

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NA ZONA DE VEDAÇÃO DE SELOS MECÂNICOS

Bruno Vinícius Toscano (apresentador)

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/PEM, Laboratório de Metrologia, Bloco I, 241.
e-mail: btoscano@webcpd.com.br

Eugênia Cruz da Trindade

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/PEM, Laboratório de Metrologia, Bloco I, 241.
e-mail: eugeniatrindade@bol.com.br

Paulo Roberto da Fonseca Santos

Divisão de Metrologia Térmica - INMETRO
e-mail: prsantos@inmetro.gov.br

Sylvio José Ribeiro Oliveira

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/PEM, Laboratório de Metrologia, Bloco I, 241.
e-mail: sjro@serv.com.ufrj.br

Resumo. Selos mecânicos são vedadores dinâmicos utilizados em máquinas rotativas, como bombas e compressores. Devido às suas condições geométricas, de duas superfícies planas e paralelas, torna-se difícil a formação de filme hidrodinâmico. O filme lubrificante que protege essas superfícies em deslizamento é muito fino, na ordem de $1\ \mu\text{m}$, enquanto a velocidade relativa pode atingir valores superiores a $10\ \text{m/s}$. Elevadas taxas de cisalhamento e o calor gerado pelo atrito entre as superfícies deslizantes influenciam no comportamento tribológico causando deterioração do lubrificante e falha nas superfícies envolvidas. Medir as temperaturas suportadas pelos fluidos na zona de vedação é muito importante para investigar as condições de operação dos lubrificantes. Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma metodologia experimental para medição da temperatura do filme lubrificante que separa as superfícies dos selos mecânicos. Os resultados obtidos indicam que as temperaturas no contato podem atingir valores superiores a 100°C . A metodologia desenvolvida mostrou-se bastante satisfatória para medir a temperatura local da película de óleo em contato com a face do selo.

Palavras Chave: Selos mecânicos, tribologia, temperatura.

1.INTRODUÇÃO

Selos mecânicos são elementos amplamente utilizados para realizar a vedação de fluido em máquinas rotativas tais como bombas, compressores e misturadores. São compostos basicamente de duas superfícies paralelas pressionadas uma contra a outra. Uma das superfícies gira solidária ao eixo, enquanto a outra é montada fixa, vide Fig. (1). Superfícies paralelas com movimento relativo no fluido lubrificante utilizado para separá-las, não têm capacidade para gerar pressão hidrodinâmica (Etsion *et al.* 2003).

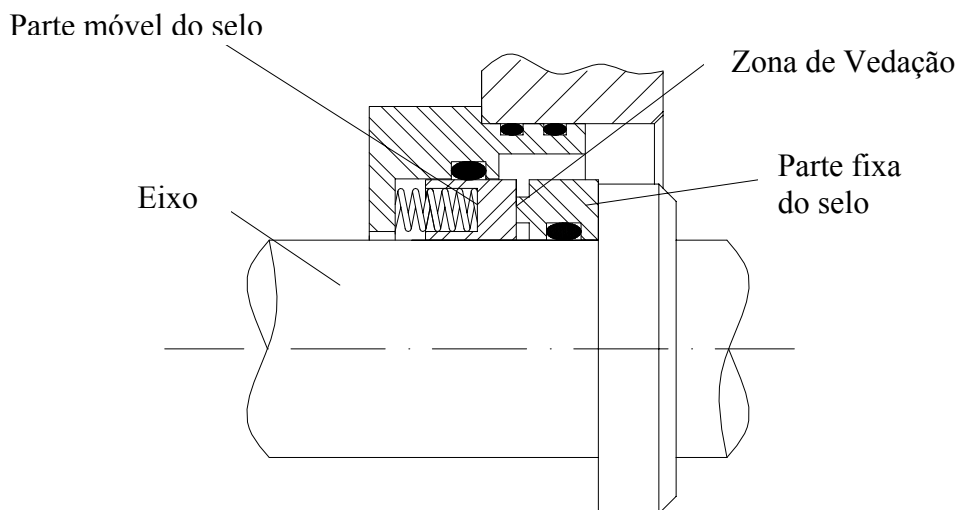


Figura 1. Partes do Selo Mecânico

As hipóteses de lubrificação mais aceitas para o caso de movimento relativo paralelo apontam para ou geração de pressão ao nível de rugosidades superficiais (Hamilton *et al.*, 1966), ou desvio do paralelismo por excentricidade ou ondulações superficiais (Lebeck, 1981). A pressão superficial entre as faces dos selos mecânicos gerada pela força de um elemento elástico, normalmente molas helicoidais, somada à pressão do fluido a ser vedado é fundamental para o mecanismo de vedação, porém quanto maior a pressão, maior é o atrito e o desgaste correlato. Deve-se procurar portanto, a combinação de pressão superficial e fluido lubrificante que possibilite um mecanismo de vedação e vida útil elevada.

Com a ação da pressão superficial e do momento de atrito causado pelo movimento relativo entre as faces forma-se uma fonte de geração de calor. Já que as condições de operação em muitas aplicações não são constantes, com pressões e velocidades de deslizamento variáveis, os selos mecânicos são submetidos a taxas de geração de calor variáveis.

A quantidade de calor gerada pela operação afeta as propriedades dos lubrificantes usados, causando variações na espessura do filme que separa as superfícies. Para um funcionamento adequado dos selos mecânicos, a distribuição de pressão do filme lubrificante é um fator fundamental e essa distribuição é muito dependente das deformações térmicas e mecânicas das faces dos selos (Harp *et al.*, 1998).

Embora o projeto dos selos mecânicos vem sendo melhorado ao longo dos anos, há ainda a necessidade de maior investigação sobre as condições de operação dos filmes lubrificantes. Portanto, um conhecimento mais preciso da temperatura do filme lubrificante na zona de lubrificação e vedação dos selos mecânicos fornecerá mais subsídios para a melhoria do projeto desses elementos.

2.MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NA ZONA DE VEDAÇÃO DE SELOS MECÂNICOS

Sensores de temperatura são transdutores que alteram uma ou mais de suas características físicas ao se equalizar com a temperatura a ser determinada. A maioria dos sensores se utiliza a transmissão de calor por contato, para assimilar a energia do meio. Ao se observar a Fig. (1), verifica-se que as limitações para a medição de temperatura em zona de vedação de selos mecânicos são a dificuldade de acesso e largura limitada da superfície de contato.

Além das duas limitações citadas, o sensor a ser utilizado deve satisfazer as seguintes características:

- 1) Impermeabilidade a óleo
- 2) Facilidade de instalação

- 3) Adaptabilidade
- 4) Resistência mecânica
- 5) Resistência à corrosão
- 6) Baixo custo.

Esse conjunto de exigências leva a escolha do termopar como o tipo de sensor de temperatura capaz de cumprir as exigências citadas e obter resultados confiáveis. Embora haja aproximadamente trezentos tipos diferentes de termopares identificados, somente poucos tipos, os que têm características mais favoráveis, são usados. Há oito tipos de termopares mais usados industrialmente.

Este projeto tinha algumas limitações tais como:

- Os fios deveriam ter, no máximo 0,2 mm de diâmetro;
- Os fios não poderiam conter ferro como material predominante e deveriam resistir à atmosfera oxidante;
- A faixa de temperatura de trabalho é de 0°C a 300°C;
- Poucos tipos de termopar disponíveis no mercado devido ao pequeno diâmetro dos fios.

3. CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR

A partir desses dados, o fio do termopar a ser usado seria do tipo K. A composição dos fios desse tipo de termopar é Cromel (Nickel-10% Cromo) - Alumel (Níquel-5% Alumínio, Silício). O método de calibração escolhido foi por comparação com um SPRT (termômetro padrão de resistência de platina) em um banho líquido, no caso sal. Esta calibração foi realizada no INMETRO em sua divisão de metrologia térmica (DITER). Para esta calibração alguns passos foram seguidos:

1. Exame da junção de medição.
2. Uma das extremidades do fio foi conectada a um fio de extensão de cobre e esta conexão foi mantida em um banho de gelo para assegurar que a junta fria estará com temperatura constante e igual a 0°C. O fio de cobre é instalado em um voltímetro.
3. Ajusta-se o forno para a temperatura desejada, lê-se 4 medidas intercaladas e seguidas no termopar e no SPRT. Calcula-se a média entre as quatro medidas tanto para o fio quanto para o SPRT. Este procedimento é repetido para cada temperatura escolhida (30°C, 33°C, 38°C, 40°C, 45°C, 46°C, 50°C, 60°C, 64°C, 65°C, 170°C, 200°C, 250°C, 300°C);
4. Durante a calibração, foram colhidas as quatro medidas mergulhadas a uma profundidade de 100 mm e 200 mm no forno para as temperaturas mais altas. A maior diferença das médias dessas medições é usada para o cálculo da incerteza de medição do fio.
5. As médias feitas com a profundidade de 200 mm são ajustadas pelo método dos mínimos quadrados, uma curva de diferenças em relação aos valores da **f.e.m** que está tabelada na Norma ASTM: E230-98. O polinômio achado é combinado com o polinômio desta Norma para gerar a curva de calibração particular do termopar.

A f.e.m. varia entre 0 a 12164 μV e a incerteza do fio foi obtida e vale $\pm 0,930$ °C. Essa incerteza está dentro da faixa desejada para o presente projeto.

4. DESCRIÇÃO DA BANCADA DE TESTES EM SELOS

O banco de testes de selos mecânicos, projetado e construído na UFRJ possibilita variar os parâmetros operacionais, com a finalidade de ser possível investigar a natureza de determinados fenômenos que ocorrem durante a utilização de selos, dentre eles o vazamento. O principal parâmetro operacional que é possível variar neste banco de provas é o índice PV, que com a utilização de um inversor de frequência é possível variar a rotação do motor e conseqüentemente o índice PV. A princípio o banco foi projetado para utilizar um selo com um diâmetro de 80mm,

porém, é previsto que possam ser ensaiados outros selos neste banco de testes, bastando para isso serem construídas novas peças intercambiáveis, de acordo com as dimensões do novo selo a ser ensaiado.

Verticalmente nesta estrutura é montado um motor que através de um acoplamento elástico aciona um eixo, que passa por dentro da câmara de testes para acionar o selo mecânico. Também é fixado na estrutura a mancalização da câmara de testes, ou seja, tanto o eixo quanto a câmara de testes são mancalizados independentemente na estrutura, possibilitando assim que a câmara de teste seja arrastada pelo atrito gerado nas faces dos selos. A Fig. (2) mostra este dispositivo.

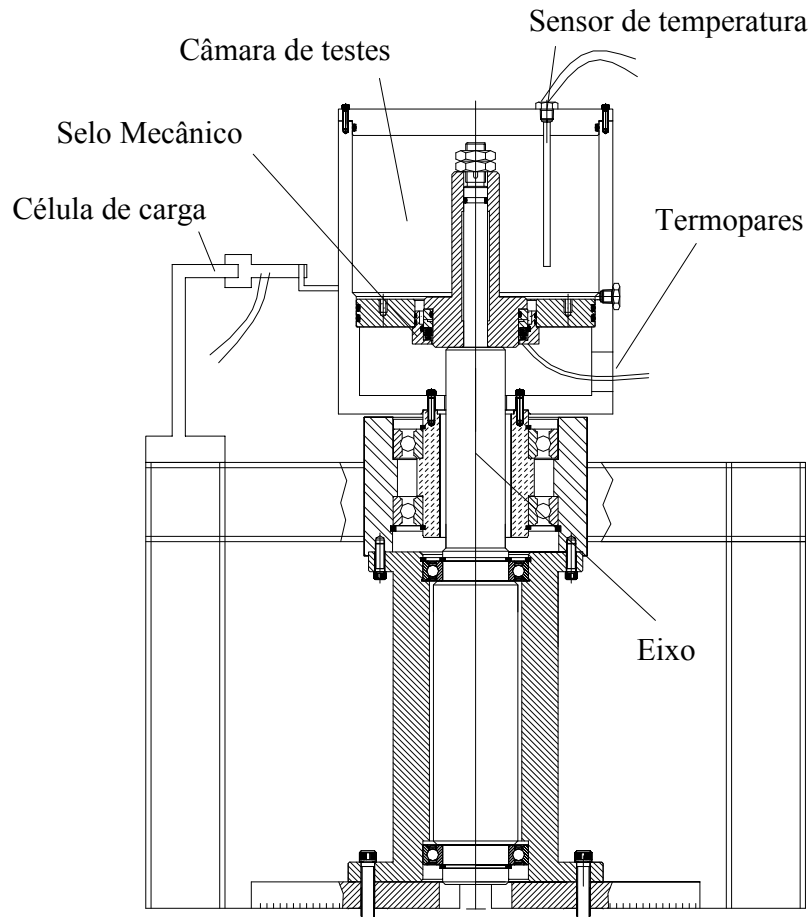


Figura 2. Mancalização

Através do momento de atrito é esperado que seja possível registrar o exato momento em que o selo venha a falhar, visto que variações no momento de atrito são devidas a modificações no filme de óleo. Estas modificações na condição de lubrificação geralmente estão ligadas a variações nos parâmetros operacionais da máquina, neste caso, um padrão de alteração no momento de atrito. Porém quando o filme de óleo rompe, a medição do momento de atrito acusa uma anormalidade, ou seja, registra um pico de momento sem variação dos parâmetros.

A Fig. (3) mostra o detalhe da montagem do selo, bem como a zona de vedação e o local onde são colocados os termopares.

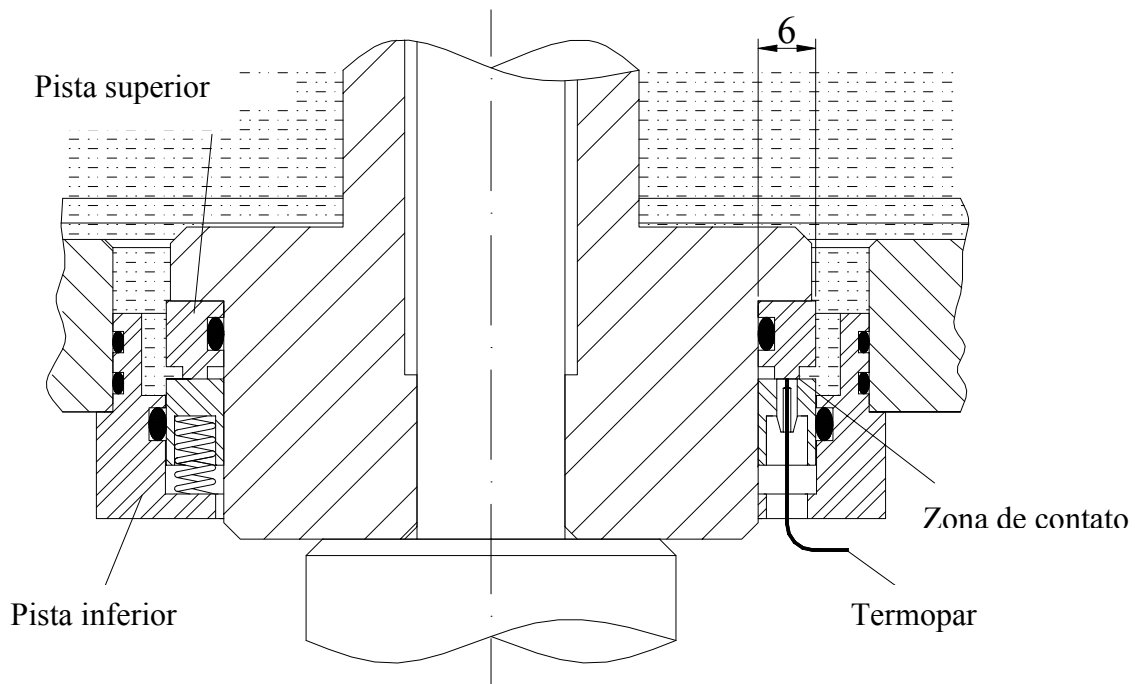


Figura 3. Detalhe do selo mecânico

O sistema de aquisição consiste em equipamentos para medição de cada grandeza. Estes equipamentos foram confeccionados a partir de placas eletrônicas específicas. Utiliza-se uma célula de carga, que utiliza dois strain-gages colados em uma viga que trabalha a flexão. O sinal da célula de carga é enviado a um amplificador HBM ME 30. A temperatura do banho é medida por um termoresistor PT 100 (IOPE). Seu sinal é amplificado por placas desenvolvidas na Universidade Técnica de Hamburgo-Harburgo. Os sinais da célula de carga e do termômetro de resistência são enviados após a amplificação para o registrador Yokogama LR 4100. O sinal de temperatura do termopar é enviado diretamente ao registrador que possui amplificador específico para esse tipo de sensor.

5. O PROJETO DO SELO MECÂNICO METÁLICO

A bancada de teste de selo mecânico usada no experimento foi projetada para inúmeras aplicações de selos mecânicos utilizando a combinação de material cerâmico (SiC) contra aço ou aço inoxidável. O uso de materiais cerâmicos é principalmente adequado quando as velocidades de deslizamento das superfícies são elevadas. Porém, devido às dificuldades de fabricação de materiais cerâmicos, optou-se pela utilização de anéis de aço inoxidável 304, que poderiam ser fabricados dentro das instalações da UFRJ.

Além disso, o principal objetivo do trabalho é o desenvolvimento de metodologia de medição de temperatura e esses anéis de Aço Inoxidável são perfeitamente adequados. Os termopares foram colocados na parte fixa do selo, por motivos óbvios. Como pode ser visto na Fig. (2), a parte fixa do selo tem três furos para que os termopares possam ser alocados. A escolha de três furos foi feita por precaução, a fim de um substituir o outro no caso de falha ou a destruição do sensor.

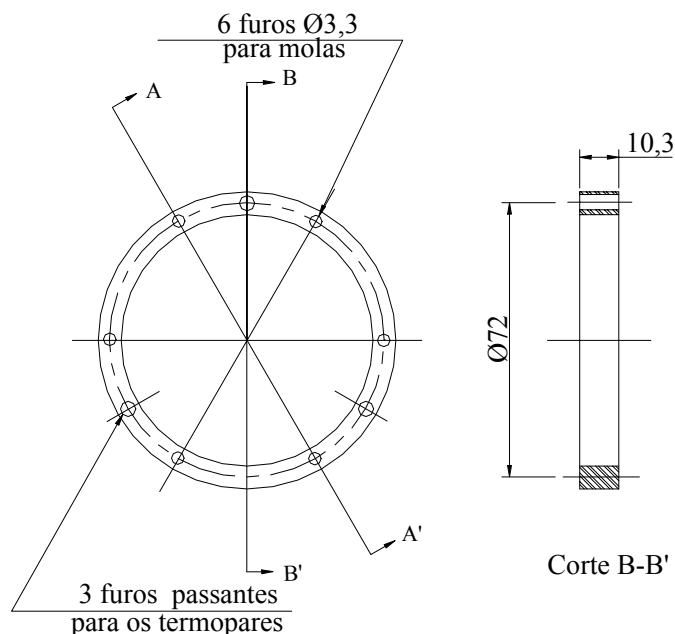


Figura 4. Vista superior e corte da parte móvel do selo

A fim de facilitar a colocação do termopar foi projetado um inserto no anel de teste. O inserto é feito do mesmo material da peça, tem a mesma altura da parte móvel do selo e 4,0 mm de diâmetro. Nele, o termopar é fixado com cola. O desenho do inserto pode ser visto abaixo:

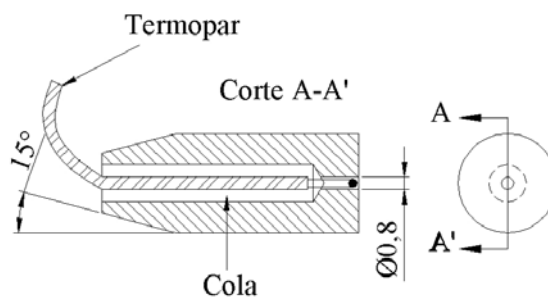


Figura 5. Desenho em corte do inserto

Durante a colocação do termopar no inserto, colocou-se a junta de medição o mais próximo possível da superfície que estará em contato com o óleo a fim de medir sua temperatura. Uma medida preventiva foi impedir que houvesse contato entre as paredes do inserto e a junta de medição, pois a união formada pelo metal do termopar com o metal da peça resultaria em um outro termopar mascarando, assim, a real temperatura do filme.

O termopar foi colado no inserto e este na peça, inicialmente, com cola LOCTITE 5920 Copper que serve para altas temperaturas, porém é muito elástica. Essa elasticidade da cola fez com que o inserto se deslocasse quando foram realizados os primeiros testes. Posteriormente, o inserto e o termopar foram colados com cola NHP EPOXY 30. Embora o fabricante não mencione a temperatura máxima que a cola pode chegar, ela mostrou resistência à temperatura acima de 100°C e durou por todo o teste. Houve problemas de vazamento de lubrificante através do furo de um dos inserts, o que indica uma necessidade de melhoria de dimensões e da cola/isolante usado. Apesar dessas dificuldades a metodologia mostrou-se promissora para a obtenção de resultados de medição de temperatura na zona de vedação.

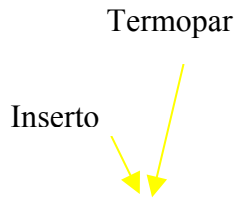


Figura 6. Parte fixa do selo mecânico

6. RESULTADOS OBTIDOS

A. Momento de Atrito

Os testes na bancada de selo mecânico foram feitos variando a rotação do motor da bancada a cada 15 minutos. As rotações usadas foram para velocidades de 1,0 m/s até 25,0 m/s, que correspondem respectivamente as faixas de rotações de 240 até 6000 rpm. Para cada rotação foram obtidas: a temperatura na zona de vedação, a temperatura do banho e o momento de atrito entre o selo e o óleo. A Fig. (7) mostra o momento de atrito e a potência dissipada para algumas rotações:

Pode-se observar que o momento de atrito mantém-se constante, enquanto a potência dissipada, aumenta. As superfícies metálicas apresentaram desgaste em poucas horas de operação o que causou vazamento do óleo através da zona de vedação. O positivo desse fato é que pode-se considerar que o atrito gerado é basicamente oriundo do cisalhamento do fluido lubrificante e a temperatura medida é a temperatura do filme lubrificante da zona de vedação.

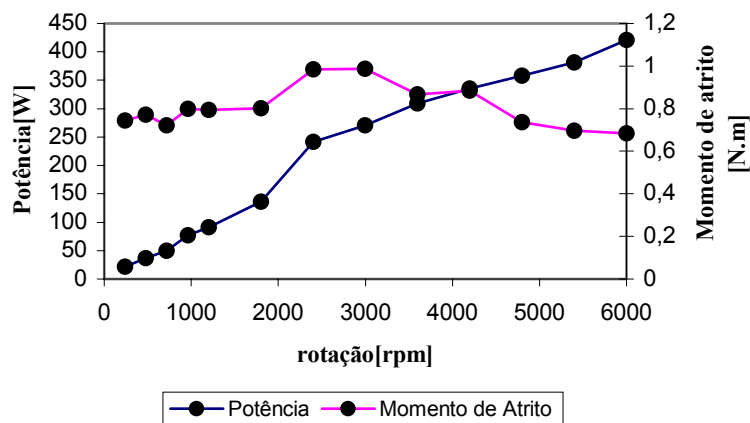


Figura 7. Momento de atrito[N.m] e Potência dissipada[W] Versus rotação [rpm]

B. Temperaturas no banho e zona de vedação

Foram medidas as temperaturas do óleo ao variar a velocidade do motor como explicado no item anterior. O termopar estudado está marcando a temperatura na zona de lubrificação do selo mecânico e um termo-resistor foi usado para obter a medida do banho de óleo.

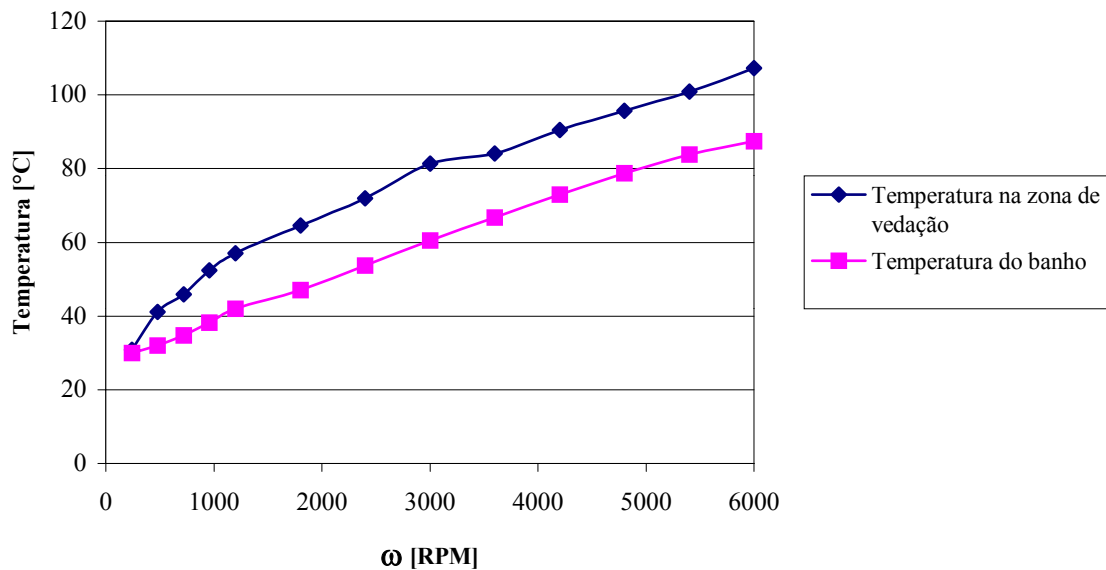


Figura 8. T[°C] X rotação[rpm] temperatura do termopar e do banho

Pode-se perceber que com o aumento do momento de atrito, houve também o acréscimo nas duas temperaturas medidas durante o teste. Existe uma constante diferença entre as temperaturas, de cerca de 15°C a partir de 480 rpm.

C. Espessura da película de óleo

A película de óleo é formada entre as partes móvel e fixa do selo mecânico, considerando o atrito de origem no fluido usado. Seu cálculo é feito levando em conta o momento de atrito médio em cada rotação, a temperatura média do óleo em cada rotação, as propriedades do óleo, as dimensões do selo e sua velocidade tangencial. As fórmulas usadas estão escritas abaixo:

$$\tau = \frac{\mu \times v}{h} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Considerando

$$A \approx 2\pi r b \quad (2)$$

E sabendo-se que

$$T = F \times r \quad (3)$$

Avalia-se a espessura do filme como:

$$h = \frac{2\pi r^2 b v \mu}{T} \quad (4)$$

onde:

h: espessura do filme [m]

μ: viscosidade [Pa.s]

v: velocidade tangencial do selo mecânico [m/s]

T: momento de atrito [N.m]
b: largura do contato [m]
r: raio da circunferência do cilindro [m]

Foram considerados para esse cálculo a largura de contato (b) com 6 mm, o raio de circunferência (r) com 33 mm e o óleo utilizado foi o Petrobrás Lubrax Gold cujas características são: Grau API 80W90 e a viscosidade medida é 134,7 cSt para 40°C e 14,4 cSt para 100°C. Com esses valores foram feitas interpolações para achar as viscosidades do óleo nas temperaturas medidas durante o teste.

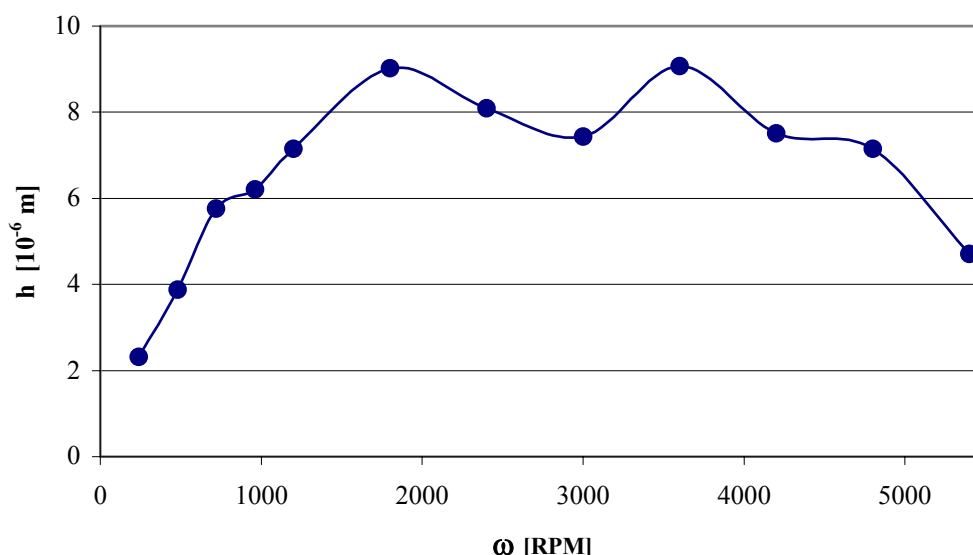


Figura 9. Espessura da película de óleo pela rotação

Na Fig. (9), pode-se perceber que houve uma instabilidade na espessura da película de óleo. Com o aumento da rotação, após alcançar a velocidade de 4000 rpm, a espessura do filme diminui, como se espera. A causa disso é o aumento de temperatura e tem como consequência o atrito entre as partes, a viscosidade do óleo diminui, o que prejudica a lubrificação e consequentemente maior desgaste.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia experimental para a medição de temperatura da película de filme formada entre as faces de selagem. Foram utilizados os recursos de dois laboratórios: no INMETRO a sua divisão de metrologia térmica (DITER) e na UFRJ, o Laboratório de Metrologia no CT, que possui uma bancada de selo mecânico.

Apesar de não terem sido feitas análises mais detalhadas, os resultados obtidos mostram que existe consistência e repetibilidade nos valores das temperaturas medidas, tornando-se assim um elemento importante na avaliação tribológica no contato dos dois discos do selo.

Apesar de não haver um controle de carga que ainda será desenvolvido, a combinação de momento de atrito com a temperatura possibilita a avaliação de espessura do filme, que nos ensaios mostrou valores abaixo de $10 \mu\text{m}$. Pode-se perceber um aumento na espessura de filme para valores de rotação até 1000 rpm até uma estabilização da mesma entre 1000 a 4000 rpm. Para valores maiores que 4000 rpm, observou-se uma diminuição na espessura do filme, devido a perda de viscosidade do óleo devido a altas temperaturas alcançadas.

Após vários ensaios o sensor de temperatura manteve-se intacto e a metodologia mostrou-se viável para a obtenção de resultados experimentais relativos à temperatura de lubrificantes na zona de contato.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido pelo CENPES/PETROBRAS e FAPERJ, que possibilitou a realização do trabalho.

9.REFERÊNCIAS

- Etsion, I., Halperin, G., 2003, "A Laser surface textured hydrostatic mechanical seal", Sealing Technology, Vol. 2003, Issue 3, pp. 6-10.
- Farias, D.F., 2003, "Projeto de uma Bancada de Testes de selos Mecânicos"; Projeto Final, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Hamilton, D.B., Walowit, J.A., Allen, C.M., 1966, "A Theory of Lubrication by Micro-irregularities"; Journal of Basic Engineering, Vol. Março 1966, pp. 177-185.
- Harp, S.R., Salant, R.F., 1998, "Analysis of Mechanical Seal Behavior During Transient Operation", Journal of Tribology, Vol. 120, pp. 191-197.
- Kennedy, F.E., Frusescu, D., Jiaying, L., 1997, "Thin Film Thermocouple Arrays for Sliding Surface Temperature Measurement"; Wear, Vol. 207, pp. 46-54.
- Lebeck, A.O., 1981, "Hydrodynamic Lubrication in Wavy Contacting Face Seals - A Two Dimensional Model"; Transactions of the ASME, vol. 103, pp. 37-46.

DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE MEASUREMENT METHOD ON THE SEALING ZONE OF MECHANICAL SEALS

Bruno Vinícius Toscano

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/PEM, Metrology Laboratory, I-241.
e-mail: btoscano@webcpd.com.br

Eugênia Cruz da Trindade

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/PEM, Metrology Laboratory, I-241.
e-mail: eugeniatrindade@bol.com.br

Paulo Roberto da Fonseca Santos

Divisão de Metrologia Térmica – INMETRO, e-mail: prsantos@inmetro.gov.br

Sylvio José Ribeiro Oliveira

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/PEM, Metrology Laboratory, I-241.
e-mail: sjro@serv.com.ufrj.br

Abstract. *Mechanical seals are dynamic sealants in rotating machines, as pumps and compressors. Due to its geometric conditions, two parallel surfaces, the formation of hydrodynamic film becomes difficult. The lubricant films that protect these sliding surfaces are very thin, in the order of 1 μm while the final speed can reach superior values as 10m/s. High shear rates and the heat generation for the friction between the sliding surfaces influences in the tribological behavior causing deterioration of the lubricant and fails in the involved surfaces. Measurement of the temperatures supported for fluids in the sealing zone is very important to investigate the deterioration of the lubricant. This work describes the development of an experimental methodology for measurement of the temperature of the lubricant film that separates the surfaces of the mechanical seals. The results indicate that the temperatures in the contact can reach superior values as 100°C. The developed methodology revealed sufficiently satisfaction to measure the local temperature of the oil film in contact with the face of the seal.*

Keywords: *Mechanical seals, tribology, temperature.*