

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM ROLAMENTO SUBMETIDO A AQUECIMENTO INDUTIVO PARA MONTAGEM POR INTERFERÊNCIA

CON-2016-0429

Resumo: Os rolamentos tem como função suportar cargas de eixos rotativos, sendo utilizados em muitas áreas da engenharia melhorando a funcionalidade de máquinas, reduzindo o consumo de energia e permitindo a transmissão eficiente de energia devido à redução do atrito. Tendo em vista a aplicabilidade dos rolamentos, o objetivo deste estudo foi analisar o processo de aquecimento indutivo em rolamentos para montagem por interferência mecânica. Para investigar o comportamento do rolamento durante o aquecimento, dados de temperatura foram coletados experimentalmente usando um termômetro a laser. Desta forma foi possível calcular a dilatação térmica do rolamento, sendo esta de 0,033 mm para a variação de temperatura obtida experimentalmente. Obteve-se também o perfil de temperatura que foi construído com base nos valores de raio do rolamento e as condições de contorno aplicadas. Com os resultados obtidos observou-se que as considerações acerca das variáveis e condições de contorno são válidas, uma vez que os resultados apresentaram-se em conformidade com a literatura consultada.

Palavras-chave: rolamento, aquecimento indutivo e interferência mecânica.

1. INTRODUÇÃO

Os rolamentos tem como função suportar cargas de eixos rotativos, sendo utilizados em muitas áreas da engenharia melhorando a funcionalidade de máquinas, reduzindo o consumo de energia e permitindo a transmissão eficiente de energia devido à redução do atrito. Para isso é comum o acoplamento de rolamentos em eixos de motores, utilizados nas indústrias automotivas, na geração de energia e nas indústrias aeronáuticas (NSK, 2015).

O princípio de funcionamento dos rolamentos deriva-se desde a antiguidade. Foram aprimorados no século XV, por Leonardo da Vinci, que desenvolveu estudos sobre o princípio de rotação e separadores para as esferas dos rolamentos, de forma a otimizar o funcionamento dos mesmos. Pode-se ver na Fig. 1 o projeto do rolamento de Da Vinci.

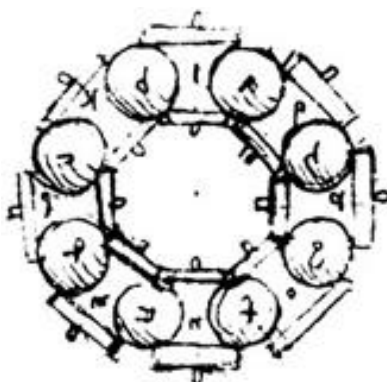


Figura 1. Projeto de rolamento de Leonardo da Vinci.

O marco histórico para o desenvolvimento dos rolamentos ocorreu simultaneamente com o desenvolvimento da engenharia durante a Revolução Industrial, aprimorando-se, os materiais e os processos de fabricação utilizados, otimizando o funcionamento desses componentes.

Atualmente os rolamentos são muito utilizados na fixação de eixos rotativos. Para um melhor aproveitamento do trabalho realizado por um eixo o atrito deve ser evitado. Isso pode ser conseguido acoplando-o à rolamentos e com o

mínimo de folga possível. Para que isso ocorra os rolamentos escolhidos para o acoplamento devem possuir um diâmetro igual ou muito próximo do eixo, o que dificulta a sua montagem.

Uma boa alternativa para a montagem de rolamentos é a interferência mecânica pelo método térmico. Processo que utiliza-se do aquecimento e resfriamento de componentes de forma a alterar momentaneamente as suas dimensões permitindo o acoplamento mecânico.

O aquecimento necessário para tal processo pode ser obtido de diferentes formas. Entre elas destaca-se o aquecimento por indução, procedimento que gera calor, por efeito Joule, ao induzir uma corrente de Foucault no material.

Observando a necessidade de conhecer o comportamento do rolamento realizou-se um estudo experimental objetivando determinar a geração de calor pelo aquecedor indutivo, o perfil de temperatura no rolamento e a dilatação no sentido radial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rolamentos Rígidos de Esferas

Segundo Santos *et al.* (2007, p. 7), “rolamentos são constituídos de anéis com pista, elementos rolantes e um elemento retentor dos elementos rolantes denominado de separador [...]. A pista é a superfície onde os elementos giram”. Esses elementos são normalmente metálicos, possuindo, principalmente, a função de sustentar um sistema de transmissão de torque, conforme Fig. 2. Estes apresentam uma grande variedade de tamanhos, o que torna-os amplamente aplicáveis.

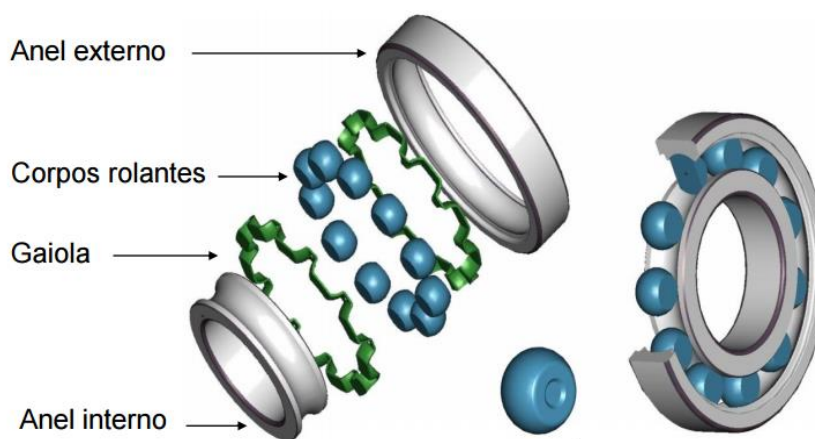


Figura 2 - Constituição básica de um rolamento.

Dentre os diversos tipos de rolamento, este estudo utilizou-se de rolamentos rígidos de esferas, que possuem ranhuras de pista profundas e ininterruptas, tendo como características osculações próximas às esferas, o que confere uma acomodação de cargas radiais e axiais em ambas direções. Diversas características são relevantes ao selecionar um rolamento para uma aplicação específica, como os diâmetros interno e externo, espessura e massa, bem como a designação do rolamento, sendo algumas delas mostradas na Tab. 1. O rolamento utilizado no estudo foi o SKF 6308, com dimensões destacadas na Tab. 1 em negrito.

Tabela 1. Tabela de rolamentos rígidos de esferas com diâmetro interno de 40 mm.

Dimensões principais			Massa	Designação
Diâmetro interno [mm]	Diâmetro externo [mm]	Espessura [mm]	[kg]	-
40	52	7	0,034	61808
	62	12	0,12	61908
	68	9	0,13	16008
	68	15	0,19	6008
	80	18	0,37	6208
	90	23	0,63	6308
	110	27	1,25	6408

Fonte: Adaptado de SKF.

2.2 Montagem por Interferência

Segundo o Grupo GH (2011), “montagem por interferência é a união por interferência mecânica de duas peças para formar um conjunto integral”. Esta montagem é necessária quando os diâmetros de duas peças a serem acopladas são muito próximos como em eixos de motores e bombas. Dessa forma, para o correto funcionamento de um rolamento, o mesmo deve ser montado com interferência, podendo ser utilizado os seguintes métodos:

- Mecânicos ou a frio.
- Hidráulicos
- Térmicos

A montagem a frio pode ser realizada por impacto ou por prensagem, sendo esta realizada por prensa mecânica ou hidráulica, enquanto a primeira por golpes de martelo. A injeção de óleo é um exemplo de método hidráulico. Ao passo que, os métodos térmicos podem ser por banho de óleo, aquecimento indutivo ou por condução/convecção, utilizando de placa de aquecimento ou estufa.

Por apresentar características como redução de tensões e deformações residuais, além do controle de qualidade da união, a montagem por interferência é muito aplicada em peças delicadas, onde não é recomendável o uso de pressão mecânica. É importante considerar ainda o controle da temperatura, que não deve exceder 110°C segundo o fabricante do conjunto de aquecimento indutivo, para que a estrutura do material não seja alterada (o material do rolamento é aço 100Cr6, conforme informações obtidas diretamente com a empresa fabricante).

Dessa forma, o aquecimento por indução mostra-se eficaz para a montagem por interferência. Isso se faz evidente tanto pelo controle da temperatura mais apurado, quanto pela facilidade e rapidez inerente ao processo, que será apresentado a seguir.

2.3 Aquecedor indutivo

O aquecedor indutivo pode ser comparado a um transformador. É composto basicamente por uma bobina primária com um grande número de enrolamentos (onde a tensão é mais elevada, e a corrente elétrica tem menores valores), e uma bobina secundária com um número de enrolamentos reduzido (onde a tensão é mais baixa e a corrente é maior, o que é necessário na aplicação). Ambas as bobinas compartilham um mesmo núcleo de ferro. É importante salientar que as tensões de saída e entrada dependem diretamente do número de enrolamentos, uma vez que a energia mantém-se a mesma (SKF, 1996).

Podemos analisar o rolamento como uma bobina secundária de apenas um enrolamento e uma volta, assim pode-se afirmar que o mesmo é colocado em curto-circuito a uma alta amperagem e baixa tensão de corrente alternada (necessário para a aplicação). Através da indução eletromagnética uma corrente é criada no rolamento, e essa corrente é denominada Corrente de Foucault (também conhecida como “Corrente Parasita”). Na maioria das outras aplicações de indução eletromagnética essas correntes são consideradas problemas, uma vez que parte da energia é perdida devido ao aquecimento do material condutor. No entanto, para a aplicação de aquecedores indutivos essa dissipação de energia por meio de calor é essencial para o aquecimento do rolamento.

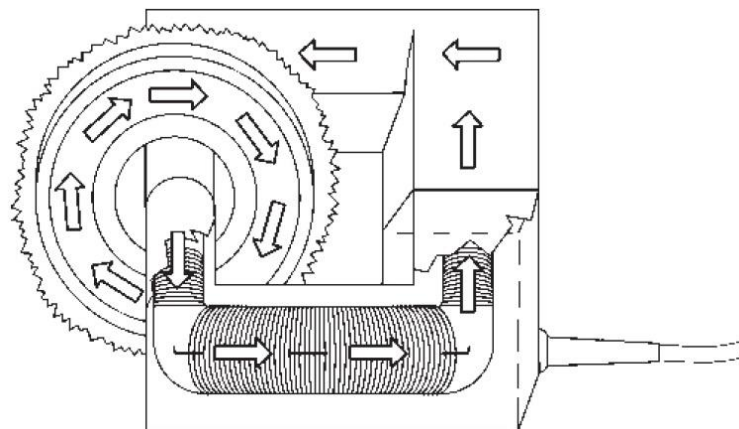


Figura 3. Esquema do aquecedor indutivo.

O anel interior será aquecido de maneira a ocorrer uma dilatação radial, o que proporcionará a montagem por interferência, porém a dilatação do anel externo não acompanhará a do anel interno. Desde que a temperatura não exceda 110°C o rolamento não sofrerá danos.

Baseando-se na Lei de Lenz, quando um campo magnético variável incide sobre um corpo de material condutor, correntes induzidas surgirão no mesmo, de modo que um novo campo será criado, cancelando a variação de fluxo. Esse

processo é análogo ao processo que ocorre em uma espira no caso de transformadores, por exemplo. Essa corrente induzida é denominada por Corrente de Foucault, que irá provocar o aquecimento do material. Conforme Griffiths (1999) “as correntes de Foucault são notoriamente difíceis de calcular, porém, seus efeitos são facilmente observados”.

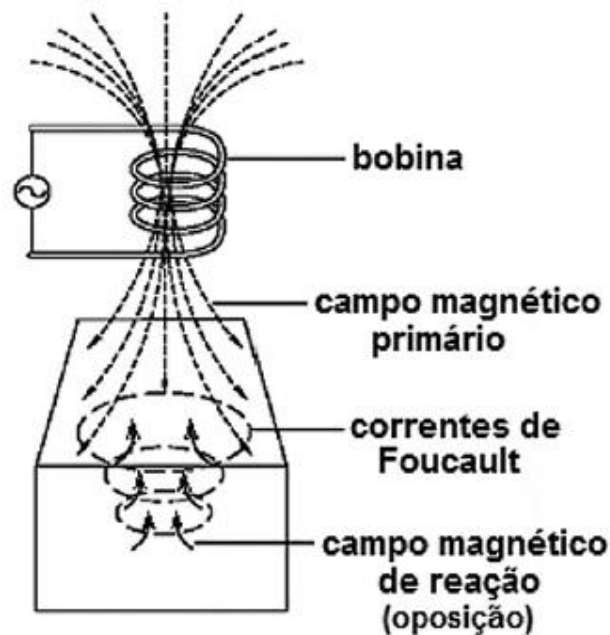


Figura 4. Representação do processo de indução de correntes de Foucault.

O material onde a corrente foi induzida irá comportar-se como um resistor (no caso, o corpo do rolamento considerado como um corpo maciço). Assim, os elétrons que irão atravessar o material colidirão com o núcleo dos átomos na rede cristalina natural do condutor. Essas colisões irão elevar a amplitude de vibração dos átomos, ou seja, a corrente irá transferir energia para o condutor. Essa energia será dissipada na forma de calor, associando assim o aumento da temperatura do condutor.

Esse efeito de conversão de energia elétrica em energia térmica foi denominado Efeito Joule, devido a descoberta de James P. Joule, enquanto estudava as relações entre as unidades de energia, “Joule” e “caloria”.

2.4 Dilatação térmica:

Quando um corpo é aquecido, o aumento da temperatura causa um aumento da agitação de suas moléculas e consequentemente as distâncias entre elas. Esse maior espaçamento entre as moléculas acarretará em uma expansão de suas dimensões. Estas podem ocorrer de forma linear, superficial ou volumétrica. No caso estudado, como o diâmetro do rolamento é a única dimensão que influenciará na montagem por interferência, consideraremos apenas a dilatação linear radial. A variação

da dimensão causada pela dilatação linear, pode ser obtida pela Eq. 1:

$$L - L_0 = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde:

L = Comprimento final [mm];

L_0 = Comprimento inicial [mm];

α = Coeficiente de dilatação térmica [$^{\circ}\text{C}^{-1}$];

ΔT = Variação de temperatura [$^{\circ}\text{C}$].

2.5 Condutividade Térmica

Segundo Çengel (2012, p. 17), “condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas. [...] A condução deve-se às colisões e difusões das moléculas em seus movimentos aleatórios”.

A quantidade de calor transferida por unidade de tempo no processo de condução em uma parede plana pode ser obtida pela Lei de Fourier conforme Eq. (2).

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Onde q_x [W/m²], o fluxo de transferência de calor, é proporcional ao gradiente de temperatura dT/dx . E k [W/(m.K)] é a condutividade térmica, propriedade característica do material.

No caso de um aquecimento indutivo devemos considerar, além das condições das fronteiras do corpo, a energia térmica que está sendo gerada em seu interior. Esta ocorre através da conversão de energia elétrica em térmica em consequência do efeito Joule. Segundo Incropera et. al. (2015, p. 89) “a taxa na qual energia é gerada em função da passagem de uma corrente i através de um meio com resistência elétrica R_e ” pode ser representada pela Eq. 3.

$$\dot{E}_g = R_e \cdot i^2 \quad (3)$$

A condução, então, é responsável pelo perfil de temperatura num determinado sistema que recebe uma quantidade de calor. Para analisar este perfil de temperatura num sólido é necessário a definição de um sistema de coordenadas.

No caso de um rolamento, o sistema a ser utilizado é o de coordenadas cilíndricas. E para a distribuição de temperatura nesta geometria, considerando a condutividade térmica do material constante, quando o material é isotrópico, temos que a equação do calor é dada representada na Eq. 4.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{q}{k} = 0 \quad (4)$$

No caso de um cilindro de tamanho e condutividade definidos, e em posse da Eq. 4, é possível definir o perfil de temperatura caso o fluxo de calor seja definido. Podemos ainda definir o fluxo de calor, caso já esteja definido um perfil de temperatura.

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais Utilizados

Para a realização do experimento foram usados os materiais e equipamentos listados abaixo, disponibilizados pela instituição onde os mesmos foram realizados:

- Rolamento rígido de esferas SKF, modelo 6308 de aço 100Cr6;
- Aquecedor de rolamentos SKF, modelo TMBH1 de 350 Watts de potência;
- Termômetro a laser SKF, modelo SKF 1400K;
- Medidor de temperatura por contato SKF, modelo TMDT2-30;
- Luvas resistentes ao calor SKF, modelo TMBA G11 (para manuseio do rolamento após aquecimento).
- Software Microsoft Office Excel 2007 (para construção de gráficos).

3.2 Desenvolvimento Experimental

Em posse de todos os materiais necessários, foram realizados os procedimentos experimentais. Realizou-se a montagem do indutor com o rolamento e os equipamentos auxiliares (termômetro e medidor de temperatura por contato) foram dispostos de forma a realizar as medições após cada processo de aquecimento. A seguir, após cada processo foi aguardado um período de aproximadamente 20 minutos para que o rolamento retornasse à temperatura ambiente de forma natural (trocando calor por convecção natural).

3.2.1 Perfil de temperatura

Para analisarmos o perfil de temperatura no rolamento é necessário relacionar as temperaturas internas e externas, assim como o calor gerado pela corrente induzida pelo indutor magnético. Para isso, considerando a equação de calor em coordenadas cilíndricas com condutividade térmica (k) constante, tem-se:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dT}{dr} \right) + \frac{q}{k} = 0 \quad (5)$$

Utilizando os conceitos de integral e derivada parcial, para resolução da Eq. 5, tem-se:

$$T = -\frac{q}{4k} \cdot r^2 + C_1 \cdot \ln r + C_2 \quad (6)$$

A Eq. 6 relaciona a temperatura que varia com o raio, ou seja, representa o perfil de temperatura no rolamento. Sendo C_1 e C_2 constantes de integração, que serão definidas posteriormente fazendo-se o uso de condições de contorno encontradas no experimento.

Com o uso do termômetro a laser pôde-se obter as temperaturas na parte interna e externa do rolamento, conforme as Figura 5. Juntamente com o termômetro foi utilizado um medidor por contato para facilitar as medições, de forma

que as mesmas fossem feitas em diversos pontos do rolamento, de forma a obter um valor médio do comportamento do perfil de temperatura no componente.



(a)

(b)

Figura 5. Medição de temperatura no anel interno (a) e medição da temperatura externa (b).

Foram realizadas 10 repetições e os resultados obtidos estão dispostos na Tab. 2:

Tabela 2. Temperaturas medidas no experimento

Temperaturas internas (°C)	88,3	89,6	80,4	73,8	87,4	96,8	95,8	91,3	87,6	87,0
Temperaturas externas (°C)	57,6	58,4	60,3	58,3	60,4	60,6	61,2	60,6	60,8	60,4

Após a construção do rol de dados de temperatura, os mesmos foram dispostos em tabelas e assim foi realizado o tratamento estatístico como recurso para a diminuição dos erros de medição. Dessa forma foram desconsiderados os 10% maiores e os 10% menores valores coletados, de tal modo que pode-se montar a Tab.3.

Tabela 3. Temperaturas medidas no experimento sem os valores extremos

T_{int} (°C)	80,4	87,0	87,4	87,6	88,3	89,6	91,3	95,8
T_{ext} (°C)	58,3	58,4	60,3	60,4	60,4	60,6	60,6	60,8

Em seguida foi calculado os valores médios de temperatura interna $T(r_1)$ e externa $T(r_2)$, indicando então 361,43K (88,43°C) e 332,98 (59,98°) respectivamente.

Dessa forma, $T(r_1)$ e $T(r_2)$ são as condições de contorno do problema. Os valores de r_1 e r_2 correspondem aos raios interno e externo, conforme Tab. 1. A potência $\dot{q}$ foi fornecida pelas instruções de uso do aquecedor indutivo, possuindo valor de 350 W, como foi mostrado na Tab. 2. A constante k é de 46,6 W/mK, conforme Tab. 4.

Tabela 4. Propriedades do aço 100Cr6 do rolamento (Adaptado de Lucefin Group).

Calor específico	Densidade	Condutividade térmica	Resistividade elétrica	Condutividade elétrica
J/(Kg·K)	Kg/dm ³	W/(m·K)	Ω·mm ² /m	Siemens·m/mm ²

475	7,81	46,6	0,22	4,55
-----	------	------	------	------

Substituindo tais valores na Eq. 6, obtemos -35,08 e 224,2 para as constantes de integração C_1 e C_2 , respectivamente. Com esses dados, o perfil de temperatura se dá pela Eq. 7.

$$T(r) = -1,88 \cdot r^2 - 35,08 \cdot \ln r + 224,2 \quad (7)$$

3.2.2 Dilatação térmica

O objetivo do aquecedor indutivo é dilatar o diâmetro interno do rolamento, para que seja possível acoplá-lo. Portanto é importante avaliarmos esta dilatação utilizando a Eq. 1.

Para determinar a variação de temperatura no diâmetro interno do rolamento precisamos saber qual a temperatura inicial em que este se encontrava antes de ser aquecido. Assim como foi realizado com as temperaturas externas e internas, também foram realizadas dez medições para a temperatura inicial, apresentadas na Tab. 5.

Tabela 5. Temperaturas iniciais na superfície do rolamento.

Temperaturas Iniciais (°C)	20,3	20,3	20,3	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,6	20,6
----------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Após serem desconsiderados os 10% maiores valores e 10% menores valores da temperatura inicial do rolamento, e realizado o cálculo da média, obteve-se uma temperatura inicial de 293,4K (20,4°C).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Perfil de Temperatura

Conforme análise na seção 3.2.1 obteve-se a equação do perfil de temperatura. Para melhor visualização deste perfil, utilizou-se o *software* Microsoft Office Excel para representar na forma de um gráfico o comportamento da temperatura em função do raio do rolamento.

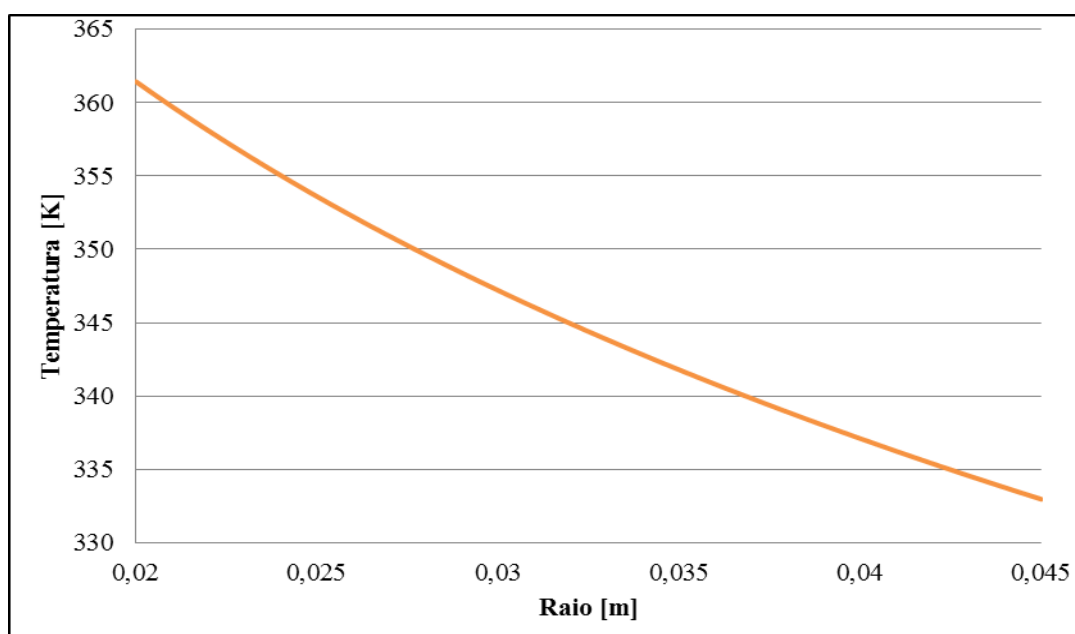


Gráfico 1 – Perfil de Temperatura variando do raio interno ao raio externo do rolamento.

Como esperado, a temperatura varia de forma não linear com o raio, o que pode ser observado com a equação do perfil de temperatura, visto que esta é uma equação quadrática. É importante ressaltar que o aquecedor indutivo registrou que a temperatura no anel interno do rolamento era de 110°C através de um sensor, no entanto os dados coletados através do termômetro apresentaram-se inferiores.

4.2 Dilatação Térmica

Conforme mostrado na Seção 3.2.1 a temperatura interna após o aquecimento foi de 88,4°C, logo a variação da temperatura é de 68,0°C. O coeficiente de dilatação térmica, apresentado na Seção 2.4, é $12 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, conforme dados da Tab. 6.

Tabela 6. Propriedades do aço do rolamento.

Propriedades do aço do rolamento	
Densidade [g/cm ³]	7,9
Dureza	700 HV10
Módulo de Elasticidade [kN/mm ²]	210
Expansão Térmica [10 ⁻⁶ /K]	12

Como o diâmetro interno do rolamento é de 40 mm a dilatação térmica pela Eq. 1 será de 0,033mm.

Considerando a temperatura máxima recomendada para que a estrutura cristalina do material não sofra alterações, que é de 110°C, o valor de dilatação pode ser considerado o valor máximo que pode ser encontrado, uma vez que existem limitações quanto ao material ensaiado e o equipamento utilizado para o ensaio.

5. CONSIDERAÇÕES

Os resultados do estudo realizado demonstraram que os objetivos propostos foram alcançados. Obteve-se o perfil de temperatura do rolamento e ao construir seu respectivo gráfico observa-se que este se comportou como o esperado, demonstrando que a consideração do rolamento como um corpo maciço é válida. O valor de dilatação encontrado para a variação de temperatura mensurada é da ordem de centésimos de milímetro, contudo como o diâmetro interno do rolamento é muito próximo do eixo ao qual será acoplado este valor de dilatação é satisfatório para a montagem por interferência.

Com os resultados obtidos neste trabalho e com os conhecimentos adquiridos acerca do problema proposto sugere-se alguns trabalhos futuros a serem realizados. Sugere-se a realização de uma simulação em software para verificar o gradiente de temperatura no rolamento a partir dos dados obtidos neste trabalho. Em paralelo pode ser realizado também um estudo aprofundado dos aspectos relacionados à Correntes de Foucault no material do rolamento e verificar os valores de rendimento observados na literatura consultada. Uma vez que o processo de aquecimento baseia-se em conceitos de eletromagnetismo pode-se realizar uma simulação em software do processo, desde a indução eletromagnética até os efeitos de dilatação no material estudado.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professores Luiz Rafael Resende da Silva e Douglas Ruy Soprani da Silveira Araujo, pela orientação e apoio na realização do trabalho; à SKF Group pela disponibilidade, atenção e presteza no atendimento aos alunos disponibilizando dados fundamentais ao desenvolvimento do trabalho; e ao Monitor do Laboratório de Manutenção Arthur da Silva Ribeiro, pelo auxílio na realização do experimento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CATTANI, M.; VANNUCCI, A., 2014. *Correntes de Foucault: Aspectos básicos*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 36. n. 2.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J., 2012. Introdução e Conceitos Básicos. In:_____. *Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática*. 4. ed. Porto Alegre: AMGH. p. 1 - 61.
- GH Electrotermia, 2011. "Montagem por interferência". 10 Jul. 2015.
<<http://www.ghinduction.com/process/montagem-por-interferencia/?lang=pt-br>>.
- GRIFFITHS, D. L., 1999. *Introduction to electrodynamics*. 3. ed. Prentice Hall: New Jersey.
- INCROPERA, F. P.; et.al., 2015. Condução Unidimensional em Regime Estacionário. In:_____. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A., 2009. Variáveis de Circuitos. In:_____. *Circuitos Elétricos*. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- NSK Control and Motion, 2015. "Introdução aos Rolamentos". 10 Jul. 2015.
<<http://www.nsk.com.br/Artigo.asp?Aid=60>>.
- SANTOS, A. C.; MARQUES, J.; TERRA, L. E. da C., 2007. *Estudo de Metodologias de montagem de rolamentos em eixos*. Monografia (Graduação). Centro Universitário Positivo, Curitiba.
- SKF Maintenance Products., 1996. *SKF TMBH I: Aquecedor de Rolamentos – Instruções de uso*. Países Baixos: SKF.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

ESTUDY OF THE BEHAVIOR OF A BEARING SUBMITTED TO INDUCTIVE HEATING FOR ASSEMBLY BY INTERFERENCE

CON-2016-0429

Abstract. *The bearings have the function of support loads in rotary axes, being used in many areas of engineering improving the functionality of machines, reducing the energy consumption and allowing the efficient transmission of energy due to friction reduction. In view of the applicability of bearings, the aim of this study was analyze the process of inductive heating in bearings for assembly by mechanical interference. To investigate the behavior of the bearing during the heating, temperature data were experimentally collected using a laser thermometer. Thus was possible to calculate the thermal dilatation, equal to 0,033mm to the temperature variation obtained experimentally. Was obtained also the temperature outline, made by the base bearing's radius and the boundary conditions. With the results it was observed that the considerations about the variable and the boundary conditions are valid, once the results are conformed with the literature.*

Keywords: *Bearing, inductive heating, mechanical interference.*