



## **“POWERCAM”, UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA O PROJETO DE MECANISMOS CAMO-SEGUIDOR**

**Tarcisio A. H. Coelho**

**Fábio L. A. dos Anjos**

**Valter F. A. Alves**

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508-900 - São Paulo, SP, Brasil

Endereço eletrônico: [tarchess@usp.br](mailto:tarchess@usp.br)

***Resumo.** Este trabalho trata do desenvolvimento de um programa de computador como ferramenta auxiliar no projeto de camos de disco com seguidores decalados de rolete, para a realização tanto da síntese cinemática do perfil, quanto da análise cineto-estática do mecanismo. De maneira a garantir precisão, generalidade e praticidade na utilização do programa, implementou-se um analisador e compilador de expressões e uma rotina de interpolação cúbica. Para a aferição do programa, efetuaram-se várias verificações. Primeiramente, sintetizou-se o perfil do camo que gerasse o movimento especificado no seguidor. Depois utilizou-se o camo resultante como dado de entrada para uma análise cineto-estática e comparou-se os resultados das duas análises. Também aferiu-se o programa, comparando os resultados obtidos nas análises realizadas em aplicativos comerciais de elementos finitos e de sistemas multi-corpos.*

***Palavras-chave:** Mecanismos, Camos, Síntese.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Entende-se por camo, um componente mecânico transmissor de movimento por contato direto a uma outra peça chamada de seguidor. A superfície de contorno do camo é projetada de modo a produzir o movimento desejado ao seguidor (posição, velocidade e aceleração).

A versatilidade é uma característica muito importante, oferecida por este tipo de mecanismo, pois o perfil do camo pode assumir infinitas configurações, impondo, praticamente, qualquer movimento ao seguidor. Por este motivo, os camos-seguidores encontram ampla aplicação em máquinas automáticas, nas quais o sincronismo dos movimentos deve ser precisamente controlado.

As ferramentas computacionais, através das simulações numéricas dos fenômenos físicos envolvidos (prototipagem virtual), têm diminuído, consideravelmente, a necessidade da elaboração de protótipos funcionais, os quais apresentam altos custos de fabricação e tempo para execução.

## 2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo do trabalho consiste no desenvolvimento de um programa de computador, como ferramenta auxiliar no projeto de camos de disco com seguidores decalados de rolete, para a realização tanto da síntese cinemática do perfil, quanto da análise cineto-estática do mecanismo.

Pretende-se desenvolver uma ferramenta que forneça precisão, generalidade e praticidade em sua utilização, de maneira que esta possa ser utilizada na indústria e também nas universidades.

## 3. MODELAGEM E EQUACIONAMENTO

O programa “POWERCAM” divide-se em dois módulos. O primeiro, SINTCAM, realiza a parte de síntese do perfil do camo, enquanto que o segundo, SOLVECAM, executa a análise cineto-estática do mecanismo.

### 3.1 Módulo de síntese - SINTCAM

O problema da síntese do perfil do camo é resolvido empregando-se o artifício da inversão do mecanismo, considerando o camo fixo e movendo-se o seguidor e a base.

Neste módulo, dada a curva do movimento do seguidor e os parâmetros geométricos básicos do conjunto, o programa calcula o perfil do camo ( $\rho$ ,  $\phi$ ), apresentando-o na tela do computador, juntamente com a animação do movimento do rolete.

As coordenadas do perfil ( $x_{p2}$ ,  $y_{p2}$ ) são calculadas pelo método proposto por Chen (1982). Este método utiliza a equação geral da envoltória, eq. (1), para o caso de camo de disco com seguidor decalado de rolete de translação.

$$F(x_{p2}, y_{p2}, \psi) = [x_{p2} + a \cos \psi - (d + s) \sin \psi]^2 + [y_{p2} - a \sin \psi - (d + s) \cos \psi]^2 - r_3^2 \quad (1)$$

O programa de síntese gera um arquivo ASCII com os dados dispostos no formato de tabela, contendo grandezas relevantes tais como: elevação do seguidor, velocidade convertida do seguidor (mm/rd), aceleração convertida do seguidor (mm/rd<sup>2</sup>), ângulo de pressão e o raio de curvatura do perfil do camo em função do ângulo de posição do camo  $\psi$ . Verifica também a eventual ocorrência de “undercutting” (Anjos, 1998).

### 3.2 Módulo de análise cineto-estática - SOLVECAM

Na análise cineto-estática, o perfil do camo e seu movimento são conhecidos. O que se deseja obter são as grandezas cinemáticas (posição, velocidade e aceleração) do seguidor e os esforços atuantes em cada peça.

Para a análise cinemática propriamente dita, foi adotada a hipótese de pares cinemáticos sem folgas e corpos rígidos (indeformáveis). Além disso, na dedução das expressões dos esforços envolvidos, o atrito nos pares foi considerado.

Para prover generalidade na definição das condições de operação do sistema, foi implementada uma variável que permite ao usuário definir uma expressão qualquer para a força externa aplicada ao seguidor, na direção do movimento do mesmo.

Basicamente, neste módulo, definida a configuração do sistema, o programa calcula o movimento de saída do seguidor bem como os esforços atuantes nos componentes. Realiza

também a animação do movimento do mecanismo na tela do computador, gerando arquivos de resultados em formato ASCII.

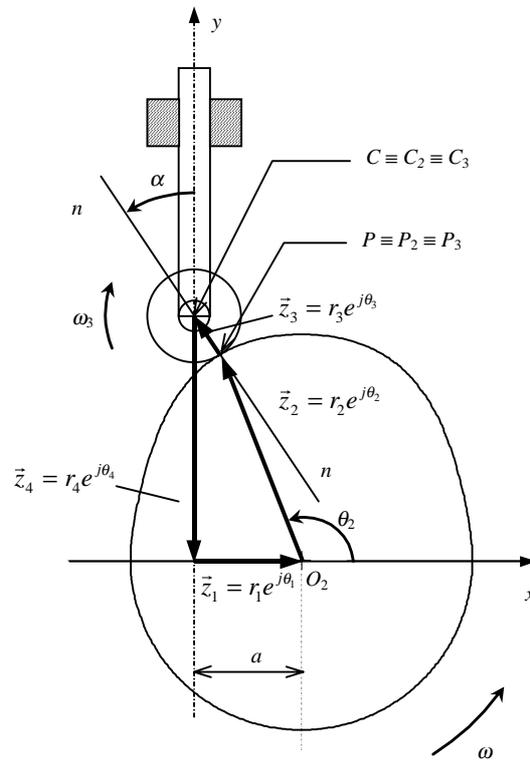


Figura 1- Representação do mecanismo em notação polar complexa.

Adotou-se a notação polar complexa no desenvolvimento das expressões, por ser esta uma forma compacta e apropriada à implementação computacional. Assim, cada peça do mecanismo foi representada por um vetor conforme mostrado na fig. 1.

$$r_1 e^{j\theta_1} + r_2 e^{j\theta_2} + r_3 e^{j\theta_3} + r_4 e^{j\theta_4} = 0 \quad (2)$$

Para uma dada posição angular do camo, a localização do ponto de contato entre este e o rolete-seguidor é calculada partindo-se da eq. (2), aplicada à fig. 1, e utilizando-se o método proposto por Gans (1991). Assim, o vetor normal a um ponto qualquer da superfície do camo pode ser calculado diretamente da equação do perfil do camo  $\rho(\psi)$ , aplicando-se o conceito do gradiente, pois este é normal ao perfil. Após algumas simplificações na expressão do versor normal e na equação de malha fechada chega-se à expressão  $G(\theta_2)$ , eq. (3), onde o ângulo  $\theta_2$  é obtido pelo método iterativo de Newton-Raphson.

$$G(\theta_2) = \sqrt{\rho^2 + \rho'^2} [r_1 \sin(\theta_1 - \theta_4) + r_2 \sin(\theta_2 - \theta_4)] + r_3 [\rho \sin(\theta_2 - \theta_4) - \rho'^2 \cos(\theta_2 - \theta_4)] = 0 \quad (3)$$

Com  $\theta_2$  conhecido, pode-se então calcular as incógnitas  $r_4$  e  $\theta_3$ . No cálculo da velocidade do seguidor, considera-se no ponto de contato  $P$  entre o camo e o seguidor, os pontos instantaneamente coincidentes  $P_2$  e  $P_3$ , respectivamente pertencendo às peças 2 e 3 (camo e rolete). No ponto de contato ( $P$ ) deve-se impor que as componentes normais das velocidades entre as duas peças sejam iguais, já que não é possível a separação nem a interpenetração dos

corpos. Para o cálculo da aceleração, deve-se considerar os pontos instantaneamente coincidentes  $C_2$  e  $C_3$ . Segundo Shigley (1970), pela composição de movimentos, pode-se escrever a eq.(4), onde  $\vec{a}_{c_3}$  é aceleração do ponto  $C_3$ ;  $\vec{a}_{c_2}$  é aceleração do ponto  $C_2$ ;  $\vec{a}_{c_3/c_2}^R$  é aceleração do ponto  $C_3$  em relação ao ponto  $C_2$  e  $\vec{a}_{c_3/c_2}^{Cor}$  é aceleração de Coriolis. Resolvendo a eq.(4) obtém-se uma expressão para o cálculo da aceleração do centro do rolete seguidor ( $\vec{a}_{c_3}$ ).

$$\vec{a}_{c_3} = \vec{a}_{c_2} + \vec{a}_{c_3/c_2}^R + \vec{a}_{c_3/c_2}^{Cor} \quad (4)$$

Como dados de saída do SOLVECAM, tem-se: deslocamento, velocidade e aceleração do centro do rolete seguidor, raio de curvatura do perfil do camo, ângulo de pressão em graus, torque motor no eixo do camo em função do ângulo de posição do camo  $\psi$ , e ainda a máxima tensão de contato de Hertz entre o camo e o rolete.

### 3.3 Rotinas auxiliares

Baseado na rotina apresentada por Schildt (1991), foi desenvolvido um analisador e compilador de expressões do tipo recursivo descendente. Modificações foram feitas na rotina básica de modo a se trabalhar com números reais em dupla precisão. Outra implementação necessária foi a criação de funções especiais com um ou mais argumentos, o que permite maior generalidade na definição da expressão desejada.

Quando os dados do perfil do camo ou do movimento do seguidor são passados na forma de pontos discretos, o método de interpolação por "spline" cúbica, descrito por Press (1990), é bastante útil. Isto porque a curva gerada passa por todos os pontos e fornece, automaticamente, valores de suas derivadas primeira e segunda. Como o polinômio interpolador utilizado é de grau três, tem-se a continuidade da curva até a sua derivada segunda. Assim, esta rotina foi implementada nos dois módulos desenvolvidos.

## 4. SIMULAÇÕES

### 4.1 Auto-aferição dos módulos de síntese (SINTCAM) e análise cineto-estática (SOLVECAM)

Com o intuito de auto-aferir os módulos de síntese e análise, os resultados obtidos nos dois módulos foram confrontados. Assim sintetizou-se o perfil do camo que gerasse o movimento especificado no seguidor, este precisamente definido por uma expressão matemática. O camo resultante foi então utilizado como dado de entrada para uma análise cineto-estática e os resultados das duas análises foram então comparados. Este tipo de verificação foi realizada impondo-se diferentes movimentos básicos ao seguidor.

Os parâmetros básicos do mecanismo para auto-aferição são apresentados na tabela 1. As figuras 2 a 5 mostram os gráficos obtidos para o movimento de avanço e retorno, definido por um polinômio 3-4-5.

Tabela 1. Parâmetros básicos do mecanismo para auto-aferição.

Raio do rolete (mm)	10
Raio de base do camo (mm)	30
Elevação total do seguidor (mm)	10
Decalagem do seguidor (mm)	0,0
Tipo de movimento	Repouso-avanço-retorno-repouso
Ângulo de avanço (graus)	90
Velocidade angular (rd/s)	1

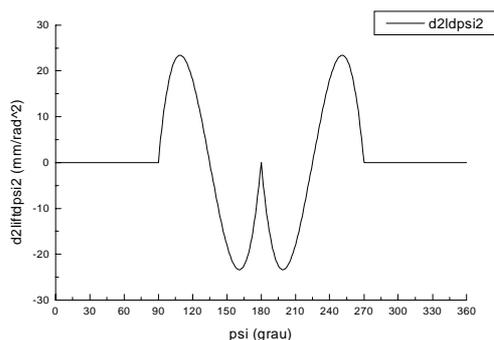


Figura 2- Diagrama de aceleração convertida. Movimento polinomial 3-4-5 - SINTCAM.

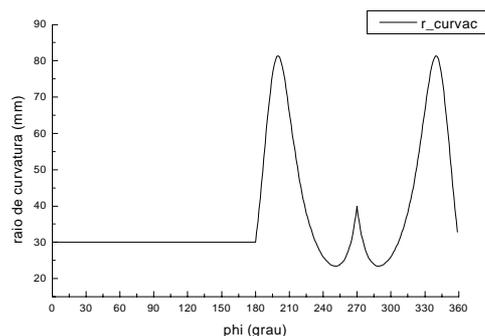


Figura 3- Raio de curvatura do perfil do camo gerado. Movimento polinomial 3-4-5 - SINTCAM.

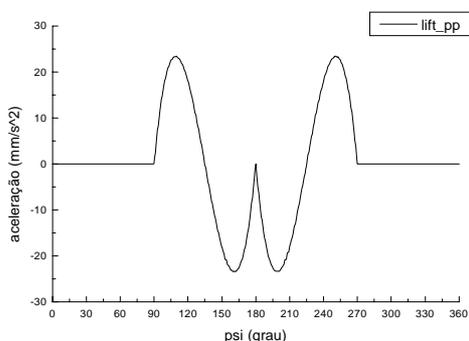


Figura 4- Diagrama de aceleração. Movimento polinomial 3-4-5 - SOLVECAM.

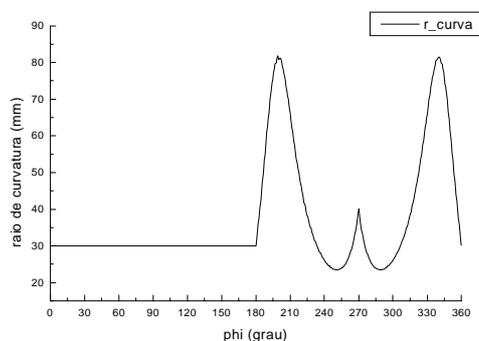


Figura 5- Raio de curvatura do perfil do camo. Movimento polinomial 3-4-5 - SOLVECAM.

## 4.2 Verificação das tensões e deformações de contato

Com a finalidade de aferir os resultados de tensão e deformação fornecidos pelo módulo SOLVECAM, escolheu-se um exemplo de aplicação do software ANSYS 5.2, de análise não linear, para o cálculo das tensões de contato entre dois cilindros paralelos, através do método dos elementos finitos. Este exemplo foi extraído do manual de verificação do "software" Ansys 5.2 (1996), produzido pela empresa norte-americana ANSYS, Inc.

A tabela 2 mostra a comparação entre as tensões e deformações de contato de Hertz, obtidas pelos programas SOLVECAM e ANSYS 5.2.

Tabela 2. Comparação entre as tensões e deformações de contato de Hertz.

Programa	Tensão (MPa) (máxima tensão de compressão)	Deformação radial global (mm)	Largura total de contato (mm)
ANSYS 5.2	1740,0	0,4289	2,3200
SOLVECAM	1698,1	0,4174	2,3994

#### 4.3 Comparação de resultados de modelos desenvolvidos no ADAMS com modelos do POWERCAM

Nesta outra comparação, um modelo de camo de disco com seguidor decalado de rolete de translação foi criado e analisado no software ADAMS 8.2, programa produzido pela empresa norte-americana MDI (Mechanical Dynamics, Inc.). A configuração adotada, fig. 6, representa um tipo de mecanismo utilizado em motores de combustão interna para comando da abertura e fechamento das válvulas. Este modelo foi extraído do curso "Introdução ao ADAMS/View 8.0", fornecido pela empresa MDI.

Foram efetuadas análises cinemáticas e dinâmicas no ADAMS, variando-se a força de pré-compressão da mola de sujeição. Nas figuras 7 e 8 tem-se os gráficos da força de contato entre o camo e o seguidor para as análises cineto-estáticas no ADAMS.

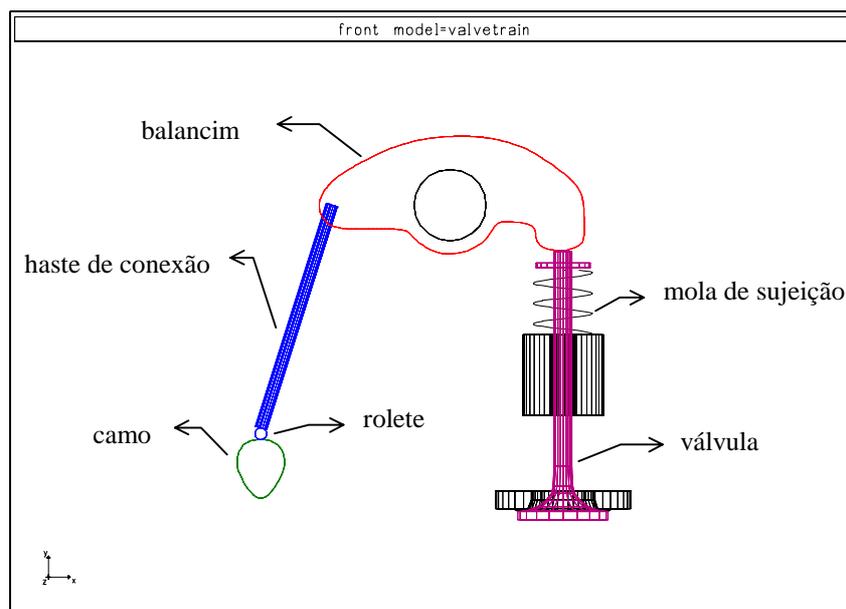


Figura 6- Modelo de comando de válvula criado no ADAMS.

Sem pré-compressão na mola, o seguidor começa a separar-se do camo na rotação aplicada. Este comportamento pode ser observado na fig. 7, onde a força normal de contato ("Fn") se anula, tangenciando o eixo x. Os pontos onde a força de contato se torna inferior a zero indicam a separação do par cinemático ("jump").

No caso de pré-compressão da mola, fig. 8, nota-se que a força normal de contato se mantém sempre positiva, indicando que não houve separação.

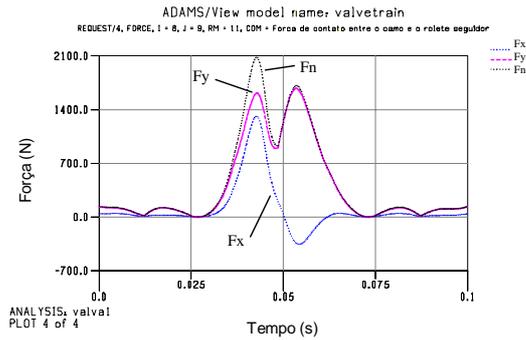


Figura 7- Força de contato entre a haste de conexão e o camo - modelo ADAMS cinemático, sem pré-compressão da mola.

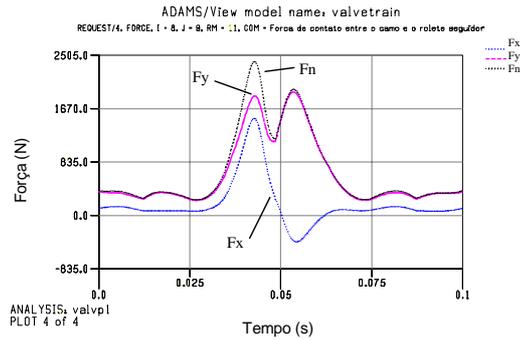


Figura 8- Força de contato - modelo ADAMS cinemático. Com pré-compressão de 1,0 mm na mola de sujeição.

Em uma segunda etapa, a curva de deslocamento da haste de conexão obtida no ADAMS foi utilizada como dado de entrada para a síntese do perfil do camo no módulo SINTCAM.

Na seqüência, os pontos do perfil do camo, obtidos no módulo SINTCAM, foram empregados como dados de entrada para o módulo SOLVECAM na verificação do "jump" do seguidor, através de análises cineto-estáticas.

O balancim e a válvula foram substituídos por um modelo reduzido equivalente. Para este caso foi necessário o equacionamento da cinemática da válvula, transferindo a força de inércia da mesma e também a força da mola de sujeição, para a haste do seguidor. As expressões matemáticas destas grandezas foram obtidas e aplicadas ao modelo como uma força externa, função do deslocamento, velocidade, aceleração do rolete seguidor e da relação de transmissão do balancim.

Nas figuras 9 e 10 tem-se os resultados obtidos com o modelo reduzido em análise no SOLVECAM. Pode-se observar a variação da força de contato sem e com pré-compressão, respectivamente.

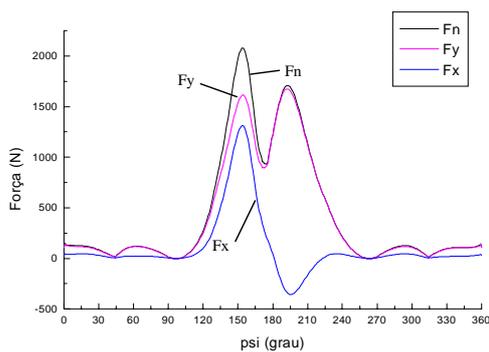


Figura 9- Força de contato entre camo e seguidor - modelo reduzido sem pré-compressão na mola.

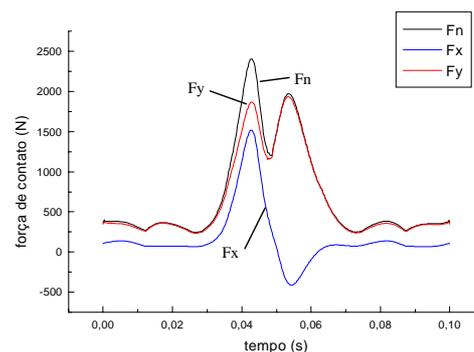


Figura 10- Força de contato - modelo SOLVECAM cinemático. Com pré-compressão de 1,0 mm na mola.

## 5. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA

Com o objetivo de mostrar que a ferramenta computacional desenvolvida pode ser empregada em situações reais, as empresas MAXION e MWM foram contatadas. Estas,

apoiando o estudo proposto, gentilmente, forneceram informações a respeito de seus produtos. Foram estudados os movimentos aplicados às válvulas dos motores HS (MAXION) e X10 (MWM). Para simplificar o problema, em ambas as situações, foi considerada uma relação de transmissão unitária e constante do balancim.

No caso do motor MAXION HS utilizou-se seguidores de rolete, enquanto que no motor MWM empregou-se seguidores de sapata plana. Neste último caso considerou-se que o raio do rolete é muito superior ao raio de base do camo. Comparando-se a solução aproximada do perfil obtida pelo SINTCAM com a solução exata para seguidores de sapata plana, verificou-se que o erro máximo entre as coordenadas do perfil foi de 0,007%. Maiores detalhes sobre estas análises podem ser encontrados em Anjos (1998).

## 6. CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um programa de computador - POWERCAM - para o projeto de mecanismos de camo de disco e seguidor decalado de rolete que realize movimento de translação alternativa. O programa realiza tanto a síntese cinemática (geração do perfil do camo) quanto a análise cineto-estática (determinação dos esforços internos) destes tipos de mecanismos, admitindo que suas peças sejam corpos rígidos.

O programa foi aferido de duas maneiras diferentes: a primeira, por auto-aferição; a segunda, por comparação de seus resultados com os resultados fornecidos por programas de análise de sistemas multi-corpos (ADAMS) e por programas de elementos finitos (ANSYS), ambos produtos disponíveis comercialmente.

O programa POWERCAM pode analisar cineto-estaticamente mecanismos em que não haja somente quatro peças (base, camo, rolete e haste). Ele permite a entrada de uma expressão matemática da força externa aplicada à haste, que considera os efeitos adicionais das demais peças que por ventura possam constituir o conjunto-seguidor. Além disso, o programa permite a verificação do "salto" do seguidor em relação ao camo (separação do par cinemático), bem como da avaliação da rigidez do contato entre as superfícies do camo e do rolete. Assim, fornece subsídios para a realização de análises dinâmicas mais sofisticadas, tanto em "softwares" de elementos finitos quanto em programas de sistemas multi-corpos. Observa-se ainda que o programa desenvolvido também pode ser utilizado no projeto de mecanismos de camo de disco e seguidor de sapata plana, devendo-se impor um raio relativamente elevado para o rolete.

O POWERCAM se constitui tanto numa ferramenta de projeto, como por exemplo as aplicações nos motores MWM-X10 e MAXION-HS, quanto num aplicativo de uso didático, tornando mais fácil e atraente o estudo dos mecanismos de camos-seguidores.

### *Agradecimentos*

Às empresas IOCHPE-MAXION S.A. e MWM Motores Diesel Ltda. pelas informações dadas sobre seus produtos e a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Anjos, F. L. A. dos, 1998, Projeto, auxiliado por computador, de mecanismos camo-seguidor, dissertação de mestrado apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil.
- Ansyz 5.2 Verification Manual, 1996, ANSYS, Inc., VM 191.

Chen, F., 1982, Mechanics and Design of Cam Mechanisms, New York, Pergamon Press Inc.  
Gans, R. F., 1991, Analytical Kinematics: analysis and synthesis of planar mechanisms, USA, Butterworth-Heinemann.  
Press, W. H., 1990, Numerical recipes in C. Cambridge, Cambridge University Press.  
Schildt, H., 1991, C - Completo e Total - cap. 22, São Paulo, McGraw-Hill / Makron.  
Shigley, J. E., 1970, Cinemática dos Mecanismos. Trad. de Omar M. Madureira e M. O. C. Amorelli. São Paulo, Edgard Blücher / EDUSP.

### **"POWERCAM, a computational tool for designing cam-follower mechanisms"**

***Abstract.** The aim of this work is to develop a computer program to assist on the design of disc cams with offset roller followers, executing the kinematic synthesis of the cam profile and the kinetostatic analysis of the mechanism. To provide precision, generality and practicality on the software usage, the authors implement an expression analyser and compiler and a cubic spline interpolation routine. Many tests are carried in order to check up the program. First the cam profile is synthesized for a given follower motion. Then this cam profile is used as an input to a kinematic analysis and the results of these two analysis are compared. The program's results are also compared to the ones given by commercial finite element and multibody system codes.*

***Key-words:** Mechanisms, Cams, Synthesis.*