

# SOFTWARE PARA O DIMENSIONAMENTO DE MOLAS HELICOIDAIS CILÍNDRICAS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

**Marcelo Nascimento Duval**

**Flávio de Marco Filho**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Departamento de Eng. Mecânica,  
Bloco G, sala 204, 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: flavio@serv.com.ufrj.br

## **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 molas helicoidais cilíndricas sujeitas a esforços de compressão ou tração. 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 solicitação, permitindo ainda a análise de diversas outras configurações. Há ainda a opção de gerar um relatório impresso e um desenho da mola dimensionada em formato *.dwg* do Autocad R14.

**Palavras-chave:** Sistemas Especialistas, Molas Helicoidais, Elementos de Máquinas

## **1. INTRODUÇÃO**

Um sistema especialista é um programa de computador que simula o raciocínio de um especialista em um determinado campo de 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 especialista proposto 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 mecânicos, aumentando também a eficiência por permitir a avaliação de diversas possibilidades e configurações em curto espaço de tempo.

É importante salientar que um sistema especialista deve apresentar o melhor resultado, de acordo com critérios pré-estabelecidos pelo projetista e permitir-lhe a avaliação e escolha de outros resultados.

O sistema especialista desenvolvido neste trabalho tem como principal tarefa o dimensionamento de molas helicoidais cilíndricas sujeitas a esforços de compressão ou tração mais adequadas às condições de operação especificadas pelo projetista. O programa faz uso de um banco de dados externo, de fácil atualização, contendo informações necessárias ao correto dimensionamento da mola para uma série de materiais. Um desenho em corte da mola em escala adequada e em formato *.dwg* do AutoCad R14 pode ser gerado após o dimensionamento.

O programa foi escrito em *Visual Basic 5*, linguagem que apresenta uma interface amigável com o usuário. A apresentação é agradável e tem-se as facilidades encontradas em qualquer programa para *Windows*. Isto torna possível que qualquer usuário, utilizando o programa pela primeira vez, já se sintam familiarizado com o ambiente.

## 2. DIMENSIONAMENTO DE MOLAS HELICOIDAIS CILÍNDRICAS

Molas são elementos mecânicos amplamente utilizados em engenharia mecânica para exercer forças constantes, eliminar folgas em mecanismos, armazenar e fornecer energia, isolar vibrações, absorver energia de impactos, medir forças etc.

Entre as molas, distinguem-se 3 grandes famílias: molas sujeitas a esforços de torção, molas sujeitas a esforços de flexão e molas sujeitas a esforços de tração ou compressão. Este trabalho é restrito a molas helicoidais cilíndricas de compressão ou tração de arame de seção circular, que pertencem à família das molas sujeitas a esforços de torção.

Um breve resumo do dimensionamento de molas se faz necessário para um melhor entendimento da sequência de telas do programa mostrada mais a frente.

### 2.1. Deflexão de Molas Helicoidais

A expressão para deflexão de molas helicoidais é dada por:

$$\frac{F}{x} = \frac{d^4 G}{8D^3 N} = k \quad (1)$$

onde  $F$  é a força aplicada à mola,  $x$  é a deformação da mola,  $d$  é o diâmetro do arame,  $D$  é o diâmetro médio da mola,  $N$  é o número de espiras ativas,  $G$  é o módulo de torção do material da mola e  $k$  é a constante da mola. Esta expressão foi obtida a partir do método da energia.

### 2.2. Cálculo da Tensão Admissível

A resistência à tensão em um arame de mola varia fortemente com o diâmetro do arame e um pouco menos com o tipo de material e o processo de fabricação. Curvas relacionando a resistência à tensão com o diâmetro do arame para vários materiais eram comuns no passado; hoje em dia, com o advento das calculadoras eletrônicas, tais curvas se tornaram desnecessárias, uma vez que plotadas em escala log-log geravam retas. A solução dessas equações é da forma:

$$\sigma_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (2)$$

onde  $\sigma_{ut}$  é a tensão de ruptura,  $A$  é uma constante relacionada ao coeficiente linear da reta e  $m$  é a inclinação da reta no gráfico log-log. É importante frisar que esta expressão somente é válida dentro de uma faixa limitada de diâmetros. O banco de dados de materiais que é parte integrante do Programa Mola contém valores de  $A$  e  $m$  para uma série de materiais.

A equação (1) deve ser corrigida usando a relação aproximada:

$$\sigma_e = 0,75\sigma_{ut} \quad (3)$$

De modo a obter-se a tensão admissível  $\sigma_e$ .

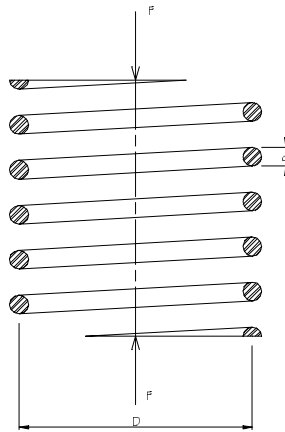
A tensão admissível do material quanto à torção é dada, segundo o critério da máxima energia de distorção, por:

$$\tau_e = 0,75\sigma_e \quad (4)$$

## 2.3. Cálculo da Tensão de Trabalho

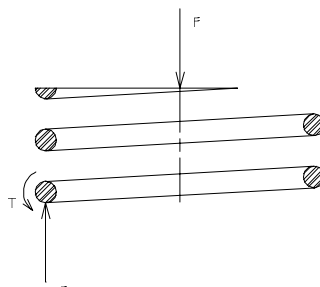
### 2.3.1. Carregamento Estático

A figura 1 mostra em corte uma mola helicoidal de arame de seção circular, comprimida pela força  $F$ .



**Figura 1.** Mola padrão com diâmetro médio  $D$  e diâmetro do arame  $d$ , comprimida pela força  $F$

Cortando a mola em um ponto qualquer e substituindo a parte removida pelo carregamento interno equivalente, obtém-se o diagrama de corpo livre da figura 2.



**Figura 2.** Carregamento aplicado ao Arame da Mola

Pelo princípio da superposição, a tensão do arame pode ser calculada somando-se a componente de torção com a componente de cisalhamento, de acordo com a expressão:

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^3} \quad (5)$$

que vale para a fibra interna da espira.

Definindo agora o índice da mola como:

$$C = \frac{D}{d} \quad (6)$$

pode-se escrever a equação (5) na forma

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (7)$$

onde

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C} \quad (8)$$

e é chamado de fator multiplicador de tensão cisalhante. A equação (7) é bem geral, e vale para molas em compressão ou em tração.

### 2.3.2. Carregamento Dinâmico

Molas submetidas a carregamentos dinâmicos também são sujeitas a falha por fadiga. Molas de um comando de válvulas por exemplo precisam suportar milhões de ciclos sem falhas; sendo assim, devem ser projetadas para vida infinita.

Eixos e muitos outros elementos de máquina são geralmente submetidos a esforços dinâmicos onde as tensões se invertem. Não é esse o caso em molas, que raramente são usadas como molas de compressão e de tração simultaneamente; na verdade operam geralmente com pré-carga. A pior situação para a mola se dá quando a força mínima  $F_{\min} = 0$ .

No projeto de molas é apropriado aplicar o fator multiplicador de tensão cisalhante  $K_s$  na média da tensão  $\tau_m$  e em sua amplitude  $\tau_a$ . O motivo para isso é que  $K_s$  não é realmente um fator de concentração de tensão, como indicado na equação (7), e sim um meio conveniente de calcular a tensão cisalhante na fibra interna da espira.

Definindo a amplitude da força como

$$F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \quad (9)$$

e a força média como

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} \quad (10)$$

as suas respectivas componentes de tensão são dadas por

$$\tau_a = \frac{8F_a D}{\pi d^3} \quad (11)$$

e

$$\tau_m = \frac{8F_m D}{\pi d^3} \quad (12)$$

Para que ocorra falha é preciso que  $\tau_a \geq \tau_n$  ou  $\tau_a + \tau_m \geq \tau_e$ , onde  $\tau_n$  é a tensão limite de resistência à fadiga e  $\tau_e$  é a tensão admissível. Essas equações serão usadas como base para o dimensionamento das molas quanto à fadiga.

## 2.4. Recomendações de Projeto

Algumas recomendações são feitas quanto ao projeto de molas helicoidais, que são as seguintes:

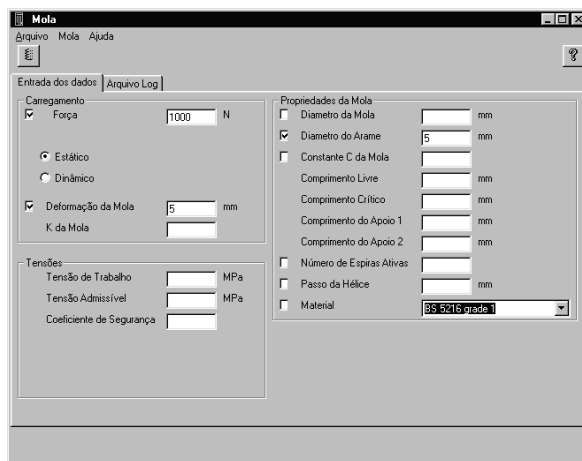
- Para evitar problemas de flambagem em molas de compressão recomenda-se que a razão entre o Comprimento Livre e o Diâmetro Médio da Mola seja menor que 4.
- Recomenda-se que o ângulo de hélice da mola seja menor que 12°.
- Recomenda-se que a constante C da Mola esteja entre 3 e 12.

## 3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO PROGRAMA

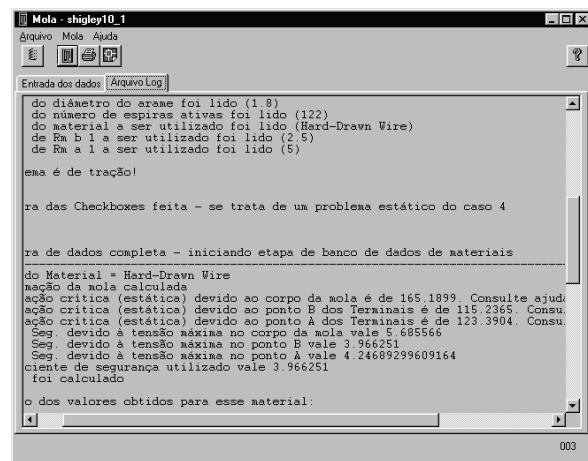
A estrutura do Programa Mola é muito simples, assim como sua interface Usuário / Programa. O usuário define o tipo de mola (mola de compressão ou de tração), o tipo de solicitação (estática ou dinâmica), os tipos de apoios e os dados de entrada. O Programa Mola calcula os dados restantes, gera um relatório impresso ou cria um desenho em formato .dwg do Autocad R14.

### 3.1. Entrada de Dados

O usuário define ao Programa Mola quais são os dados de entrada marcando a seu respectivo quadro de verificação (*checkbox*), como ilustrado na figura 3 (a).



(a)



(b)

**Figura 3.** (a) Tela principal. Força, deformação da mola e diâmetro do arame estão marcados como dados de entrada; (b) detalhe do arquivo de log

### Escolha das Unidades

O Programa Mola realiza os seus cálculos usando as unidades mm para distâncias, N para forças e MPa para tensões. Os dados podem ser fornecidos ou lidos alternativamente em cm, Kgf ou Kgf/cm<sup>2</sup>; para tal basta dar um duplo clique na unidade, como ilustrado na figura 4.

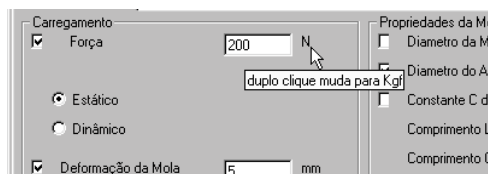


Figura 4. Escolha das unidades

### 3.2. Opção por Molas de Tração ou Compressão

A escolha do tipo de mola é feita no menu mola, de acordo com a figura 5.

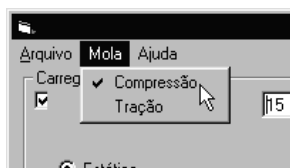


Figura 5. Opção por mola de tração ou compressão

### Opção por carregamento estático ou dinâmico

Optando por carregamento dinâmico, o usuário precisa fornecer ao Programa Mola as forças máxima e mínima e o tipo de acabamento superficial da mola, de acordo com a figura 6.

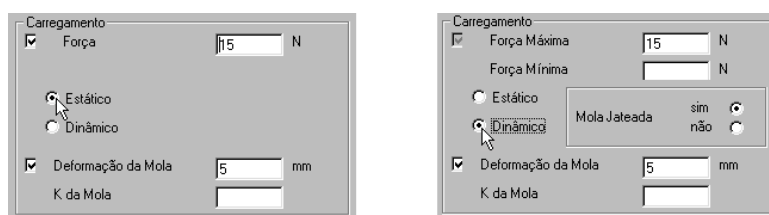
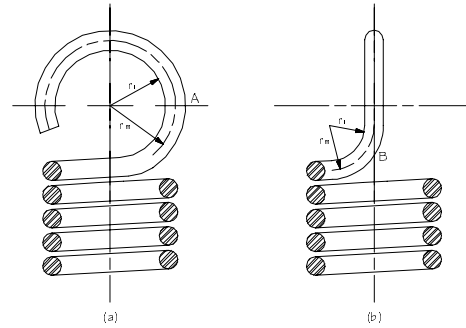
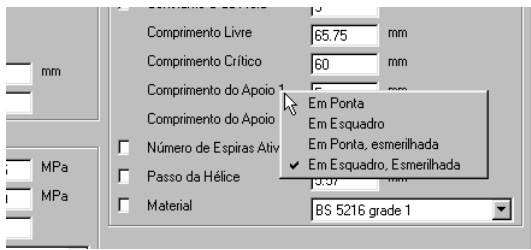


Figura 6. Carregamento estático ou dinâmico

### 3.3. Escolha dos Apoios

A escolha dos tipos de apoio é feita, no caso de molas de compressão, clicando-se com o botão direito do *mouse* sobre a legendas de seus comprimentos, como ilustrado na figura 7 (a). O usuário pode optar por apoios em ponta, em ponta esmerilhada, em esquadro ou ainda em esquadro esmerilhado.

No caso de molas de tração há somente um tipo de apoio definido no Programa Mola. Este está ilustrado na figura 7 (b).



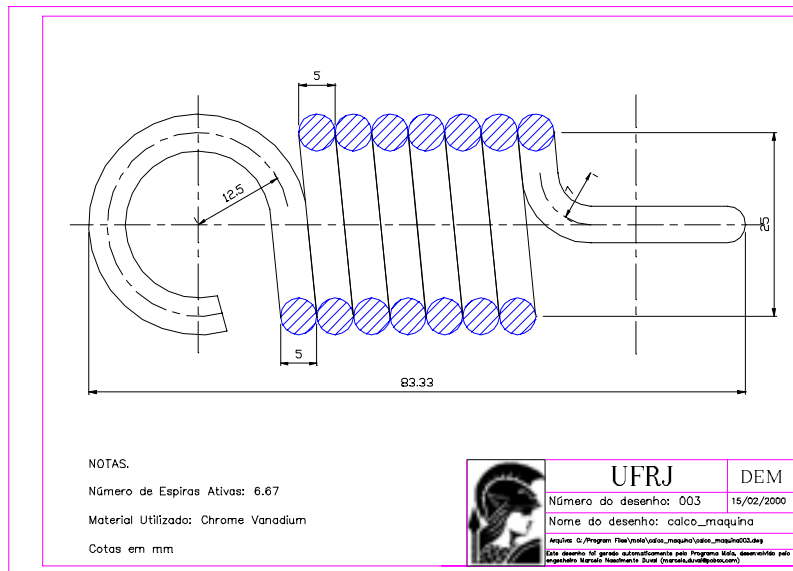
(a)

(b)

**Figura 7.** (a) Detalhe da escolha do tipo de apoio em molas de compressão com o botão direito do mouse; (b) Detalhe do tipo de terminal de molas de tração considerado pelo Programa

### 3.4. Saídas do Programa

O Programa Mola tem, além das saídas na própria tela, opções de gerar relatório impresso e desenho em formato *.dwg* do Autocad R14, como o da figura 8.



**Figura 8.** Exemplo de desenho gerado pelo Programa Mola

Caso o usuário não tenha o Autocad R14 instalado, basta guardar o arquivo de *script* gerado pelo Programa Mola para posterior utilização.

O Programa Mola também gera a cada novo cálculo um arquivo de log contendo informações mais detalhadas do projeto. Esta é uma boa fonte de consulta por informações adicionais. Detalhes do arquivo de log podem ser vistos na figura 3 (b).

### 3.5. Arquivos de Ajuda

O Programa Mola é dotado de extensa documentação em formato HTML, possibilitando assim ao usuário tirar dúvidas tanto do uso do programa quanto de teoria de molas. Clicando na opção ajuda, o programa abre os arquivos de ajuda no browser de internet definido pelo usuário, tornando assim a consulta aos arquivos de ajuda extremamente simples e familiar.

#### 4. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

O algoritmo desenvolvido oferece ao projetista uma ferramenta poderosa que determina, com rapidez, eficiência e exatidão de cálculos, as características mais importantes das molas helicoidais cilíndricas.

É interessante observar que o controle do projeto é do usuário. Toda e qualquer decisão é feita por ele, sendo função do programa apenas a orientação e exibição dos resultados.

O algoritmo foi elaborado e desenvolvido com especial preocupação em torná-lo simples, eficiente, auto explicativo e de fácil compreensão, tudo isto em um ambiente amigável e agradável.

A grande motivação deste trabalho, foi a certeza de estar produzindo algo de concreto, uma ferramenta de utilidade real que facilitará o projeto de molas.

Este programa é um sistema especialista do módulo ELEMENTOS DE MÁQUINAS, componente do Sistema Computacional de Projeto, desenvolvido no Laboratório de Ensino e Projeto Assistido por Computador – LEPAC do DEM/UFRJ. Outros sistemas especialistas já foram desenvolvidos ou estão em fase de desenvolvimento, tais como: parafusos de união e transmissão, chavetas e estrias retas, correias trapezoidais, engrenagens cilíndricas de dentes retos e correntes de rolos.

O encadeamento destes sistemas especialistas permitirá o desenvolvimento rápido e eficiente de projetos de máquinas.

#### REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 11414, “Arame redondo de aço-carbono para molas”, maio de 1990
- Dobrovolsky, V. and others, 1965, “Machine Elements”, first edition, Mir Publishers, Moscow.
- Gaál, José Alberto, 1999, “Curso de AutoLISP”, 1ª edição, DeseCAD Computação Gráfica, Campinas.
- Halvorson, 1997, “Microsoft Visual Basic 5 – Passo a Passo”, Makron Books do Brasil Editora Ltda., São Paulo.
- Provenza, Francesco, 1984, “Molas”, Centro de Comunicação Gráfica da PRO-TEC, São Paulo.
- Reshetov, D. N., 1978, “Machine Design”, Mir Publishers, Moscow.
- Shigley, J. E., 1986, “Mechanical Engineering Design”, first metric edition, McGraw-Hill Book Company.
- Spotts, M. F., 1985, “Design of Machine Elements”, 6<sup>th</sup> edition, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Sandim, C.,L., de Marco, F.F. e 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.
- de Marco, F. F., e Ascolesi, A. – “Sistemas Especialistas – Especificação de Parafusos de União” – Anais do COBEM/99, Águas de Lindóia, São Paulo, SP, 1999.
- de Marco, F. F., e Avilez, A. – “Sistemas Especialistas – Dimensionamento de Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos” – Anais do COBEM/99, Águas de Lindóia, São Paulo, SP, 1999.
- de Marco, F. F., França Jr., H. e Souza, M. – “Sistemas Especialistas para Especificação de Chavetas e Estrias” – Anais do COBEM/99, Águas de Lindóia, São Paulo, SP, 1999.