aqui apresentado refere-se a atribuição de tolerâncias do ponto de vista exclusivamente funcional. Pretende-se na próxima etapa do trabalho, avaliar as tolerâncias inicialmente atribuídas através da Função Perda proposta por Taguchi encontrado em Ross (1988). Desta forma os valores finais de tolerância vão satisfazer um critério de qualidade, além do funcional.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas –Catálogo de Normas 1996.
- AGOSTINHO, O. L. RODRIGUES, A. C. e LIRANI, J. “Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões”. Edgard Blücher LTDA., São Paulo, 1977
- ANDREASEN, M.M. & HEIN, L (1987).”Integrated Product Development”, Springer-Verlag, Heidelberg.
- BEDWORTH, D.D. *et al.* (1991). “Computer Integrated Design and Manufacturing”, McGraw-Hill, Inc., New York, N.Y.
- NEVINS, J.L. & WITNEY, D.E. (1989).”Concurrent Design of Products and Processes: a Strategy for the Next Generation in Manufacturing”, McGraw Hill Inc.
- ROSS, P. J. (1988). “Taguchi Techniques for Quality Engineering”.

A Computer Based Tool for Dimensional Tolerance Attribution of Mechanical Parts

Abstract. *The dimensional tolerance attribution for mechanical parts is a typical task of the conceptual phase of the product development process. Frequently this task is carried out without any interaction with the manufacturing department. As a consequence, the product designers tend to set dimensional tolerances tighter than they should be or which are beyond the actual company capability to attain them. This implies additional costs and delays in the product development cycle. This paper presents an efficient, computer based, means of bringing in to the designers at the conceptual phase, the information from the manufacturing area which is necessary for attribution of tolerances in an optimised fashion. The computer based program is constituted by a set of procedures based on technical standards and on the actual capabilities of the machines present in the company plant floor.*

The computer program is written in Visual Basic and has a user friendly interface; another important feature is its integration with a very popular CAD software, namely AutoCAD. The contribution herein presented is the Design for Tolerancing tool, which may be added to the set of technology information tools which act as the implementation side of the Integrated Product Development concept.

Keywords: Dimensional Tolerances, Design for Tolerance, Concurrent Engineering.