

M  
mecânica

E  
experimental

Revista da APAET - Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões



Ensaios

Comportamento de Materiais

Betão Estrutural

Tribologia

nº 6  
2001

**CORPO EDITORIAL:**

Prof. J. Sousa Cirne (FCTUC)  
Prof. Fernando Branco (IC/IST)  
Prof. J. Silva Gomes (INEGI)  
Engº Mário Santos (INETI)  
Engº J. M. Catarino (LNEC)  
Drª M. Lurdes Eusébio (LNEC)  
Eng. Paulo Piloto (IPB-ESTIG)

mecânica

experimental

**COMISSÃO CIENTÍFICA:**

M. Conceição Cruz Azevedo  
Fernando Branco  
P. Tavares de Castro  
J. Sousa Cirne  
J. M. Catarino  
M.J. Esteves Ferreira  
J. Silva Gomes  
A. Torres Marques  
Mário Santos  
J. Montalvão e Silva  
A. Morão Dias  
J. Sarmento  
M. Seabra Pereira  
A. Sousa Miranda  
J. Oliveira Pedro  
R.A.F. Martins

Depósito Legal Nº 165644/01  
Impressão e acabamento  
Quilate – artes gráficas, lda.

Fotografia da capa:  
Pormenor da instrumentação de um rodado  
de veículo ferroviário, com protecção  
contra poeiras, água e óleo  
(cortesia do Prof. Montalvão e Silva, IST, Lisboa)

Nº 6

2001

Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões

c/o Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Av. do Brasil, 101 - 1799 LISBOA CODEX

e-mail: [apaet@lnec.pt](mailto:apaet@lnec.pt)

<http://www-ext.lnec.pt/APAET/>



ISSN – 122 922

Publicação financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia

# ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE ALIMENTAÇÃO NO DESEMPENHO DE UMA CHUMACEIRA HIDRODINÂMICA COM SULCO DE ALIMENTAÇÃO NA LINHA DE CARGA

L. Costa<sup>a</sup>, A.S. Miranda<sup>a</sup>, J.C.P. Claro<sup>a</sup> e M. Fillon<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Mecânica, 4810 Guimarães, PORTUGAL

<sup>b</sup> Université de Poitiers, Laboratoire de Mécanique des Solides, URM CNRS 6610, BP 179, 86960 Futuroscope, FRANCE



## RESUMO

Foi estudada experimentalmente a influência de alguns parâmetros de alimentação no desempenho de uma chumaceira radial hidrodinâmica com sulco de alimentação na linha de carga, carregada estaticamente. Os resultados obtidos mostram que a temperatura de alimentação condiciona fortemente todos os parâmetros de desempenho, enquanto que a pressão de alimentação afecta significativamente o caudal e ligeiramente a temperatura máxima do casquilho, tendo uma influência moderada sobre a excentricidade, sobretudo a baixa carga específica.

## NOMENCLATURA

a	Comprimento do sulco	Pal	Pressão de alimentação
b	Comprimento da chumaceira	Tal	Temperatura de alimentação
$C_r$	Folga radial [ $C_r = 0,5 (d_c - d_v)$ ]	Tam	Temperatura ambiente
d	Diâmetro nominal da chumaceira	W	Carga aplicada
$d_c$	Diâmetro interior do casquilho	$\alpha$	Coordenada circunferencial
$d_v$	Diâmetro do veio	$\epsilon$	Excentricidade relativa
$D_{ex}$	Diâmetro exterior da chumaceira	$\Psi$	Ângulo de atitude
h	Espessura da película [ $h = C_r (1 + \epsilon \cos \phi_0)$ ]	$\phi_0$	Ângulo medido a partir de $h_{max}$
$h_{max}$	Espessura máxima da película	$\phi_s$	Ângulo de localização do sulco
$h_{min}$	Espessura mínima da película	$\mu_{30}$	Viscosidade do óleo a 30 °C
N	Velocidade do veio	$\mu_{75}$	Viscosidade do óleo a 75 °C

## 1. INTRODUÇÃO

A chumaceira radial (Fig.1) é, geralmente, projectada para suportar elevadas cargas específicas associadas a altas velocidades de funcionamento, com boa fiabilidade. Nestas condições operativas, a energia gerada por atrito viscoso no óleo lubrificante é significativa, sendo afectada pelas condições de

fornecimento de óleo à chumaceira (pressão e temperatura de alimentação, dimensões e localização do sulco de alimentação). Por isso, considera-se importante o estudo da influência das condições de alimentação no desempenho termohidrodinâmico da chumaceira (Costa et al., 2000a).

A experimentação laboratorial destinada à análise do desempenho

termohidrodinâmico de chumaceiras radiais vem sendo realizada ao longo de décadas (Swanson and Kirk, 1997). Todavia, é reduzido o número de publicações com resultados experimentais reveladores da influência das condições de alimentação nos principais parâmetros de desempenho da chumaceira, nomeadamente o caudal de óleo, a temperatura máxima do casquilho, a temperatura do óleo saído da chumaceira e a espessura mínima da película lubrificante.

O presente trabalho visa um melhor conhecimento do efeito das condições de alimentação em alguns dos parâmetros de desempenho de chumaceiras com um sulco de alimentação axial localizado na linha de acção da carga.

## 2- GEOMETRIA DAS CHUMACEIRAS E CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO

Foram efectuados testes com duas chumaceiras cujas características

geométricas são apresentadas na Tabela 1. Os casquilhos são em bronze RG5G-CuSn5ZnPb. A face interior dos casquilhos foi maquinada com qualidade de acabamento ISO N5. O diâmetro interior de cada casquilho foi medido com um comparador digital com resolução igual a  $10^{-6}$ m. O aspecto de um dos casquilhos utilizados é mostrado na Fig. 2.

O veio rotativo, executado em aço X22-CrNi17, foi rectificado, apresentando uma qualidade de acabamento ISO N4. O diâmetro do veio foi avaliado com uma máquina de medir por coordenadas cuja resolução é de  $10^{-7}$ m.

O lubrificante utilizado foi óleo mineral Hidrolep 32 (GALP) do tipo ISO VG 32, tendo sido medida a viscosidade do mesmo a diferentes temperaturas (Tabela 2) com um viscosímetro de queda de esfera (DIN 53015).

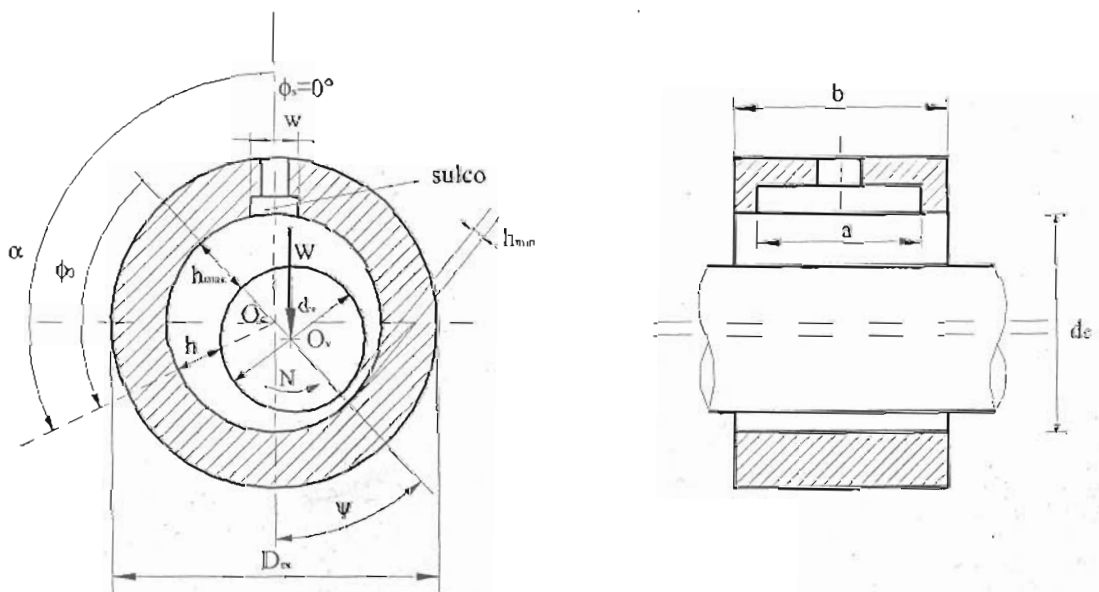


Fig. 1. Representação esquemática de uma chumaceira radial hidrodinâmica

Tabela 1: Características geométricas das chumaceiras testadas

			Chumaceira A	Chumaceira B
Diâmetro nominal da chumaceira	d	$10^{-3}$ m	50	50
Comprimento do casquilho	b	$10^{-3}$ m	40	40
Diâmetro exterior da chumaceira	D	$10^{-3}$ m	100	100
Folga radial medida a 23°C	$C_r$	$10^{-6}$ m	38.5	40.75
Comprimento do sulco	a	$10^{-3}$ m	20	32
Largura do sulco	w	$10^{-3}$ m	10	10
Localização do sulco	$\phi_s$	graus	0	0

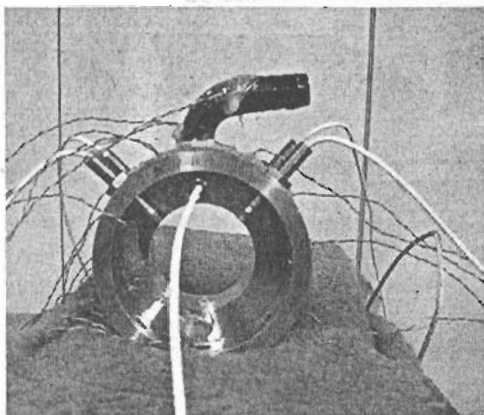


Fig. 2. Vista de um dos casquilhos utilizados

### 3- EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL E CONDIÇÕES OPERATIVAS

O dispositivo de ensaio de chumaceiras hidrodinâmicas, originariamente construído para análise da influência das condições de alimentação no caudal, foi modificado para o presente trabalho. Os detalhes construtivos do dispositivo de ensaio, podem ser encontrados noutros trabalhos publicados (Claro, 1994; Costa et. al., 2000b). Neste artigo apenas se apresenta uma breve descrição.

Uma vista geral da instalação experimental é ilustrada na Fig. 3. Basicamente, o dispositivo de ensaio consiste na chumaceira de teste, o veio rotativo, um sistema de alimentação, um mecanismo de carregamento, um sistema para a medição de temperaturas, e um osciloscópio ligado a transdutores de deslocamento, cuja informação permite avaliar a espessura da película lubrificante.

O veio rotativo é suportado por dois rolamentos cónicos, montados com pré-carregamento, de maneira a minimizar folgas radiais e assegurar uma boa rigidez. Para a medição da velocidade do veio foi utilizado um tacómetro de reflexão sem contacto.

A carga aplicada na chumaceira resultava da reacção ao peso de discos calibrados colocados numa das extremidades da barra apoiada numa rótula esférica, sendo o casquilho suportado por um cabo de aço conforme mostra a Fig. 4.

O sistema de alimentação da chumaceira é constituído por uma bomba de engrenagens, uma válvula de regulação do caudal, um amortecedor de oscilações de pressão, tubagem e um reservatório. A válvula de regulação do caudal possibilitava a fixação da pressão de alimentação, que era medida com um transdutor de pressão montado no sulco de alimentação. O caudal de óleo fornecido à chumaceira era medido com um caudalímetro, instalado na linha de alimentação.

Vinte e um termopares do tipo J foram introduzidos no casquilho de maneira a possibilitar a medição da temperatura da face interna do mesmo (Fig. 5). Outros termopares do mesmo tipo foram montados para medir a temperatura de alimentação, a temperatura no interior do sulco de alimentação, a temperatura ambiente, a temperatura do óleo saído da chumaceira e a temperatura no reservatório do sistema de alimentação.

A excentricidade relativa da chumaceira era calculada com base nos resultados das medições da espessura da película, obtidas através de quatro transdutores de deslocamento que foram montados ortogonalmente em planos transversais-laterais da chumaceira. O sinal analógico proveniente dos transdutores de deslocamento era transferido para o osciloscópio, onde era transformado em sinal digital que servia para a determinação da posição excêntrica do veio relativamente ao casquilho. Para este propósito, foi necessário estimar as dilatações térmicas do veio e do casquilho, considerando um incremento de temperatura de 23°C (temperatura inicial) até uma temperatura igual à média das temperaturas medidas na face interna do casquilho.

Os testes foram realizados em condições de funcionamento estacionárias, com condições de alimentação devidamente controladas. Os parâmetros medidos foram: o caudal, a temperatura de alimentação, a pressão de alimentação, a temperatura em vários pontos do casquilho e a excentricidade relativa. As condições ope-

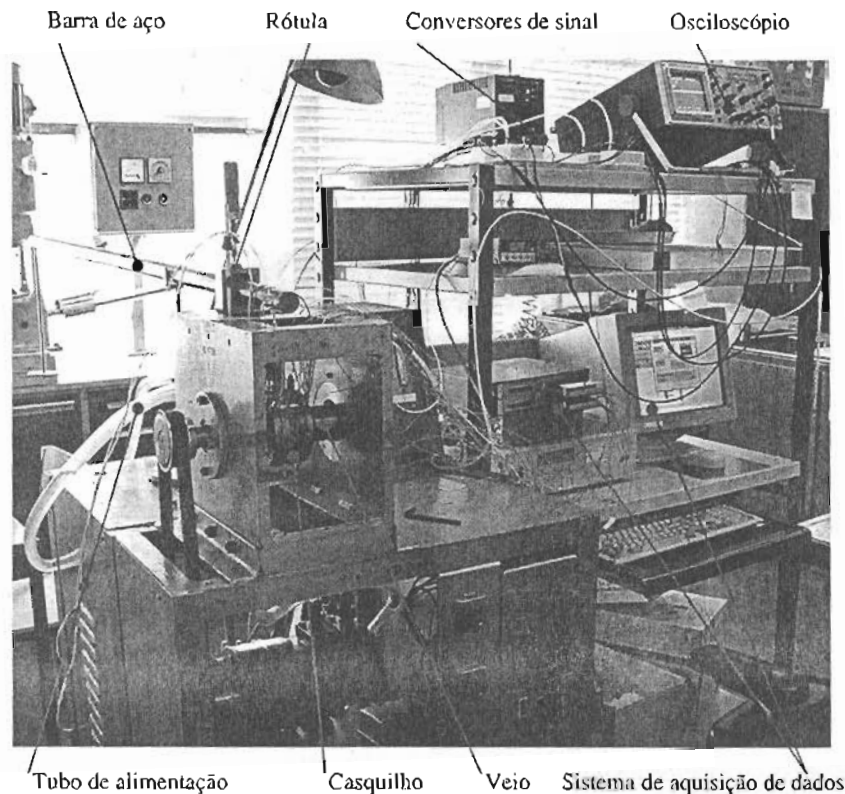


Fig. 3. Vista geral da instalação experimental

rativas de teste são apresentadas na Tabela 2.

A repetibilidade dos resultados dos testes também foi analisada. Para várias das condições operativas, foram realizados quatro testes em diferentes dias e em diferentes períodos do dia. As maiores diferenças apuradas foram,  $\pm 1,5$  °C na

temperatura máxima,  $\pm 6,6$  % na excentricidade relativa e  $\pm 4,4$  % no caudal. Uma análise da incerteza das medições, desencadeada em conformidade com recomendações da ASME (código ASME PTC-19.1, 1998), proporcionou os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 2: Viscosidade do óleo e condições operativas de teste

Viscosidade do óleo a 30 °C	$\mu_{30}$	Pa.s	0.0467
Viscosidade do óleo a 75 °C	$\mu_{75}$	Pa.s	0.0083
Pressão de alimentação	Pal	kPa	100 e 300
Temperatura de alimentação	Tal	°C	35 e 45
Velocidade do veio	N	rpm	2000 e 4000
Carga	W	kN	1; 2; 3 e 4
Temperatura ambiente	Tam	°C	20 a 45

#### 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 6 mostra a variação da temperatura na face interna do casquilho, nas duas chumaceiras com condições operativas similares. Pode observar-se que as temperaturas são mais elevadas na chumaceira A. Esta chumaceira é a que

apresenta menor folga radial e sulco de menor comprimento. Funciona, por isso, com uma menor quantidade de óleo novo fornecido, o que tem como consequência a diminuição do efeito refrigerante do óleo novo, originando temperaturas de funcionamento mais elevadas.

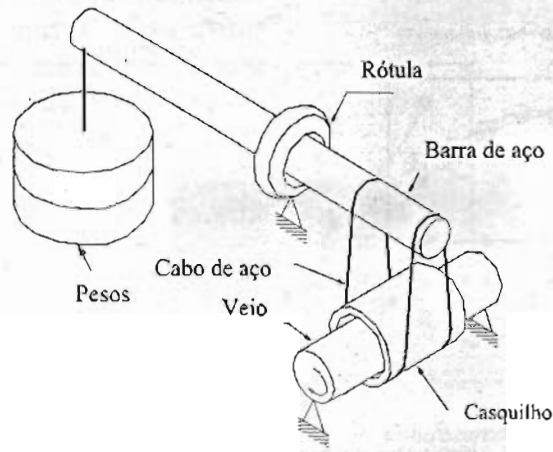


Fig. 4. Sistema de carregamento da chumaceira



Fig. 5. Distribuição de termopares para a medição da temperatura da face interna da chumaceira

Tabela 3: Erros associados aos procedimentos de medição

Variável medida		Categorias			
		Resolução da medição	Incerteza sistemática	Desvio padrão da média	Erro de medição
Folga diametral	$\mu\text{m}$	0,10	0,15	0,63	1,27
Velocidade do veio	rpm	0,01	1,1	1,0	2,66
Carga aplicada	kN	$10^{-5}$	0,0267	0,015	0,04
Caudal	lit/min	$10^{-6}$	3 %	3,8 %	4,08 % (b)
Pressão	kPa	0,001	0,1	1,2	2,402
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	0,01	0,75	0,55	1,33
Excentricidade relativa		0,01	0,077(a)	0,035(a)	0.104 (a)

a) Análise da incerteza somente efectuada com  $0,12 < \varepsilon < 0,78$ .

b) Percentagem do total da escala.

A Fig. 7 mostra a variação da temperatura da face interna do casquilho, na direcção axial, nas chumaceiras A e B, para condições operativas similares. Como se pode verificar, o gradiente axial de

temperatura só é significativo na vizinhança da secção de entrada do sulco de alimentação, na chumaceira A. Neste caso, o comprimento do sulco é significativamente menor que o

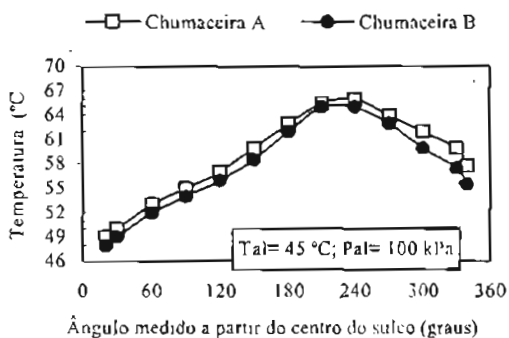


Fig. 6. Variação circunferencial da temperatura na interface óleo-casquilho, no plano central da chumaceira ( $W = 4 \text{ kN}$ ,  $N = 4000 \text{ rpm}$ )

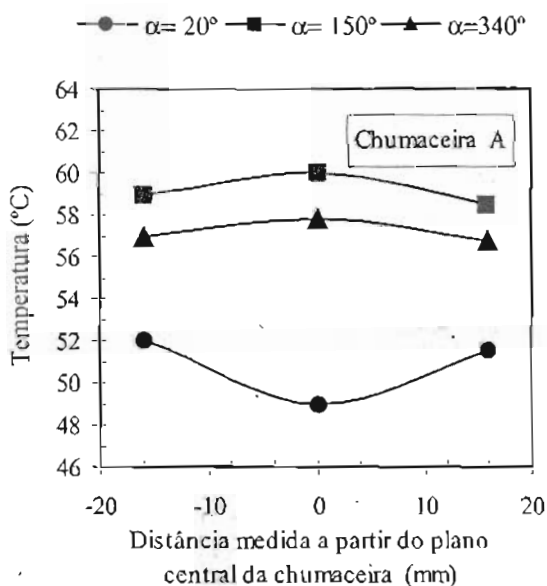
comprimento do casquilho ( $a/b=0,5$ ). Consequentemente, uma parte do caudal recirculado não se mistura directamente no sulco com o óleo fornecido à chumaceira, tendo a regeneração completa da película ocorrido numa zona a jusante do sulco, consideravelmente afastada da secção de entrada.

A influência do aumento da pressão de alimentação de 100 kPa para 300 kPa, é apresentada na Fig. 8. Com o triplicar do valor da pressão de alimentação ocorreu um ligeiro decréscimo da temperatura máxima

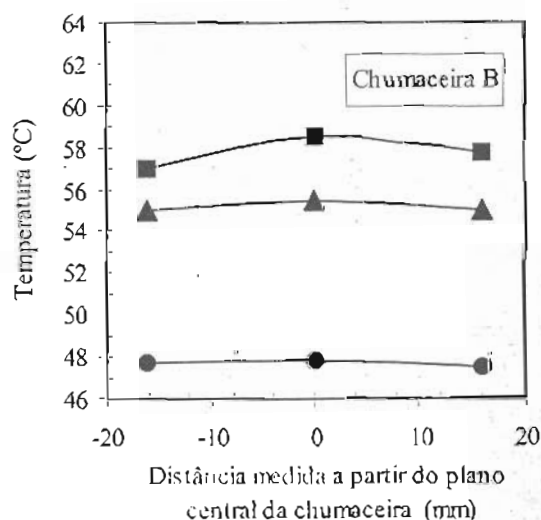
do casquilho (que não excedeu  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e um acentuado incremento do caudal. O decréscimo da temperatura máxima deriva de uma intensificação do efeito refrigerante produzido com a entrada de uma maior quantidade de óleo novo que resulta do aumento do caudal.

O efeito do aumento da pressão de alimentação na excentricidade relativa só foi relevante para baixa carga, devido ao contributo da componente hidrostática da pressão de alimentação.

A diminuição da temperatura de alimentação de  $45^\circ\text{C}$  para  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , originou um decréscimo médio de  $8,5 \text{ }^\circ\text{C}$  na temperatura máxima, e decréscimos acentuados do caudal e da excentricidade relativa, conforme representado na Fig. 9. O decréscimo da temperatura máxima é consequência directa da entrada de óleo mais fresco, que proporciona um maior efeito refrigerante na chumaceira. Nestas circunstâncias, o decréscimo do caudal e da excentricidade foi consequência do aumento da viscosidade do óleo, resultante da redução da temperatura de alimentação



(a)



(b)

Fig. 7. Variação da temperatura da interface óleo-casquilho na direcção axial da chumaceira, em diferentes posições circunferenciais ( $W = 4 \text{ kN}$ ,  $N = 4000 \text{ rpm}$ ,  $P_{al} = 100 \text{ kPa}$ )



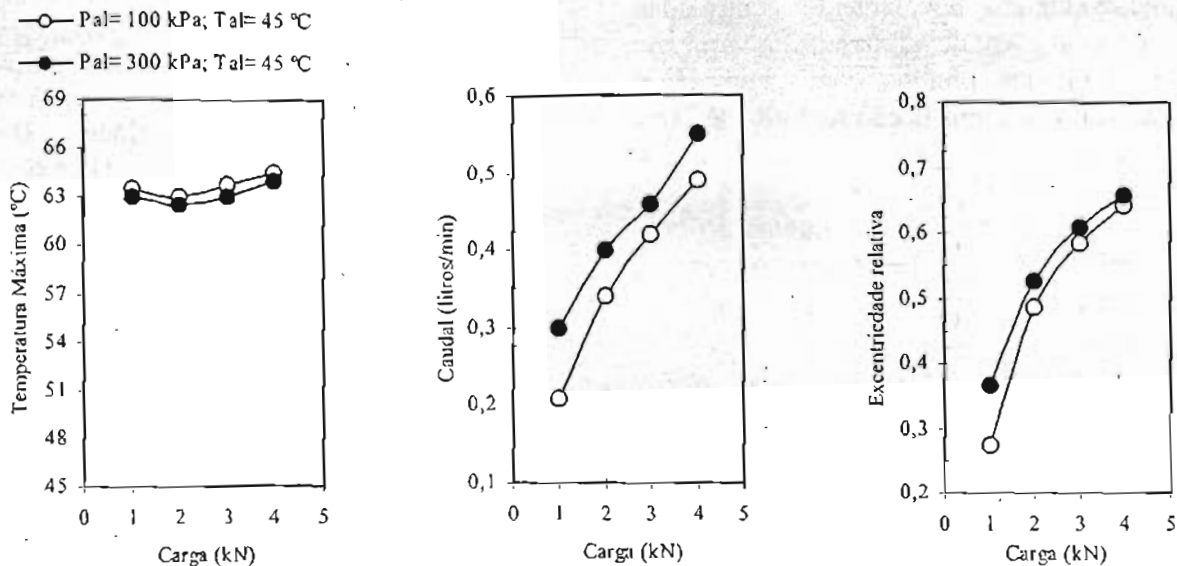


Fig. 8. Influência da pressão de alimentação na temperatura máxima do casquilho, no caudal e na excentricidade, para diferentes cargas (Chumaceira B, N= 4000 rpm)

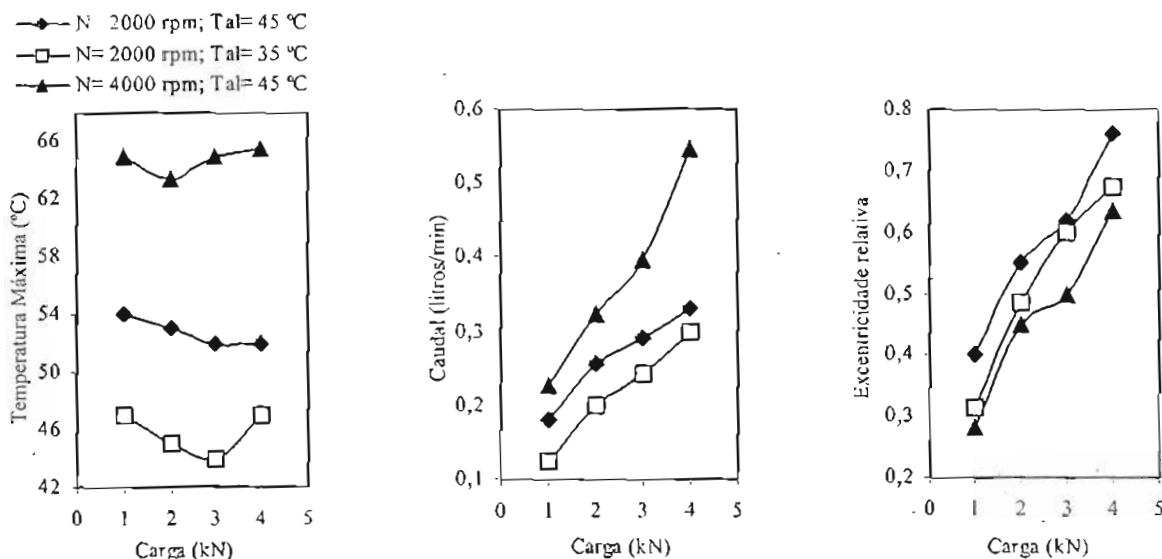


Fig. 9. Influência da temperatura de alimentação e da velocidade do veio na temperatura máxima do casquilho, no caudal e na excentricidade, para diferentes cargas (Chumaceira B, Pal= 100 kPa)

A influência da velocidade é também patente na Fig. 9. Pode observar-se que com o aumento da velocidade de 2000 rpm para 4000 rpm, os parâmetros de desempenho medidos variaram significativamente. A temperatura máxima e o caudal aumentaram, porque o incremento da velocidade origina um aumento da taxa de corte na película e um crescimento do efeito de arrastamento de óleo pelo veio. A excentricidade diminuiu consideravelmente com o incremento da

velocidade porque, não obstante o decréscimo da viscosidade, aquele incremento corresponde a um aumento da capacidade da chumaceira para suportar carga.

## 5. CONCLUSÕES

Com um dispositivo experimental dotado de instrumentação adequada à análise termohidrodinâmica de chumaceiras radiais, foram realizados testes laboratoriais para diferentes condições de

funcionamento, devidamente controladas, com condições de alimentação variáveis. Os resultados obtidos com chumaceiras com sulco de alimentação na linha de carga mostram que:

- i) A temperatura de alimentação tem influência significativa na temperatura máxima do casquilho, no caudal e na excentricidade.
- ii) A pressão de alimentação afecta significativamente o caudal e ligeiramente a temperatura máxima do casquilho, tendo uma influência moderada sobre a excentricidade, sobretudo a baixa carga específica.
- iii) Na chumaceira com um sulco de alimentação de comprimento igual a metade do comprimento da chumaceira, pode existir uma considerável variação da temperatura na direcção axial, na região imediatamente a jusante do sulco.

#### AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o apoio da *Fundação para a Ciência e a Tecnologia*, pela atribuição da bolsa de doutoramento PRAXIS XXI / BD / 13922/97.

#### REFERÊNCIAS

- ASME PTC 19.1, *Test Uncertainty-Instruments and Apparatus*, Supplement to ASME Performance Test Codes, The American Society Mechanical Engineers, New York, 1998.
- Claro J. C. P., *Reformulação do Método de Cálculo de Chumaceiras Radiais Hidrodinâmicas - Análise do Desempenho Considerando Condições de Alimentação*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Portugal, 1994.
- Costa L., Fillon M., Miranda A. S. and Claro, J. C. P., *An Experimental Investigation of the Effect of Groove Location and Supply Pressure on the THD Performance of a Steadily Loaded Journal Bearing*, ASME Journal of Tribology, Vol. 122, pp. 227-232, 2000a.
- Costa L., Miranda A. S., Claro J. C. P. and Fillon M., *Temperature, Flow and Eccentricity Measurements in a Journal Bearing With a Single Groove at 90° to the Load Line*, Proc. of 9th Nordic Symposium of Tribology, NORDTRIB 2000, Vol. 1, pp. 108-117, 2000b.
- Swanson E. E. and Kirk R. G., *Survey of Experimental Data for Fixed Geometry Hydrodynamic Journal Bearings*, ASME Journal of Tribology, Vol. 119, pp. 704-710, 1997.