



## SISTEMAS ESPECIALISTAS – ESPECIFICAÇÃO DE PARAFUSOS DE UNIÃO

**de Marco Filho, Flávio**

**Ascolesi, A. F. Silva**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica

Cx. P. 68503 – 21945-970 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

***Resumo.** Com o objetivo de auxiliar o projetista na tarefa de especificação e dimensionamento dos elementos mecânicos e diminuir o tempo gasto durante o desenvolvimento de projetos de máquinas, foi elaborado, desenvolvido e implementado um sistema computacional especialista no dimensionamento de parafusos hexagonais de união. O algoritmo apresentado é uma poderosa ferramenta que fornece de forma segura, rápida, em ambiente amigável e de fácil utilização, as dimensões, a geometria e os materiais mais adequados a uma dada união, permitindo ainda a análise de diversas outras configurações.*

***Palavras-chave:** Sistemas Especialistas, Parafusos de união, Elementos de Máquinas.*

### 1. INTRODUÇÃO

Um sistema especialista é um programa de computador que simula o raciocínio de um especialista em um determinado campo do conhecimento. É composto de uma base de conhecimento, na qual estão registradas as regras de raciocínio utilizadas pelo especialista e de uma máquina de inferência, que promove o encadeamento destas regras do raciocínio.

O sistema proposto neste trabalho tem por finalidade auxiliar o projetista durante o desenvolvimento de projetos mecânicos, utilizando o computador para executar as tarefas mais cansativas e repetitivas e portanto mais susceptíveis a erro, como cálculos e a procura de dados em tabelas e gráficos. Possibilita a redução do tempo gasto na elaboração de projetos, aumentando também a eficiência, por permitir a avaliação de diversas possibilidades e configurações de montagem.

O sistema especialista desenvolvido tem como principal tarefa o dimensionamento/especificação do conjunto parafuso e porca hexagonal mais adequado às condições de operação especificadas pelo projetista. Além disso é possível fazer o estudo, para uma mesma montagem, das tensões atuantes nos elementos da junta, no parafuso e nos filetes da rosca, utilizando vários materiais disponíveis nos arquivos do programa. Os parafusos e porcas escolhidos para a elaboração deste programa são os hexagonais, normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através das normas NBR 8851, NBR 9981, NBR 8855, NBR 9982 e NBR 9527.

## 2. PARAFUSOS DE UNIÃO

### 2.1. Aplicações

A aplicação de parafusos como elemento de união é largamente difundida e conhecida por sua característica de promover uma estrutura ou junta desmontável. Outras aplicações de parafusos também são encontradas, como transmissão de potência (fusos), obturação ou fechamento de orifícios, ajustagem e regulagem, porém não serão abrangidas neste trabalho. A figura 1 apresenta alguns exemplos destas aplicações.

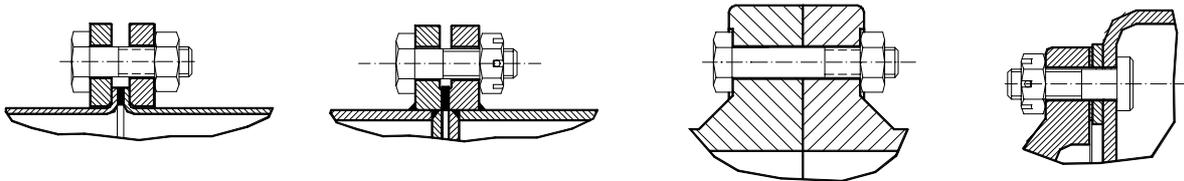


Figura 1 – Exemplos de aplicações de fixação por parafusos.

Comparando com outros tipos de juntas, a união por parafusos apresenta algumas desvantagens. Uma delas é não garantir que o aperto inicial se mantenha, devido a movimentos e vibrações, havendo freqüentemente a necessidade de uso de dispositivos de segurança contra o afrouxamento do parafuso.

### 2.2. Classificação dos Parafusos

Para ser considerado um parafuso, dois requisitos básicos são necessários. O primeiro é a rosca e o segundo é o dispositivo de atarraxar, que não muito raramente é confundido com o tipo de cabeça. Os parafusos se classificam quanto as suas partes que são: cabeça, pescoço, corpo e extremidade ou ponta. Em alguns casos a cabeça, o pescoço ou a ponta podem se confundir com o corpo ou simplesmente não existir. Assim, pode-se classificar os parafusos segundo:

- forma da cabeça: sextavada, quadrada, oval, borboleta, etc.
- forma do pescoço: quadrado, cilíndrico, estriado, cavado, etc.
- forma do corpo: totalmente ou parcialmente roscado, com diâmetro igual, maior ou menor do que o da parte não roscada.
- forma da extremidade ou ponta: em taça, oval, cilíndrica, cônica, etc.
- dispositivo de atarraxar: cabeça ou pescoço sextavado, fenda, sextavado interno, furo transversal na cabeça, etc.
- tipo de rosca: métrica ISO, unificada ou americana, witworth, quadrada, etc.

### 2.3. Fabricação de Parafusos

Os parafusos de fixação são fabricados por diversos processos utilizando os mais variados materiais. Aços, bronze, níquel, ligas de titânio, alumínio, etc.

Existem duas formas básicas para fabricação de parafusos: usinagem e conformação plástica. Quando o formato do parafuso é obtido por usinagem, parte-se de vergalhões laminados no formato do tipo de parafuso (hexagonal, redondo, quadrado, etc.). Quando conformado plasticamente, parte-se de uma peça primária, que pode ser forjada ou usinada. Diversos estágios de conformação a quente ou a frio se seguirão até a forma final desejada.

O rosqueamento é executado pelos seguintes processos: usinagem (fresamento, retificação, torneamento) e rolagem, processo amplamente utilizado. Seguem-se diversos tratamentos superficiais, tais como: cadmiagem, zincagem, cromagem, fosfatização, niquelação, etc.

Neste trabalho, apenas os parafusos de cabeça e porcas hexagonais de aço, de rosca métrica, conforme as normas acima citadas, foram utilizados.

## 2.4. Dimensionamento das Uniões por Parafusos

O dimensionamento é feito a partir da seguinte premissa: o parafuso deve suportar, sem ruptura e sem permitir o afastamento entre os elementos de junta, as cargas externas,  $P$ , na junta, e internas,  $F_i$ , provenientes da reação dos elementos de junta ao aperto no parafuso. Para isto duas condições devem ser satisfeitas. A primeira é a condição de compressão, isto é, não separação dos elementos de junta, dada pela Eq. (1). A segunda é a condição de não ruptura do parafuso, dada pela Eq. (2). Deve ser observado ainda a condição de carga externa dinâmica, dada pela Eq. (3). A figura 2 mostra o sistema a ser dimensionado.

$$F_j < 0 \quad F_p < A_t \cdot S_y \quad \frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_e} < 1 \quad (1), (2) \text{ e } (3)$$

onde:  $F_j$  = carga resultante nos elementos de junta [N],  
 $F_p$  = carga resultante no parafuso [N],  
 $A_t$  = área do parafuso sob tensão [mm<sup>2</sup>],  
 $S_y$  = limite de escoamento do parafuso [MPa],  
 $S_{ut}$  = limite de ruptura do parafuso [MPa],  
 $S_e$  = limite de resistência à fadiga do parafuso [MPa],  
 $\sigma_m$  = tensão média [MPa],  
 $\sigma_a$  = tensão de amplitude [MPa].

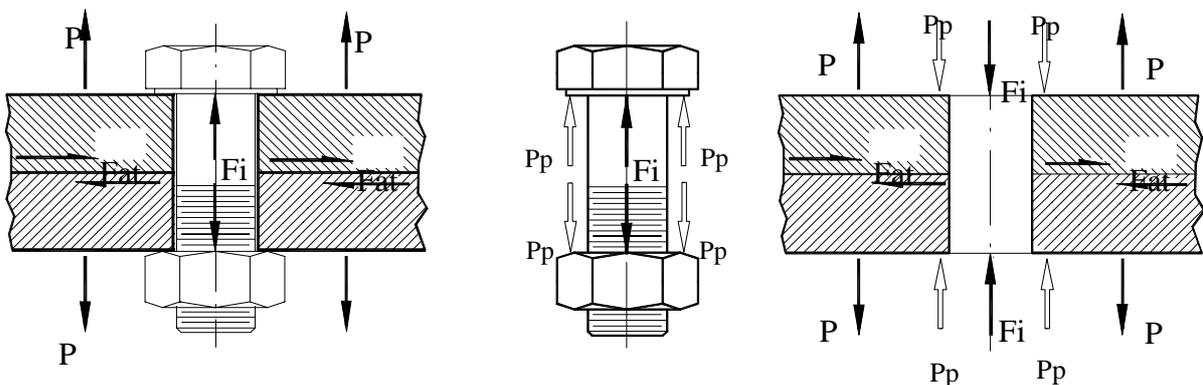


Figura 2 – Forças atuantes em elementos fixados por parafuso.

A carga total atuante no parafuso  $F_p$  é dada pela combinação de duas parcelas: a carga inicial de aperto,  $F_i$  e a parcela da carga externa, atuante na junta, absorvida pelo parafuso,  $P_p$ .

Na junta, a carga total atuante é dada pela combinação entre a carga inicial de aperto, agora de compressão e a parcela da carga  $P$  atuante na junta, absorvida pela junta,  $P_j$ . As Eq. (4) e (5) descrevem este comportamento.

$$F_p = P_p + F_i \quad \text{e} \quad F_j = P_j - F_i \quad (4) \text{ e } (5)$$

onde:  $F_i$  = carga inicial de aperto  
 $P_p$  = parte da carga externa  $P$  absorvida pelo parafuso.  
 $P_j$  = parte da carga externa  $P$  absorvida pela junta.

Para a determinação das componentes  $P_p$  e  $P_j$  da carga  $P$  deve-se considerar que os elementos estão unidos sem separação.

$$\delta = \frac{P_p}{K_p} = \frac{P_j}{K_j} \quad P = P_p + P_j \quad (6) \text{ e } (7)$$

onde:  $\delta$  = deformação sofrida pelo parafuso e pela junta  
 $K_p$  e  $K_j$  = rigidez do parafuso e elementos da junta, respectivamente

As Eq. (6) e (7) podem ser combinadas e escritas da seguinte forma:

$$P_p = \left[ \frac{K_p}{K_p + K_j} \right] \cdot P \quad P_j = \left[ \frac{K_j}{K_j + K_p} \right] \cdot P \quad (8a) \text{ e } (8b)$$

A rigidez do parafuso  $K_p$  é determinada através da Eq. (9).

$$K_p = \frac{F}{\delta} = \frac{A_t \cdot E}{L} \quad (9)$$

onde:  $E$  = módulo de elasticidade do parafuso [MPa].  
 $L$  = comprimento do parafuso [mm].

A área sob tensão do parafuso,  $A_t$ , é definida pela média dos diâmetros da raiz e primitivo da rosca do parafuso. De acordo com a norma NBR 9527, que fornece a geometria das roscas métricas, o valor desta média é  $d - 0,938194 \cdot p$ , onde  $d$  é o diâmetro nominal do parafuso e  $p$  é o passo da rosca do parafuso. Assim, a área sob tensão de um parafuso de rosca métrica é:

$$A_t = \frac{\pi \cdot (d - 0,938194 \cdot p)^2}{4} \quad (10)$$

A rigidez da junta é determinada através da combinação da rigidez de cada elemento componente da junta, em série, resultando na rigidez equivalente da junta,  $K_j$ .

$$K_j = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \quad (11)$$

Shigley, 1986, propõe que a área sob compressão da junta seja calculada segundo um tronco de cone com ângulo de  $45^\circ$ , conforme a figura 3. Assim, tem-se:

$$d\delta = \frac{F \cdot dx}{E \cdot A} = \frac{F \cdot dx}{E \cdot \pi \cdot (r_0^2 - r_i^2)} = \frac{F \cdot dx}{E \cdot \left[ \pi \cdot \frac{(x + D + d)}{2} \cdot \frac{(x + D - d)}{2} \right]} \quad (12)$$

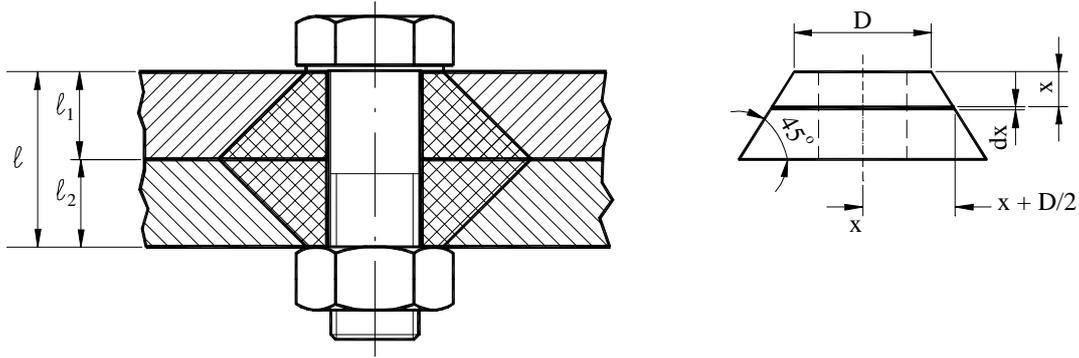


Figura 3 – Área sob compressão nos elementos de junta.

Integrando-se a Eq. (12) entre zero e a espessura  $\ell$  do elemento de junta e substituindo na 1ª parte da Eq. (09), tem-se:

$$\delta = \frac{F}{\pi \cdot E \cdot d} \cdot \ln \left[ \left( \frac{2\ell + D - d}{2\ell + D + d} \right) \cdot \left( \frac{D + d}{D - d} \right) \right] \Rightarrow K = \frac{\pi \cdot E \cdot d}{\ln \left[ \left( \frac{2\ell + D - d}{2\ell + D + d} \right) \cdot \left( \frac{D + d}{D - d} \right) \right]} \quad (13)$$

Fazendo a aproximação, bastante razoável para parafusos hexagonais, de que  $D = 1.5d$ , determinam-se, então, a rigidez de cada elemento de junta.

$$K_1 = \frac{\pi \cdot E_1 \cdot d}{\ln \left[ 5 \cdot \frac{(2\ell_1 + 0.5 \cdot d)}{(2\ell_1 + 2.5 \cdot d)} \right]} \quad \text{e} \quad K_2 = \frac{\pi \cdot E_2 \cdot d}{\ln \left[ 5 \cdot \frac{(2\ell_2 + 0.5 \cdot d)}{(2\ell_2 + 2.5 \cdot d)} \right]} \quad (14a) \text{ e } (14b)$$

Assim as Eq. (1), (2) e (3) podem ser escritas da forma:

$$\frac{C \cdot P}{N} + F_i = \frac{A_t \cdot S_y}{CS_{est}} \quad (15)$$

$$\frac{(1 - C) \cdot P}{N} - F_i < 0 \quad (16)$$

$$\sigma_m = \frac{C \cdot (P_{m\acute{a}x} + P_{m\acute{i}n}) + 2 \cdot N \cdot F_i}{2 \cdot N \cdot A_t} \quad \text{e} \quad \sigma_a = \frac{C \cdot (P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n})}{2 \cdot N \cdot A_t} \quad (17)$$

onde:  $C = \frac{K_p}{K_p + K_j}$

$N$  = número de parafusos

$CS_{est}$  = coeficiente de segurança

Além da ruptura no corpo do parafuso, situação prevista na Eq. (15), a junta pode falhar por ruptura dos filetes do parafuso ou da porca. Uma análise indica que a tensão atuante nos filetes causada pela carga  $F_p$ , de cisalhamento é dada por:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F_p}{\pi \cdot d_r \cdot h} = \frac{S_{Sy}}{CS} \Rightarrow h = \frac{3.466 \cdot CS \cdot (C \cdot P + F_i)}{\pi \cdot S_y \cdot (d - 1.52 \cdot p)} \quad (18)$$

onde:  $d_r$  = diâmetro da raiz da rosca [mm] =  $d - 1.52 \cdot p$

$h$  = altura necessária à porca [mm]

$S_{Sy} = 0.577 \cdot S_y$  = tensão de cisalhamento máxima do material [MPa].

Assim, para o dimensionamento de parafusos tem-se que, para o critério de carga estática, a verificação da resistência do parafuso, a verificação da compressão da junta e a verificação da resistência dos filetes são utilizadas as Eq. (15), (16) e (18). Para o critério de carga dinâmica, as equações a serem satisfeitas são as Eq. (17) e (18). O torque de aperto do parafuso que determine uma força  $F_i$  é calculado pela Eq. (19) abaixo.

$$T = 0.208 \cdot F_i \cdot d \quad (19)$$

### 3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO PROGRAMA

O programa desenvolvido denomina-se PARFIX. Ele foi codificado em Visual Basic 4.0, um estilo de programação especialmente recomendado para o tratamento de interação gráfica com o usuário (GUI – Graphical Users Interface) e que pode ser executado em qualquer equipamento que suporte o ambiente operacional Windows. Graças a utilização deste ambiente, tem-se a possibilidade de comunicação com qualquer padrão de base de dados via ODBC (Open DataBase Connectivity) visando futuras expansões do sistema, além da capacidade de interação com outras aplicações Windows, entre elas o AutoCAD e o Excel, utilizando as técnicas de OLE (Object Linking and Embedding).

Ao ser executado o programa inicia a Tela de Apresentação, reproduzida na figura 4, onde 5 botões de comando representam 5 opções oferecidas ao usuário. A opção SAÍDA logicamente permite o retorno ao sistema.



Figura 4 – Tela de Apresentação.

A opção “Problema de Carregamento Estático” e “Problema de Carregamento Dinâmico” levam a Tela de Dados Básicos do Problema, onde são inseridas as características principais do parafuso de união e dos elementos a serem unidos, conforme mostra a figura 5a.

A primeira coluna desta tela apresenta o campo para a carga que atua em toda a união. Para o problema dinâmico serão exigidas as cargas máxima e mínima. No caso estático, apenas um valor é necessário. As caixas de texto não aceitarão valores negativos (compressão) nos elementos e, apenas para a carga máxima, não aceitará zero ou valores menores do que a carga mínima. A unidade de trabalho pode ser [N] ou [kgf], bastando um duplo clique na caixa para a conversão automática dos valores. Uma caixa de combinação oferecerá a opção entre vida infinita e vida finita para o parafuso. Caso vida finita seja selecionada, o número de ciclos que deseja-se que a fixação suporte deve ser definido.

O processo de fabricação da rosca do parafuso é selecionado na coluna central. Esta seleção permitirá a escolha correta do fator de concentração de tensões. A temperatura de trabalho, a confiabilidade da montagem, as espessuras e os materiais dos elementos da junta, também são definidos nesta tela.

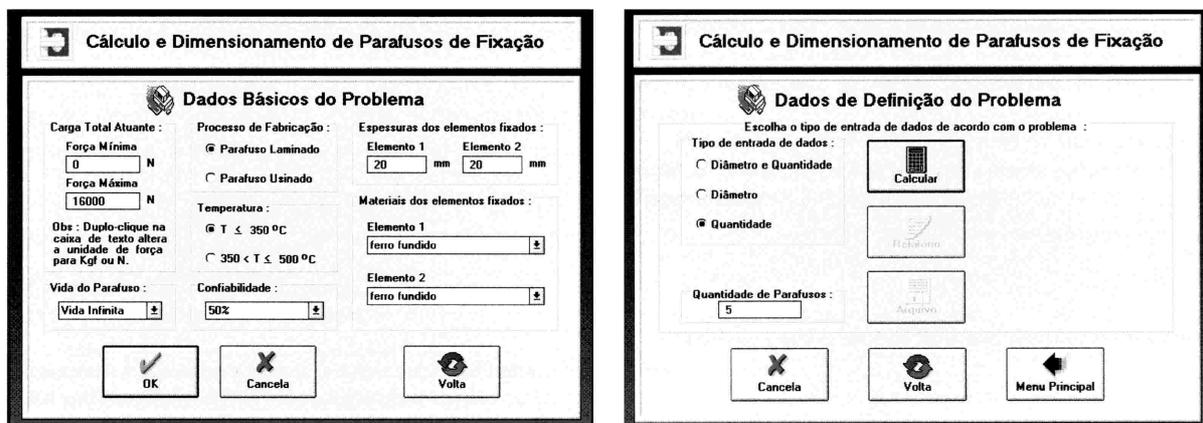


Figura 5a e 5b – Tela de dados básicos do problema e Tela de definição do problema.

Neste momento, devem ser consideradas as cinco variáveis ainda não conhecidas do problema: diâmetro, material e quantidade de parafusos, força inicial de aperto e coeficiente de segurança. A tela de definição do problema, figura 5b, permite a escolha de três tipos de problema: diâmetro, quantidade de parafusos ou ambos. Ao fazer a escolha, apenas a caixa de texto correspondente a escolha estará visível. Valores negativos não são aceitos nestas caixas.

Três novos botões estarão presentes na tela: “Calcular”, “Relatório” e “Arquivo”.

O objetivo do botão “Calcular” é achar uma configuração que satisfaça ao critério escolhido (carga estática ou dinâmica), para um dos três problemas definidos, da forma mais econômica possível, isto é, o menor diâmetro ou a menor quantidade de parafusos ou ambos. Dependendo do tipo de problema um algoritmo diferente será utilizado.

Para que exista uma faixa de possíveis valores da carga inicial de aperto,  $F_i$ , as condições de resistência do parafuso e compressão da junta, Eq. (15) e (16), são utilizadas da seguinte forma:

$$\frac{1-C}{N} \cdot P \leq F_i \leq A_t \cdot S_y - \frac{C \cdot P}{N} \Rightarrow A_t S_y > \frac{P}{N} \quad (20)$$

Se o diâmetro é fornecido, o programa variará o valor da quantidade de parafusos de 1 até o primeiro valor que atender a Eq. (15) e (16) ou (17). O número máximo de parafusos

previstos é 100, valor acima do qual o aviso de “N >100 - Material inadequado” aparecerá e uma nova classe será testada.

Se a quantidade é fornecida, a variação ocorrerá no diâmetro, a partir 1.6 mm, seguindo os valores métricos padronizados, até 36 mm. Um aviso semelhante aparecerá na tela caso as Eq. (15) e (16) ou (17) não sejam satisfeitas.

Se o diâmetro e a quantidade são fornecidas, apenas um teste para verificação das equações é executado.

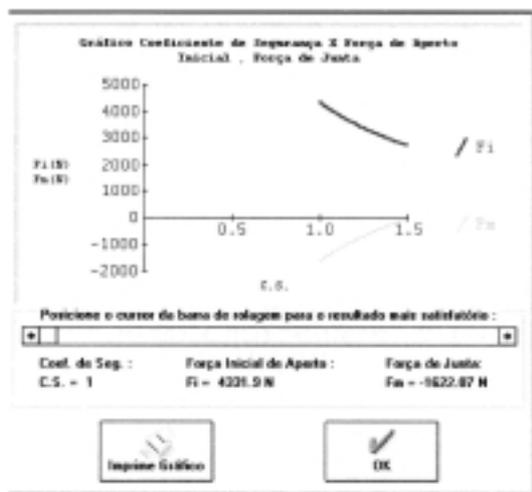
Para cada material ou classe do parafuso o botão “Calcular” retornará o diâmetro e quantidade de parafusos, além de uma faixa de valores para a força inicial de aperto e para o coeficiente de segurança para o problema estático ou dinâmico escolhido. Este resultado é exibido na tela de “Escolha do material do parafuso”, mostrada na figura 6.

**Selecione o material que fornece o resultado mais satisfatório :**

Material	Diâmetro (mm)	Quantidade	Coef. de Seg. (intervalo)
Classe 4.6	5	5	De 1 até 1.1
Classe 4.8	5	5	De 1 até 1.5
Classe 5.8	4	5	De 1 até 1.08
Classe 8.8	3.5	5	De 1 até 1.34
Classe 9.8	3	5	De 1 até 1.11
Classe 10.9	3	5	De 1.04 até 1.4
Classe 12.9	2.5	5	De 1.12 até 1.16

Figura 6 – Tela de escolha do material do parafuso.

Existem casos em que algumas ou todas as linhas aparecerão desabilitadas e não será disponível a escolha. Isto ocorrerá quando o material não for capaz de atender às necessidades do problema mesmo com o diâmetro e/ou quantidade máxima. O programa considera que  $CS > 30$ , no caso estático ou uma diferença entre CS mínimo e máximo  $> 24$  no caso dinâmico, como super dimensionamento. Neste caso, aviso de “Material Inadequado” ou “Super dimensionamento” serão enviados ao usuário.



**Cálculo e Dimensionamento de Parafusos de Fixação**

**Dados de Definição do Problema**

Solução para o problema apresentado :

N  
 mm  
 N  
  
 N.m

Figura 7a e b – Tela de escolha do coeficiente de segurança e Tela de resultados do problema.

A finalização dos cálculos de todos os parâmetros da fixação é feita com a escolha do coeficiente de segurança a ser utilizado. Com ele serão automaticamente definidas as forças de aperto,  $F_i$  e na junta,  $F_j$ . A tela “Escolha de CS”, mostrada na figura 7a auxiliará o projetista nesta escolha. A tela apresenta um gráfico onde são vistas as variações de CS x  $F_i$  e CS x  $F_j$ . A barra de rolagem permite ao projetista a escolha do CS mais adequado, apresentando os valores de  $F_i$  e  $F_j$ , correspondentes. Um “click” em “ok” levará aos resultados finais.

A tela final é a mesma tela de “Definição do problema” acrescida dos resultados finais, conforme a figura 7b. Na coluna da esquerda são apresentados, desabilitados, os valores de diâmetro e quantidade de parafusos escolhidos. Na coluna da direita são mostrados os resultados dos parâmetros escolhidos pelo projetista, incluindo o torque de aperto, calculado pela Eq. (21).

Um relatório com todos os dados do problema é apresentado na opção “Relatório”. Entre as dimensões apresentadas estão a altura mínima necessária à porca, calculada pela Eq. (21), e o comprimento do parafuso, calculado pela soma das espessuras dos componentes da junta mais a altura da porca, acrescido de um 20% e comparado com o valor da série de comprimentos normalizados imediatamente superior.

#### **4. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAS**

O algoritmo desenvolvido oferece ao projetista uma ferramenta que determina, com rapidez, eficiência e exatidão de cálculos, as características mais importantes da união aparafusada. Especial preocupação em torná-lo simples, eficiente, auto explicativo e de fácil compreensão, em um ambiente agradável e amigável, foi empregada.

É interessante observar que o controle do projeto é do usuário. Todas as decisões são tomadas por ele, sendo função do programa apenas a orientação e exibição de resultados.

Este programa é um sistema especialista do módulo ELEMENTOS DE MÁQUINAS, componente do Sistema Computacional de Projeto, desenvolvido no LEPAC – Laboratório de Ensino e Projeto Assistido por Computador – pertencente ao DEM/UFRJ. Outros sistemas especialistas já foram desenvolvidos ou estão em fase de desenvolvimento, tais como: molas helicoidais de compressão, parafusos de união e transmissão, correias trapezoidais, correntes de rolos. O encadeamento destes sistemas especialistas permitirá o desenvolvimento rápido e eficiente de projetos de máquinas.

#### **REFERÊNCIAS**

- Dobrovolsky, V., and others, 1965, Machine Elements – A textbook, First edition, Mir Publishers, Moscow.
- Juinall, R.C., 1983, Fundamentals of Machine Components Design, First edition, John Wiley and Sons, Singapore.
- Norton, R.L., 1996, Machine Design – An Integrated Approach, First edition, Prentice Hall Inc., NJ, USA.
- Orlov, P., 1980, Fundamentals of Machine Design, Vol V, 2<sup>th</sup> edition, Mir Publishers, Moscow.
- Reshetov, D.N., 1978, Machine Design, First edition, Mir Publishers, Moscow.

Spotts, M.F., 1985, Design of Machine Elements, 6<sup>th</sup> edition, Prentice Hall Inc., New Jersey, USA.

Shigley, J.E., 1986, Mechanical Engineering Design, First metric edition, McGraw Hill, New York, USA.

Shackelford, J.F., 1992, Introduction to Materials Science for Engineers, 3th edition, Macmillan Publishing Co., New York, USA.

Sandim, C. L., de Marco, F. F., Scieszko, J. L., 1995, Sistemas Especialistas – Especificação de Correias Trapezoidais, - Anais do XIII COBEM/CIDIM, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Sandim, C. L., de Marco, F. F., 1997, Sistemas Especialistas – Especificação de Corrente de Rolos, Anais do XIV COBEM, Bauru, SP, Brasil.

## EXPERT SYSTEMS – FASTENERS THREADED SELECTION AND DESIGN

### ABSTRACT

*Our intent was to help the mechanical engineering designer in the selection, the specification and the design phase of machine components and diminish the time expended on machine design, we succeeded in elaborating an expert computational system for evaluation of fasteners threaded. The presented algorithm is an easy, fast, safe and powerful tool that gives the most suitable geometry and materials for a given union, allowing several analysis of many others configurations.*

Key words: Expert Systems, Fasteners Threaded, Machine Design