

AVALIAÇÃO DO DESGASTE POR FADIGA DE CONTATO DE MANCAIS AXIAIS LUBRIFICADOS¹

*Leonardo Augusto Moreira Dourado²
Clarissa Danielle Mendonça de Oliveira³
Marcelo Renney Alves de Freitas⁴
Ricardo Cumino⁵
João Telésforo Nóbrega de Medeiros⁶*

Resumo

Investigou-se o desgaste de mancais de rolamento axiais 51100, lubrificados, nacionais e chineses, associando-o à sua dissipação térmica, à sua energia elástica de vibração mecânica e acústica durante ensaios tribológicos acelerados em bancada de laboratório. Os corpos-de-prova foram adquiridos comercialmente e submetidos à carga normal de 450 ± 5 N e à rotação de 3.100 ± 30 RPM, estabelecidos após ensaios-piloto. Registraram-se as temperaturas [K] na zona a 3 mm do contato e a ambiente, a potência elétrica [W] demandada pelo motor, a velocidade de vibração global do sistema [mm/s] e o nível de pressão sonora NPS[dB]. As pistas, após ensaios de 10^6 ciclos, foram analisadas por Microscopia Óptica. Os rolamentos axiais chineses, de custo inferior aos nacionais, apresentaram respostas distintas em relação às dos nacionais. As assinaturas e a morfologia dos danos após os ensaios foram analisadas, enfatizando-se flutuações nas assinaturas do aquecimento das pistas, na vibração, na potência e no NPS.

Palavras-chave: Tribologia; Fadiga de contato; Lubrificação; Mecanismos de dano.

CONTACT FATIGUE WEAR OF THRUST ROLLING BEARINGS

Abstract

The wear of Chinese and Brazilian thrust 51100 rolling bearings were investigated and their dissipative responses in a bench test rig were associated to their heating, elastic energy of mechanical vibration and sound pressure level [dB]. The samples were commercially acquired and submitted to a normal load of 450 ± 5 N and 3100 ± 30 RPM, determined after the screening tests. Four variables were measured: temperature [K], electrical power [W], global velocity vibration [mm/s] and sound pressure level [dB]. After 10^6 cycles, the tracks were analyzed by optical microscopy. The cheaper Chinese rolling bearings showed different responses in relation to the Brazilian thrust bearings. The signal of the signatures and the damage morphology are presented and discussed.

Keywords: Tribology; Contact fatigue; Lubrication; Mechanisms of damage.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Graduando em Engenharia Mecânica da UFRN.*

³ *Graduanda em Engenharia dos Materiais da UFRN.*

⁴ *Mestrando do PPGEM da UFRN.*

⁵ *Mestre Eng. Rolamentos INA – São Paulo – SP – Brasil.*

⁶ *Professor do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica da UFRN – medeirosj2@asme.org*

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico de novos materiais, com maiores resistências às mais diversas solicitações está em plena evidência em vários ramos da pesquisa científica. A utilização das ligas metálicas, materiais poliméricos, as blendas, as cerâmicas, os compósitos, materiais desenvolvidos com auxílio da nanotecnologia, materiais a partir do plasma funcionalmente graduados leva-nos a diversas possibilidades no que diz respeito ao desenvolvimento e seleção do melhor material para uma determinada aplicação. Entretanto, alguns materiais de componentes mecânicos comercialmente adquiridos a baixo custo, na maioria das vezes, ainda possuem uma dispersão indesejável em algumas propriedades mecânicas, comprometendo a sua resposta funcional a solicitações severas, induzindo-os a danos prematuros.

Em vista disto, o presente trabalho se propõe a investigar o desempenho de mancais axiais nacionais e importados, face às diversas formas de dissipação de energia que caracterizam um sistema tribológico, onde algumas de suas irreversibilidades foram monitoradas e analisadas, associando-as com os possíveis danos gerados por fadiga de contato inerente ao sistema.

O fenômeno da fadiga de contato reduz a vida útil dos materiais utilizados e é definido como sendo um mecanismo de dano decorrente de carregamentos cíclicos atuantes no campo de tensões da zona de contato de Hertz, segundo Medeiros,⁽¹⁾ e se evidenciando na superfície e/ou subsuperfície do material, com o aparecimento de transformações ou danos na sua microestrutura, ao longo da vida em serviço.

Para se estudar esse fenômeno, faz-se necessária uma discussão sobre os mecanismos de dano gerados na superfície e na subsuperfície. Medeiros,⁽¹⁾ citando Tallian,⁽²⁾ apud Dumont,⁽³⁾ afirma que uma das evidências da fadiga de contato é a presença de danos, tais como, “lascamento” e “microlascamento”, que surgem a partir da nucleação e propagação de trincas no campo da zona de tensões hertzianas, promovendo trincas subsuperficiais e/ou o crateramento da superfície. No microlascamento, a ordem de grandeza é similar à do perfil de rugosidade superficial, além de apresentar uma superfície lustrosa.

Medeiros,⁽¹⁾ citando Nélias et al.⁽⁴⁾ diz que, o principal mecanismo de fadiga de contato em aços de rolamento advém do surgimento e propagação de microtrincas iniciada na subsuperfície hertziana em torno de inclusões, sejam de óxidos, as mais severas, ou de carbonetos ou nitretos, sob o efeito de incompatibilidades entre a sua deformação e a da matriz martensítica.

Uma condição de extrema relevância em contatos lubrificadas é a presença de um filme lubrificante, a cujas falhas se associam inevitáveis danos às superfícies em contato e respectivas subsuperfícies, durante o movimento relativo entre os corpos sólidos. O desgaste por fadiga de contato pode ocorrer mesmo que as superfícies sejam separadas completamente por uma película de lubrificante, como acontece em rolamentos e engrenagens. Neste tipo de componentes, embora não ocorra contato direto entre os sólidos, as superfícies estão sujeitas a tensões cíclicas extremamente elevadas, transmitidas através da película lubrificante. A consequência da falha do filme lubrificante é o desgaste severo.^(5,6)

Para a análise dos danos superficiais e sub-superficiais das pistas de rolamentos, na área de contato, faz-se necessário o uso de técnicas tais como: microscopia óptica, que fornece imagens de até 1000X de aumento e também a microscopia eletrônica de varredura (MEV), que possibilita a visualização da

morfologia da estrutura superficial em até 100.000X outra técnica é o EDS, que fornece uma análise química qualitativa em uma microregião.

A análise por monitoramento das irreversibilidades do sistema tribológico, tendo como ponto de partida as assinaturas ou medidas das energias dissipadas na forma de calor, energia elétrica consumida pelo motor, energia elástica de vibração e nível de pressão sonora (NPS), geradas pelas partes em contato.

Medeiros,⁽¹⁾ citando vários autores, mostra o quanto é complexa a formalização de uma teoria geral que associe ao ambiente a dissipação de energia nos pequenos movimentos entre duas superfícies em contato cíclico, suas geometrias absoluta e relativa, a alternância do sentido e a flutuação do módulo da força tangencial, as propriedades elásticas e o limite de escoamento dos materiais.

Entretanto, é possível se fazer análises indiretas através do monitoramento de parâmetros, tais como: potência elétrica consumida pelo sistema, a dissipação da energia em forma de calor, pela diferença de temperatura do contato e ambiente, a energia elástica de vibração e o nível de pressão sonora. Com esses parâmetros, obtidos sem a necessidade de parada do processo, tem-se medidas indiretas das flutuações do atrito e do desgaste do sistema tribológico, podendo-se inferir uma tendência do seu comportamento e da sua vida residual.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, apresentam-se os resultados de ensaios tribológicos lubrificados, onde se utilizaram corpos-de-prova constituídos por mancais de rolamento axiais de duas marcas distintas, sendo uma nacional e a outra importada, modelo 51100 e tomaram-se como parâmetros de avaliação funcional o consumo de energia elétrica, a dissipação de energias na forma de calor, ruído e vibração. Após parada do sistema, foram executadas medidas de rugosidade superficial, perda de massa e obtenção de imagens de microscopia óptica para avaliação do status quo da vida das pistas segundo os danos ocorridos nas superfícies de contato.

Para se intensificar a pressão de contato de Hertz e efetuar ensaios acelerados, introduziram-se modificações na forma convencional de uso desses mancais, tais como: diminuição do número de esferas, de 9 para apenas 3, e inversão da pista inferior, de forma que a esfera ficasse em contato com uma superfície plana, caracterizando um contato não-conforme (Figura 1), de forma a gerar possíveis danos superficiais mensuráveis.

Esses mancais são compostos por um componente (A) (pista superior) com diâmetro externo de $24,0 \pm 0,01$ mm e diâmetro interno de $11,0 \pm 0,01$ mm, o componente (B) (gaiola com esferas) composto por três esferas de diâmetro de $4,76 \pm 0,01$ mm, e o componente (C) (pista inferior) com um diâmetro externo de $24,0 \pm 0,01$ mm e diâmetro interno de $10,0 \pm 0,01$ mm. Na pista inferior, que foi analisada no presente trabalho, foram feitas medidas de dureza Rockwell C.

A pista do mancal nacional apresentou dureza de 61 ± 1 HRC e a do importado 63 ± 1 HRC. Os componentes em movimento relativo foram ensaiados em banho de óleo que, associado a outros fatores como a morfologia do dano, a viscosidade do lubrificante e a carga normal aplicada, conferissem ao sistema um filme lubrificante em regime de lubrificação hidrodinâmico e/ou elasto-hidrodinâmico.

Na preparação das peças para os ensaios, foram realizados banhos de ultrassom em álcool isopropílico, durante 10 min, e secagem com ar quente, em seguida foi feita pesagem, microscopia óptica e medidas de rugosidade em quatro pontos distintos na direção radial das pistas, apresentadas na Figura 5 e Tabelas 1 e 2. O

mesmo procedimento foi adotado após cada um dos ensaios para que pudesse ser feita a análise dos danos nas superfícies e avaliada a perda mássica. Para o referido estudo, foram feitos um ensaio e uma repetição para cada fabricante, com as mesmas condições e parâmetros.

Utilizou-se um óleo lubrificante para contatos não-conformes com viscosidade de 327 cSt a 40°C e 24,9 cSt a 100°C e índice de viscosidade de 99.

O aparato experimental usou uma furadeira de bancada adaptada com possibilidade de cinco velocidades e com motor de potência 1/3 de CV (245 W). Os ensaios foram realizados com velocidade de rotação de 3100 ± 30 RPM e uma carga normal de 450 ± 5 N. Foram inseridos no aparato sensores de medição e seus respectivos sistemas de processamento de sinais e um computador para armazenamentos dos dados. Através desses sensores, foi viabilizado o mapeamento das irreversibilidades do sistema tribológico, como estudado por Medeiros,⁽¹⁾. Com um alicate amperimétrico, foi possível coletar dados de potência elétrica [W] consumida pelo motor, com uma taxa de aquisição de 0,7 Hz. Para o registro do NPS [dB], o nível de pressão sonora foi usado um decibelímetro, onde foram coletados sinais em janelas de aquisição de dados com duração de 4 minutos a uma taxa de 1 Hz, repetidos a cada 30 minutos. As temperaturas próximas ao contato e ambiente foram registradas com a utilização de termopares tipo “J”, com taxa de aquisição de 0,5 Hz. A velocidade global de vibração foi monitorada com o auxílio de um Medidor de Vibração portátil e um acelerômetro, com uma aquisição de 1 ponto a cada 10 minutos. Todos esses sensores tinham interface ao computador, à exceção da velocidade global de vibração. A instrumentação da bancada pode ser visualizada na Figura 2.

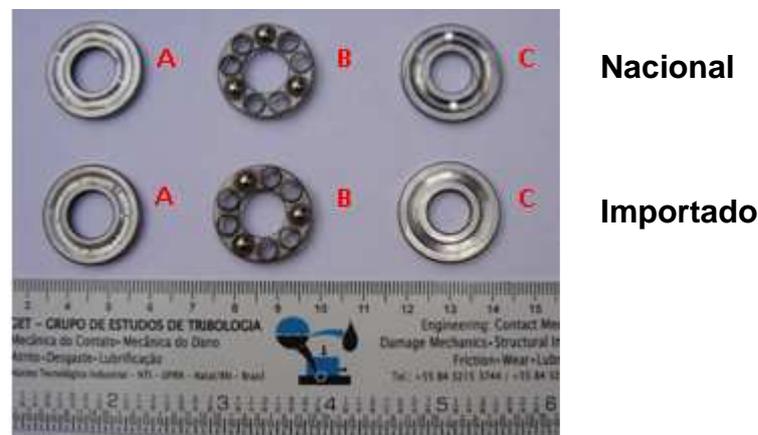


Figura 1. Componentes dos mancais axiais, (A) Pista Superior, (B) Gaiola de Esferas e (C) Pista Inferior.

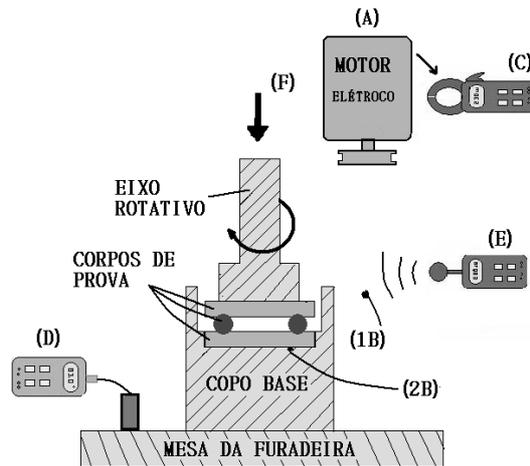


Figura 2 Desenho esquemático do ensaio: (A) Furadeira, (B) Termopares, (C) Medidor de Potência, (D) Medidor de Vibração, (E) Decibelímetro, (F) Carga Normal.

3 RESULTADOS

Os gráficos a seguir são referentes aos dados obtidos através dos aparelhos de monitoramento das irreversibilidades do sistema através de quatro parâmetros observados neste artigo: potência elétrica, ruído, velocidade global de vibração e aquecimento do sistema tribológico.

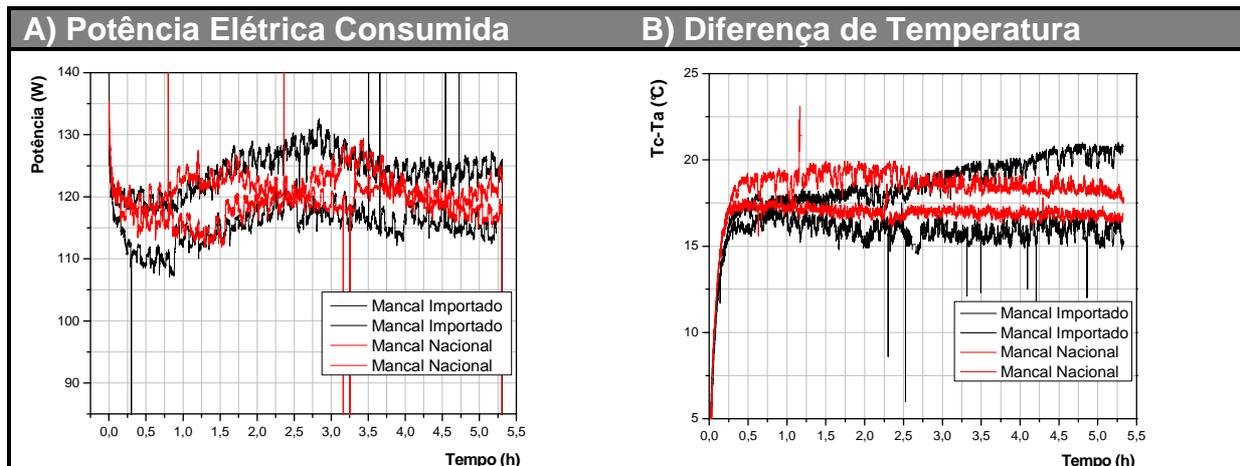


Figura 3 – Gráficos da potência elétrica consumida e diferença de temperatura.

A Figura 3 apresenta os gráficos de potência elétrica consumida pelo motor (A) e a energia térmica dissipada pelo sistema através da diferença das temperaturas próximo ao contato e ambiente (B). As curvas em vermelho são referentes aos mancais nacionais e as curvas em preto são referentes aos mancais importados. Em todas as curvas, tanto nos gráficos de (A) quanto de (B) da figura 3, já antes da meia hora de ensaio, fica evidenciado uma tendência do comportamento das curvas entrarem em regime. Entretanto, logo em seguida, percebe-se uma nova mudança de tendência, mais visível nos gráficos de potência. No gráfico (A), percebe-se que as curvas dos ensaios com os mancais importados, curvas em preto, apresentaram um maior distanciamento entre si, do que as curvas dos ensaios com os mancais nacionais, curvas em vermelho. No gráfico (B) também se verifica um distanciamento entre as repetições dos ensaios com os mancais

importados, curvas em preto, em relação às repetições dos ensaios com os mancais nacionais, curvas em vermelho. Fica também evidenciado que a partir de duas horas de ensaio, em uma das curvas dos ensaios com os importados [figura 3 (B)], há um aumento da diferença de temperatura, tendendo a estabilizar apenas no final do ensaio.

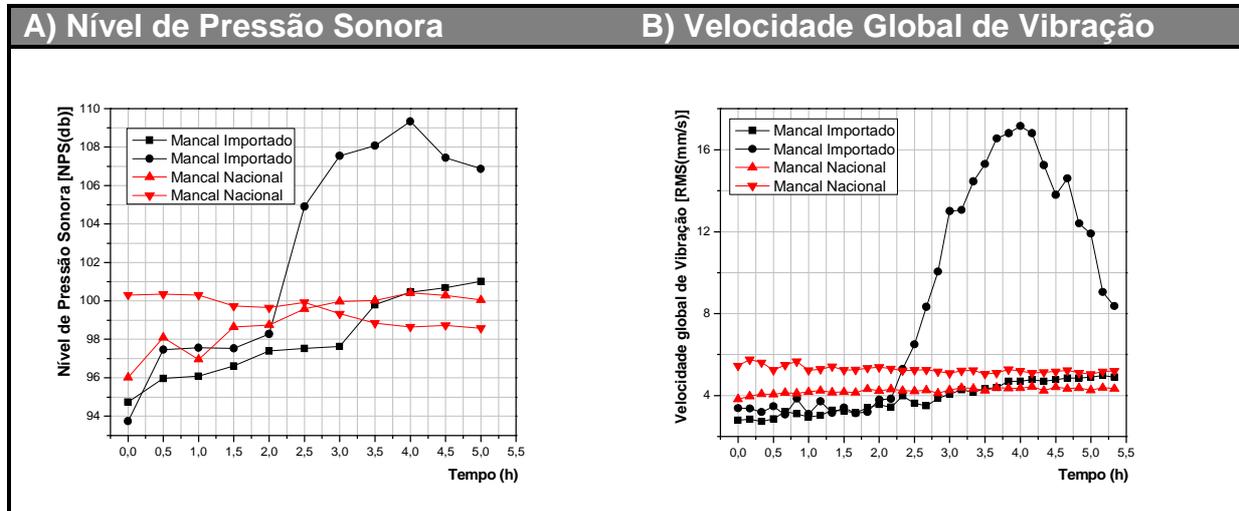


Figura 4 – Gráficos do Nível de Pressão Sonora e Velocidade Global de Vibração.

Na Figura 4 têm-se os gráficos (A) de Nível de Pressão Sonora e (B) Velocidade Global de Vibração. Onde se verifica uma grande disparidade entre as curvas dos ensaios com os mancais importados, curvas em preto, quando a partir da segunda hora de ensaio, em uma das curvas há um aumento brusco, tanto em (A) como em (B). Já nos gráficos com os mancais nacionais, curvas vermelho, mais uma vez, percebe-se que há uma proximidade entre as curvas, corroborando com os gráficos de potência elétrica consumida e de diferença de temperatura.

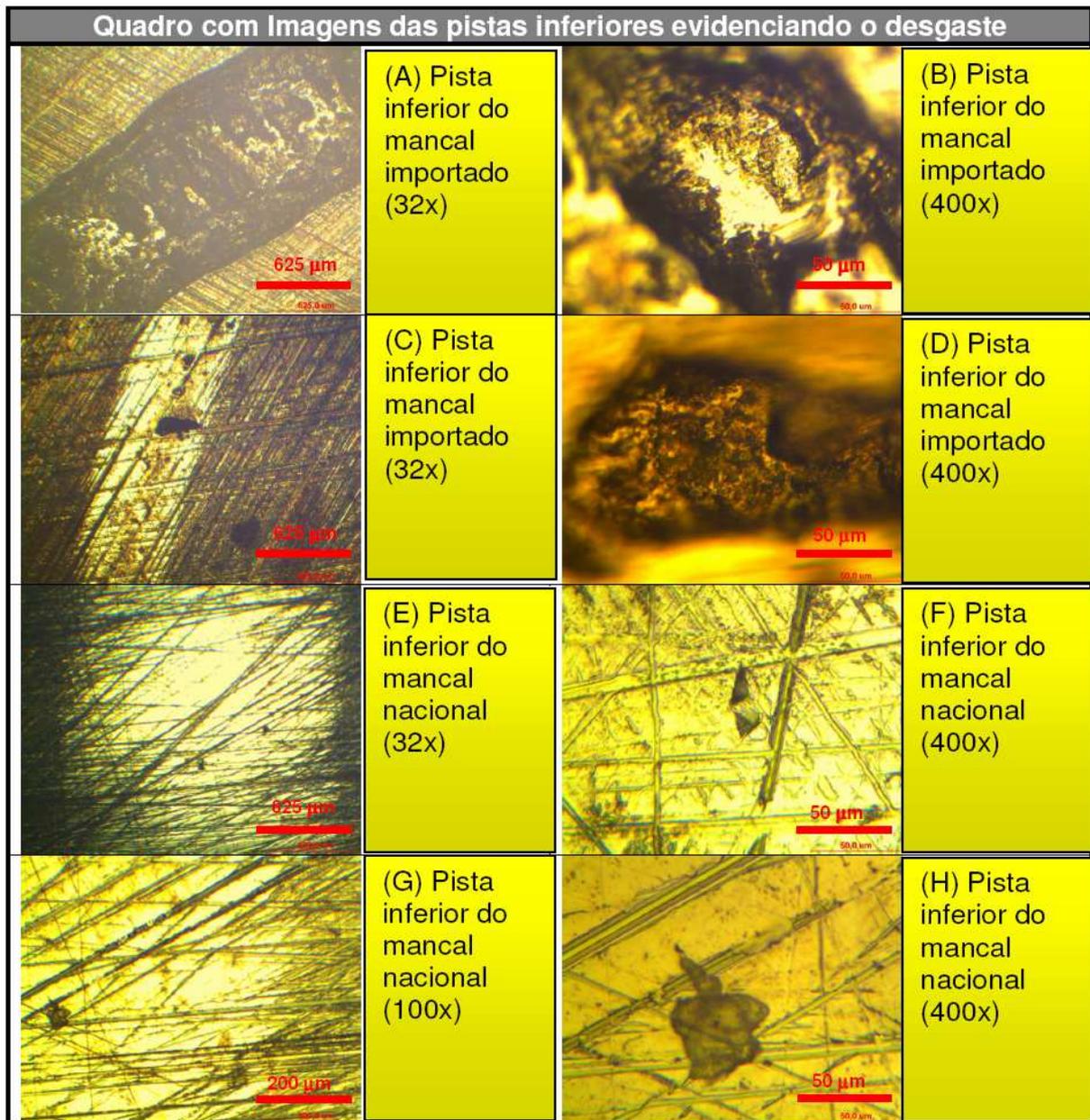


Figura 5 Imagens de microscopia óptica das pistas inferiores de ambos os mancais ensaiados.

Na Figura 5, as imagens (A), (B), (C) e (D) se referem aos ensaios com o mancal importado. Onde, visivelmente percebe-se uma grande diferença no modo de desgaste de um ensaio para o outro. Na imagem (A) e (B) percebe-se o surgimento de danos na superfície de forma bastante acentuada, ou seja, é visível o crateramento da superfície. Enquanto que na imagem (C) e (D) que se trata de outro ensaio, mas nas mesmas condições (repetição), verifica-se também a ocorrência de danos a superfície, mas de forma menos acentuada, tais danos são da ordem de 100 μm . Nas imagens (E), (F), (G) e (H) são evidenciados os danos dos mancais nacionais. Onde se verifica uma superfície lustrosa e microcrateras da ordem de grandeza de 10 μm .

Tabela 1 – Rugosidades das pistas inferiores dos mancais

	IMPORTADO	IMPORTADO	NACIONAIS	NACIONAIS
Antes [(Ra) μm]	0,465	0,433	0,120	0,158
Depois [(Ra) μm]	0,667	0,434	0,141	0,191
Variação (%)	43,441	0,231	17,500	20,886

Na Tabela 1 são apresentadas as medidas de rugosidades antes e depois dos ensaios e suas respectivas variações, em porcentagens. Em todas as pistas ocorreram aumento da rugosidade média (Ra), com destaque para uma das pistas dos mancais importados, onde, além de possuir rugosidade inicial maior, apresentou a maior variação após o ensaio.

Tabela 2 – Perda mássica das pistas inferiores dos mancais ensaiados

	IMPORTADO	IMPORTADO	NACIONAIS	NACIONAIS
Antes (g)	6,7473	6,6972	6,8680	6,8870
Depois (g)	6,7394	6,6967	6,8676	6,8869
Variação (mg)	7,9	0,5	0,4	0,1

A Tabela 2 mostra as variações da perda mássica, em miligramas, das pistas inferiores. Onde fica evidenciado que as maiores perdas ocorreram nas pistas dos mancais importados. E ainda observou-se que, enquanto nos ensaios com mancais nacionais a perda mássica estava na mesma ordem de grandeza, com os importados houve uma discrepância nos resultados.

4 DISCUSSÃO

Os gráficos de diferença de temperatura (Figura 3 (B)), nível de pressão sonora (Figura 4 (A)) e velocidade global de vibração (Figura 4 (B)) nos fornecem dados das energias dissipadas pelo sistema. Através desses dados, associados às informações da potência elétrica consumida pelo motor (Figura 3 (A)), pode-se monitorar e analisar as irreversibilidades do sistema tribológico, confrontando-as com os possíveis danos gerados por fadiga de contato inerente ao sistema descrito por Medeiros.⁽¹⁾

Partindo-se dessa premissa, verifica-se que nos gráficos da figura 3, ocorre uma tendência à estabilização do sinal, ou seja, indicação de que o sistema está entrando em regime, caracterizando o final do período do *running-in*.⁽⁷⁾ Os ensaios com os mancais nacionais, em (A), apresentaram respostas do consumo da potência elétrica consumida, próximas, ou seja, consumo de energia equivalente entre as repetições, sinalizando uma melhor repetitividade do seu funcionamento durante os ensaios. Já as curvas dos ensaios com os rolamentos importados evidenciaram uma diferença média de 7,5% entre as repetições. Este comportamento pode ser observado nos gráficos de diferença de temperatura (Figura 3 (B)), e também nos gráficos da Figura 4. No gráfico da diferença de temperatura (Figura 3 (B)), nas curvas em preto, observou-se uma diferença média de 17% entre as repetições, enquanto que, nas curvas em vermelho, a diferença foi de 9%. Nos gráficos da Figura 4, percebe-se claramente a discrepância das curvas em preto, principalmente a partir da segunda hora de ensaio (cerca de 370.000 rotações).

Confrontando-se os dados acima detalhados com as imagens de microscopia óptica, pode-se dizer que há respostas diferenciadas, no que dizem respeito às energias dissipadas por cada mancal, gerando danos diferenciados nas superfícies dos mesmos.

Na Figura 5, as imagens (A), (B), (C) e (D) referentes aos ensaios com os mancais importados, evidenciam uma grande diferença no modo de desgaste de um ensaio para o outro, confirmando as respostas da dissipação de energia analisadas. Nas duas primeiras imagens (Figuras 5 (A) e (B) percebe-se, com nitidez a morfologia do desgaste severo, onde é visível o crateramento acentuado da superfície, referendado (I) pela perda mássica de 7,9 mg, a maior perda, e (II) pelos picos nas curvas em preto dos gráficos da Figura 4.

Hutchings⁽⁷⁾ define uma zona de transição do limiar do desgaste moderado para o severo, em que, neste último, tem-se uma taxa de desgaste elevada e o surgimento de partículas de desgaste superiores a 20 µm, consideradas relativamente grandes, confirmado experimentalmente neste trabalho com a constatação de crateras da ordem de 1 mm. Já no ensaio de repetição (figura 5 (C) e (D) verifica-se a ocorrência de pequenos arrancamentos de partículas e danos da ordem de 100 µm, caracterizando igualmente um desgaste severo.

Resultados semelhantes, no que dizem respeito ao desgaste severo, foram obtidos por Medeiros,⁽¹⁾ quando estudando o desgaste de um par de discos metálicos em ensaios não lubrificados em contato não-conforme. Os danos das pistas no presente trabalho, muito possivelmente, foram gerados a partir da nucleação e propagação de trincas no campo de tensões hertzianas, promovendo o crateramento da superfície, como no caso de Medeiros.⁽¹⁾

Nas imagens (E), (F), (G) e (H), são evidenciados os danos dos mancais nacionais, onde se verifica a formação de uma superfície lustrosa e com microcrateras. Essas microcrateras podem ser advindas de microtrincas superficiais ou por pites de oxidação.

Segundo Hutchings,⁽⁷⁾ em ensaios de desgaste pino-disco, quando entre as superfícies em contato surgem apenas partículas de óxido, geram-se danos com profundidades abaixo de 25 µm; com um misto de óxido e metal, os danos apresentam uma profundidade entre 25 µm e 40 µm e quando se tem apenas metal, podem-se ter danos com profundidades maiores que 40 µm.

No texto acima, Hutchings associou o tamanho médio do desgaste ao regime de lubrificação e, possivelmente, o mancal em questão está enquadrado no primeiro caso, uma vez que, pelas imagens de microscopia óptica, visualizam-se microcrateras da ordem das ranhuras de usinagem, e, portanto, menores que 25 µm.

Além do monitoramento das irreversibilidades do sistema tribológico e da quantificação da perda mássica das pistas analisadas, foram realizadas medidas de rugosidade médias (Ra) antes e após os ensaios, tabela 1, onde foi verificado que a maior e a menor variação de rugosidade média ocorreu nas pistas dos mancais importados, os quais possuíam rugosidades médias iniciais maiores do que as dos mancais nacionais.

Segundo Hutchings,⁽⁷⁾ a rugosidade média e o nível de tensão residual são parâmetros relevantes quando se trata de contatos metal-metal com movimentos relativos entre si, lubrificados ou não, no que diz respeito à geração de danos superficiais. Isso foi verificado neste trabalho, pois os mancais que sofreram maiores danos superficiais foram os que tinham os maiores valores iniciais de (Ra) e de dureza, portanto, por definição, provavelmente as maiores variações nos níveis de tensões residuais.

5 CONCLUSÃO

A análise de parâmetros associados à dissipação de energia (atrito) e variação mássica (desgaste) tais como: janelas das assinaturas (I) da potência elétrica consumida pelo motor, (II) do aquecimento do sistema medido através da diferença de temperatura e (III) do nível de pressão sonora, bem como as medidas seqüenciadas da velocidade global de vibração, demonstrou consistência quando os sinais foram confrontados entre si.

A monitoração e análise das irreversibilidades do sistema tribológico inferiu que os rolamentos axiais importados, de custo inferior aos dos nacionais, sofreram maior desgaste e apresentaram respostas distintas em relação às do seu concorrente, nacional, no que se refere à energia dissipada.

A morfologia das superfícies ensaiadas, bem como os dados de perda mássica e rugosidade, confirmaram respostas diferenciadas entre os mancais no que diz respeito aos vários modos de desgaste apresentados.

REFERÊNCIAS

- 1 Medeiros, J. T. N. "Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico", 2002, Tese de doutorado. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 2 Vol.
- 2 TALLIAN, T.E. Simplified Contact Fatigue Life Prediction Model- Part I: Review of Published Models. *Journal of Tribology*, v.114, p. 207-22, Apr. 1992.
- 3 Dumont, M.L. Etude des endommagements de surface induits par la fatigue de roulement dans les contacts élastohydrodynamiques pour des aciers M50 et 100Cr6. 197p. PhD Thesis. Laboratoire de Mécanique des Contacts, INSA de Lyon, France, 1997.
- 4 Nélias, D., Dumont, M.L., Champiot, F., Vincent, A., Girodin, D., Lormand, G., Fougères, R., Flamand, L. Influence des Inclusions de L'état de Surface et des Conditions de Fonctionnement sur la Fatigue des Aciers M50 et 100Cr6 dans les Contacts Pontuels Lubrifiés. *SFMM 17e Journées de Printemps: Fatigue de Contact*. Senlis-France, v. 10 (1)-10 (12), 1998.
- 5 Nélias, D.; Dumont, M.-L.; Couhier, F.; Dudragne, G.; Flamand, L. Experimental and Theoretical Investigation on Rolling Contact Fatigue of 52100 and M50 Steels Under EHL or Micro-EHL Conditions. *ASME Journal of Tribology*, 120, n. 2, Apr. 1997.
- 6 Ferreira, L. A. *Tribologia: Notas de Curso. Lubrificação e Lubrificantes*, Porto, 2000, 2ª edição, Publindústria, Edições Técnicas.
- 7 Hutchings, I. M.; *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, 1992, Great Britaing Editora Edward Arnold.