

**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Bahia

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
BAHIA

CAMPUS SIMÕES FILHO

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VINICIUS SORIANO SANTOS

**ANÁLISE DE FALHA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZADA EM
INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

Simões Filho/BA

2022

Vinicius Soriano Santos

ANÁLISE DE FALHA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZADA EM INDÚSTRIA
PETROQUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia,
campus Simões Filho, como requisito
parcial para a obtenção do título de
Bacharel(a) em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Me. Marcus Vinicius Pascoal Ramos

Simões Filho/BA

2022

A474a Soriano Santos, Vinicius

Análise de Falha de uma Bomba Centrífuga Utilizada em Indústria Petroquímica / Vinicius Soriano Santos. – Bahia: Instituto Federal da Bahia, 2022.

28f.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) – Instituto Federal da Bahia: Bahia, 2022.

Orientador(a): Me. Marcus Vinicius Pascoal Ramos

1. Projeto Final de Curso de Engenharia Mecânica. I. Título.

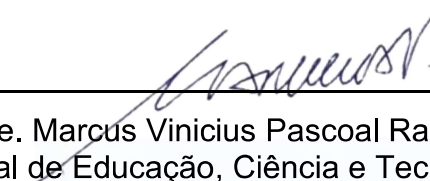
VINICIUS SORIANO SANTOS

**ANÁLISE DE FALHA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZADA EM
INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, campus Simões Filho, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Mecânica.

Simões Filho/BA, 20 de dezembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Marcus Vinicius Pascoal Ramos (orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA)



Prof. Me. Paulo Esteves de Almeida Silva (examinador)

Instituição



Prof. Me. Marcelo Miguel da Silva (examinador)

Instituição

ANÁLISE DE FALHA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZADA EM INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

Vinicius Soriano Santos*

Marcus Vinícius Pascoal**

RESUMO

O presente trabalho trata-se de uma análise de falha acerca de uma bomba centrífuga multiestágio, modelo 2 ½ - HE - 2 da Worthington, que atua numa indústria petroquímica bombeando água para alimentação de uma caldeira. Após ser removida e passar por uma manutenção geral, a bomba é reinstalada na área e opera por poucos minutos até o mancal LA (lado acoplado) superaquecer e falhar. Nesse sentido, o estudo tem por função discutir e apontar as causas, bem como, propor as soluções para o problema ocorrido. A discussão do problema gira em torno de 3 hipóteses principais, que poderiam ter gerado a falha, as quais foram levantadas a partir da ferramenta de investigação, digrama de Ishikawa, são elas: alinhamento da bomba, lubrificação do equipamento, além de instalação e propriedades do rolamento.

Palavras-chave: Bomba centrífuga; Falha; Mancal; Superaquecimento.

FAILURE ANALYSIS OF A CENTRIFUGAL PUMP USED IN PETROCHEMICAL INDUSTRY

ABSTRACT

This work is a failure analysis of a multistage centrifugal pump, model 2 ½ - HE - 2 from Worthington, which operates in a petrochemical industry pumping water to feed a boiler. After removal for general maintenance, the pump is reinstalled in the area and runs for a few minutes until the LA (coupled side) bearing overheats and fails. So, the study has the function of discussing and pointing out the causes, as well as proposing solutions to the problem that occurred. The discussion of the problem revolves around 3 main hypotheses, which could have generated the failure, which were raised from the investigation tool, Ishikawa's diagram, they are: pump alignment, equipment lubrication and installation and bearing properties.

Keywords: Centrifugal pump; Failure; Bearing; Overheating.

** Professor do IFBA, campus Simões Filho. E-mail: marcuspascoal1@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Utilizadas em diversos ramos e aplicações, as máquinas geratrizes ou simplesmente bombas, modo pelo qual são popularmente chamadas, configuram sem dúvida como um dos equipamentos mais versáteis da mecânica. De modo geral, elas atuam pressurizando e transferindo o fluido de um local para outro, e por esse motivo são fundamentais em diferentes cenários como: abastecimento de água em um município, sistemas de irrigação em uma lavoura, transporte de fluido de processo em plantas industriais etc.

O princípio de funcionamento das máquinas geratrizes baseia-se na conversão do trabalho mecânico recebido através de um impulsor (motor ou turbina) em energia cinética e de pressão, imposta ao fluido na sua saída. A forma em que esse fenômeno é desempenhado permite classificar as bombas em dois grandes grupos: bombas de Deslocamento Positivo (Hidrostáticas ou Volumétricas) e bombas de Deslocamento não-positivo (Turbobombas ou Hidrodinâmicas).

As bombas são utilizadas nos circuitos hidráulicos, para converter energia mecânica em energia hidráulica. A ação mecânica cria um vácuo parcial na entrada da bomba, o que permite que a pressão atmosférica force o fluido do tanque, através da linha de sucção, a penetrar na bomba.

A bomba passará o fluido para a abertura de descarga, forçando-o através do sistema hidráulico. (PARKER HANNIFIN IND. COM. LTDA, 1999, p.36).

Dentre as bombas existentes, as de deslocamento não-positivo configuram como as mais utilizadas nas indústrias, visto o seu baixo custo e flexibilidade operacional. Dito isso, surgiu-se o interesse em realizar um estudo de caso voltado à manutenção deste tipo de bomba, visando analisar a falha em uma bomba Hidrodinâmica que opera numa fábrica produtora de resinas e insumos químicos. A bomba em questão é responsável pelo transporte de água para alimentação de uma caldeira. Segundo a equipe técnica, responsável pela manutenção, após passar por uma manutenção geral na oficina da empresa e retornar para a área, o equipamento operou por alguns minutos até o mancal LA (lado acoplado) falhar.

Os dados e informações que compõe o presente estudo, é pautado em um caso ocorrido numa empresa presente no polo petroquímico de Camaçari-BA

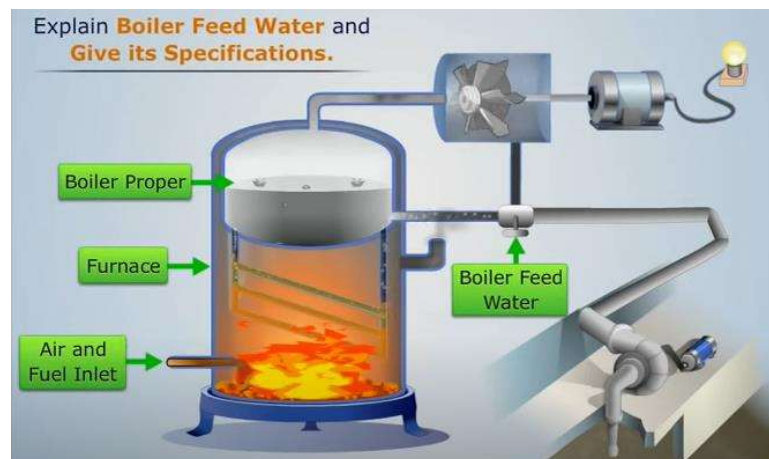
Para um melhor aproveitamento do estudo proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

Objetivo principal: analisar a falha de uma bomba Hidrodinâmica responsável pelo transporte de água para alimentação de uma caldeira.

Objetivos específicos:

- a) Elaborar uma revisão da literatura a partir de livros e artigos sobre o tema proposto;
- b) Investigar as possíveis causas para a falha no mancal LA;
- c) Propor uma ou mais soluções para o(s) problema(s) encontrado(s).

Figura 1 – Desenho esquemático do processamento da água de alimentação em uma caldeira.



Fonte - Explanation of Boiler Feed Water & Its Treatment | Engineering Chemistry (2014).

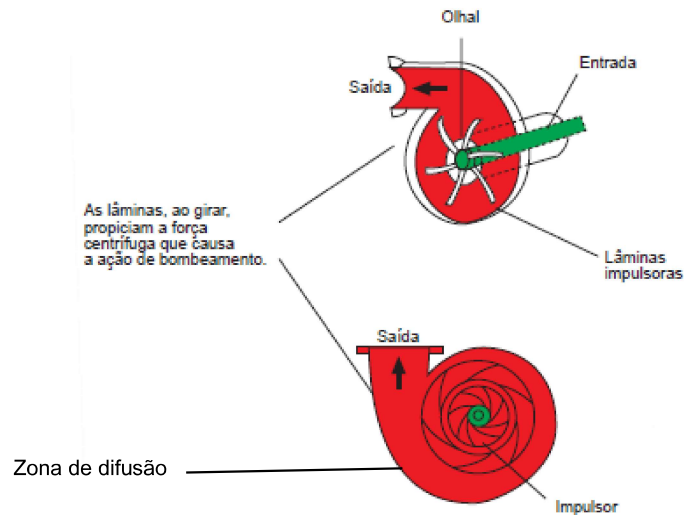
2 REFERENCIAL TEÓRICO

As bombas Hidrodinâmicas são mais comumente denominadas bombas Centrífugas. Neste tipo de equipamento a conversão da energia mecânica em energia hidráulica dar-se por meio de um órgão rotatório dotado de pás (denominado rotor ou impelidor) as quais ao entrar em contato com o fluido de trabalho imprime nele forças resultantes da aceleração que lhe é concedida (concedida às pás).

Neste tipo de bomba há ainda as zonas de difusão. Presentes em todo o percurso de saída do fluido (após passar pelos impelidores), elas são responsáveis por transformar parte da energia cinética obtida, em energia potencial, aumentando a pressão na descarga do equipamento.

Diferentemente das bombas de deslocamento positivo, nas Turbobombas, a aceleração do fluido bombeado não possui mesma direção e sentido do impulsor, já que o rotor admite o fluido pelo seu centro e o expulsa pela periferia, por meio da força centrífuga.

Figura 2 – Bomba Centrífuga.



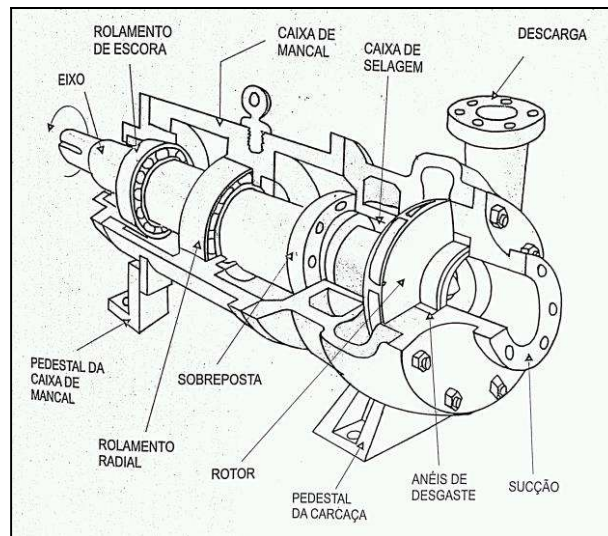
Fonte: PARKER HANNIFIN IND. COM. LTDA (1999). (Modificado pelo autor).

Este referencial teórico está subdividido em 3 partes, que servirão como base para a resolução do estudo de caso proposto.

2.1. Componentes gerais de uma bomba Centrífuga

As bombas centrífugas são constituídas de diversos componentes, cada um com sua função e importância. No entanto, existem 4 principais elementos sem os quais o equipamento não tem possibilidade de operar, são eles: eixo, mancal, selagem e rotor.

Figura 3 – Desenho em corte de uma bomba Centrífuga.



Fonte: Bombas Centrífugas Passo a Passo (2008).

- Eixo: operam transferindo a energia do motor para o rotor da bomba. Em geral possuem chavetas que permitem o acoplamento ao motor e a fixação do impelidor.
- Mancal: além de suportar o rotor, os mancais atuam como transmissores dos esforços estáticos e dinâmicos para a estrutura da máquina e podem ser classificados em dois grandes grupos: mancal de rolamento e mancal de deslizamento.
- Selagem: responsável pela vedação da bomba, não permitindo a passagem (escape) entre o rotor e carcaça do fluido bombeado. Para selagem das bombas normalmente utiliza-se selos mecânicos ou gaxetas.
- Rotor (impelidor): componente responsável diretamente pela transferência de energia hidráulica ao fluido, recebendo-o axialmente e lançando-o radialmente pela ação da rotação. Podem ser: abertos, fechados ou semi-abertos.

2.2. Configuração da bomba em estudo

Segundo a API 610 (*American Petroleum Institute*), as bombas centrífugas subdividem-se em 3 categorias: *Overhung* (OH), *Vertically Suspended* (VS) e *Between Bearing* (BB).

As chamadas *Overhung*, são as bombas em que o impelidor trabalha em balanço, todas as forças dinâmicas e hidráulicas geradas são suportadas apenas por um mancal na extremidade oposta a ele (Figura 3). Esse tipo de bomba pode trabalhar na vertical ou horizontal.

Um outro padrão de bombas são as suspensas verticalmente, VS. Caracterizam-se pelo seu posicionamento acima da coluna de líquido ao qual pretendem bombear, de modo que a captação de fluido no meio ocorre através do impelidor, o qual permanece submerso. Operam apenas verticalmente.

Por fim tem-se as *Between Bearing*, BB. O nome desta configuração se dá pelo fato do impelidor trabalhar no meio, suportado por mancais em ambas extremidades da bomba.

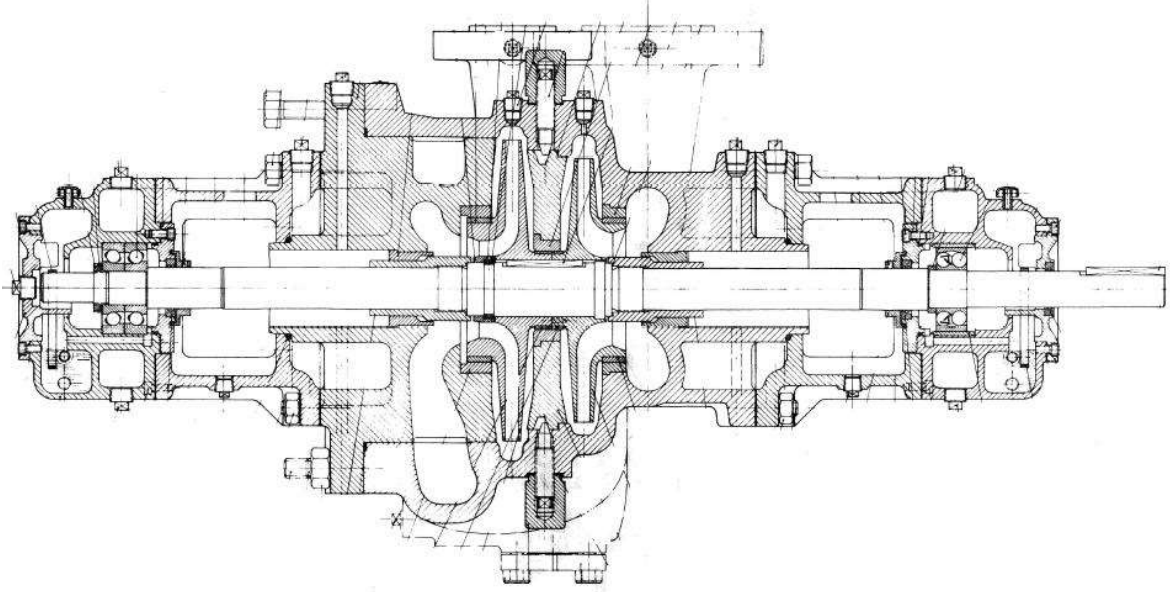
Figura 4 – Classificação das bombas centrífugas conforme API 610.

Pump type ^a		Orientation		Type code	
Centrifugal pumps	Overhung	Flexibly coupled	Horizontal	Foot-mounted	OH1
				Centreline-supported	OH2
			Vertical in-line with bearing bracket	—	OH3
		Rigidly coupled	Vertical in-line	—	OH4
		Close-coupled	Vertical in-line	—	OH5
			High-speed integrally geared	—	OH6
	Between-bearings	1- and 2-stage	Axially split	—	BB1
			Radially split	—	BB2
			Axially split	—	BB3
		Multistage	Radially split	Single casing	BB4
				Double casing	BB5
	Vertically suspended	Single casing	Discharge through column	Diffuser	VS1
				Volute	VS2
			Separate discharge	Axial flow	VS3
Line shaft				VS4	
Double casing		Cantilever		VS5	
			Diffuser	—	VS6
			Volute	—	VS7

Fonte – Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries (2010).

Com base no desenho em corte do equipamento (Figura 5) é possível perceber que a máquina geratriz do estudo de caso em questão trata-se de uma bomba de dois estágios, com impelidor posicionado entre mancais e bipartida radialmente, portanto é do tipo **BB2** (conforme Figura 4). A principal vantagem dessa configuração é a melhor suportação do rotor por conta do equilíbrio entre mancais.

Figura 5 – Desenho em corte da bomba Worthington, modelo 2 ½ -HE-2.



Fonte – Manual Técnico Worthington (1976).

2.3. Mancal de Rolamento

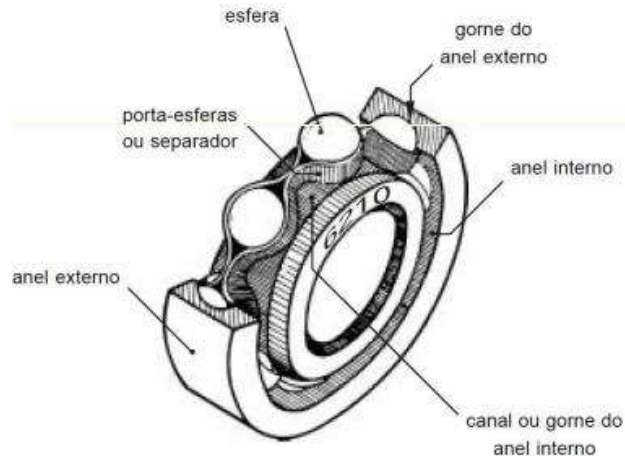
Com base na Figura 5 é possível perceber que os mancais empregados na bomba 2 ½ HE 2 são **mancais de rolamento**.

Os mancais de modo geral são classificados quanto à direção ao qual suportam esforços, sendo: radial, axial ou misto. No caso dos mancais de rolamento, os elementos rolantes que o compõe podem ser:

- Esferas: mais comum, indicado para cargas leves e médias, em alta rotação.
- Rolos: indicado para cargas pesadas.
- Agulhas (rolos agulhados): indicado para cargas elevadas onde o espaço radial é limitado. Suportam apenas esforços radiais.

Os rolamentos utilizados no equipamento em estudo trata-se do rolamento de **esfera de contato angular no lado LOA** (lado oposto ao acoplado) e o rolamento **autocompensador de esferas no lado LA** (lado acoplado). As principais características deles são, no caso do primeiro, uma maior capacidade de suportaçã dos esforços axiais, devido ao ângulo de contato entre as esferas e a pista externa do rolamento, enquanto que o autocompensador, como o nome sugere, é um rolamento capaz de compensar desalinhamentos angulares de até 3 graus.

Figura 6 – Desenho esquemático de um rolamento de esferas.



Fonte – Introdução aos Elementos de Máquinas PMR3320 (2019).

2.3.1 Modos de falha em rolamentos

Os mancais além de ser um dos principais componentes da bomba, são também os que merecem maior atenção no que diz respeito à falhas.

Devido às condições operacionais bastante exigentes (alta pressão, alta vazão, alta velocidade e operação contínua), a bomba opera sob regime acentuado de estresse. Um dos principais componentes mecânicos que é muito exigido e requer monitoramento constante são os mancais. Os mancais tem função de suportar o eixo girante da bomba, garantindo, com a devida lubrificação, o mínimo atrito possível para operação da máquina. (GANDA; MOUTINHO; CASTRO, 2017, p.2).

A ISO (Organização Internacional para Padronização) estabeleceu no ano de 2004 a norma ISO 15243 na qual classifica as falhas de rolamentos em 6 grupos principais. Essa divisão baseia-se nas características visíveis das superfícies de contato dos elementos rolantes e outras superfícies funcionais. São elas:

- Fadiga: uma alteração na estrutura do material causada pelas tensões cíclicas desenvolvidas nas áreas de contato entre os elementos rolantes e as pistas. Manifesta-se comumente como um descasamento de partículas nas superfícies.
 - Tipos de Fadiga: Subsuperficial e iniciada na superfície.

- Desgaste: a remoção progressiva de material resultante da interação de duas superfícies de contato deslizantes ou de rolagem/deslizante durante a operação.
 - Tipos de Desgaste: abrasivo e adesivo.
- Corrosão: a deterioração de uma superfície metálica, resultante da oxidação ou reação química nas superfícies metálicas.
 - Tipos de Corrosão: por umidade, por atrito, por contato e resistência à medição do falso Brinell.
- Erosão elétrica: danos nas superfícies de contato (remoção de material) causados pela passagem de correntes elétricas.
 - Tipos de Erosão: tensão excessiva e fuga de corrente.
- Deformação plástica: deformação permanente que ocorre sempre que o limite de elasticidade do material é ultrapassado.
 - Tipos de Deformação plástica: sobrecarga, endentações por detritos e endentações por manuseio.
- Fratura: a resistência à tração máxima do material é excedida e ocorre a separação completa de uma parte do componente.
 - Tipos de Fratura: forçada, por fadiga e trinca térmica.

Com base nos modos de falha apresentados anteriormente, será evidenciado ao decorrer do trabalho os modos de falha apresentados na Figura 7 e Figura 8, sendo respectivamente desgaste e fratura.

Figura 7 – Falha por desgaste.



Fonte - Norma ISO 15243 (2004).

Figura 8 – Falha por fratura.



Fonte - NSK Bearing Doctor (2001).

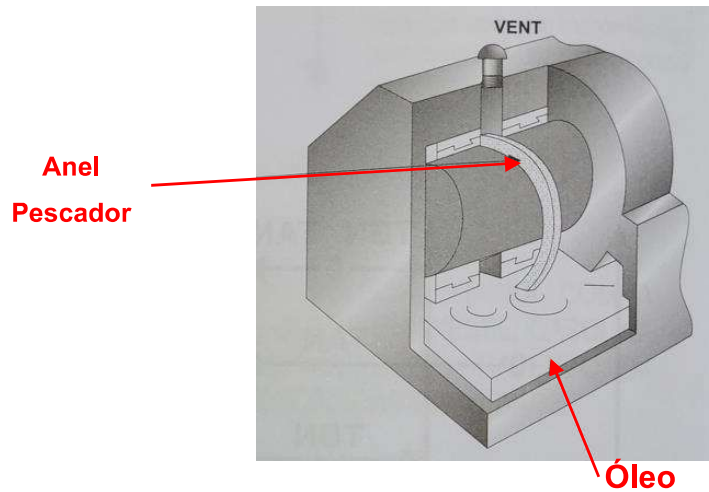
2.3.2 Lubrificação do mancal

A lubrificação consiste basicamente em aplicar uma camada viscosa de lubrificante para separar parcialmente ou totalmente as superfícies e favorecer o movimento. No caso dos rolamentos, essa redução no atrito e conseqüentemente no desgaste entre superfícies, promove um melhor desempenho do equipamento, prolongamento da sua vida útil, além de evitar problemas como superaquecimento e engripamento dos elementos rolantes.

Existem diversos sistemas de lubrificação para mancais, no entanto os mais usuais em bombas centrífugas são: lubrificação por anel pescador, lubrificação por óleo circulante (forçada) e lubrificação por banho de óleo. A bomba em análise utiliza-se do método de lubrificação por anel pescador.

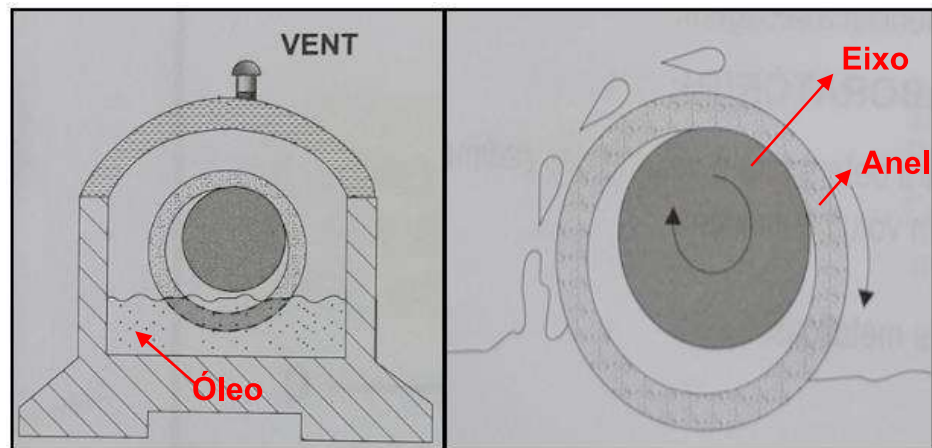
O anel pescador é uma peça metálica fabricada com diâmetro do furo maior que o diâmetro do eixo. Ele é inserido dentro da caixa de mancal e montado ao redor do eixo de modo que sua parte inferior fica imersa em óleo. No momento que o eixo gira, o anel gira junto em uma rotação mais baixa, isso lhe permite arrastar consigo óleo, que é então distribuído pelo mancal.

Figura 9 – Parte interna da caixa de mancal.



Fonte - Bombas Centrifugas Passo a Passo (2008). (Modificado pelo autor).

Figura 10 - Movimento de arraste do lubrificante pelo anel pescador.



Fonte – Bombas Centrifugas Passo a Passo (2008). (Modificado pelo autor).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar esse trabalho foi utilizada uma bomba centrífuga multiestágio bipartida radialmente (classificada como BB2 pela API conforme Figura 4), modelo 2 ½ - HE – 2, da Worthington. Esse equipamento atua na planta industrial da petroquímica em questão, bombeando água para alimentação de uma caldeira (Figura 1).

Tabela 1 – Condição de operação do equipamento.

Fabricante	Worthington	Vazão	57,3 m ³ /h
Tipo	Multiestágio bi apoiada	Pressão de Sucção	4,8 kg/cm ²
Modelo	2 ½ - HE - 2	Pressão de Descarga	25,3 kg/cm ²
Temperatura	147 °C	Rotação (rpm)	3550
Produto	Água de alimentação de caldeira		

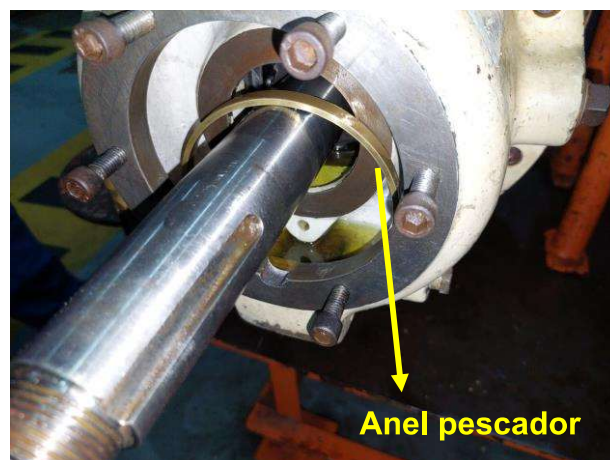
Fonte - Elaborado pelo autor.¹

Figura 11 – Bomba centrífuga multiestágio 2 ½ - HE – 2.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Caixa de mancal com a tampa frontal removida.



Fonte – Elaborado pelo autor.

¹ Dados coletados na folha de operação (Datasheet) do equipamento.

No desenvolvimento desse estudo foi utilizado o Brainstorm para levantamento de hipóteses, além da ferramenta de investigação, diagrama de Ishikawa. Também conhecida como espinha de peixe, o diagrama de Ishikawa teve seu importante papel de mapear e apontar as possíveis causas que desencadearam o determinado efeito ocorrido, a falha do mancal. Dessa forma, as hipóteses foram categorizadas com base em 6 fatores de influência no processo de operação do equipamento (métodos, meio ambiente, medida, máquina, material e mão de obra) e analisadas.

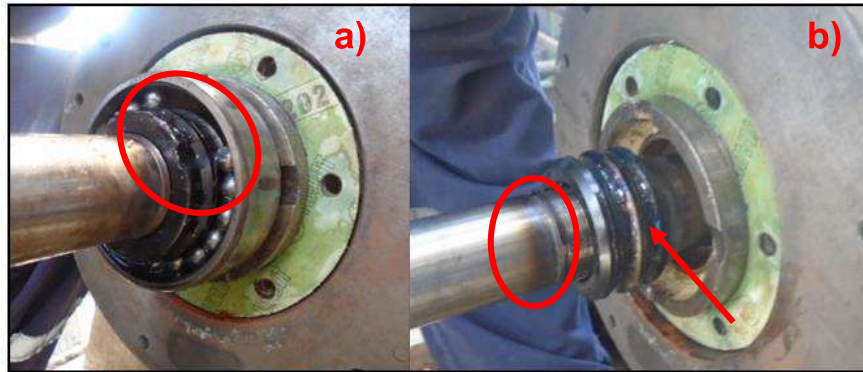
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como dito anteriormente, o problema ocorrido na bomba se deu após o equipamento passar por uma manutenção geral, e retornar à operação, onde falhou alguns minutos após a partida. Os sintomas da falha foram avistados na caixa de mancal L.A, a qual apresentou sinais de temperatura elevada (esfumaçando). Segundo a equipe de manutenção preditiva, o mancal costuma operar em uma temperatura estabilizada de 52 °C, no entanto, no dia do ocorrido não foi possível medir a temperatura que o mancal atingiu, por falta de instrumento na área.

Para avaliar o ocorrido, a equipe técnica foi instruída a abrir a caixa de mancal e tirar algumas fotos. O rolamento instalado era o **autocompensador de esferas 2309 E-2RS1TN9**.

Nas imagens obtidas, é possível perceber que os rolamentos estavam com a gaiola (porta-esferas Figura 6) destruída e coloração escurecida (Figura 13 a). Além disso, a pista interna (anel interno Figura 6) estava com coloração azulada, assim como o eixo (Figura 13 b).

Figura 13 – Rolamento após a falha.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Já em primeiro momento é possível afirmar que o que provocou a falha no mancal foi o **superaquecimento do rolamento**. Segundo a *NSK Bearing Doctor* essa mudança na coloração do lubrificante, é um comportamento típico de degradação em altas temperaturas (Figura 14). No entanto, este é apenas mais um sintoma da causa raiz, que devido à variedade de possibilidades, deve ser investigada com cautela. Desse modo, foi utilizada a ferramenta para mapeamento de possíveis causas, Ishikawa, aonde levantou-se, com a ajuda do brainstorm, as hipóteses e as categorizou, buscando encontrar uma correlação entre elas (Figura 15).

Figura 14 – Alteração na coloração do anel interno de um rolamento após superaquecimento.



Fonte - NSK Bearing Doctor (2001).

Figura 15 – Diagrama de Ishikawa.



Fonte – Elaborado pelo autor.

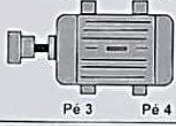
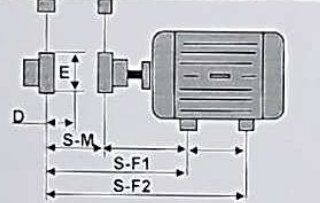
Diante dos itens elencados no diagrama, pode-se perceber uma maior aparição de problemas relacionados ao alinhamento da bomba (itens 7, 8 e 13), lubrificação (itens 3, 4 e 10) e instalação e propriedades do rolamento (itens 1, 2, 7, 9, 12 e 14).

ALINHAMENTO

Após apuração com a equipe técnica, responsável por instalar a bomba na área, foi informado que houve a realização de alinhamento do conjunto (motor e bomba) sendo utilizado o **alinhador a laser (modelo Easy Laser D450)**. Esse esclarecimento reduz drasticamente as chances do superaquecimento do rolamento estar acontecendo por desalinhamento, pois, ainda que tivesse sido alinhado, mas, por relógio comparador, existiam maiores chances do alinhamento não estar em conformidade, já que essa técnica exige um pouco mais de atenção e experiência do executante. No entanto, o alinhamento utilizando alinhador a laser exige muito menos do operador por se tratar de uma técnica computadorizada, além de obter boa precisão.

Vale ressaltar ainda que, o rolamento utilizado era autocompensador e segundo especificação técnica, o modelo permite um desalinhamento angular de até 1,5°.

Figura 16 – Relatório de alinhamento deixado bomba da 2 ½ - HE – 2.

LEITURA DO PÉ MANCO									
				Recomendado		Valor máximo admissível 0,06 mm			
				Encontrado		Deixado			
Pé 1	XX	Pé 1	0,04						
Pé 2	XX	Pé 2	0,02						
Pé 3	XX	Pé 3	0,03						
Pé 4	XX	Pé 4	0,01						
DADOS ALINHAMENTO									
				DIMENSÕES					
				S-M	140	X	X		
				S-F1	310	X	X		
S-F2	720								
VALORES DE DESALINHAMENTO									
Posição	Recomendado	Encontrado	Deixado						
Vertical									
Radial	XX	X	0,03	mm					
Axial	XX	X	0	mm/100mm					
Horizontal									
Radial	XX	X	-0,03	mm					
Axial	XX	X	0,02	mm/100mm					
Valores em mm				Encontrado	Deixado				
Vertical	Pés Frontais			X	0,02				
	Pés Traseiros			X	0,02				
Horizontal	Pés Frontais			X	0,09				
	Pés Traseiros			X	0,10				
Recomendação (quando não houver recomend. do fabricante)									
Rpm	Radial (mm)	Axial (mm/100mm)	Rpm	Radial (mm)	Axial (mm/100mm)				
600	0,18	0,18	2000	0,08	0,08				
750	0,16	0,15	3000	0,06	0,07				
1000	0,14	0,12	3600	0,05	0,06				
1500	0,10	0,10	4000	0,04	0,05				
1800	0,08	0,09	6000	0,03	0,04				
QUANTIDADE DE CALÇOS (max. recom. 5)									
Pé 1	0,01	Pé 2	0,01	Pé 3	0,2	Pé 4	0,03		

Fonte – Elaborado pelo autor.

Obs: Os valores de recomendação para posição radial e axial (~0,05 mm e ~0,06 mm respectivamente) do relatório (Figura 16), referem-se a valores máximos permitidos, em módulo.

LUBRIFICAÇÃO

O lubrificante utilizado no equipamento é um óleo, **Lubrax Turbina 68**. Com base no histórico de manutenções, uma equipe de preditiva vinha sendo responsável pelo monitoramento do óleo **mensalmente**, e, portanto, não foram encontrados indícios de contaminação do lubrificante.

Por outro lado, ao checar junto ao fabricante do rolamento o tipo de lubrificante recomendado para o modelo em uso (autocompensador de esferas 2309 E-2RS1TN9) foi encontrado **graxa** como recomendação (Figura 17). Trata-se de um rolamento vedado nas duas faces, e por esse motivo ele sai de fábrica com lubrificação permanente, não havendo necessidade de nova aplicação. O que nos leva a inferir que, no momento do ocorrido, o elemento foi encontrado em desvio de pelo menos dois padrões especificados. O primeiro refere-se à utilização do

rolamento sem a presença das vedações, aonde conforme Figura 13 (a) é possível ver que os elementos rolantes estavam completamente expostos. Já o outro ponto é com relação ao lubrificante utilizado na operação, um óleo, que também não era recomendado.

Embora essas sejam constatações importantes ao mapeamento das causas para o superaquecimento do rolamento, não é possível afirmar ainda que esses dados tenham alguma ligação com o problema, já que é extremamente usual ter-se mancais de rolamentos não vedados e lubrificados a óleo. É preciso estudar o lubrificante e analisar de que forma a sua utilização poderia estar sendo prejudicial ao rolamento.

Tabela 2 - Propriedades do Lubrificante utilizado.

Lubrax Turbina 68	
Estado físico: Líquido	Ponto de Fulgor: 242 °C
Densidade Relativa: 0,88 (20/4°C)	Viscosidade cinemática (40°C): 68 mm ² /s

Fonte - FISPQ - Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (2021).

Figura 17 – Rolamento vedado nas duas faces, pré lubrificado à graxa.



SKF®

2309 E-2RS1TN9

Rolamento autocompensador de esferas com vedações em ambos os lados

Os rolamentos autocompensadores de esferas, com vedações em ambos os lados, possuem duas carreiras de esferas, uma pista esférica comum no anel externo e duas pistas rígidas e ininterruptas no anel interno. Eles são insensíveis ao desalinhamento angular do eixo em relação à caixa de mancal. A vedação integral pode prolongar significativamente a vida útil do rolamento, pois mantém o lubrificante dentro dos rolamentos e os contaminantes fora.

- Suporta desalinhamento estático e dinâmico
- Excelente desempenho de alta velocidade
- Excelente desempenho de carga leve
- Baixo atrito
- Vedação integral resulta em menos requisitos de manutenção e vida útil prolongada do rolamento

Overview

Dimensões		Propriedades	
Diâmetro do furo	45 mm	Classe de tolerância	Normal
Diâmetro externo	100 mm	Folga interna radial	CN
Largura	36 mm	Gaiola	Não metálico
		Lubrificante	Graxa

Fonte – Site da SKF.

Segundo o manual de manutenção da SKF, a propriedade mais importante do óleo lubrificante, é a sua viscosidade. A partir dela é que se define o óleo que fornecerá lubrificação suficiente nas condições de operação do rolamento. A norma ISO estabelece uma determinação sobre viscosidade de óleo, denominada grau de viscosidade ISO (VG), ela é basicamente a média da viscosidade do óleo na temperatura de referência padronizada de 40° C (105° F). Por exemplo, um óleo ISO VG 32, significa que ele tem uma viscosidade média de 32 mm²/s a 40 °C (105° F).

A viscosidade é a resistência ao escoamento de um fluido e depende da temperatura e pressão. A viscosidade diminui com o aumento da temperatura e aumenta com a queda de temperatura (SKF, 2012, p. 203).

Para determinar a eficácia do lubrificante utiliza-se a relação de viscosidade K, que consiste na razão entre a viscosidade real de operação (ν) (obtida por meio do diagrama de viscosidade correspondente ISO VG, Figura 19) e a viscosidade cinemática mínima (ν_1). Conforme determina catálogo SKF para se obter uma relação de viscosidade adequada, K deve estar entre 1 e 4, e dentro desse intervalo, quanto maior o valor de K, melhor será condição de lubrificação do rolamento e a vida nominal esperada.

$$K = \nu / \nu_1$$

K – Relação de Viscosidade

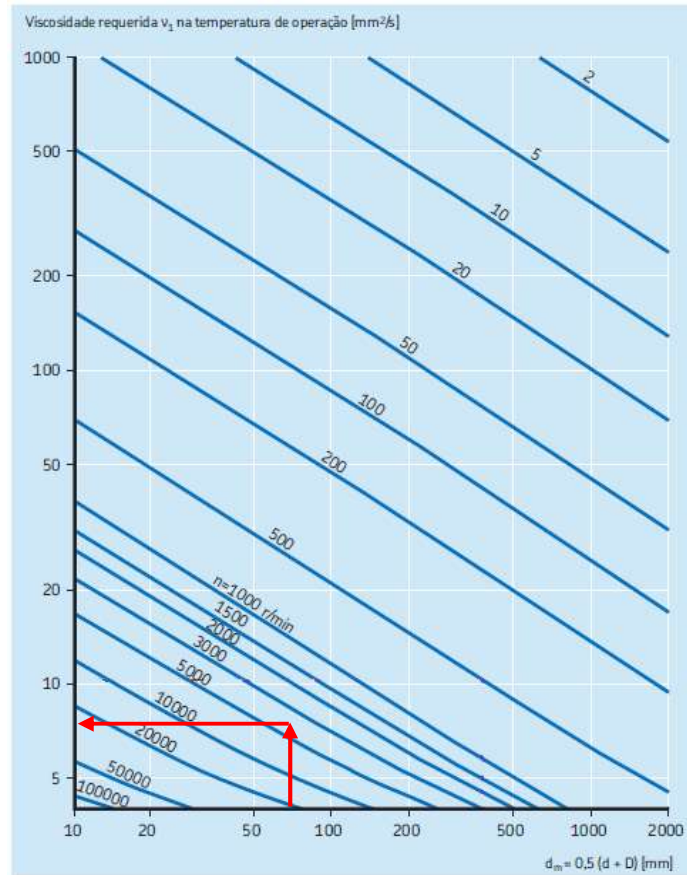
ν – Viscosidade real de operação (mm² / s)

ν_1 – Viscosidade cinemática mínima (mm²/ s)

Sabendo que a viscosidade cinemática mínima (ν_1), é a mínima quantidade de lubrificante que a superfície interna do rolamento deve reter para ter um filme de óleo adequado ao movimento, pode-se defini-la através da correlação gráfica entre o diâmetro médio do rolamento d_m e a rotação (rpm), assim temos que:

- $d_m = (\text{Diâm. Externo} + \text{Diâm. Interno}) / 2 = (100 + 45) / 2 = \mathbf{72,5 \text{ mm}}$
- *Rotação = 3550 rpm*

Figura 18 – Determinação da viscosidade cinemática mínima (mm^2/s)

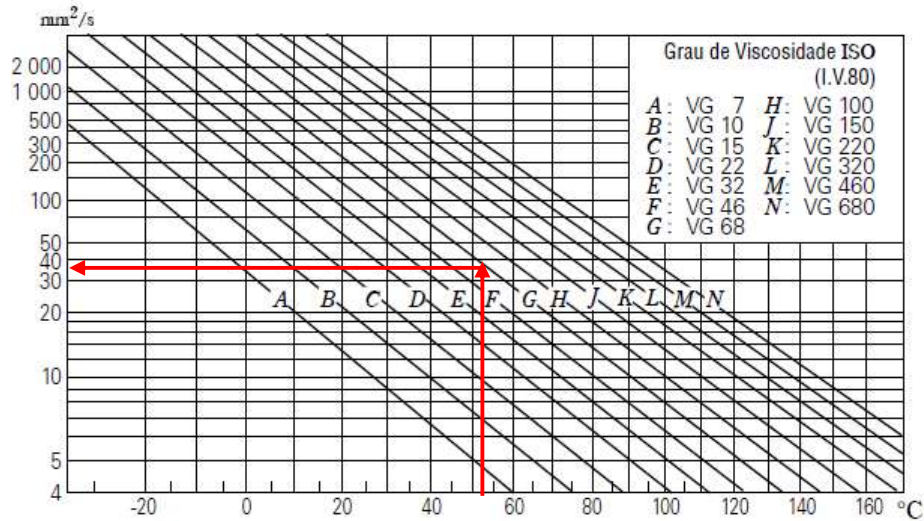


Fonte – Manual de manutenção de rolamentos SKF (2012). (Modificado pelo autor).

Analisando o gráfico da Figura 18, pode-se assumir uma viscosidade cinemática mínima (v_1) de aproximadamente **7,50 mm^2/s** .

Tendo em vista que o lubrificante utilizado pertence à classe ISO VG 68, e que a temperatura de operação do mancal normalmente é em torno de 52°C , pode-se obter a viscosidade real do lubrificante atuante no rolamento, através da Figura 19.

Figura 19 – Diagrama de viscosidade correspondente ISO VG.



Fonte – Catálogo geral de rolamentos NSK (2013).

Através do diagrama acima, pode-se considerar que a viscosidade real (v) do lubrificante Lubrax Turbina 68, na temperatura de operação, é de aproximadamente **39,00 mm²/s**. Desse modo, temos que:

$$K = v / v_1 = 39 / 7,5$$

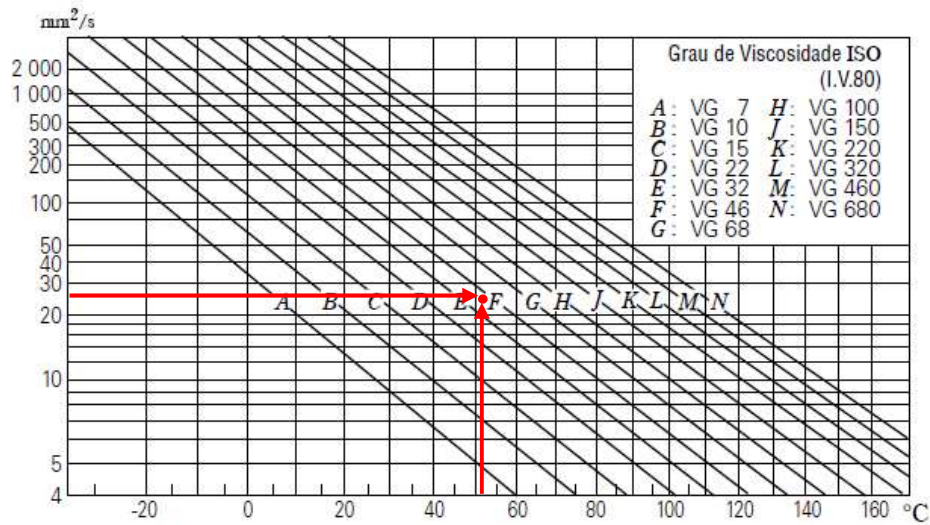
$$K \approx 5,2.$$

Claramente, com um grau de viscosidade encontrado sendo 1,3 vezes acima do máximo recomendado ($k=4$), é possível constatar mais uma não conformidade e confirmar a suspeita de que o óleo lubrificante utilizado no rolamento, contribuiu para o dano causado ao elemento, já que a alta viscosidade, significa um filme de óleo mais espesso e conseqüentemente, a perda por atrito viscoso será mais alto, promovendo o aumento da temperatura operacional do componente. Levando-se em consideração os parâmetros de operação do rolamento, e assumindo um valor seguro e eficiente de grau de viscosidade ($K= 3,5$), o óleo mais adequado para se utilizar no equipamento é da classe ISO VG 46 (conforme Figura 20).

$$v = K \cdot v_1 = 3,5 \cdot 7,5$$

$$v = 26,25 \text{ mm}^2/\text{s}$$

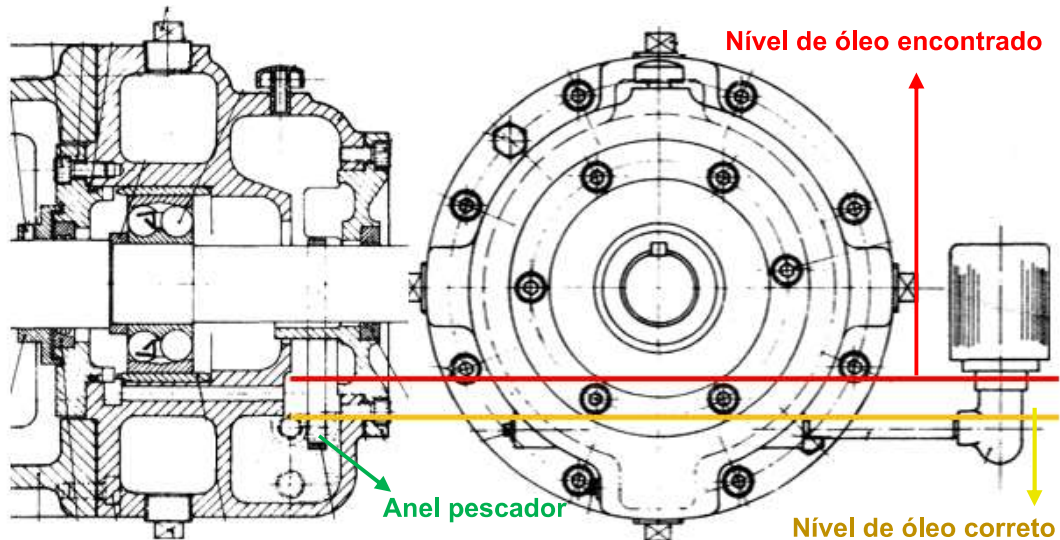
Figura 20 – Diagrama de viscosidade correspondente ISO VG.



Fonte - Catálogo geral de rolamentos NSK (2013).

Ainda sobre a lubrificação do equipamento no momento da falha, foi analisado o nível de óleo no interior do mancal, e constatou-se que havia um nível excessivo de lubrificante no reservatório da caixa de mancal, como demonstrado na Figura 21.

Figura 21 – Desenho esquemático do nível de óleo no interior da caixa de mancal.



Fonte - Manual Técnico Whorthington (1976). (Modificado pelo autor).

Sabendo que o equipamento se utiliza do método de lubrificação por anel pescador, pode-se inferir que esta foi mais uma não conformidade que contribuiu para o superaquecimento do rolamento, já que, o nível excessivo de óleo no reservatório da caixa de mancal provoca um efeito direto sobre a rotação do anel pescador e conseqüentemente influencia na quantidade de lubrificante arrastado por

ele que chega ao rolamento, contribuindo para a deficiência na lubrificação do equipamento.

INSTALAÇÃO E PROPRIEDADES DO ROLAMENTO

Após finalizar a investigação acerca da lubrificação, partiu-se para apuração da última hipótese que poderia estar provocando o superaquecimento do rolamento: o modo de instalação e suas características.

O primeiro ponto a analisar foram os ajustes encontrados entre a pista interna do rolamento e o eixo, e entre a pista externa do rolamento e a caixa. A partir do catálogo do fabricante do rolamento (SKF), é possível definir o fator de ajuste do rolamento com base na sua utilização. No caso do elemento em estudo, tem-se um rolamento de suportação apenas dos esforços radiais (já que os esforços axiais são suportados pelo rolamento lado L.O.A) com a carga rotativa centrada no anel interno do rolamento. Além disso, baseado no diâmetro nominal do furo do rolamento (Figura 17), pode-se considerar o diâmetro nominal do eixo 45 mm. Sendo assim, o fator de ajuste determinado para essa aplica o   k5 no ajuste rolamento / eixo (Figura 22) e H7 no ajuste rolamento / caixa (Figura 23).

Figura 22 – Fator de ajuste entre eixo e rolamento.

Ajustes para eixos sólidos de a�o (para rolamentos radiais com furo cilíndrico)						
Condi�es	Exemplos	Diâmetro do eixo, em mm				Classe de tolerância
		Rolamentos de esferas ¹⁾	Rolamentos de rolos cilíndricos	Rolamentos de rolos c�nicos	Rolamentos CARB e rolamentos auto-compensadores de rolos	
Carga rotativa do anel interno ou dire�o da carga indeterminada						
Rolamentos de correias transportadoras, redutores de carga leve (P ≤ 0,05 C)	Transportadores, rolamentos de redutor de engrenagens com carga leve	≤ 17	–	–	–	j5 (h5) ²⁾
		(17) a 100	≤ 25	≤ 25	–	j6 (j5) ²⁾
		(100) a 140	(25) a 60	(25) a 60	–	k6
		–	(60) a 140	(60) a 140	–	m6
Cargas normais a pesadas (P > 0,05 C)	Aplica�es gerais de rolamentos, motores elétricos, turbinas, bombas, engrenagens, máquinas para marcenaria, motores de combustão interna	≤ 10	–	–	–	j5
		(10) a 17	–	–	–	j5 (j5) ²⁾
		(17) a 100	–	–	< 25	k5 ³⁾
		–	≤ 30	≤ 40	–	k6
		(100) a 140	(30) a 50	–	25 a 40	m5
		(140) a 200	–	(40) a 65	–	m6
		–	(50) a 65	–	(40) a 60	n5 ⁴⁾
		(200) a 500	(65) a 100	(65) a 200	(60) a 100	n6 ⁴⁾
–	(100) a 280	(200) a 360	(100) a 200	p6 ⁵⁾		
–	> 500	–	–	p7 ⁴⁾		
–	–	(280) a 500	(360) a 500	(200) a 500	r6 ⁴⁾	
–	–	> 500	> 500	> 500	r7 ⁴⁾	
Cargas de pesadas a muito pesadas e cargas de choque em condi�es operacionais dificeis (P > 0,1 C)	Caixas de mancal de eixo para veículos ferroviários pesados, motores de traço, laminadoras	–	(50) a 65	–	(50) a 70	n5 ⁴⁾
		–	(65) a 85	(50) a 110	–	n6 ⁴⁾
		–	(85) a 140	(110) a 200	(70) a 140	p6 ⁴⁾
		–	(140) a 300	(200) a 500	(140) a 280	r6 ⁷⁾
		–	(300) a 500	–	(280) a 400	s6 ⁶⁾ min ± IT6/2 ^{6)R}
–	> 500	> 500	> 400	s7 ⁶⁾ min ± IT7/2 ^{6)R}		
Exigências elevadas quanto � precisão em opera�o com cargas leves (P ≤ 0,05 C) ³⁰⁾	Máquinas-ferramenta	8 a 240	–	–	–	j4
		–	25 a 40	25 a 40	–	j4 (j5) ⁹⁾
		–	(40) a 140	(40) a 140	–	k4 (k5) ⁹⁾
		–	(140) a 200	(140) a 200	–	m5
–	–	(200) a 500	(200) a 500	–	n5	

Fonte - Manual de manuten o de rolamentos SKF (2012).

Figura 23 – Fator de ajuste entre caixa e rolamento.

Ajustes para caixas de mancal bipartidas ou inteiriças de ferro fundido e aço (para rolamentos radiais)			
Condições	Exemplos	Classe de tolerância ¹⁾	Deslocamento do anel externo
Direção da carga indeterminada			
Cargas de leves a normais ($P \leq 0,1 C$) deslocamento axial do anel externo desejável	Máquinas elétricas de médio porte, bombas, mancais de virabrequim	J7	Pode ser deslocado como regra, mas podem ocorrer algumas forças axiais (induzidas)
Carga do anel externo estacionário			
Cargas de todos os tipos	Engenharia em geral, caixas de mancal H7 ²⁾ de eixo de veículos ferroviários		Como regra, pode ser deslocado
Cargas de leves a normais ($P \leq 0,1 C$) com condições operacionais simples	Engenharia em geral	H8	Pode ser deslocado
Condição de calor através de eixo	Cilindros de secadoras, máquinas elétricas de grande porte com rolamentos auto-compensadores de rolos	G7 ³⁾	Pode ser deslocado

Fonte - Manual de manutenção de rolamentos SKF (2012).

Para facilitar o estudo, elaborou-se uma tabela visando comparar os valores recomendados e encontrados na instalação do rolamento.

Tabela 3 – Valores de ajustes da montagem do rolamento.


	Fator de ajuste	Recomendado	Encontrado
Ajuste rolamento - eixo	k5	-0,002 a -0,025 mm	0,00 mm
Ajuste rolamento - caixa	H7	0,00 a +0,036 mm	+0,01 a +0,02 mm

Fonte – Elaborado pelo autor.

Com base nos dados demonstrados na Tabela 3, não houve desvio ao recomendado no ajuste dos rolamentos.

Outro critério de análise, foi o tipo e características do rolamento. Sabendo que o modelo de rolamento encontrado em operação na bomba no momento da falha era o autocompensador de esferas 2309 E-2RS1TN9, da SKF, buscou-se na lista de peças do equipamento o modelo do rolamento original, para ver se coincidia. No entanto, eram diferentes. Apesar de também ser autocompensador de esferas e confeccionado pela SKF, o modelo especificado pelo fabricante da bomba era o 2309 ETN9. Um rolamento com dimensões similares, mas propriedades diferentes.

Figura 24 – Rolamento 2309 ETN9.



SKF[®]

2309 ETN9

Rolamento autocompensador de esferas

Os rolamentos autocompensadores de esferas possuem duas carreiras de esferas, uma pista esférica comum no anel externo e duas pistas rígidas e ininterruptas no anel interno. Eles são insensíveis ao desalinhamento angular do eixo em relação à caixa de mancal, que pode ser causado, por exemplo, pela deflexão do eixo.

- Suporta desalinhamento estático e dinâmico
- Excelente desempenho de alta velocidade
- Excelente desempenho de carga leve
- Baixo atrito

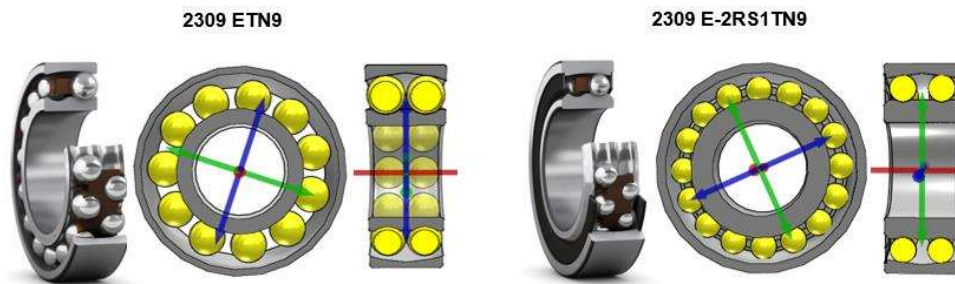
Overview

Dimensões		Propriedades	
Diâmetro do furo	45 mm	Classe de tolerância	Normal
Diâmetro externo	100 mm	Folga interna radial	CN
Largura	36 mm	Gaiola	Não metálico
		Lubrificante	Nenhum
		Material, rolamento	Aço para rolamentos
		Recurso de localização, anel externo do rolamento	Nenhum
		Recurso de relubrificação	Sem
		Recurso de retenção do anel interno	Nenhum
		Revestimento	Sem
		Tipo de furo	Cilíndrico
		Vedação	Sem

Fonte – Site da SKF.

Conforme visto na Figura 24 e Figura 17 ambos rolamentos possuem os mesmos diâmetros e largura, porém, diferentemente do rolamento encontrado no equipamento, o especificado na lista de peças não possui vedação, nem definição prévia de lubrificação. Sabendo que ambos rolamentos possuem mesma largura, essa verificação (da ausência de vedação), sugere que as características construtivas internas dos rolamentos também diferem, já que o rolamento com vedação, teria um menor espaço interno para comportar os elementos rolantes. Sendo assim, decidiu-se investigar se esse fato teria alguma relação com a falha no mancal.

Figura 25 – Design interno dos rolamentos.



Fonte – Elaborado pelo autor².

A partir da Figura 25 é possível perceber que o rolamento encontrado no equipamento (2309 E-2RS1TN9) possui elementos rolantes menores e em maior quantidade. Essa característica tende a influenciar em muitos parâmetros suportados pelo rolamento durante a operação, sobretudo a sua capacidade de carga e rotação. Desse modo, foi feita uma comparação entre as características do rolamento encontrado e o descrito na lista de peças, com base nas informações fornecidas pelo fabricante de ambos rolamentos (SKF).

Tabela 4 – Características dos rolamentos.

Características do Rolamento	2309 ETN9	2309 E-2RS1TN9
Classificação de carga dinâmica básica C	63,9 kN	39 kN
Classificação de carga estática básica C ₀	19,3 kN	13,4 kN
Limite de carga de fadiga P _U	1 kN	0,695 kN
Velocidade-limite	9000 RPM	4300 RPM
Desalinhamento angular permitido	3°	1,5°

Fonte – Elaborado pelo autor.³

Diante do exposto na Tabela 4, notoriamente o rolamento encontrado no equipamento no momento da falha (2309 E-2RS1TN9) é inferior ao especificado no projeto da bomba (2309 ETN9), com um **limite de carga de fadiga** aproximadamente **1,5 vezes menor** e uma **capacidade de carga dinâmica** correspondente a **61,03 %** da capacidade total do rolamento previsto em projeto,

² Montagem a partir de figuras coletadas no site da SKF (www.skf.com.br).

³ Dados obtidos no catálogo do fabricante de ambos rolamentos.

pode-se confirmar que a utilização do rolamento fora do especificado colaborou para a falha gerada no mancal.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo de caso teve como objetivo investigar e apontar as causas que levaram à falha no mancal LA da bomba de água de alimentação de caldeira, modelo 2 ½ - HE – 2. O aporte teórico balizou a análise, bem como a aplicação da ferramenta de investigação, Ishikawa, a qual permitiu a organização e categorização das hipóteses levantadas, colaborando para elaboração lógica de uma linha de raciocínio na apuração dos fatos.

A partir da análise dos dados utilizados nesse estudo, chegou-se à conclusão de que o motivo da falha no mancal LA foi o superaquecimento do rolamento gerado pela lubrificação ineficiente e a utilização de um rolamento inferior ao especificado no projeto da bomba. A aplicação de cargas superiores ao suportado pelo rolamento durante o trabalho, aliado a uma deficiência na lubrificação, gerou uma condição excessiva de desgaste abrasivo (Item 2.3.1 Modos de falha em rolamentos) entre os elementos rolantes (esferas) e a pista interna do rolamento, o que por sua vez fez elevar consideravelmente a temperatura do material e provocar a sua dilatação. A partir desse momento, com o advento da alteração dimensional e a redução da folga interna, ocorreu o travamento e a quebra da gaiola, configurando uma fratura forçada (Item 2.3.1 Modos de falha em rolamentos).

Diante dos resultados obtidos, é possível sugerir algumas recomendações para a resolução do problema, bem como evitar a sua ocorrência futuramente, de modo a garantir o pleno funcionamento da bomba e minimizar os possíveis prejuízos a produção. A seguir é listado o conjunto de ações que devem ser abordadas:

- Substituir o rolamento autocompensador de esferas 2309 E-2RS1TN9 pelo também autocompensador de esferas 2309 ETN9, atentando-se para as folgas de montagem recomendadas no catálogo do fabricante;
- Substituir o óleo Lubrax Turbina 68 pelo Lubrax Turbina 46;

- Reposicionar o nível de óleo conforme desenho técnico do equipamento e realizar o monitoramento mensal do nível e características do óleo.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries**: ANSI/API STANDARD 610. 11ª Edição. ed. Washington DC, USA: [s. n.], 2010. 218 p. Disponível em: <http://www.rashidipumpag.com/files/API%20610%20,%2011th.pdf>. Acesso em: 3 out. 2022.

BRASIL, Alex N. Máquinas Termohidráulicas de Fluxo. **3. BOMBAS - CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO**, Universidade de São Paulo - USP, p. 62-91, 1 fev. 2010. Disponível em: https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4015/capitulo3_bombasc lassificacaoedescricao.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

CARRION, Ronaldo. **Introdução aos Elementos de Máquinas PMR3320**: Mancais de Rolamento, Escola Politécnica da USP, p. 1-39, 1 jan. 2019. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4682512/mod_resource/content/1/Aula%206%20-%20Mancais%20de%20Rolamento.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

CHIES, Suelen de Oliveira; BUNEDER, Ricardo. **A APLICAÇÃO DA FERRAMENTA 8D PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE QUALIDADE NO CLIENTE**, Canoas - RS, v. 7, 2 dez. 2019. CIPPUS – REVISTA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, p. 1-18. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Cippus/article/download/6306/pdf#:~:text=A%20ferramenta%208D%20%C3%A9%20uma,como%20a%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20das%20melhorias>. Acesso em: 31 ago. 2022.

EXPLANATION of Boiler Feed Water & Its Treatment | Engineering Chemistry. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=is5wdVgPOkl>. Acesso em: 1 ago. 2022.

GANDA, WENDERSON L.; MOUTINHO, MARCUS V. B.; CASTRO, GABRIEL B. **APLICAÇÃO DE ALGORITMO PARA DETECÇÃO DE FALHAS EMBOMBAS CENTRÍFUGAS MULTI-ESTÁGIO DE INJEÇÃO DE ÁGUA EMRESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO**, Porto Alegre - RS, 4 out. 2017. XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, p. 1109-1113. Disponível em: https://www.sba.org.br/Proceedings/SBAI/SBAI2017/SBAI17/papers/paper_314.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15243**: Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes. 1ª Edição. ed. Suíça: [s. n.], 2004. 48 p. Disponível em:

https://kupdf.net/download/iso15243fallaenrodamientospdf_5c802de7e2b6f5470ee89b0c_pdf. Acesso em: 3 out. 2022.

JARDIM, João Victor; RIFFEL, Douglas Bressan; COSTA, André Luiz. **ANÁLISE DE FALHAS DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA**, Fortaleza - Ceará, 22 ago. 2016. Conem 2016 Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, p. 1-10. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311457366_Analise_de_Falhas_de_uma_Bomba_Centrifuga. Acesso em: 1 set. 2022.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2ª Edição. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1997. 408 p. ISBN 85-216-1086-6.

NSK BRASIL LTDA. **NSK Bearing Doctor: Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos**. Catálogo B08. ed. São Paulo - Brasil: NSK Brasil Ltda, 2014. 36 p. Disponível em: https://www.nsk.com.br/upload/file/Cat_bearing_doctor_NSK.pdf. Acesso em: 25 out. 2022.

NSK MOTION & CONTROL. **Rolamentos**. São Paulo - Brasil: NSK Brasil Ltda, 2013. 557 p. Disponível em: [https://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK\(1\).pdf](https://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK(1).pdf). Acesso em: 10 out. 2022.

PARKER HANNIFIN IND. COM. LTDA. **Tecnologia Hidráulica Industrial: Apostila M2001-1**. ed. Jacareí, SP - Brasil: [s. n.], 1999. 158 p. Disponível em: <https://jvrmaquinas.com.br/wp-content/uploads/2017/02/Apostila-de-Tecnologia-Hidraulica-Industrial.pdf>. Acesso em: 1 set. 2022.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. **FISPQ - Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos: LUBRAX TURBINA X 68**. 1021468. ed. rev. Rio de Janeiro - Brasil: [s. n.], 2021. 11 p. Disponível em: https://www.lubrax.com.br/sites/lubrax/files/fichas-de-seguranca/FISPQ_BR_PT_LUBRAX_TURBINA_X_68.pdf. Acesso em: 12 out. 2022.

SANTOS, WESLEY MODESTO; NERY, MESTRE MACCLARCK. **COMPONENTES CRÍTICOS E MODOS DE FALHA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA DE COMBATE A INCÊNDIO**. 2018. 18 p. Artigo (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Sergipe (UFS), Sergipe - Brasil, 2018. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/componentes-criticos-e-modos-de-falha-de-uma-bomba-centrifuga-de-combate-incendio>. Acesso em: 1 set. 2022.

SILVA, Jairo Torres; IVO, Lúcio António; OLIVEIRA, Paulo Soares; PELLEGRINO, Sérgio Lins. **Bombas Centrífugas Passo a Passo: Manual prático de manutenção e operação**. 4ª Edição. ed. Lauro de Freitas, Bahia-Brasil: TURBOTECH ENGENHARIA LTDA., 2008. 368 p. ISBN 85-87874-01-2.

SKF - SVENSKA KULLAGERFABRIKEN. **2309 E-2RS1TN9**: Rolamento autocompensador de esferas com vedações em ambos os lados. [S. l.], [20--]. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings/productid-2309%20E-2RS1TN9>. Acesso em: 29 out. 2022.

SKF - SVENSKA KULLAGERFABRIKEN. **2309 ETN9**: Rolamento autocompensador de esferas. [S. l.], [20--]. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings/productid-2309%20ETN9>. Acesso em: 29 out. 2022.

SKF - SVENSKA KULLAGERFABRIKEN. **Manual de manutenção de rolamentos da SKF**. PUB SR/P7 10001/1 PT.BR. ed. Brasil: Grupo SKF, 2012. 454 p. Disponível em: https://www.skf.com/binaries/pub45/Images/0901d1968083afa2-SKF-Bearing-maintenance-handbook---10001_1-PT-BR_tcm_45-463040.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

WORTHINGTON BOMBAS. **Manual Técnico Worthington**. Rio de Janeiro - Brasil: [s. n.], 1976.