



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E NORMATIZAÇÃO DE ENSAIOS MECÂNICOS EM ROLAMENTOS

Antônio Carlos Marangoni, toninmarangoni@gmail.com¹

Daniel de Oliveira Bazoni, dobazoni@ifsp.edu.br²

Luciano Henrique Almeida, almeidalh@gmail.com¹

Letícia Budoia, leticia.budoia@hotmail.com¹

¹Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos – UNIFEB
Av Professor Roberto Frade Monte, 389 – Barretos-SP - CEP 14.783-226

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Sertãozinho
Rua Américo Ambrósio, 269 - Sertãozinho - SP - Brasil - Cep: 14169-263

Resumo: Diante das problemáticas relacionadas ao consumo desenfreado de energia, o processo evolutivo exige que novas tecnologias sejam implantada para reduzir a demanda, apresentar vantagens econômicas e conciliar a questão energética e ambiental. As variáveis não favoráveis ao desenvolvimento sustentável estão sujeitas à recusa do mercado. Este estudo leva em consideração as necessidades básicas, a solidariedade com as gerações futuras, a participação da população envolvida, a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente em geral. A utilização dos rolamentos se faz importante por prolongar a vida útil dos equipamentos e aumentar seu rendimento. Este trabalho propôs um estudo sobre a validação da técnica de ensaio mecânico para se qualificar a eficiência energética de um rolamento apresentada por Lucas C. Nogueira e publicado no CONEM/2014. A experiência adquirida em campo estimou que é o projeto de máquina que geralmente define o rolamento, com o estudo em laboratório importante para a obtenção de dados de desempenho com menor custo e tempo em condições mais controladas. Os corpos de provas definidos para os testes foram os rolamentos rígidos de esfera, normais e de eficiência energética, 6003-2Z/C3 e E2.6003-2Z/C3 por suportarem cargas radiais e axiais, apropriados para máquinas de baixo ruído e vibração, em locais de alta velocidade de rotação. Foi utilizada a termografia para analisar as diferenças de temperatura dos rolamentos quando expostos à atuação de atrito e velocidades distintas. Constitui um método que permite ao homem a visão do espectro infravermelho - frequência eletromagnética natural emitida com intensidade proporcional à temperatura. As imagens geradas foram carregadas de exibir a distribuição de calor no rolamento. Estima-se uma redução do momento de atrito do rolamento normal de mesmo tamanho do rolamento de eficiência energética. Com os resultados, técnicas foram estabelecidas para regulamentar e comparar rolamentos normal e de eficiência energética para comprovar sua eficiência. Do ponto de vista econômico, os fabricantes brasileiros faturaram mais de US\$ 700 milhões, o que comprova o espaço que os rolamentos ocupam no mercado.

Palavras-chave: rolamento, eficiência energética, termografia

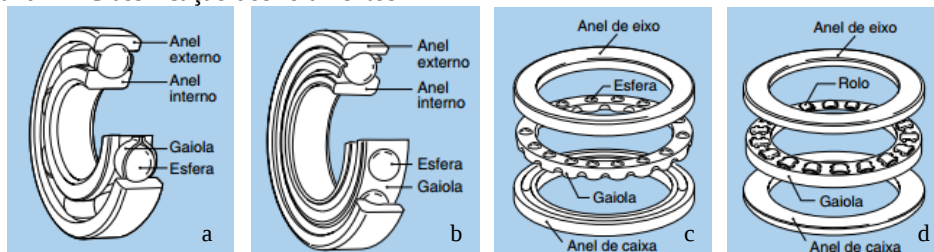
1. INTRODUÇÃO

Os rolamentos são elementos de máquinas que reduzem o atrito entre as peças que sustentem cargas, sejam estas radiais, axiais ou combinadas (Graciola e Goedel, 2011). Prevalcem os rolamentos compostos por anéis com pista (um anel interno e um anel externo), corpos rolantes (tanto esferas como rolos) e um elemento retentor dos corpos rolantes (gaiola). A pista é o local responsável por permitir que os corpos rolantes girem e por aguentar a carga aplicada. Já os corpos rolantes podem ser esferas ou rolos. As gaiolas separam os corpos rolantes, podendo ser prensadas, usinadas e forjadas (NTN, 2013).

A NTN, 2013, especifica a sua classificação segundo os corpos rolantes: os rolamentos de esferas mudam conforme seus anéis, que podem ser rígidos de esferas (fig. 1a), de contatos angulares (fig. 1b) e axiais (fig. 1c e fig. 1d) e os rolamentos de rolos mudam conforme sua forma, que podem ser cilíndricas (fig. 2a), agulhas (fig. 2b), cônicas (fig. 2c) e esféricas (fig. 2d); de acordo com a direção da carga aplicada: rolamentos radiais suportam cargas radiais e

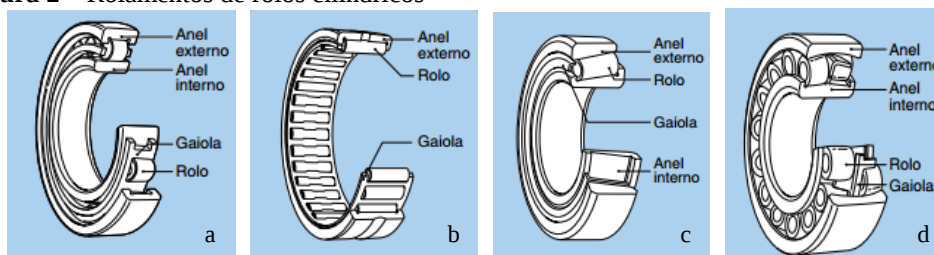
rolamentos axiais suportam cargas axiais; de acordo com o número de pistas de rolamento: simples, múltipla ou 4 pistas; não separáveis e separáveis: possibilita a separação do anel interno e externo.

Figura 1 – Classificação dos rolamentos



Fonte - NTN, 2013.

Figura 2 – Rolamentos de rolos cilíndricos



Fonte – NTN, 2013.

De acordo com Gonçalves, 2010, por reduzirem o atrito por deslizamento, os rolamentos permitem minimizar as perdas de energia. Sua manipulação deve ser cuidadosa para preservar suas peculiaridades, uma vez que é um elemento de máquina de alta precisão. Uma das formas de se estabelecer uma prevenção quanto a ocorrência de falhas de equipamentos é através de suas vibrações mecânicas, sendo a variação da velocidade que define as condições de trabalho.

Segundo Júnior, 2010, o desgaste, problemas de lubrificação, atrito, vibração ou desalinhamento dos componentes de sistemas mecânicos acarretam em um funcionamento insatisfatório, o que provoca elevação na temperatura. Entende-se por manutenção preventiva o ato de observar tais sistemas a ponto de identificar mudanças termográficas.

Graciola e Goedel, 2011, afirmam que a lubrificação correta dos rolamentos é importante por liberar somente o atrito entre o fluido e a superfície, o que reduz seu desgaste ao dissipar o calor, auxiliando na vedação do rolamento, para neutralizar choques mecânicos, além de precaver a oxidação e corrosão dos componentes. O exagero ou carência de lubrificantes acarreta em elevação de temperatura.

Segundo Bizare (2014), a escolha do rolamento se têm de acordo com seu coeficiente de atrito –quanto menor, maior é o deslizamento que reage diretamente com o consumo de energia e combustível. Em comparação com rolamentos comuns, rolamentos de eficiência energética demonstram diferença em tal coeficiente, levando como fatores contribuintes a lubrificação, carga e rotação adequada.

É o projeto da máquina que geralmente define o rolamento pelo diâmetro do eixo, levando em conta a facilidade na instalação e na remoção, o espaço permissível, as dimensões, a disponibilidade do rolamento, a vida do projeto e seus limites de durabilidade, a precisão, a folga interna, o tipo de gaiola, a graxa, etc. São peças usinadas de alta precisão, de acordo com a fabricante NSK® com ruído e torque pequenos.

Inicialmente para os testes, os corpos-de-prova escolhidos são os rolamentos normais e de eficiência energética, rígidos de esfera 6003-2Z/C3 e E2.6003-2Z/C3, respectivamente, da fabricante SKF®. Os rolamentos rígidos de esfera normal representam a classe mais utilizada entre os rolamentos por abrangerem um extenso campo de aplicação e por suportarem cargas radial e axial. Com perfil lateral em forma de arco nos anéis interno e externo, seu raio é ligeiramente maior que o das esferas. O torque de atrito é pequeno e seu uso é apropriado em máquinas que necessitam de baixo ruído e vibração, em locais de alta velocidade de rotação.

O processo de fabricação dos rolamentos rígidos de esfera é geralmente à vácuo, realizado com aço AISI 52100 de alto nível de qualidade. O tratamento de têmpera total permite alcançar uma dureza de 58 HRC. Possui resistência à fadiga de contato elevada, porém as cargas pesadas ou incidência de flexão dos anéis o torna frágil e suscetível a fraturas. As gaiolas são em aço com baixo teor de carbono, enquanto os separadores são ligas de cobre usinadas.

A SKF® oferece um reprojeto da gaiola, combinação de um aço extremamente limpo e homogêneo com tratamento térmico das esferas. Tais mudanças acarretam na melhoria da capacidade de carga dinâmica, menos calor de atrito, vida útil prolongada, redução do tamanho e consumo de lubrificantes e energia. São geralmente usados em motores elétricos, veículos de duas rodas e transmissão.

A classe E2 dos rolamentos compreende à SKF *Energy Efficient*® característica pela redução do momento de atrito do rolamento normal de mesmo tamanho, além de apresentar durabilidade maior e consumo de lubrificante menor quando sua frequência supera 1000 rpm e sua carga elétrica menor ou igual a 0,125 C. Tampados com uma

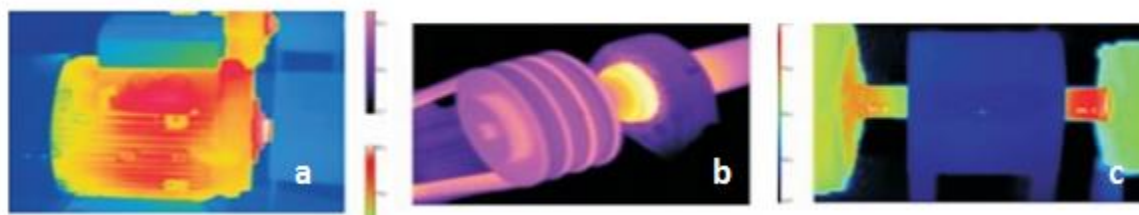
vedação/placa de proteção em ambos os lados, possuem folga interna radial padrão e são comumente usados em motores elétricos, bombas, transportadores e ventiladores.

Campanha, 2011, levanta o ponto de vista econômico, referente aos fabricantes brasileiros que faturaram, em 2006, mais de US\$ 700 milhões, o que comprova o espaço que os rolamentos ocupam no mercado atual.

2. TERMOGRAFIA

O ensaio térmico é o campo da ciência capaz de diagnosticar problemas em processos, funcionamento de equipamentos, defeitos internos em estruturas, caracterizar materiais de forma não destrutiva. A termografia permite representar um perfil térmico de forma gráfica que captura a imagem resultante da radiação infravermelha através de uma termocâmera e a envia a um software de análise onde é correlacionado o nível de intensidade da imagem digital com o campo de temperatura superficial, como exemplo da fig. 3. Além de ser possível analisar o ensaio de forma não destrutiva, sua utilização é vantajosa por sua sensibilidade e facilidade de operação, alta velocidade de medição e obtenção de respostas, grande versatilidade no processamento das imagens térmicas ou termogramas, possibilidade de utilização para objetos em movimento e acesso a informações de regiões fechadas ou de risco (Tavares, Cunha e Andrade, 2004).

Figura 3 - Inspeção termográfica em equipamentos mecânicos



Fonte: Nogueira e Reis, 2010

A transferência de calor ocorre por quatro métodos: convecção, condução, radiação e radiação infravermelha. Condução é a energia transferida de molécula para molécula, convecção é a energia térmica que cria uma corrente capaz de transferir calor da fonte quente para a fonte fria, radiação é a transferência direta de energia por ondas eletromagnéticas e radiação infravermelha compreende a energia emitida acima do zero absoluto onde o seu comprimento é inversamente proporcional à temperatura (Nogueira e Reis, 2010).

A termografia pode ser qualitativa e/ou quantitativa. Qualitativa é a primeira a ser aplicada e fornece laudos instantâneos enquanto a quantitativa fornece a gravidade da anomalia. A cada temperatura é designada uma cor ou tom para se possa analisar o que está ocorrendo em cada componente da peça. Caso haja uma anomalia no sistema, a irregularidade na geração de calor é capaz de identificar a fonte do problema. Outras técnicas como análise de vibração e ultrassom são utilizadas para auxiliar na detecção e/ou comprovar a causa do problema. (Silva, Netto e Silva, 2010).

A técnica passiva é utilizada como manutenção preventiva e preditiva de indústrias e é possível quando o material e a estrutura apresentam diferença de temperatura sem a necessidade de estímulo de pulsos elétricos, somente com a sua diferença natural de temperatura. Tal método é possível quando o objeto ultrapassa 4°C da temperatura ambiente, responsável por apresentar resultados quantitativos. Em geral, os resultados possuem limitações da qual é necessária uma preparação do operador para suprir o déficit da avaliação (Tavares, Cunha e Andrade, 2004).

Apesar de o método apresentar confiabilidade, é necessária uma análise de incerteza dentro dos limites de tolerância para contar com resultados mais precisos. Tal análise deve levar em consideração os fatores internos e externos, que são os intrínsecos e de medição. Fatores responsáveis por mudança nos resultados de medição são as perdas térmicas para o ambiente, temperatura e transmissividade do meio, sendo a determinação da emissividade da superfície testada a que mais influencia.

Tavares, Cunha e Andrade, 2004, indicaram estudos publicados na *Maintenance Technology Magazine*[®] levantaram a real viabilidade de implementação na indústria. Segundo a revista, existe uma relação custo/benefício da razão de 1:4 no uso em programas de manutenção preditiva, mesmo considerando o investimento inicial relativamente alto para a aquisição do sistema. Segundo a revista, esta relação pode chegar a 1:20 se forem consideradas as perdas de produção decorrentes de paradas no processo. Em contraposição às vantagens da aplicação do método e da ótima relação custo/benefício, pouca atenção tem sido dada às metodologias para a sua implementação.

3. MODELOS DE CÁLCULOS DO FABRICANTE

A SKF[®] fornece em seu catálogo de rolamentos de esferas equações para análise e comparação de desempenho. A Tabela 2 fornece suas principais características, que serão utilizadas referente à anéis, corpos rolantes e gaiola dos rolamentos.

Tabela 2 -Principais características dos rolamentos

Designações	Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga	Classificações de velocidade	Velocidade limite	Massa
	d	D	B	Dinâmica (C)	Estática (C ₀)	P _u	Velocidade de referência		
	mm			kN	kN	kN	rpm		
6003-2Z/C3	17	35	10	6,37	3,25	0,137	45 000	22 000	0,041
E2.6003-2Z/C3	17	35	10	5,85	3,00	0,127	49 000	25 000	0,039

Fonte - Rolamentos de esferas SKF[®], 2015.

3.1. Vida nominal básica de um rolamento

A vida nominal básica de um rolamento de acordo com a norma ISO 281 é dada pela equação 1:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (1)$$

Onde:

L_{10} - vida nominal básica (milhões de revoluções)

C - Classificação de carga dinâmica básica (kN)

P - Carga dinâmica equivalente do rolamento (kN)

p - Expoente da equação de vida, para rolamento de esfera adotar $p = 3$.

Se a velocidade for constante, é geralmente preferível calcular a vida expressa em horas de funcionamento, utilizando a equação 2:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_{10} \quad (2)$$

Onde:

L_{10h} - vida nominal básica com velocidade constante (milhões de revoluções)

n - velocidade de rotação (rpm)

3.2. Carga dinâmica equivalente do rolamento

Quando a carga do rolamento atender aos requisitos de classificação de carga dinâmica básica C , ou seja, a carga for constante em magnitude e direção e atuar radialmente em um rolamento radial ou axial, a carga pode ser inserida diretamente nas equações de vida útil. A verificação das cargas dinâmicas do rolamento é realizada examinando o fator de segurança, que é definida pela equação 3:

$$P = \frac{C}{S} \quad (3)$$

Onde:

P - carga dinâmica equivalente do rolamento (kN)

C - Classificação de carga dinâmica básica (kN)

S - fator de segurança, considerar 0,5

3.3. Condições de lubrificação – relação de viscosidade k

A efetividade de um lubrificante é determinada, principalmente, pelo grau de separação da superfície entre as superfícies de contato rolantes. Se um filme lubrificante adequado for formado, o lubrificante deverá ter uma determinada viscosidade mínima quando a aplicação tiver atingido sua temperatura operacional. A condição do lubrificante é descrita pela equação 4:

$$k = \frac{\nu}{\nu_1} \quad (4)$$

Onde:

k - relação de viscosidade

ν - viscosidade operacional real do lubrificante (mm²/s)

ν_1 - viscosidade nominal do lubrificante (mm²/s)

3.4. Diâmetro médio do rolamento

O diâmetro médio do rolamento é definido pela equação 5:

$$d_m = 0,5(d + D) \quad (5)$$

Onde:

d_m - diâmetro médio (mm)

d - diâmetro interno do rolamento (mm)

D - diâmetro externo do rolamento (mm)

3.5. Estimativa do momento de atrito

O momento de atrito pode ser estimado com precisão suficiente, usando a equação 6:

$$M = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d \quad (6)$$

Onde:

M - momento de atrito (Nmm)

μ - Coeficiente de atrito, para rolamento rígido de esfera considerar 0,0015

P - Carga dinâmica equivalente do rolamento (N)

d - diâmetro do furo (mm)

3.6. Fator de redução do aquecimento por cisalhamento de entrada

O lubrificante disponível no rolamento não pode passar por toda a sua área de contato. Apenas uma parte é utilizada para formar um filme hidrodinâmico. Portanto, parte do óleo próximo da área de contato da entrada é rejeitada e produz um fluxo inverso. Esse fluxo produz um cisalhamento no lubrificante, gerando calor que diminui a viscosidade do óleo e reduz a espessura do filme e o atrito rolante, estimado pela equação 7:

$$\phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} \cdot (n \cdot d_m)^{1,28} \cdot \nu^{0,64}} \quad (7)$$

Onde:

ϕ_{ish} - fator de redução do aquecimento por cisalhamento de entrada

n - velocidade de rotação (rpm)

d_m - diâmetro médio do rolamento (mm)

ν - viscosidade operacional real do óleo (mm^2/s)

3.7. Perda de potência e temperatura do rolamento

A perda de potência como resultado do atrito no rolamento pode ser estimada considerando a equação 8:

$$N_R = 1,05 \times 10^{-4} \cdot M \cdot n \quad (8)$$

Onde:

N_R - perda de potência (W)

M - momento de atrito total (Nmm)

n - velocidade de rotação (rpm)

3.8. Fator de resfriamento

O fator de resfriamento W_s é definido como o calor sendo removido do rolamento por grau de diferença de temperatura entre o rolamento e o ambiente, que pode ser obtida pela equação 9:

$$W_s = \frac{N_R}{\Delta T} \quad (9)$$

Onde:

W_s - fator de refrigeração ($W/^\circ C$)

N_R - perda de potência (W)

ΔT - aumento de temperatura ($^\circ C$)

4. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas serão analisadas referente à gaiola do rolamento porque o material dos anéis e corpos rolantes não são especificados pelo fabricante SKF®.

4.1. Condutividade térmica

Çengel e Ghajar, 2012, definem condução térmica como o fator pelo qual o calor é transportado das regiões de alta temperatura para as de baixa temperatura em uma substância, correspondente à equação 10:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (10)$$

Onde:

Q - taxa de condução de calor (W)

k - condutividade térmica ($W/m^\circ C$)

A - área (m^2)

ΔT - variação de temperatura ($^\circ C$)

L - espessura (m)

4.2. Calor específico

O calor específico é a energia necessária para aumentar a temperatura em um grau de uma unidade de massa de dada substância, por Çengel e Ghajar, 2012, dado pela equação 11:

$$Q_c = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (11)$$

Onde:

Q_c – variação de energia (kJ)

m - massa (kg)

c - calor específico (kJ/kg°C)

4.3. Capacidade térmica

A capacidade térmica, de acordo com Gaspar, 2013, de um corpo tem a ver com a capacidade de energia que este recebe e a variação de temperatura que esta causa no corpo, proporção que pode ser resolvida pela equação 12:

$$C = m \cdot c \quad (12)$$

C – capacidade térmica (kJ/°C)

m - massa (kg)

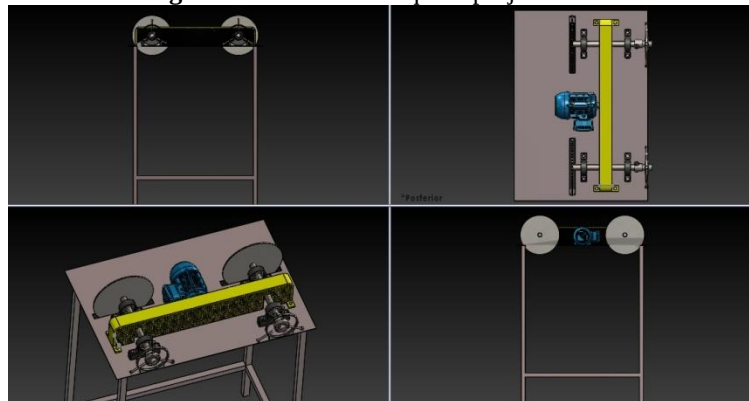
c - calor específico (kJ/kg°C)

5. METODOLOGIA

A termografia foi utilizada para analisar as diferenças de temperatura dos rolamentos quando expostos à atuação de atrito e velocidades distintas. A inspeção termográfica realizada nos rolamentos ocorreu a uma temperatura constante de 20°C, conforme a norma ABNT NBR NM ISO 1:1997 estabelece, no Laboratório de Metrologia (LAME) do UNIFEB.

A máquina projetada em *SolidWorks*® utilizada para os ensaios necessários com rolamentos está representada em suas vistas projetadas pelo software, fig. 4.

Figura 4 – Vistas da máquina projetada



Fonte: Bizare e Maschio, 2015.

No ensaio realizado, o equipamento termográfico *Fluke Ti125*® foi fixado para que não houvesse alteração no ponto analisado (figura 5a). A distância para a inspeção foi de 20 cm da luneta onde o rolamento é acoplado, conforme figura 5b. A captura das imagens foi realizada a cada 30 segundos em um intervalo de 1 hora. Durante os ensaios, não deve haver troca de calor entre ambientes (exemplo: abertura de porta). A posição dos equipamentos durante os ensaios estão mostrados nas figuras 5c e 5d.

Figura 5 – Equipamento *Fluke Ti125*® fixado em suporte a uma distância de 20 cm do rolamento.



O motor elétrico tem frequência máxima de 1690 rpm, com saída de 5,6 A. Entretanto o inversor de potência limitou o ensaio a 1380 rpm, pois a carga de saída que suporta é de 1,7 A. Com isso, os ensaios ocorreram a 562,4 rpm e 1380 rpm.

Seriam indicadas modificações segundo dois pontos de vista: projeto e ensaio. Em relação ao projeto, a modificação seria no eixo e no inversor de frequência: ao invés de dois mancais, seria colocado um para diminuir as perdas providas do equipamento e aumentar a distância do volante para evitar contato, com o cuidado necessário para mantê-los alinhados. Para atingir a frequência máxima do rolamento, que é 3000 rpm, ou obter uma rotação próxima, o motor deve ser ligado a um inversor de frequência que possibilite seu trabalho em suas condições máximas e não em condições limitadas pelo equipamento auxiliar.

Em relação aos ensaios, o ideal seria vedar os parafusos que aplicam carga e seguram os rolamentos, para que não haja transferência de calor parafuso/rolamento. A vibração acima do esperado do equipamento pode estar relacionada com o desbalanceamento do sistema.

As figuras 6a e 6b são imagens termográficas do início e final dos ensaios a 562,4 rpm, enquanto as imagens 6c e 6d são relativas ao resfriamento do rolamento comum, em °C. O mesmo procedimento ocorreu com as figuras 7a, 7b, 7c e 7d, porém com o rolamento de eficiência energética.

Figura 6 – Ensaio com rolamento 6003-2Z/C3 a uma velocidade angular de 562,4 rpm.

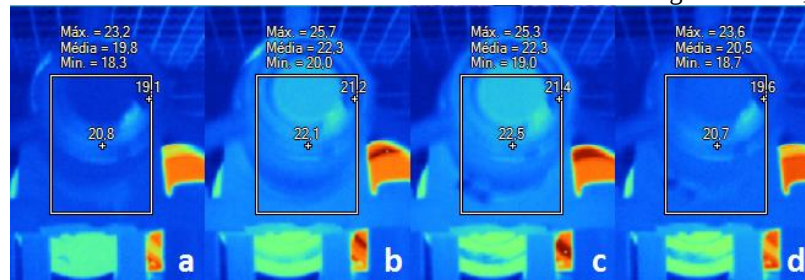
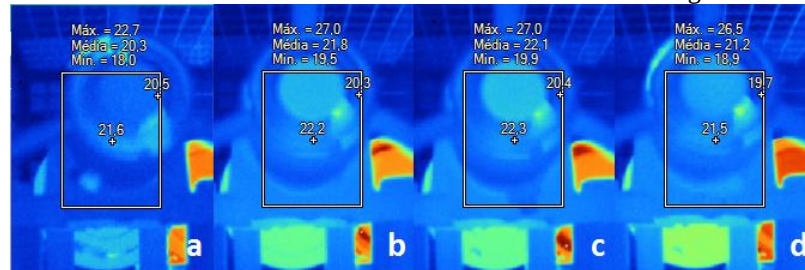


Figura 7 – Ensaio com rolamento E2.6003-2Z/C3 a uma velocidade angular de 562,4 rpm.



Já as figuras 8^a e 8^b são referentes aos ensaios a uma velocidade angular de 1380 rpm, e as figuras 8c e 8d são do resfriamento do rolamento normal a 1380 rpm. As figuras 9a, 9b, 9c e 9d correspondem ao mesmo ensaio, com rolamento de eficiência energética, em °C.

Figura 8 – Ensaio com rolamento 6003-2Z/C3 a uma velocidade angular de 1380 rpm.

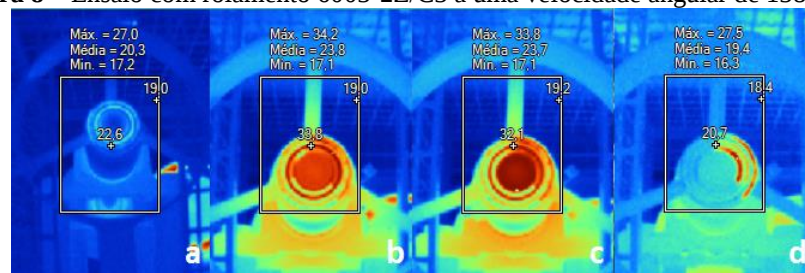
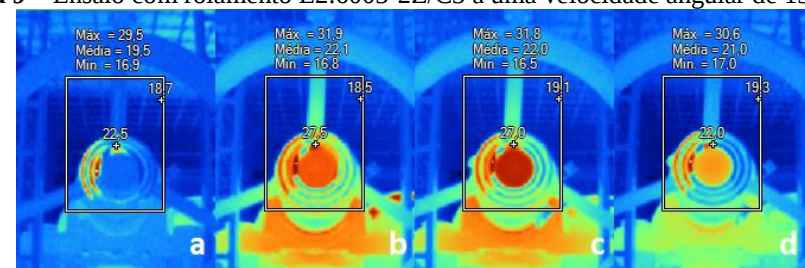


Figura 9 – Ensaio com rolamento E2.6003-2Z/C3 a uma velocidade angular de 1380 rpm.



6. RESULTADOS

Os gráficos são de *Temperatura(°C) × tempo(min)*. No gráfico 1 é apresentado o comportamento dos rolamentos durante o ensaio a 562,4 rpm e o gráfico 2, o tempo de resfriamento no final dos ensaios.

Gráfico 1 - Aquecimento dos rolamentos a 562,4 rpm

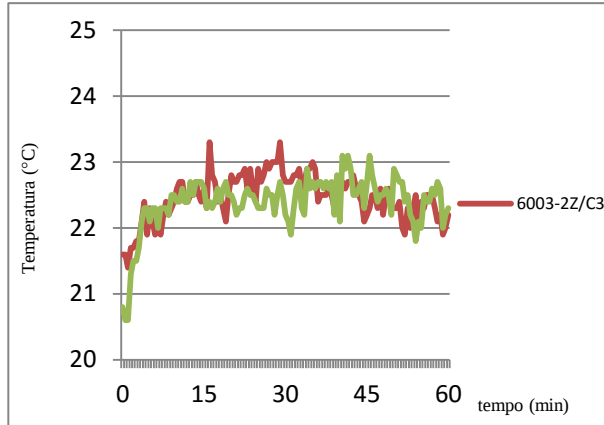
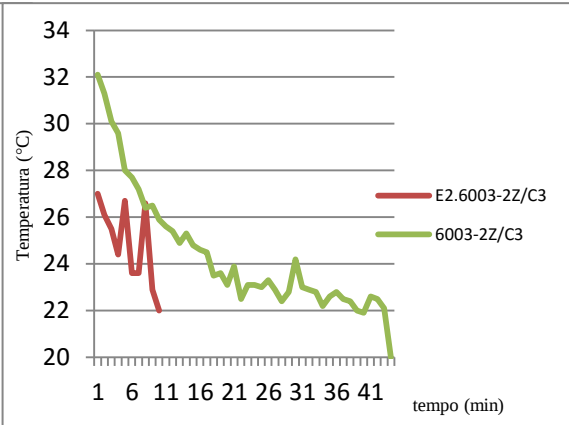


Gráfico 2 - Resfriamento dos rolamento a 562,4 rpm



No gráfico 3 é apresentado o comportamento do rolamento normal e de eficiência energética durante o ensaio a 1380 rpm, enquanto o gráfico 4 representa o tempo de resfriamento depois de finalizado.

Gráfico 3: Aquecimento dos rolamentos a 562,4 rpm

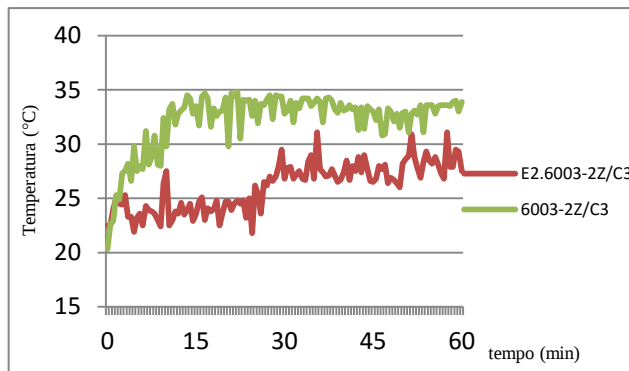
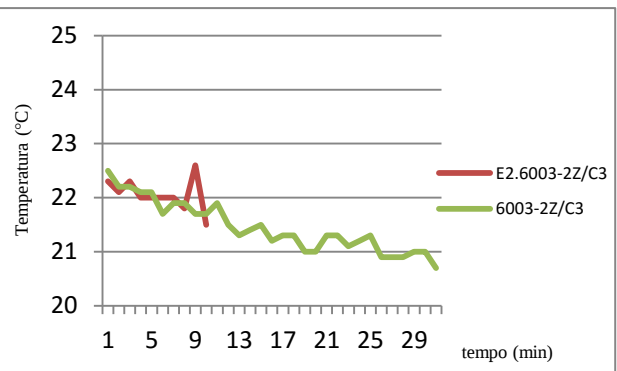


Gráfico 4: Resfriamento dos rolamento a 562,4 rpm



Não é informado pelo fabricante quais materiais compõe o conjunto anel, corpos rolantes e gaiola, porém são fornecidos dados que, junto com os obtidos em laboratório, compuseram o Tabela 2. Para o Tabela 3, o material analisado é referente à gaiola, com as propriedades físicas do rolamento 6003-2Z/C3 considerados do Aço 1020 e a do rolamento E2.6003-2Z/C3, Poliamida PA66.

Tabela 2. Cálculos comparativos com base nas equações fornecidas pela SKF®

Designações	n rpm	L_{10h} milhões de revoluções	P kN	σ GPa	d_m mm	v $\frac{mm^2}{s}$	v_1 $\frac{mm^2}{s}$	k	M Nmm	ϕ_{ish}	N_R W	W_s W/°C
6003-2Z/C3	562,4	0,125	12,74	4,2	26	110	≈30	3,667	162	0,992	0,00957	0,006380
E2.6003-2Z/C3	562,4	0,125	11,70	4,2	26	25	≈30	0,833	149	0,997	0,00880	0,014670
6003-2Z/C3	1380,0	0,125	12,74	4,2	26	110	≈18	6,111	162	0,975	0,02347	0,001726
E2.6003-2Z/C3	1380,0	0,125	11,70	4,2	26	25	≈18	1,389	149	0,990	0,02159	0,004318

Tabela 3. Cálculos comparativos com base nas propriedades físicas

Designações	n rpm	Temperatura		Massa gaiola	Calor específico	Condutividade de térmica	Taxa de condução de calor	Variação de energia	Capacidade térmica
		T_i	T_f	m	C	k	Q	Q_c	C
		°C	°C	kg	J/kg°C	W/m°C	J	W	kJ/°C
6003-2Z/C3	562,4	20,8	22,3	1,395	486	51,90	11 443,95	1,01696	0,678
E2.6003-2Z/C3	562,4	21,6	22,2	0,392	1670	0,24	21,17	0,39278	0,655
6003-2Z/C3	1380,0	20,3	33,9	1,395	486	51,90	103 758,48	9,22039	0,678
E2.6003-2Z/C3	1380,0	22,5	27,5	0,392	1670	0,24	176,40	3,27320	0,655

7. DISCUSSÃO

De acordo com a análise dos gráficos e resultados obtidos através dos cálculos, pode-se concluir que os ensaios apresentaram resultados dentro do esperado. Referente aos anéis, corpos rolantes e gaiola, o coeficiente de atrito do rolamento normal é maior que o de eficiência energética, o que explica um aquecimento, além de sua potência diminuir em velocidade menor, o que acarreta em um fator de resfriamento inferior e explica a diferença de tempo entre eles.

Quanto aos parâmetros relacionados às suas gaiolas, o rolamento normal aquece significativamente mais que o de eficiência energética. A diferença de capacidade térmica é de $0,023 \text{ kJ}^\circ\text{C}$, o que explica o tempo de resfriamento do rolamento de eficiência, mesmo com capacidade térmica menor.

A proposta é que os ensaios sigam o mesmo padrão de análise e monitoria, com cuidado para que não haja influência do meio e do operador durante os ensaios.

8. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que os ensaios realizados forneceram resultados esperados. Para uma melhor análise e dados mais precisos, as perdas da máquina para rolamentos devem ser reduzidas e calculadas. O auxílio da câmera termográfica possibilita a captura de imagens para estudo, porém os ensaios podem ser realizados com equipamentos de análise térmica com menor precisão, desde que a metodologia seja seguida.

9. AGRADECIMENTOS

A Reitoria, coordenação e todos os professores do curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos (UNIFEB).

Ao Hospital da Fundação PIO XII de Barretos pelo empréstimo do equipamento termográfico para realização dos ensaios e ao CNPQ pela bolsa de PIBIC que viabilizou os estudos deste projeto.

10. REFERÊNCIAS

- ABNT. “Ensaio não destrutivo — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos”. Disponível em: http://www.janeladeinspecao.com.br/download/janela_infravermelha_termografica_ja_e_mencionada_na_norma_PR_ABNT_NBR_15572_em_02_CN.pdf Acesso em: 22 de maio de 2015.
- BIZARE, Felipe C. “Ensaio mecânico em rolamentos de eficiência energética”. 2015. Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos, Barretos, 2015.
- MARANGONI, Antônio C. BARBIERI, Renan. “Experiência didática da disciplina de projeto integrado dos cursos de engenharias do UNIFEB na Maratona Universitária de Eficiência Energética”. Cobenge. Gramado, 2013.
- GONÇALVES, Juliano F. “Implementação de uma bancada de ensaios para identificação de falhas em rolamentos por monitoramento de vibrações”. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/46399>. Acesso em: 04 de abril de 2015
- GRACIOLA, Clayton L.; GOEDEL, Alessandro. “Classificador neural aplicado na análise da lubrificação dos rolamentos de um motor de indução”. Disponível em: <http://www.sba.org.br/rsv/SBAI/SBAI2011/86278.pdf>. Acesso em: 18 de abril de 2015.
- JÚNIOR, Helso F. O. “Uso da termografia na inspeção preditiva”. Disponível em: <http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/1811/989>. Acesso em: 25 de abril de 2015.
- MASHIO, Vanderson C. “Ensaio Mecânico em rolamentos comuns”. Curso de Engenharia Mecânica, Cobenge, 2015.
- MARANGONI, Antônio C. NOGUEIRA, Lucas. “Estudo da Eficiência energética de rolamentos”. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2014. UFU. Uberlândia, 2014.
- NTN, “Classificação e características dos rolamentos”. Disponível em: <http://www.ntn.com.br/pdfServicos/indiceA2/indiceA2.pdf> Acesso em: 04 de abril de 2015.
- SKF, “Rolamentos SKF com Eficiência Energética”. Disponível em: <http://www.durao.com.br/pages/pdf/04.pdf>. Acesso em: 24 de maio de 2015.
- NSK, “Rolamentos”. Disponível em: <http://www.irusa.com.br/catalogos/NSK/COMPLETO.pdf>. Acesso em: 18 de janeiro de 2016.
- CAMPANHA, Marcos V. “Estudo sobre a vida útil de rolamentos fixos de uma carreira de esferas”. Disponível em: [file:///C:/Users/note/Downloads/Texto_Marcos_Campanha_rev%20\(1\).PDF](file:///C:/Users/note/Downloads/Texto_Marcos_Campanha_rev%20(1).PDF). Acesso em 15 de fevereiro de 2016.
- CUNHA, Ângela; ANDRADE, Roberto M.; TAVARES, Sinthya G. “APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA NA AVALIAÇÃO DE DEFEITOS NÃO APARENTES EM MATERIAIS”. Disponível em: http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/encit/2004/artigos/symp_expmet/CIT04-0132.pdf. Acesso em: 22 de fevereiro de 2016.

- SILVA, Arthur M.; NETTO, Walaci D. B.; SILVA, Ruan C. C. “Emprego da termografia na manutenção preditiva”. Disponível em: <<http://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/1789>>. Acesso em: 2 de março de 2016.
- NOGUEIRA, Jessica C. B.; REIS, Virgílio P. “Emprego da termografia na inspeção preditiva”. Disponível em: <<http://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/1788>>. Acesso em 2 de março de 2016.
- SKF, “Rolamentos de esfera”. Catálogo eletrônico. Outubro de 2015.
- ÇENGEL, Yunus A. GHAJAR, Afshin J. “Transferência de calor e massa”. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=3L2kZCIcvvYC&pg=PP2&lpg=PP2&dq=%C3%A7engel+e+ghajar+2012&source=bl&ots=FPwc6kPuAE&sig=QATMmYTSdDWBx2yFyiGwa2jQ2hQ&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwj0q7nJnLLNAhXEiZAKHYViBpk4ChDoAQgeMAE#v=onepage&q=%C3%A7engel%20e%20ghajar%202012&f=false>>. Acesso em abril de 2016.
- GASPAR, Alberto. “Compreendendo a física mecânica”. Livro eletrônico. 2 ed. São Paulo, 2013.

11. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY, DEVELOPMENT AND TESTING STANDARDS IN MECHANICAL BEARINGS

Antônio Carlos Marangoni, toninmarangoni@gmail.com¹

Daniel de Oliveira Bazoni, dobazoni@ifsp.edu.br²

Luciano Henrique Almeida, almeidalh@gmail.com¹

Letícia Budoia, leticia.budoia@hotmail.com¹

¹Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos – UNIFEB

Av Professor Roberto Frade Monte, 389 – Barretos-SP - CEP 14.783-226

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Sertãozinho

Rua Américo Ambrósio, 269 - Sertãozinho - SP - Brasil - Cep: 14169-263

Abstract. Facing the problems related to the power of unbridled consumption, the evolutionary process should be constant and require new technologies to be deployed in order to reduce demand, to provide economic benefits and reconcile energy and environmental issues. The unfavorable variables sustainable development are subject to refusal of the market. This paper takes into account the basic needs, solidarity with future generations, the participation of the population involved, preservation of natural resources and the environment in general. The use of bearings becomes important to prolong the life of equipment and improve energy efficiency. This paper proposed a study on the possibility of mechanical test of technical validation to assess the energy efficiency of a bearing by Lucas C. Nogueira and published in CONEM / 2014. Field experience analysis estimated that, it is the machine design that generally defines the bearing, with study in an important laboratory for obtaining performance data with less cost and time in more controlled conditions. The pieces of evidence set for the tests were the hard ball bearings, standard and energy efficiency, 6003-2Z / C3 and E2.6003-2Z / C3 bearing for radial and axial loads, suitable for low noise and vibration machines, in high-speed rotation places. Thermography was used to analyze the bearing temperature differences when exposed to friction operation and different speeds. It is a method that enables man to visualize the infrared spectrum - natural electromagnetic frequency emitted with an intensity proportional to the temperature. The generated images were supposed to display the heat distribution in the bearing. It is expected reduction in rolling friction of the same size normal rolling efficiency bearing with greater durability. With the obtained results, experimental techniques are expected to be established, and rules governing the comparison between common bearings and energy efficiency able to prove that energy efficiency bearings are more efficient than ordinary. From an economic point of view, Brazilian manufacturers gross more than \$ 700 million, which shows the space that occupy the bearings in the current market.

Keywords: bearing, energy efficient, thermography.