

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DO AQUECIMENTO DE UM ROLAMENTO DE ESFERAS PARA O PROCESSO
DE MONTAGEM EM UMA INDÚSTRIA DO SETOR METALMECÂNICO

por

Gabriela Bellardinelli Oliveira

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

Gabriela Bellardinelli Oliveira

ANÁLISE DO AQUECIMENTO DE UM ROLAMENTO DE ESFERAS PARA O PROCESSO
DE MONTAGEM EM UMA INDÚSTRIA DO SETOR METALMECÂNICO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburo Zevallos

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, dezembro de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Oliveira, Gabriela
ANÁLISE DO AQUECIMENTO DE UM ROLAMENTO DE ESFERAS
PARA O PROCESSO DE MONTAGEM EM UMA INDÚSTRIA DO SETOR
METALMECÂNICO / Gabriela Oliveira. -- 2019.
27 f.
Orientador: Francis França.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Montagem a quente. 2. Rolamento de esferas. 3.
Simulação numérica. 4. Dilatação térmica. 5.
resistência térmica de contato. I. França, Francis,
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer meu orientador Prof. Dr. Francis H. R. França pela disponibilidade e por aceitar o desafio de realizar esse trabalho. Agradeço também ao apoio técnico do Eng. Luiz Fernando Bez, que me auxiliou em percalços encontrados no caminho. Ao Laboratório de Radiação Térmica, sou grata por ceder sua infraestrutura para realização das simulações.

Aos colegas de trabalho, técnicos e engenheiros, agradeço pelos dias de convivência, pelos conhecimentos compartilhados e pela confiança durante o desenvolvimento desse projeto. Aos meus amigos, agradeço pelo apoio e compreensão. Em especial, aqueles que tive o privilégio de conviver durante os anos de graduação e aqueles que conheci no meu período de estágio. Passamos por diversos desafios lado a lado, nos tornamos melhores pessoas e profissionais, e por isso sou eternamente grata.

Agradeço aos meus pais, Paulo (in memoriam) e Marcia, por todo o carinho, pelos ensinamentos e valores transmitidos. Além de todo apoio emocional e financeiro oferecido durante toda a minha vida e, especialmente, nos meus anos de graduação. Vocês não mediram esforços para que eu pudesse ter conforto e uma educação de qualidade. As minhas conquistas também são de vocês.

Oliveira, Gabriela. Análise do Aquecimento de um Rolamento de Esferas para o Processo de Montagem em uma Indústria Do Setor Metalmeccânico . 2019. 27. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

Este trabalho objetiva investigar a realização de um procedimento de montagem a quente de rolamentos e eixos em uma linha de montagem, em que o encaixe é realizado de forma manual. O tempo de processo de aquecimento é de 20 s, representando 50% do tempo do ciclo. O desenvolvimento passa pela modelagem do processo em *software* de simulação computacional ANSYS (*Transient Thermal* e *Transient Structural*). Para o desenvolvimento do modelo, analisam-se diferentes formas de resistência térmica de contato. Posteriormente, comparam-se os resultados simulados com testes experimentais realizados no posto de trabalho onde ocorre o processo de montagem. Após encontrar os parâmetros de simulação e compara-los aos dados experimentais, são avaliados aspectos do aquecimento e dilatação térmica obtida. Verifica-se falta de homogeneidade de dilatação e pouca eficiência no processo de aquecimento, indicando possíveis consequências tanto ergonômicas, durante a operação de montagem, quanto estruturais no rolamento, durante o encaixe do eixo. Por fim, realiza-se uma proposta de novo sistema de aquecimento utilizando resistências elétricas a fim de reduzir o tempo de ciclo da fase. Indica-se a utilização de equipamentos com indução eletromagnética para o trabalho em temperaturas superiores.

PALAVRAS-CHAVE: montagem a quente, rolamento de esferas, resistência térmica de contato, simulação numérica, dilatação térmica

Oliveira, Gabriela. Heating Analysis of a Ball Bearing for Assembly Process in a Metalworking Industry. 2019. 27. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

This report aims at the investigation of a hot bearing mounting in an assembly line, where the fitting procedure is performed manually. The heating process time is 20 s, representing 50% of the phase cycle time. The development goes through a modeling process in ANSYS (Transient Thermal and Transient Structural) computer simulation software. To apply the model, it is analyzed different forms of thermal contact resistance, later evaluated by comparing the simulated results with experimental tests performed at the workstation where the assembly process occurs. After finding the simulation parameters and comparing them to the experimental data, heating aspects and the thermal expansion obtained are evaluated. There is a lack of homogeneity of expansion and little efficiency in the heating process, indicating possible ergonomic consequences in operating the assembly, as well as structural consequences in the bearing, during shaft fitting. Finally, a suggestion for a new heating system using electrical resistors is made in order to reduce the phase cycle time. The use of electromagnetic induction equipment to work at higher temperatures is indicated.

KEYWORDS: hot mounting, deep groove ball bearing, thermal contact conductance, numerical simulation, thermal expansion

NOMENCLATURA

β_m	Coeficiente de dilatação volumétrica	[1/C°]
V	Volume	[m ³]
T	Temperatura	[°C]
P	Pressão de contato aparente	[Pa]
TCC	Condutância térmica de contato (<i>Thermal contact conductance</i>)	$\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$
m	Declive médio absoluto	-
σ	Rugosidade RMS combinada	[μm]
k_s	Média aritmética de condutividades	$\left[\frac{W}{mK} \right]$
H_c	Dureza de contato plástica	[Pa]
z_{trunc}	Level de truncamento	-
w_x	Incerteza	-
t	Valor da distribuição t-Student	-
s	Desvio experimental	-
n	Número de eventos da amostra	-
x	Eventos da amostra	-
p	Função densidade de probabilidade	-
TG	Modelo distribuição Gaussiana truncada	-
....	Rugosidade RMS	-

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1 MANCAIS DE ROLAMENTO.....	1
2.1.2 Métodos de montagem de eixos em rolamentos	2
2.2 DILATAÇÃO TÉRMICA	3
2.3 RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO.....	3
2.3.1 Resistência de contato rolamentos de esferas	4
2.4 PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS	5
3. CASO DE ESTUDO.....	5
3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	6
3.2 SIMULAÇÃO ANSYS.....	7
3.2.1 Modelagem teórica do problema térmico	7
3.2.2. Modelagem expansão do rolamento	8
3.2.3 Modelagem computacional	8
3.2.4 Propostas de melhorias no sistema.....	9
4. RESULTADOS.....	9
4.1 TESTES EXPERIMENTAIS.....	9
4.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	10
4.2.1 Estudo de independência de malha	11
4.2.2 Convergência no tempo	11
4.2.3 Resultados processo atual de montagem.....	11
4.2.4 Proposta de redução do tempo de aquecimento	14
5. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1. INTRODUÇÃO

Dentre os métodos de produção existentes na indústria, destacam-se as linhas de montagem, destinadas a realizar a junção de componentes já processados. A união desses componentes pode se dar de forma permanente ou semipermanente. Dos métodos permanentes tem-se: soldagem, brasagem e ligação adesiva. Quanto aos procedimentos semipermanentes, em que os componentes são mais facilmente separáveis, ressalta-se o tradicional uso de fixadores (como parafusos e porcas), rebites e ajuste por interferência. Sendo esse último normalmente utilizado na montagem de mancais de rolamento. A montagem pode ocorrer de duas formas principais: *press fitting*, pela utilização de prensas, ou *expansion fit* e *shrink fit*, métodos de resfriamento ou aquecimento de um dos componentes a serem montados (GROOVER, 2010).

Em um estudo mais aprofundado de um processo de aquecimento de mancais de rolamento para montagem, o principal aspecto a ser compreendido é a expansão térmica no tempo, decorrente do comportamento do campo de temperaturas. Babu *et al.* (2015) desenvolveram um estudo numérico e experimental com a finalidade de estimar a efetividade da condutividade térmica entre componentes de um rolamento em condição estática. Milanez *et al.* (2004) desenvolveram um estudo com o intuito de comparar modelos analíticos de resistência térmica de contato com resultados experimentais a baixas pressões de contato, condição encontrada no rolamento fora de operação. Contudo, não foram encontrados estudos cujo objetivo fosse analisar o aquecimento de rolamentos com foco em sua montagem em alojamentos e eixos.

O presente trabalho propõe-se a investigar o método de aquecimento de um mancal de rolamento de esferas tipo 6202 com o objetivo de realizar a inserção de um eixo em uma linha de montagem da indústria do setor metal mecânico. Valendo-se de dados experimentais, modelos analíticos e simulações numéricas, pretende-se obter condições de contorno que representem o fenômeno físico de forma satisfatória e avaliar seus impactos no modelo. Deseja-se, assim, caracterizar o processo atual da montagem do rolamento. Por fim, pretende-se realizar propostas de melhorias no sistema utilizando simulações numéricas com a finalidade de reduzir o tempo de ciclo do processo, uma vez que o aquecimento do rolamento representa 50% do tempo máquina da estação de trabalho estudada.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MANCAIS DE ROLAMENTO

Rolamentos podem ser empregados em diversos tipos de máquinas que necessitem de aplicação de uma carga radial em rotação. Nesses componentes a carga é transferida no contato de elementos de rolamento. A nomenclatura mais usual para os componentes que compõe o rolamento são: anel externo, anel interno, esferas (ou elementos rolantes) e porta-esferas (também chamado de separador), representados esquematicamente na Figura 1. Além do porta esferas, o rolamento, alternativamente, pode ser aberto ou contar com blindagens de placas de aço ou vedação com proteção de borracha, a fim de evitar a saída do lubrificante ali inserido e a entrada de partículas indesejadas (BUDYNAS; NISBETT, 2008).

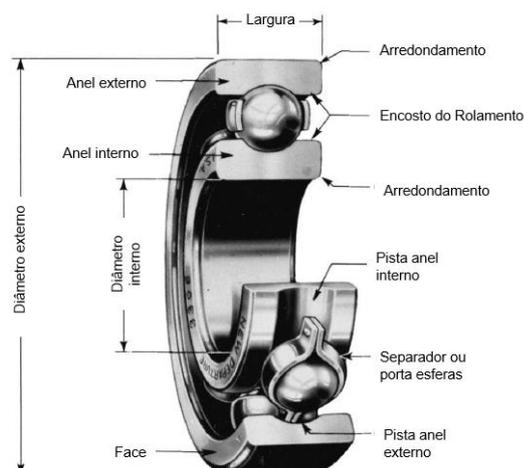


Figura 1 – Nomenclatura de mancal de rolamento de esferas (Adaptado de BUDYNAS; NISBETT, 2008).

Encontram-se disponíveis no mercado mancais com características específicas para se adequar a cada tipo de projeto, suportando cargas axiais, radiais ou uma combinação delas. Destaca-se o uso de rolamentos fixos de uma carreira de esferas (Figura 1) para utilização de carga radial e axial (em ambos os sentidos) moderadas. Caso se exceda a carga axial nesse tipo de rolamento, existe o risco de possível separação dos componentes durante a aplicação do carregamento (NSK, 2011).

Além disso, para o correto desempenho em operação, é fundamental que, na fase de dimensionamento dos rolamentos, tenha-se levado em consideração o local de aplicação dessas cargas rotativas, a fim de não ocasionar deslizamento entre as partes. Segundo Budynas e Nisbett (2008), utiliza-se normalmente o ajuste com interferência no anel que apresenta rotação, e no anel estacionário ajuste com folga. Assim, pode-se realizar a seleção das tolerâncias necessárias no anel interno, anel externo, eixo e alojamento.

A folga ou interferência utilizada é determinante para estabelecer o método mais adequado de montagem do rolamento em cada caso. A montagem se dá com inserção do anel externo do rolamento no alojamento, e a inserção de um eixo em seu anel interno.

2.1.2 Métodos de montagem de eixos em rolamentos

Para correta montagem dos rolamentos, deve-se procurar seguir procedimentos indicados por fabricantes. Os métodos mais usuais são a montagem a frio pela prensagem do eixo contra o anel interno, ou a quente. Na montagem a quente, o anel interno é aquecido e ocorre a dilatação do componente, permitindo a inserção do eixo. Recomenda-se esse tipo de processo para rolamentos com ajuste interferente, ou quando o esforço para realizar a montagem seja excessivo. Também é indicada uma margem de segurança de 30 °C de aquecimento. Além disso, pode-se utilizar equipamentos com resistências elétricas, como pratos aquecidos, ou banhos em óleo quente (FAG, 2010). Segundo Dahmer (2013), outra possibilidade frequentemente indicada por fabricantes é o aquecimento por indução eletromagnética, por tratar-se de um processo seguro, preciso e rápido.

A fabricante de rolamentos SKF (2019) indica que para pequenos rolamentos (abaixo de 80 mm) a montagem pode ocorrer a frio (excetuando casos em que o rolamento e eixo possuam interferência). Além disso, a empresa ainda recomenda que rolamentos abertos não sejam aquecidos acima de 120 °C, e rolamentos com blindagem acima de 80 °C.

2.2 DILATAÇÃO TÉRMICA

Devido à dificuldade de métodos de resfriamentos rápidos e efetivos, o método térmico mais amplamente empregado na montagem de rolamentos é aquele que envolve o aquecimento. A dilatação térmica é o fenômeno físico que permite esse processo ser realizado.

A variação da temperatura de um sólido resulta em uma variação de volume correspondente (Touloukian *et al.*, 1975). A qual variação é definida por:

$$\beta_m = \frac{V_2 - V_1}{V_1(T_2 - T_1)} \quad (1)$$

A variação β_m é chamada de coeficiente médio expansão volumétrica. Uma vez que o coeficiente real de expansão varia com a temperatura, ele deve ser definido por um diferencial a pressão constante:

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad (2)$$

Definições semelhantes existem para determinar o coeficiente linear de expansão térmica, porém em função do comprimento do sólido. A expansão térmica volumétrica ainda pode ser definida em função da densidade com expressões semelhantes. Sabe-se também que, para materiais isotrópicos, o coeficiente de dilatação linear é cerca de 3 vezes menor que o volumétrico.

2.3 RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO

No estudo da transferência de calor entre superfícies sólidas, deve-se sempre levar em consideração os efeitos da resistência térmica de contato ou, alternativamente, condutância térmica de contato (definido como o inverso da resistência). Segundo Bow den e Tabor (1950), mesmo em altas pressões (na ordem de 10 MPa), a área de contato entre superfícies metálicas é de 1 a 2% da nominal. Portanto, o que acontece nessas zonas é a variação abrupta de temperatura. O autor Madhusudana (1996) apontou que esse tipo de efeito não pode ser negligenciado, especialmente quando se estuda o contato entre sólidos pouco condutores, como aço inoxidável, ou quando o interstício é preenchido por bons condutores. Normalmente, o fluxo de calor através do contato de superfícies sólidas é medido realizando testes no vácuo e em um segundo meio desejado. Depois, realiza-se a comparação entre os resultados, que deve levar a um valor reduzido no teste a vácuo.

Também foram desenvolvidos diversos modelos analíticos que tentam expressar o efeito da condutância térmica de contato. Dentre os modelos, pode-se destacar o CMY, desenvolvido por Cooper *et al.* (1969) para superfícies deformando plasticamente. Os autores Sridhar e Yovanovick (1994) realizaram comparações entre esses modelos com dados experimentais coletados por outros autores. Para o modelo CMY, conclui-se que é representativo quando as superfícies estão em altas pressões de contato. Na comparação desses modelos (baseados no CMY) com dados experimentais observa-se que a condutância térmica de contato é subestimada em baixas pressões de contato, uma vez que assume que a distribuição dos picos da rugosidade é Gaussiana. Tal aproximação tem um comportamento adequado em até 2 vezes o desvio padrão, como pode-se ver na Figura 2, que mostra os picos das distribuições da superfície de um aço AISI 304. Além disso, os picos, normalmente, não devem ultrapassar 4,5 vezes o desvio padrão. Entende-se que se os picos são inferiores aqueles calculados pela distribuição Gaussiana, a folga existente entre os sólidos é também inferior (MILANEZ *et al.*, 2004).

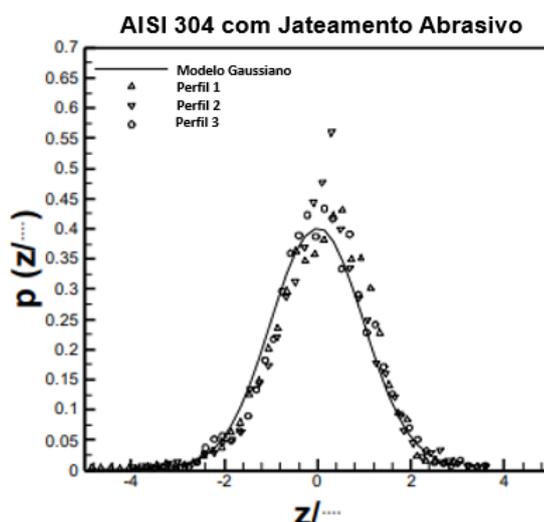


Figura 2 – Distribuição de três diferentes perfis de uma superfície jateada de AISI304 e comparação com modelo Gaussiano (Adaptado de MILANEZ *et al*, 2002).

Portanto, Milanez *et al.* (2004) propuseram a seguinte expressão para determinação da condutância térmica de contato em baixas pressões de contato (TCC):

$$TCC = 1,25(m/\sigma)k_s(P/H)^{0,95} \left[1 + 1/f\right]^{0,9289} \sqrt{1 - 1/(1 + f)} \quad (3)$$

onde:

$$f = P/H_c \sqrt{2\pi} z_{trunc} \exp\left(z_{trunc}^2/2\right) \quad (4)$$

A expressão leva em consideração parâmetros de superfície e uma distribuição Gaussiana truncada (*truncated Gaussian model*, TG), em que a distribuição dos picos é limitada por um valor z_{trunc} , que é o nível de truncamento. Enquanto que os valores m e σ são parâmetros superficiais relacionados ao par em contato. Na comparação da expressão desenvolvida com testes experimentais para diferentes pressões de contato, tem-se que o modelo TG tem desvios de 5,4 a 17,5%, comparado ao modelo de distribuição completamente gaussiana com 21,1 a 48,8% de desvio. Os testes são referentes a superfícies de aço inox AISI 304 e Ni 200 (MILANEZ *et al.*, 2004).

2.3.1 Resistência de contato em rolamentos de esferas

A condutância térmica pode ter características mais específicas quando consideramos a transferência térmica entre componentes de rolamentos, devido à geometria, lubrificação, atrito e condições de refrigeração. Sendo assim, Babu *et al.* (2015) conduziram um estudo abordando a resistência térmica de contato entre componentes de um rolamento de esferas dependendo da rugosidade da superfície e temperatura. Os estudos contaram com testes experimentais utilizando combinações de aços AISI 4140 e AISI 52100, com lubrificação (SKF *Premium* VKG9/1) e sem. Os resultados foram comparados com simulações numéricas da distribuição da temperatura, onde foi possível verificar a efetiva queda no campo de temperatura na passagem entre os componentes. A Figura 3 apresenta alguns dos dados obtidos por Babu *et al.* (2015), onde se pode observar a variação

da resistência térmica de contato dependendo do acabamento da superfície e da temperatura da interface dos sólidos.

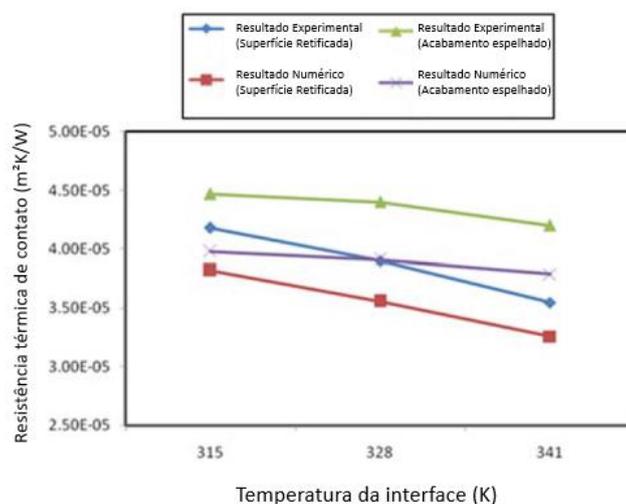


Figura 3 – Resistência térmica de contato em razão da temperatura da interface e acabamento (Adaptado de Babu *et al.*, 2015).

2.4 PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

Ao realizar testes experimentais, frequentemente é assumida a distribuição Gaussiana para os dados medidos. Entretanto, muitas vezes, a amostra não tem características que permitam seguir essa distribuição estatística. Dessa maneira, havendo a necessidade de avaliar amostras com menos de 30 eventos, indica-se tratá-la como uma distribuição de t-Student (SCHNEIDER, 2000). A incerteza, nesses casos, é dada por:

$$w_x = \frac{ts}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

O valor da distribuição (t) é dependente do número de graus de liberdade, que por sua vez depende do tamanho da amostra. O desvio padrão experimental é dado por:

$$s = \sqrt{\sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (6)$$

com \bar{x} dado pela média aritmética dos eventos.

3. CASO DE ESTUDO

O presente trabalho pretende avaliar o aquecimento para montagem por *expansion fit* de um rolamento de esferas 6202, já previamente montado na peça em que é alojado, denominada Peça A para a finalidade desse texto. Esse aquecimento ocorre pela utilização de uma resistência blindada microtubular de 250 W (com capacidade para atingir 450 °C), acoplada a uma ponteira de aço AISI 304 (Figura 4). A ponteira metálica por sua vez, é colocada em contato com o anel interno do rolamento, que expande ao ser aquecido durante 20 s.

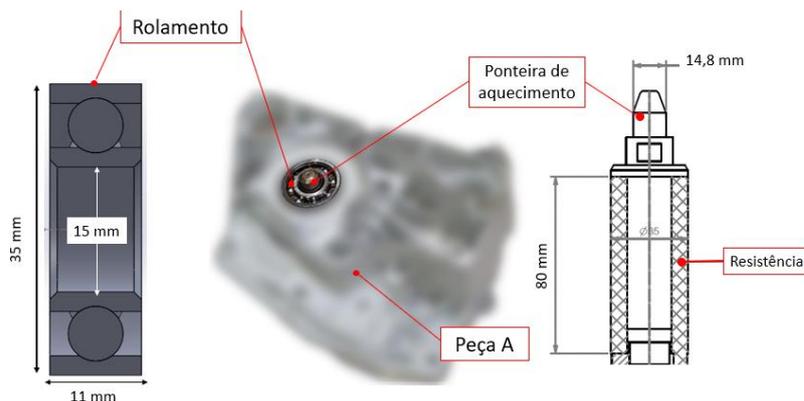


Figura 4 – Peças envolvidas no sistema de aquecimento.

Após montados, o eixo e o anel interno do rolamento devem apresentar interferência máxima de $16 \mu\text{m}$ quando manufacturados nos limites de suas tolerâncias de fabricação. A resistência é controlada por um CLP (Controlador lógico programável) e um sensor de temperatura, já instalados na linha de produção. O CLP aciona e desliga o aquecimento de forma a manter a temperatura entre $300 \text{ }^\circ\text{C}$ e $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Verificou-se, ao longo do tempo, que a temperatura média da ponteira foi de $330 \text{ }^\circ\text{C}$.

Desta forma, serão abordados neste capítulo aspectos quanto a metodologia utilizada para modelar o sistema estudado em software de simulação numérica e para verificar se tal modelagem representa o processo real de forma satisfatória. Em seguida, propõe-se um método para desenvolver um novo sistema e simular alterações de funcionamento da resistência que reduzam o tempo de ciclo da operação.

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Realizou-se um experimento a fim de medir a variação da temperatura em dois pontos essenciais para avaliação da montagem: a superfície externa no anel interno e o centro da ponteira (Figura 5). Os pontos foram escolhidos por se aproximarem da região de contato do anel interno e ponteira, facilitando a avaliação posterior da resistência térmica de contato. Durante o experimento a temperatura ambiente foi de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ e foram utilizados os mesmos equipamentos de aquecimento empregados regularmente na produção (ponteira, resistência e controladores). Foram utilizadas quatro amostras do conjunto montado (Peça A e rolamento), sendo elas extremamente semelhantes geometricamente por possuírem baixas tolerâncias de fabricação. Os conjuntos foram denominados A1, A2, A3 e A4. Foi realizada apenas uma medição em cada amostra para captar a variação de temperatura no rolamento, uma vez que o aquecimento excessivo poderia alterar as propriedades do lubrificante, modificando o mecanismo de transferência de calor.

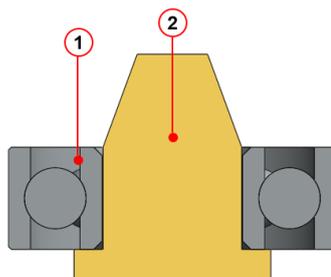


Figura 5 – Pontos de medição de temperatura nas peças.

Para medição da temperatura, utilizou-se um termopar tipo J com calibração realizada pelo próprio fabricante para mensurar a temperatura. Para visualização, foi utilizado um controlador C704 da empresa Contemp, próprio para o controle de instrumentos de medição de temperatura. Na fixação do termopar no rolamento, foi aplicada a resina adesiva A60X que, depositada sob a junta, permitiu um contato mais efetivo com o anel do rolamento, e o isolamento das interferências do ambiente. Para fixação no centro ponteira, o termopar foi posicionado com sua junta aberta através de um furo existente no topo do dispositivo.

3.2 SIMULAÇÃO ANSYS

Foram realizadas simulações no pacote ANSYS para analisar o processo atual de aquecimento dos rolamentos, que contou com uma análise termomecânica para determinação de temperaturas e processo de expansão do rolamento. As análises foram realizadas com um modelo 3D da ponteira e rolamento em regime transiente. Após definir a modelagem que melhor refletisse o processo real, realizaram-se propostas de melhoria no sistema, utilizando simulações numéricas em ANSYS para avaliar seus efeitos.

3.2.1 Modelagem do problema térmico

Para a simulação térmica, as condições de contorno são apresentadas esquematicamente na Figura 6. Importaram-se para o ambiente *Transient Thermal* as geometrias do rolamento (esferas, anel interno e anel externo) e da parte superior da ponteira, mais próxima da região de contato com o rolamento. Utilizou-se condição de simetria radial nas faces do rolamento, ou seja, sem fluxo térmico, com intuito de reduzir esforço computacional.

No anel externo do rolamento, onde existe o contato com a Peça A, foi imposta uma resistência térmica representando um corpo de massa muito superior à temperatura de 30 °C (temperatura ambiente) e resistência de $1/[8000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})]$. As superfícies do rolamento e ponteira foram consideradas expostas a convecção natural com coeficiente convectivo de $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, representativo da convecção livre. A radiação no rolamento foi negligenciada, uma vez que a peça não atinge altas temperaturas, enquanto que na ponteira foi inserida uma condição de radiação com emissão para o ambiente, pois sua superfície atinge 330 °C. A emissividade utilizada na ponteira foi estimada em 0,8. Apesar de ser fabricada em um aço que normalmente possuiria baixa emissividade, na realidade possui uma superfície opaca já muito desgastada por sua utilização, justificando a utilização de uma emissividade superior (INCROPERA; DEWITT, 2016). As temperaturas iniciais do rolamento e ponteira foram estabelecidas como 30 °C (temperatura ambiente) e 330 °C respectivamente. Nos instantes seguintes, foi fixada uma temperatura de 330 °C na base da ponteira, representando o funcionamento da resistência.

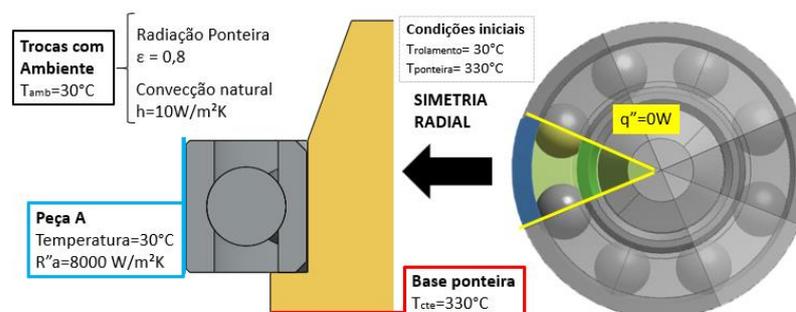


Figura 6 – Representação esquemática das condições de contorno.

Para modelagem da resistência térmica de contato da superfície utilizaram-se estudos conduzidos pelos autores Milanez *et al.* (2004) e Babu *et al.* (2015). As Equações (3) e (4) foram aplicadas para estimar a resistência térmica de contato entre a ponteira e o anel interno do rolamento, utilizando diferentes valores de pressão de contato entre as superfícies, variando de 100 kPa a 1600 kPa. Ainda foram utilizados na expressão os parâmetros de superfície do par aproximados por aqueles medidos experimentalmente por Milanez *et al.* (2004) para o aço AISI 304, mesmo utilizado na ponteira. Para cada um dos nove casos calculados, analisou-se o impacto na solução e selecionou-se aquele que correspondia ao menor desvio médio da temperatura no anel interno do rolamento, quando comparada aos dados experimentais.

Para a resistência térmica existente entre os componentes do rolamento, foram utilizados os valores experimentais obtidos por Babu *et al.* (2014) para superfícies lubrificadas como ponto de partida da análise. Em seguida, foram verificados os impactos de diferentes valores no modelo, selecionando novamente aquele que resultasse em menor desvio médio da temperatura no rolamento em relação aos dados experimentais.

Por fim, procedimento semelhante foi realizado para avaliar os impactos da hipótese de $1 / [8000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})]$ como a resistência representando o corpo Peça A, selecionando-se o valor com resultado mais adequado ao experimental. Esse valor foi estimado, uma vez que não foram encontradas fontes que representassem modelos semelhantes àquele discutido nesse texto. Ademais, as propriedades térmicas e físicas foram consideradas constantes e isotrópicas.

3.2.2. Modelagem expansão do rolamento

Para avaliação da expansão térmica, foi importado no ambiente *Transient Structural* apenas o rolamento (esferas, anel interno e anel externo), uma vez que não se tem interesse em estudar o comportamento da ponteira durante a expansão. Foi utilizado também o carregamento obtido na análise térmica com o menor desvio em relação ao teste experimental. Por fim, os suportes foram configurados como simplesmente apoiado na base do anel interno, representando o ressalto de apoio da ponteira, e engastado no anel externo, representando o contato da Peça A (Figura 7). As propriedades foram consideradas constantes e isotrópicas.

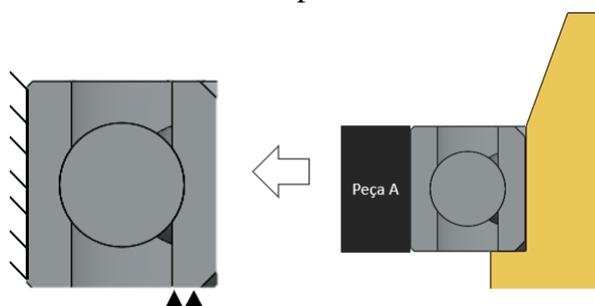


Figura 7 – Representação esquemática dos apoios utilizados na modelagem do problema.

3.2.3 Modelagem computacional

Para análise térmica, os corpos em contato foram considerados colados, conectando os nós das superfícies. A documentação do ANSYS recomenda aplicação de resistências ao fluxo de calor pelo uso da condutância térmica de contato. A forma de contato entre as superfícies foi considerada constante. Para convergência do fluxo de calor e temperatura, foi utilizado um critério de 10^{-6} . No modelo de expansão térmica, onde foi obtido o deslocamento das superfícies no processo de dilatação,

foi utilizado o contato com atrito de coeficiente de 0,05 e rigidez com fator de 0,1. No modelo térmico e de expansão foi aplicado um passo de 0,5 s no tempo e utilizado o *solver* Newton-Rhapon.

O método de malha utilizado nos anéis foi o *Multizone*, que gerou elementos hexaédricos. Nesse modo, a malha foi formulada em uma face da peça e foi repetida ao longo da mesma. Na ponteira foi utilizada uma malha majoritariamente hexaédrica. Nas esferas, optou-se por elementos tetraédricos, a fim de melhorar a ortogonalidade dos elementos. Em média, a ortogonalidade resultante foi de 0,26 com 0,22 de desvio padrão. O Apêndice A apresenta a ortogonalidade dos elementos na peça no último refinamento realizado, discutido posteriormente nesse texto.

Foi realizado ainda, um refinamento local nos contatos próximos à região de interface ponteira e anel interno e interface anel interno e esferas (Figura 8), de forma a garantir melhor representação dos gradientes de temperatura e deslocamento. Em todos os componentes os elementos gerados foram SOLID87 e SOLID90. Os pares utilizados para o contato foram TARGE170 e CONTA174, caracterizando um contato face-face de elementos 3D, onde as superfícies côncavas foram selecionadas como sendo o *target* (ANSYS, 2019).

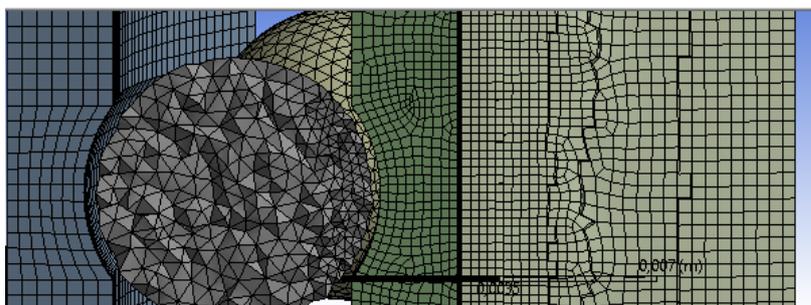


Figura 8 – Refinamento local próximo a região de interesse.

3.2.4 Propostas de melhorias no sistema

Com a finalidade de reduzir o tempo de processo de aquecimento de rolamentos, foi obtida a condição de dilatação do anel interno com as condições de contorno da Figura 6. Uma vez que não foram encontradas referências sobre a condição de dilatação que o anel interno do rolamento deve atingir para realizar a montagem adequadamente, não se propõe aqui avaliar a validade do processo atual. As propostas de melhoria estudadas nesse trabalho visam a alcançar a mesma condição de dilatação do processo atual, entretanto, em tempo reduzido. Para tanto, foram propostas novas condições de operação da temperatura de aquecimento.

4. RESULTADOS

4.1 TESTES EXPERIMENTAIS

Os resultados para as medições de temperatura no rolamento (ponto 1 da Figura 5) são apresentados no gráfico da Figura 9, que mostra a variação no tempo de cada amostra do conjunto rolamento e Peça A. Realizando uma análise estatística do método de medição, utilizando a distribuição de t-Student (ideal para quando se trabalha com baixo número amostral), obteve-se pela Equação (6) que, em média, a incerteza da medição foi de 3,4 °C e a máxima incerteza obtida nessas medições foi de 4,4 °C aos 10 s de aquecimento.



Figura 9 – Variação da temperatura na superfície do anel interno do rolamento.

A variação de temperatura obtida no ponto central da ponteira (ponto 2 da Figura 5) é apresentada na Figura 10. Para as medições realizadas na ponteira, a incerteza obtida pela Equação (6), em média, foi de 1,6 °C e a máxima foi de 2,7 °C aos 13 s. Em todos os casos, o nível de confiabilidade utilizado foi de 95,5%.

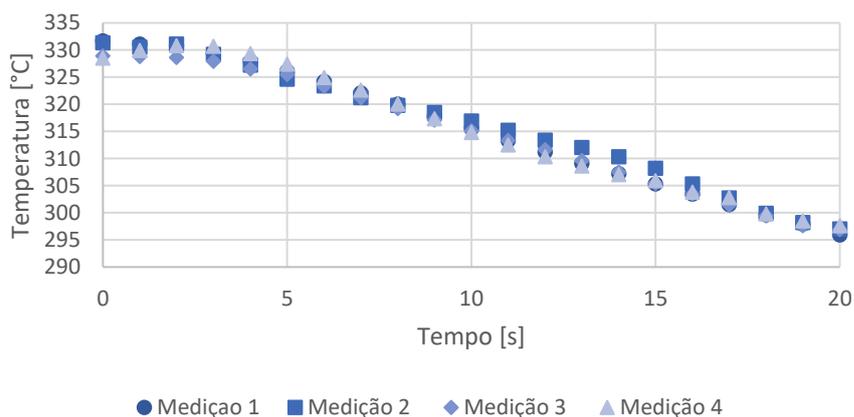


Figura 10 - Variação da temperatura ponto central da ponteira.

As curvas têm comportamentos semelhantes, aproximadamente linear. Igualmente, as taxas de aquecimento se apresentaram muito próximas, indicando coerência nos resultados obtidos. Além disso, percebe-se que a temperatura no rolamento não atinge valores superiores a 120 °C, estando dentro dos padrões indicados por fabricantes de rolamentos.

4.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos na modelagem numérica. Primeiramente, será avaliada a validade da malha utilizada e a discretização no tempo, bem como seus refinamentos. Depois serão abordados os resultados gerados para o processo atual de montagem e, posteriormente, serão realizadas propostas de redução do tempo de processo.

4.2.1 Estudo de independência de malha

Durante o estudo foram desenvolvidas três malhas para o problema térmico, realizando um refinamento no tamanho dos elementos de $\sqrt{2}$. Procurou-se obter um desvio menor de 5% entre os resultados de refinamentos consecutivos. A convergência foi observada pela temperatura para os segundos 10 e 5 de dois pontos distintos do modelo, próximos à zona de contato entre a ponteira e o rolamento. Os pontos selecionados foram a superfície externa do anel interno e superfície da ponteira em contato com o anel. A malha selecionada possui 24821 elementos e 93121 nós. Os resultados da temperatura no anel interno em refinamentos seguidos são apresentados no Apêndice B.

No Apêndice C, são apresentados os resultados da independência da malha para a temperatura na ponteira. As simulações para o estudo de independência de malha, em ambos casos, foram realizadas considerando a transferência de calor entre os componentes sem resistência de contato.

As mesmas malhas foram analisadas no problema mecânico de dilatação térmica, e os resultados se mostraram independentes a partir da malha 1, com desvio inferior a 5%. Para tanto, foi analisado o deslocamento médio de uma aresta da superfície interna do anel interno. Os resultados estão expostos no Apêndice D.

4.2.2 Convergência no tempo

Para análise de independência do resultado em relação ao passo utilizado no tempo, foram empregados na simulação a malha 1 e 3 passos de tempo diferentes: 0,5 s, 0,1 s e 0,05 s. Os resultados foram analisados na superfície do anel interno no problema térmico e na aresta interna do anel interno no problema mecânico. Os resultados são apresentados no Apêndice E, onde observa-se que a convergência é atingida com 0,5 s de passo no tempo.

4.2.3 Resultados do processo atual de montagem

Utilizando-se as Equações (3) e (4), foram obtidos nove valores de condutância térmica de contato na interface ponteira e anel interno (TCC_p) pela variação da pressão de contato entre as superfícies na faixa entre 100 kPa e 1600 kPa. Esses resultados são apresentados na Tabela 1, bem como valores experimentais utilizados na solução de Milanez *et al* (2004) para uma superfície de AISI 304 com rugosidade intermediária.

Tabela 1 – Resultados da condutância térmica de contato para diferentes valores de pressão de contato.

Caso	P [kPa]	TCC _p [W/(m ² K)]	f	ks [W/(mK)]	ztrunc	σ [μm]	m	Hc [GPa]
1	200	141,69	7,89(10 ⁵)	30,3	3,8	1,29	0,049	3,3
2	400	273,73	1,58(10 ⁶)	30,3	3,8	1,29	0,049	3,3
3	600	402,36	2,37(10 ⁶)	30,3	3,8	1,29	0,049	3,3
4	800	528,82	3,16(10 ⁶)	30,3	3,8	1,29	0,049	3,3
5	1000	653,69	3,94(10 ⁶)	30,3	3,8	1,29	0,049	3,3
6	1200	777,31	4,73(10 ⁶)	30,3	3,8	1,29	0,049	3,3
7	1400	899,90	5,52(10 ⁶)	30,3	3,8	1,29	0,049	3,3
8	1600	1021,61	6,31(10 ⁶)	30,3	3,8	1,29	0,049	3,3
9	1800	1142,56	7,10(10 ⁶)	30,3	3,8	1,29	0,049	3,3

A Figura 11 exibe os resultados da variação da temperatura no tempo na superfície do anel interno encontrados nas simulações. Foi apresentada também a média dos dados experimentais para o mesmo ponto no rolamento.

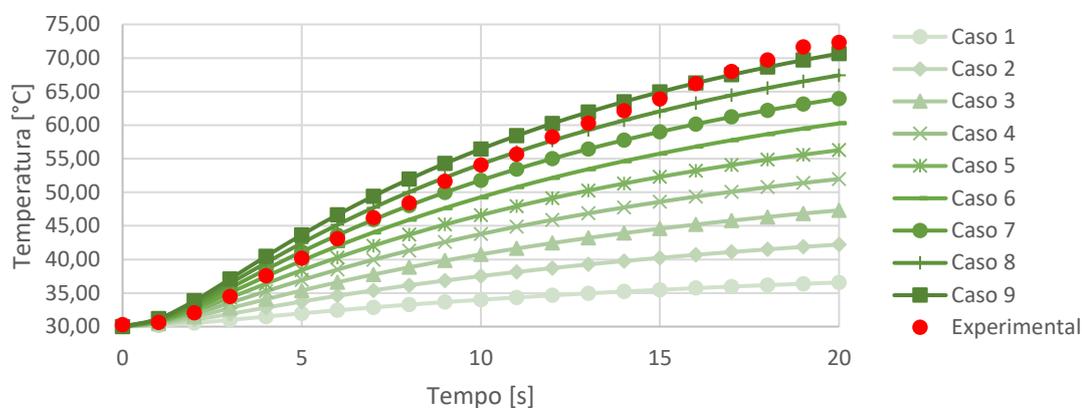


Figura 11 – Temperatura na superfície interna do rolamento para diferentes valores de condutância térmica de contato entre ponteira e anel interno.

Considerando os resultados, foi configurado como constante o valor de $1021,61 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para condutância térmica de contato entre a ponteira e o anel interno (caso 8), por apresentar menor desvio percentual médio do resultado experimental (3,5%). O gráfico comparando os casos apresentados e dados experimentais no ponto central da ponteira encontra-se no Apêndice F. Em seguida, foi realizado o mesmo procedimento para encontrar o valor mais adequado da condutância térmica de contato entre os elementos do rolamento (TCC_r). Os resultados são apresentados na Figura 12, onde a legenda traz os diferentes valores do TCC_r avaliados.

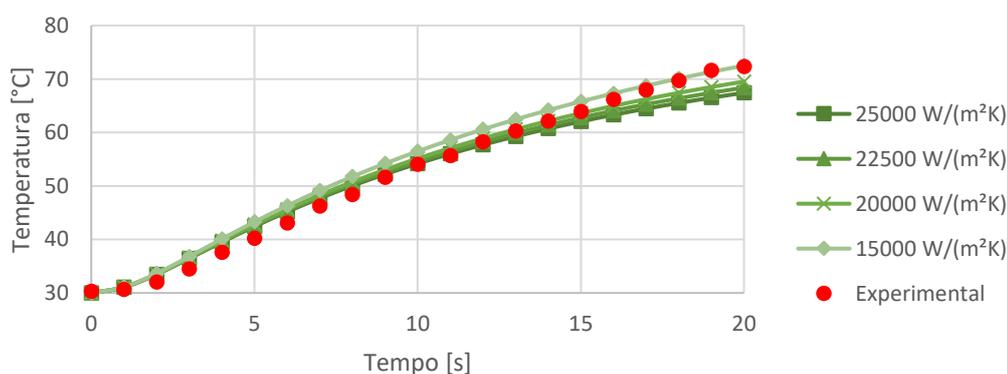


Figura 12 - Temperatura na superfície interna do rolamento para diferentes valores de condutância térmica de contato entre componentes do rolamento.

O valor de TCC_r que trouxe o menor desvio percentual (3,3%) na comparação com os dados experimentais foi de $22500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. No Apêndice G, encontra-se o gráfico comparando a variação da temperatura no centro da ponteira da simulação com dados experimentais. Por fim, foi avaliado o impacto da hipótese de $8000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ representando a condutância da Peça A. A Figura 13 apresenta os resultados obtidos numa faixa de 100 a $8000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

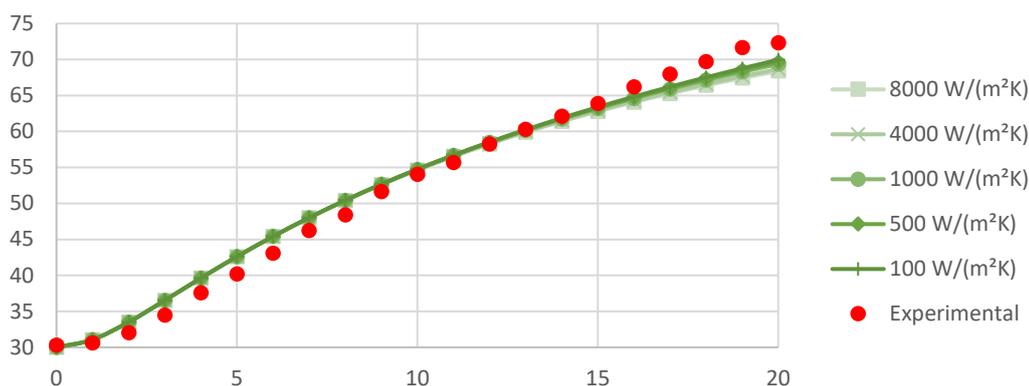


Figura 13 - Temperatura na superfície interna do rolamento para diferentes valores de condutância térmica representando a Peça A.

O valor para a condutância térmica representando a Peça A para o qual foi obtido o menor desvio médio em relação ao experimental (2,9%) foi a partir de 500 W/(m²K). O maior desvio percentual obtido foi de 6,1% aos 6 s e com desvio absoluto de 2,4 °C. O Apêndice D apresenta as curvas obtidas na simulação para o ponto central da ponteira e a sua média experimental. A Figura 14a exibe o campo de temperatura resultante, utilizado como carga térmica no problema de expansão. Enquanto isso, pode-se observar na Figura 14b o deslocamento da aresta do anel interno no eixo z. O menor deslocamento encontrado no instante final foi de 1,90 µm, enquanto que, em média, o deslocamento médio na aresta aos 20 s foi de 2,99 µm.

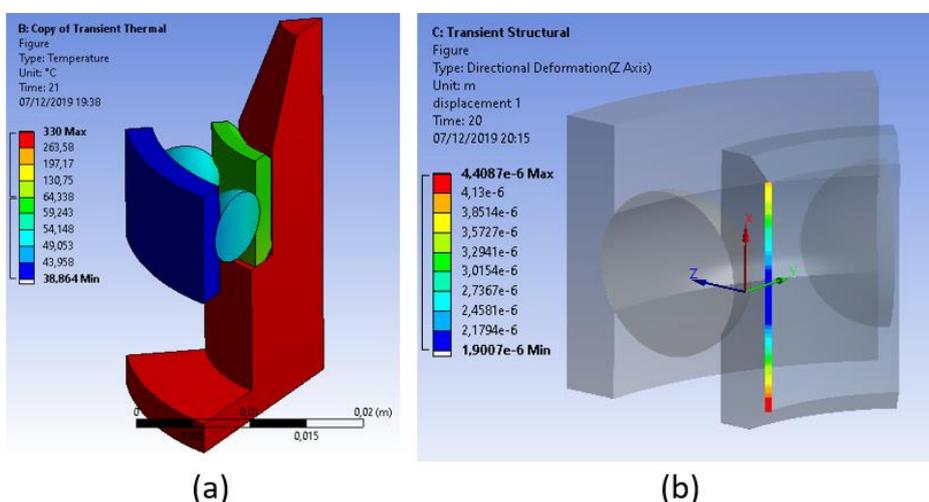


Figura 14 – (a) Resultado do campo de temperaturas nos corpos. (b) Deslocamento resultante na aresta do anel interno no eixo z.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos parâmetros selecionados.

Tabela 2 – Resumo dos parâmetros selecionados de condutância térmica de contato.

TCC_p	1.021,61 W/(m²K)
TCC_r	22.500,00 W/(m²K)
Condutância Peça A	500,00 W/(m²K)

Quanto aos resultados obtidos para as condutâncias térmicas de contato, apresentados na Tabela 2, observou-se que o valor encontrado para TCC_r frente aos demais é coerente, uma vez que se trata de uma superfície lubrificada, com baixa rugosidade e pequena folga interna, intensificando a transferência de calor na região. Para o resultado obtido de condutância da Peça A, notou-se baixa influência no modelo, mesmo para uma faixa de valores relativamente extensa (de $500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a $8000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Portanto, considerou-se a hipótese de $500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ satisfatória. A análise realizada para TCC_p mostrou que o resultado final é muito sensível à essa hipótese. Os parâmetros utilizados representam de forma aceitável os resultados experimentais, apresentando baixo desvio (2,9% em média no rolamento). Quanto à dilatação, observou-se a falta de homogeneidade (Figura 14b) resultado de um aquecimento também desigual, como mostra a Figura 15.

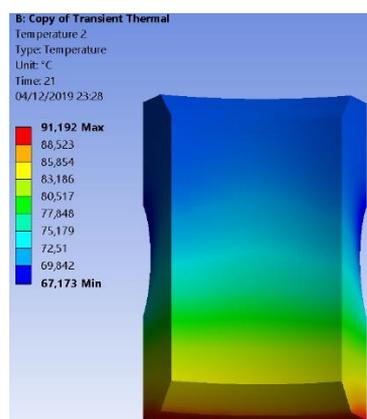


Figura 15 – Campo de temperatura resultante no anel interno.

4.2.4 Proposta de redução do tempo de aquecimento

A Figura 16 apresenta diferentes variações do deslocamento médio da aresta do anel interno conforme a temperatura configurada na ponteira, que foi variada numa faixa de 330 °C (condição atual) até 480 °C . Além disso, pode-se observar o tempo necessário para atingir a condição de montagem atual (linha vermelha) para cada condição de operação. A configuração de temperatura na ponteira que deve realizar o processo de montagem de forma mais efetiva se apresentou como sendo a 480 °C (Apêndice G).

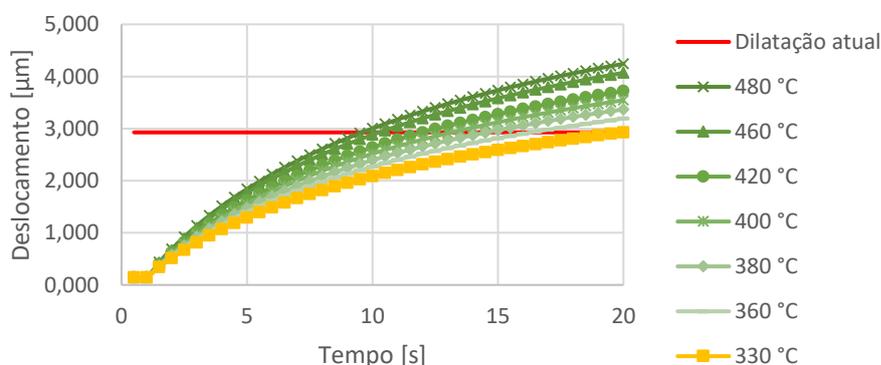


Figura 16 – Variação do deslocamento médio da aresta do anel interno conforme diferentes temperaturas de operação da ponteira

5. CONCLUSÃO

O estudo realizado objetivou investigar o processo de aquecimento de um rolamento de esferas para sua montagem em um eixo em uma linha de montagem e realizar propostas de novas temperaturas de operação para o sistema. Mediante a análise de resultados, entende-se que o objetivo proposto foi alcançado.

Durante o trabalho desenvolvido, observou-se que a dilatação do rolamento ocorre de forma pouco homogênea. Isso decorre do ressalto existente na ponteira, que gera um fluxo térmico excessivo na região inferior do anel frente àquele produzido no contato com a sua face interna. Observa-se também uma disparidade do deslocamento médio da aresta de $2,99 \mu\text{m}$ frente a uma interferência total de $16 \mu\text{m}$ entre eixo e anel interno, quando fabricados no limite de tolerância. Isso indica uma possível dificuldade de realizar a montagem devido a fatores ergonômicos. Esse resultado também aponta para possíveis esforços demasiados que podem ser transferidos aos componentes do rolamento (esferas e pistas dos anéis) durante a inserção do eixo. Para confirmação, indica-se a realização de avaliações estruturais no rolamento durante a montagem.

Quanto à variabilidade nas medições da temperatura no rolamento, pode-se justificar pelo posicionamento da Peça A para a realização do teste. Em outras palavras, a posição da Peça A pode ter levado a diferentes disposições da parede do anel interno do rolamento em relação a ponteira, devido a folga de $0,2 \text{ mm}$ existente entre as peças, resultando em certa oscilação no padrão de aquecimento. Na comparação desses resultados do processo de aquecimento com os simulados, observa-se certa divergência na taxa de aquecimento. Isso indica que o modelo simulado pode estar subestimando as resistências de contato, uma vez que a curva tem um comportamento onde aparenta discreta tendência para um valor constante.

A simulação com diferentes temperaturas de aquecimento na ponteira resultou num valor de 10 s de tempo de aquecimento para uma temperatura $480 \text{ }^\circ\text{C}$. Esse valor foi considerado o limite de aquecimento dentro da condição sugerida por fabricantes de rolamentos, uma vez que o campo de temperaturas no anel interno atinge $120 \text{ }^\circ\text{C}$ (limite para rolamentos abertos). Para realização do processo de aquecimento com esses parâmetros, se faz necessária a substituição da resistência por outra de potência superior (uma vez que a atual não atinge mais que $450 \text{ }^\circ\text{C}$). Recomenda-se a avaliação técnica e econômica da utilização de equipamentos alternativos a resistência, como indutores, que resultam em um processo mais seguro e rápido para operação em temperaturas superiores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, “**Documentation**”, 2019

Babu, S., Manisekar K., Kumar, A.P., Rajenthirakumar, D. **Experimental study of Thermal Contact Resistance in Hardened Bearing Surfaces**, 2015.

Bowden, F.P., Tabor, D.; “**The Friction and Lubrification of Solids**”, 1950

Budynas, R.G., Nisbett, J. K.; “**Shigley's Mechanical Engineering Design**”, McGraw Hill, 8th Edition, 2008

Cooper, M., Mikic, B. B., Yovanovich, M. M.; “**Thermal Contact Conductance**”, 1969

Dahmer, B. P.; “**Bearing Maintenance Practices to Ensure Maximum Bearing Life**”, 2013

Groover, M.P.; “**Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**”, Pearson, 4th Edition, 2015

Incropera, F.P., Dewitt, D.P.; “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**”, McGraw Hill, 7^a Edição, 2016

Madhusudana, C. V.; “**Thermal Contact Conductance**”. Springer, 1996

Milanez, F.H., Yovanovich, M. M., Culham, J. R.; “**Effect of Surface Asperity Truncation on Thermal Contact Conductance**”, 2002

Milanez, F.H., Yovanovich, M.M., Mantelli, M. B. “**Thermal Contact Conductance at Low Contact Pressure**”, 2004

NSK; “**Rolling Bearings for Industrial Machinery**”, 2011 disponível em <http://www.nskamericas-literature.com/en/rolling-bearings/> consultado em 20/12/2019

Schneider, P.; “**Incertezas de Medição e Ajuste de dados**”, 2007

Schaeffler FAG; “**Mounting of rolling bearings – Thermal mounting**” , 2010, disponível em https://medias.schaeffler.com/medias/montage/mh1_medias_023_en_gb_de.pdf consultado em 20/12/2019

SKF; “**SKF Bearing Maintenance Handbook**”, 2011, disponível em [https://www.skf.com/binaries/323-463040/0901d1968013be94-SKF-bearing-maintenance-handbook---10001_1-EN\(1\).pdf](https://www.skf.com/binaries/323-463040/0901d1968013be94-SKF-bearing-maintenance-handbook---10001_1-EN(1).pdf) consultado em 20/12/2019

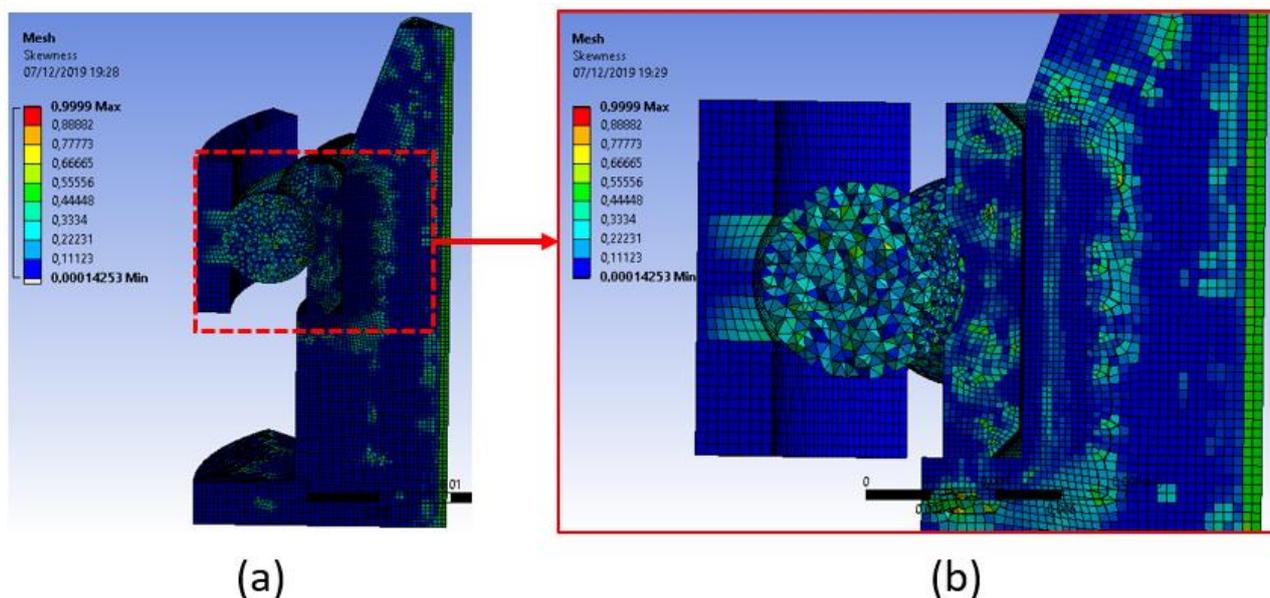
Sridhar, M. R., Yovanovich, M.M.; “**Review of Elastic and Plastic Contact Conductance Models: Comparison and Experiment**”, 1994

Twidell, J.W., Weir, A.D.; “**Renewable Energy Resources**”. Taylor, 2nd Edition, 2006

Touloukian, Y. S., Kirby, R. K., Taylor, R. E., Desai, P. D.; “**Thermal Expansion Metallic Elements and Alloys**”, Springer, 1975

APÊNDICE

APÊNDICE A – (a) Ortogonalidade dos elementos da Malha 3. (b) Ortogonalidade dos elementos da malha 3 próximo da região de contato ponteira e anel interno.



APÊNDICE B - Resultados do refinamento para temperatura no anel interno do rolamento.

Malha	N° Elementos	Temperatura	Desvio	Temperatura	Desvio
		tempo = 5 s (°C)	Temperatura tempo = 5 s	tempo = 10 s (°C)	Temperatura tempo = 10 s
1	24821	85,46	-	121,97	-
2	46982	87,62	2,5 %	125,04	2,5 %
3	146491	88,63	1,1 %	127,17	1,7 %

APÊNDICE C - Resultados do refinamento de malha para temperatura na ponteira.

Malha	N° Elementos	Temperatura	Desvio	Temperatura	Desvio
		t=5 (°C)	Temperatura tempo = 5 s	tempo = 10 s (°C)	Temperatura tempo = 10 s
1	24821	311,4	-	295,1	-
2	46982	311,7	0,09 %	295,6	0,17 %
3	146491	311,8	0,03 %	296,0	0,13 %

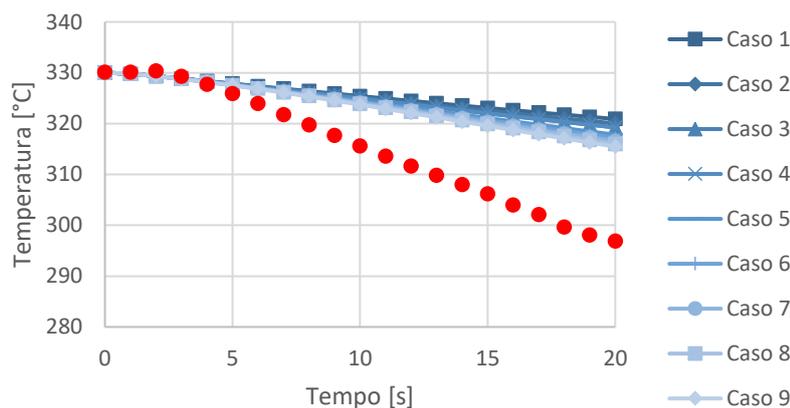
APÊNDICE D - Resultados do refinamento de malha no problema de expansão térmica.

Malha	N° Elementos	Deslocamento tempo = 5 s (mm)	Desvio Temperatura tempo = 5 s	Deslocamento tempo = 10 s (mm)	Desvio Temperatura tempo = 10 s
1	24821	0,0138	-	0,0112	-
2	46982	0,0141	2,1 %	0,0114	1,75 %
3	146491	0,0142	0,7 %	0,0115	0,86 %

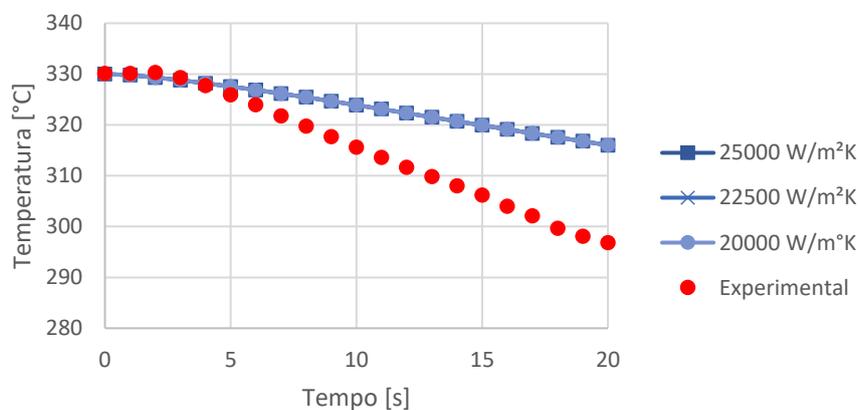
APÊNDICE E – Resultados do refinamento da discretização no tempo na temperatura do rolamento.

Passo (s)	Temperatura (°C)	Desvio Temperatura	Deslocamento (mm)	Desvio Deslocamento
0,5	121,97	-	0,0138	-
0,1	123,15	0,96%	0,0138	0,00%
0,05	123,29	0,11%	0,0138	0,00%

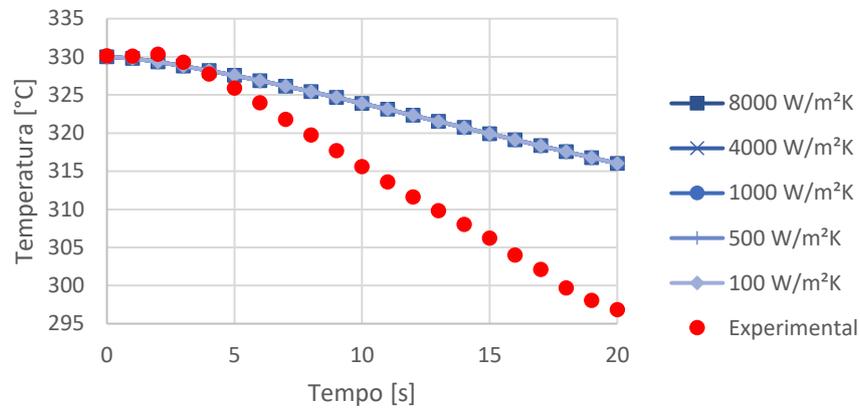
APÊNDICE F – Temperatura no centro da ponteira para diferentes valores de condutância térmica de contato entre ponteira e anel interno.



APÊNDICE G – Temperatura no centro da ponteira para diferentes valores de condutância térmica de contato entre componentes do rolamento.



APÊNDICE H – Temperatura no centro da ponteira para diferentes valores de condutância térmica de contato para Peça A.



APÊNDICE E – (a) Campo de temperaturas no anel interno quando a ponteira opera a 480°C. (b) Deslocamento da aresta do anel interno no eixo Z.

