

1^{as} Jornadas Porto-Minho de Tribologia

INEGI - Leça do Balio, 19 de Maio de 1994

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CHUMACEIRAS RADIAIS HIDRODINÁMICAS

Miranda, A A S; Claro, J C P

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade do Minho
Campus de Azurém
4800 GUIMARÃES

RESUMO

Os métodos de cálculo de chumaceiras hidrodinâmicas, disponíveis para projecto, podem conduzir a previsões das condições de desempenho substancialmente diferentes das reais.

Um dos principais factores responsáveis por este problema é a forma como, de uma forma geral, é tratada a questão da alimentação de lubrificante à chumaceira.

Neste trabalho, apresenta-se um programa de computador para simulação do funcionamento da chumaceira radial hidrodinâmica, dotada de sulcos de alimentação axiais e sujeita a carregamento estático, capaz de entrar em linha de conta com os principais factores condicionantes do seu desempenho, nomeadamente quanto às condições de alimentação.

Este programa pode ser utilizado na análise de chumaceiras já existentes, de molde a conhecer as suas reais condições de desempenho, e no estudo da influência de alterações às condições de funcionamento.

1. INTRODUÇÃO

A chumaceira radial hidrodinâmica, dada a sua simplicidade construtiva, fiabilidade e eficiência, tem demonstrado ser insubstituível no apoio de veios rotativos, nas mais variadas aplicações - motores eléctricos e de combustão interna, turbinas e geradores, redutores de engrenagens e caixas de velocidades, etc.

O princípio do seu funcionamento baseia-se no arrastamento do lubrificante pelo movimento do veio (moente) para a zona de folga mínima entre este e o casquilho. O fenómeno de 'cunha' geométrica origina uma distribuição de pressões cuja resultante determina a capacidade de carga da chumaceira - Fig.1. Adicionalmente, este efeito tende a expulsar parte do lubrificante pelos bordos da chumaceira. A passagem de uma zona convergente para uma zona divergente, após (h_{min}), provoca um rápido abaixamento da pressão e a cavitação do restante lubrificante. A película volta a regenerar, fruto da geometria convergente, na região oposta, e da alimentação de lubrificante através de sulcos convenientemente colocados (ou através dos bordos da chumaceira, no caso de esta trabalhar submersa).

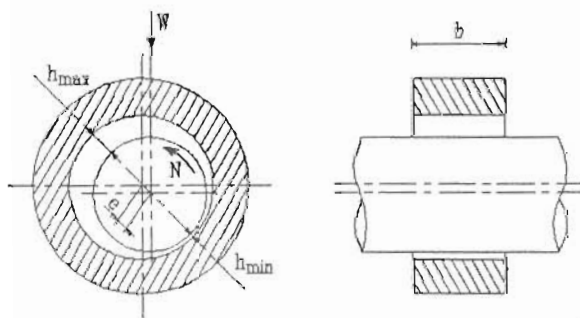


Fig.1 - Geometria da Chumaceira Radial Hidrodinâmica

Virtualmente isenta de contacto metálico, excepto em situações de arranque e paragem, a potência dissipada fica a dever-se apenas ao atrito viscoso no seio do lubrificante, que se traduz num aumento da

sua temperatura, controlada pelas condições de alimentação.

Em termos construtivos, várias soluções são possíveis para a alimentação do lubrificante. Para chumaceiras sujeitas a cargas unidireccionais recorre-se, normalmente, a sulcos axiais. A sua geometria pode variar do simples furo circular a cavidades rectangulares, sendo adoptadas diferentes alternativas para o seu posicionamento, nomeadamente: um sulco segundo a linha de actuação da carga ou dois sulcos em ângulo recto com esta, para veios com a possibilidade de rotação nos dois sentidos, e um sulco a 90° com a linha de carga, para aplicações com um único sentido de rotação - Fig.2.

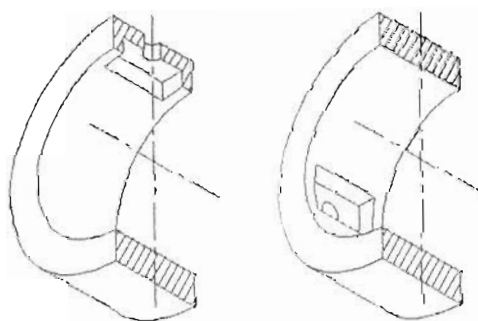


Fig.2 - Sulcos Axiais de Alimentação

2. O PROJECTO DE CHUMACEIRAS RADIAIS HIDRODINÁMICAS CARRREGADAS ESTÁTICAMENTE

No início da segunda metade deste século apareceram os primeiros métodos de cálculo [1, 2], dotando o projecto de bases mais sólidas que as compilações de dados empíricos e os ensaios de protótipos, até aí utilizados.

De então para cá, a evolução tem sido marcada pela particularização da aplicabilidade desses métodos, muito especialmente no que diz respeito às condições de alimentação de lubrificante: dos primeiros sistemas de cálculo, sem qualquer tipo de considerações quanto a esta questão [2], passando pelos que consideram

praticamente todos os arranjos normalmente utilizados na prática [3], até aos que se dedicam apenas a determinados posicionamentos dos sulcos na chumaceira [4].

Todos estes métodos têm como base resultados obtidos por solução numérica da equação de escoamento do lubrificante na chumaceira - a chamada Equação de Reynolds. Na sua aplicação à chumaceira radial são geralmente adoptadas hipóteses simplificativas que consideram, por exemplo, que a alimentação se realiza à pressão ambiente, pelos bordos laterais do casquilho ou por um sulco 'ideal' - de comprimento igual ao da chumaceira e de largura nula - preenchendo o lubrificante totalmente o espaço entre o casquilho e o moente, na zona de folga máxima ou na zona em que se posiciona o sulco de alimentação. O caudal assim calculado, correspondente à acção de bombeamento realizado pela rotação do moente, é geralmente denominado 'caudal de velocidade'.

A influência da pressão de alimentação é introduzida posteriormente, por simples adição ao 'caudal de velocidade' de uma componente, equivalente à injeção de lubrificante entre duas paredes paralelas e estacionárias (as superfícies do moente e do casquilho) através de um sulco de dadas dimensões, usualmente referida como 'caudal de pressão'.

Este procedimento, adoptado por circunstâncias que se prendem com dificuldades encontradas na resolução da Equação de Reynolds englobando os principais factores que contribuem para o caudal na chumaceira, tem sido utilizado até hoje. Todavia, vários autores - [5,6,7] entre outros - demonstraram, experimental e analiticamente, que a realidade física do fenómeno e as previsões dos métodos baseados naquele procedimento se podem afastar consideravelmente.

Na verdade, as condições de alimentação (número, posição e dimensões do sulco de

alimentação e pressão de alimentação) influenciam notoriamente a forma como ocorre a regeneração da película de lubrificante e, conseqüentemente, a extensão total desta - Fig.3. O caudal em jogo pode, assim, variar de forma significativa, para condições de utilização idênticas, em termos de velocidade de rotação e carga aplicada.

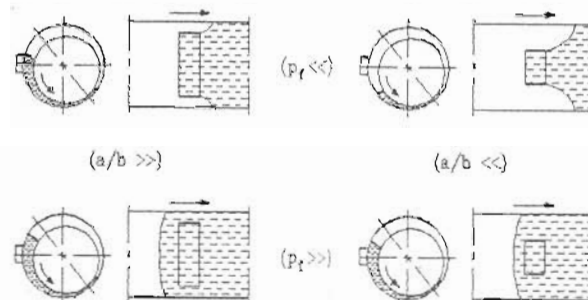


Fig.3 - Geometria da Fronteira de Regeneração da Película

A importância do cálculo do caudal no projecto da chumaceira, à primeira vista secundária face a parâmetros mais directamente relacionáveis com o seu funcionamento, prende-se com o facto de o cálculo do desempenho se basear num equilíbrio delicado: a geração de pressões na película depende das condições de escoamento; estas dependem da viscosidade e, portanto, da temperatura do lubrificante, que é influenciada pela geração de calor devida à potência dissipada e pelo caudal de lubrificante, que remove parte substancial desse calor gerado; por sua vez, capacidade de carga, potência dissipada e caudal de lubrificante são determinados pela distribuição de pressões.

Assim, apenas um cálculo global, conjugando todos os parâmetros em causa, pode conduzir a uma solução mais fiável.

Um cálculo menos preciso da chumaceira leva a que as condições reais de funcionamento possam ser substancialmente diferentes das previstas teoricamente. Esta situação pode não conduzir de forma imediata (e drástica) à ruína do componente. Mas pode obstar a que, com um mínimo de confiança, se

proceda a uma otimização da eficiência da chumaceira ou a uma alteração das condições de funcionamento do equipamento em que aquela se insere.

3. O ALGORITMO DE ELROD APLICADO A CHUMACEIRA RADIAL HIDRODINÂMICA

Neste trabalho utilizou-se o chamado 'Algoritmo de Elrod', no qual o princípio de conservação de massa é aplicado à célula elementar envolvente de cada um dos $(M \times N)$ nós criados pela discretização da superfície planificada da chumaceira - Fig.4.

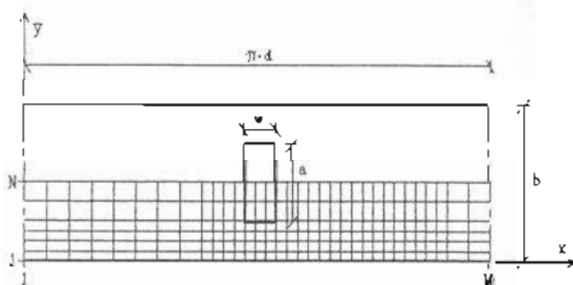


Fig.4 - Discretização da Superfície Planificada da Chumaceira

O sistema de equações assim obtido, na forma de diferenças finitas, foi resolvido pelo método iterativo de Gauss-Seidel, tendo sido utilizadas técnicas de 'multi-grid' para acelerar a convergência do processo iterativo. Foi, assim, possível determinar a distribuição da pressão hidrodinâmica gerada na zona de película contínua e a identificação da zona de cavitação, decorrentes das condições de funcionamento.

O processo foi implementado num programa para computador (do tipo PC-compatível) envolvendo uma discretização automática da superfície, com adaptação à geometria da chumaceira e à extensão da

película lubrificante.

Virtualmente qualquer geometria da chumaceira pode ser considerada, assim como as dimensões, posição e número de sulcos de alimentação e o valor da pressão de alimentação.

Actualmente, o programa encontra-se capaz de reconhecer e tratar os casos de alimentação por sulcos axiais com os seguintes posicionamentos:

- um sulco, na zona de folga máxima
- um sulco, segundo a linha de carga
- um sulco, a $+90^\circ$ da linha de carga
- dois sulcos, a $\pm 90^\circ$ da linha de carga

No Quadro 1 indicam-se os parâmetros de entrada, que é necessário fornecer ao programa, e os parâmetros de saída que se obtêm e, a partir dos quais, se torna possível a determinação dos correspondentes valores reais (dimensionais).

4. APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE COMPUTADOR DESENVOLVIDO A ANÁLISE DE CHUMACEIRAS

O método aqui apresentado pode ser utilizado na análise de componentes existentes, em que o conhecimento das características geométricas e condições de funcionamento (carga, velocidade e pressão de alimentação, por exemplo) permite a determinação das principais características de desempenho (nomeadamente, a excentricidade de funcionamento, o caudal de lubrificante necessário e a potência dissipada), ou em que o conhecimento de algumas dessas características permite a extrapolação das restantes.

Assim, o programa pode fornecer valores

Quadro 1:

parâmetros de entrada (dados)	b/d	a/b	w/d	\bar{p}_f	ϵ
parâmetros de saída (calculados)	\bar{w}	\bar{Q}	\bar{H}		

de base para estudos tão diversos como, por exemplo, a quantificação do rendimento global de um equipamento em que a chumaceira esteja integrada, a determinação da capacidade necessária a um sistema centralizado de lubrificação a instalar ou, de uma forma mais particular, as alterações a introduzir na concepção da chumaceira para a sua optimização ou, ainda, a análise da possibilidade e consequências de uma alteração, voluntária ou acidental, das suas condições de funcionamento.

A extensão e a fiabilidade da análise dependem apenas da quantificação das condições de funcionamento da chumaceira. Alguns parâmetros são normalmente acessíveis, tais como as características dimensionais da chumaceira, a velocidade de rotação do moente e o tipo de lubrificante empregue. Outras, como o valor e a direcção de actuação da carga, e respectiva posição relativa do(s) sulco(s) de alimentação, podem ser facilmente determinadas. As possibilidades de monitorização de parâmetros como as temperaturas de entrada e de saída e o caudal do lubrificante, a pressão de alimentação na proximidade (cu mesmo no interior) do sulco de alimentação, ou a excentricidade de funcionamento, dependem das aplicações concretas e nem sempre serão viáveis.

De notar que a falta de acesso a algumas destas últimas variáveis não inviabiliza a execução da análise, apenas a tornando dependente da atribuição de valores, arbitrados de acordo com as restantes condições conhecidas.

5. VALIDAÇÃO DO PROGRAMA PROPOSTO

Como forma de averiguar da fiabilidade do programa, procedeu-se a um estudo comparativo dos resultados da simulação teórica com situações práticas. Para o efeito, recorreu-se a valores obtidos pela via experimental, publicados [8, 9] e obtidos pelos autores [10], cobrindo uma extensa gama de geometrias e condições de

funcionamento.

A título de exemplo, apresentam-se nas Figs.5 a 7 alguns dos resultados obtidos.

Globalmente, a comparação revelou-se inteiramente satisfatória, demonstrando o bom desempenho da análise aqui proposta.

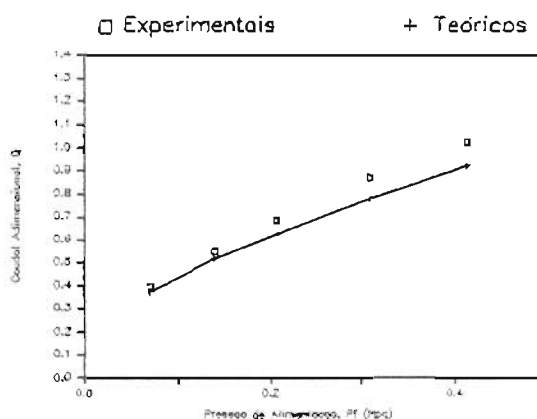


Fig.5 - Comparação com Resultados de [8]

1 sulco na linha de carga
 $W=6.9 \text{ kN}$ $N=34 \text{ rps}$ $p_f=59 \text{ a } 414 \text{ kPa}$
 $b/d=0.62$ $a/b=0.10$ $w/d=0.06$ $c_d/d=1.6 \cdot 10^{-1}$

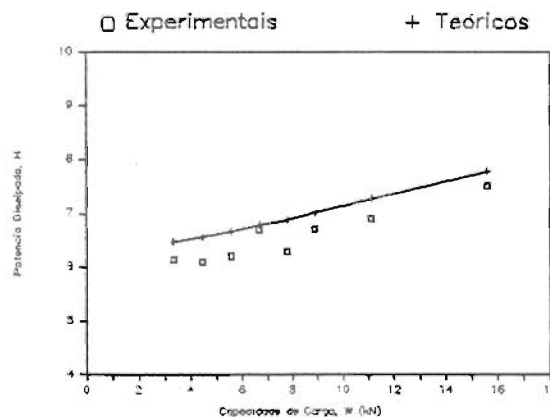


Fig.6 - Comparação com Resultados de [9]

1 sulco na linha de carga
 $W=1.3 \text{ a } 15.6 \text{ kN}$ $N=25 \text{ rps}$ $p_f=276 \text{ kPa}$
 $b/d=0.75$ $a/b=0.875$ $w/d=0.05$ $c_d/d=1.25 \cdot 10^{-1}$

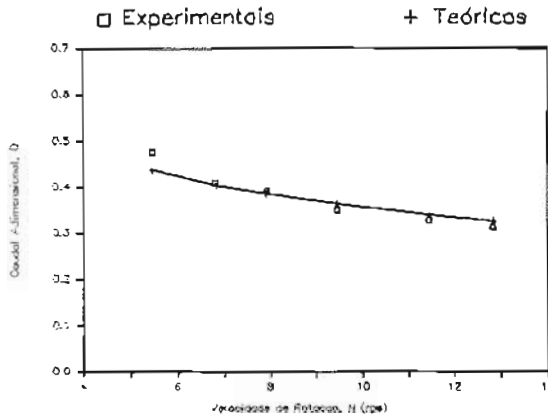


Fig.7 - Comparação com Resultados de [10]

2 sulcos a $\pm 90^\circ$ da linha de carga

$\bar{W}=3.1$ kN $N=5.5$ a 12.9 rps $p_f=110$ kPa

$b/d=1.0$ $a/b=0.8$ $v/d=0.2$ $c_d/d=2.44 \cdot 10^{-2}$

NOMENCLATURA

a	comprimento do sulco de alimentação [m]
b	comprimento da chumaceira [m]
c_d	folga diametral da chumaceira [m]
d	diâmetro nominal da chumaceira [m]
e	excentricidade absoluta [m]
h	espessura de película lubrificante [m]
p_f	pressão de alimentação [Pa]
H	potência dissipada [watt]
Q	caudal de lubrificante [m ³ /s]
U	velocidade periférica do moente [m/s]
W	capacidade de carga da chumaceira [N]
μ	viscosidade do lubrificante [Pa·s]

6. CONCLUSÃO

A análise desenvolvida mostrou-se capaz de fornecer resultados satisfatórios, quando comparados com valores experimentais dentro da gama de condições usualmente empregues. Assim, pode ser considerada como uma base fiável para o estudo (e eventual optimização) de componentes já em funcionamento.

O mesmo programa foi, paralelamente, aplicado na obtenção de dados com vista à criação de diagramas para projecto, tendo até ao presente sido gerados resultados referentes a chumaceiras com sulcos a $+90^\circ$ e $\pm 90^\circ$ [10], e segundo a linha de carga [11].

Parâmetros Adimensionais:

$$\varepsilon = (2 \cdot e / c_d)$$

$$\bar{p}_f = p_f \cdot \frac{(c_d/d)^2}{\mu \cdot U \cdot 2/d}$$

$$\bar{W} = W \cdot \frac{(c_d/d)^2}{\mu \cdot U \cdot b}$$

$$\bar{H} = H \cdot \frac{c_d}{\mu \cdot U^2 \cdot b \cdot d}$$

$$\bar{Q} = Q \cdot \frac{1}{U \cdot b \cdot c_d/2}$$

REFERENCIAS

- [1] BURKE, A.E.; NEALE, M.J. - A Method of Designing Plain Journal Bearings for Steady Loads. 'Proc. Conf. Lubr. and Wear', Inst. Mech. Engrs., 1957
- [2] RAIMONDI, A.A.; BOYD, J. - A Solution for the Finite Journal Bearing and its Application to Analysis and Design: part III. 'Lubr. and Sc. Tech.', Trans. ASLE, vol. 1, n. 1, 1958
- [3] ESDU 66023 - Calculation Methods for Steadily Loaded Pressure Fed Hydrodynamic Journal Bearings. 'Engineering Science Data Unit', 1966
- [4] ESDU 84031 - Calculation Methods for Steadily Loaded Axial Groove Hydrodynamic Journal Bearings. 'Engineering Science Data Unit', 1984
- [5] COLE, J.A.; HUGHES, C.J. - Oil Flow and Film Extent in Complete Journal Bearings. 'Proc. Inst. Mech. Engrs.', vol. 170, 1956
- [6] MIRANDA, A.A.S. - Oil Flow, Cavitation and Film Reformation in Journal Bearings, Including an Interactive Computer-Aided Design Study. 'Ph.D. Thesis', Dep. Mech. Engr., Univ. Leeds, 1983
- [7] BASRI, H.; NEAL, P.B. - Oil Flow in Axial Groove Journal Bearings. 'Developments in Plain Bearings for the 90's', Inst. Mech. Engrs., 1990
- [8] McKEE, S.A. - Oil Flow in Plain Journal Bearings. 'Trans. ASME', vol. 74, 1952
- [9] DOWSON, D.; et al - An Experimental Investigation of the Thermal Equilibrium of Steadily Loaded Journal Bearings. 'Proc. Inst. Mech. Engrs.', vol. 181, n. 3B, 1967
- [10] CLARO, J.C.P. - Reformulação do Método de Cálculo de Chumaceiras Radiais Hidrodinâmicas. Tese de doutoramento, Dep. Eng. Mecânica, Univ. do Minho, (em preparação)
- [11] CLARO, J.C.P.; MIRANDA, A.A.S. - Design Data for Steadily Loaded Crown Bearings. 'Eurotrib'93', 6th. International Congress on Tribology, Budapest, 1993