

ANÁLISE DE FALHA DO ROLAMENTO DO EXAUSTOR DE MÁQUINA DE PAPEL¹

Omar Maluf²
Mauricio Angeloni³
José Carlos dos Santos⁴
Marco Antonio Colósio⁴
Cassius R. Terra²
José Ricardo Tarpani⁵
Dirceu Spinelli⁶

Resumo

Este trabalho teve por objetivo a investigação da(s) causa(s) de falha de um componente mecânico utilizado em um exaustor de máquina de papel. A peça consiste em um rolamento SKF 7314 BECBJ de contato angular com uma carreira de esferas, montado em par, que falhou após três meses de operação contínua em serviço. A partir das análises detalhadas realizadas pôde-se identificar a causa da falha do rolamento bem como os fenômenos envolvidos.

Palavras-chave: Fadiga por contato; Inclusões; Rolamentos.

ROLLER BEARING FAILURE ANALYSIS OF THE EXHAUSTER OF PAPER MACHINE

Abstract

This study aimed to the investigation of the failure cause of a mechanical component used in exhauster of the paper machine. The part consists of a roller bearing SKF 7314 BECBJ of angular contact with a row of bearing balls, mounted on pair, which failed after three months of continuous operation on service. Form detailed analysis could be identify the cause of the roller bearing failure as well as the involved phenomenon.

Key words: Contact fatigue; Inclusions; Roller bearing

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Pós Doutorado do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil.*

³ *Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil.*

⁴ *General Motors do Brasil -GMB, Av. do estado 8860, São Caetano do Sul - SP, Brasil.*

⁵ *Prof. Dr. do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil.*

⁶ *Prof. Dr. Titular do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A investigação da causa de falha de componentes mecânicos é essencial em um mundo competitivo e em constante desenvolvimento. O objetivo deste trabalho foi o de investigar a causa da falha ocorrida em um rolamento de contato angular com uma carreira de esferas, montado em par, após três meses de operação contínua em serviço.

A Figura 1(a) mostra uma pista de rolamento de esferas, situada na superfície externa do anel interno do componente. Observa-se um dano altamente localizado, originado pelo descascamento progressivo da área de máximo contato entre as esferas e a superfície da pista de rolamento. Este fenômeno é conhecido na literatura por *flaking*, em um estágio inicial, e por *spalling*, num estágio mais avançado do dano.^[1] Este tipo de falha é tipicamente observado em superfícies em contato por rolamento puro, como no caso em questão. O mecanismo básico de iniciação do dano está vinculado ao desenvolvimento de tensões cisalhantes máximas, a uma profundidade logo abaixo das superfícies em contato por rolamento. Estas tensões desenvolvem-se ciclicamente, como função da periodicidade do carregamento por contato entre as esferas e a pista de rolamento, daí a denominação de fadiga por contato. As descontinuidades microestruturais, em especial de partículas de inclusões, atuam como pontos de concentração de tensões, fazendo com que durante a repetição alternada do carregamento, pequenas trincas nucleiem na interface inclusão/matriz, gerando, desta forma, pequenos pites. Com a continuidade do carregamento, ocorre o crescimento dos pites, que passam a atuar como grandes concentradores de tensão, acelerando o processo de extração de material da superfície da pista de rolamento, isto é, promovendo o descascamento do material. O estágio final do processo coincide com a geração de um pite largo e profundo, que inutiliza o componente para as condições normais de uso para o qual foi projetado.

Também, na Figura 1(a), observa-se sinais de desgaste ao longo de toda a pista de rolamento dos anéis interno e externo, gerados pelo atrito dos fragmentos arrancados pelo descascamento altamente localizado, anteriormente descrito, além de marcas de trabalho irregular nas pistas de rolamento de ambos os anéis, estando o anel externo acoplado ao mancal e permanecendo fixo durante a operação em serviço. As marcas revelam uma nítida variação da largura da banda de rolamento das esferas, denotando um provável desalinhamento do rolamento, acompanhado ou não da deformação dos anéis, quando da montagem do conjunto rolamento-mancal-eixo do exaustor. As marcas de trabalho irregular mostram um padrão bem definido, atingindo, respectivamente, uma largura máxima (folga mínima no rolamento) e uma largura mínima (folga máxima) em pólos diametralmente opostos, em ambos os anéis, interno e externo. De fato, verificou-se que o dano de fadiga por contato, gerou um descascamento altamente localizado sobre a pista de rolamento do anel interno, ocorrendo exatamente na região que apresentava uma largura máxima (folga mínima) de marcação de contato com a carreira de esferas. Isto indica o efeito de uma sobrecarga altamente localizada naquela região, na indução do dano pelo mecanismo de fadiga por contato.

A Figura 1(b) mostra uma oxidação acentuada ocupando aproximadamente 40% da superfície externa do anel externo do rolamento de esferas. Esta oxidação mais intensa desenvolveu-se exatamente na região em que a área de contato entre a pista de rolamento e a carreira de esferas atingiu um valor máximo (folga mínima). Este fato concorda plenamente com a maior geração de calor no local em que o

contato entre pista e esferas era o mais intenso, ao longo do perímetro do anel externo.

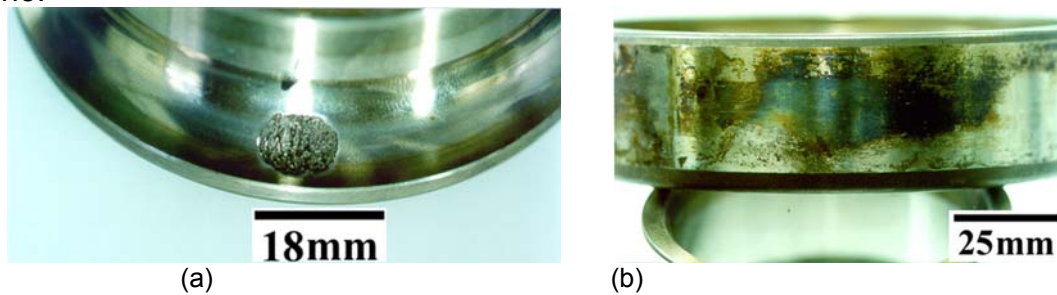


Figura 1. (a) Detalhe do dano altamente localizado (descascamento) na superfície interna do anel interno do rolamento. (b) Oxidação na superfície externa do anel externo do rolamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material em estudo é um rolamento SKF 7314 BECBJ de contato angular com uma carreira de esferas, montado em par. As características técnicas e condições de operação da peça são fornecidas na Tabela 1:

Tabela 1. Especificações do rolamento SKF 7314 BECBJ.

	Característica	Valor
Características Técnicas	Dimensões em mm	$\phi_{ext.}$ 150 P6 x ϕ 70 x 35 largura (conf. ISO 15 – 1981)
	Peso	2,65 Kg
	Capacidade de carga dinâmica	119000 N
	Carga limite de fadiga	3650 N
	Velocidade máxima	3000 Rpm
	Temperatura máxima	120°C
	Condições de Operação	Diâmetro do alojamento
Diâmetro do eixo		70 k6
Posição de trabalho		vertical
Lubrificação		graxa sintética Mobil EP SHC 220
Temperatura de trabalho		100°C
Sentido de giro		horário
Classe de trabalho		24 horas contínuas
Velocidade	900 Rpm	

A Figura 2 mostra um esquema parcial do equipamento em que trabalhava o rolamento que falhou em serviço, com o seu posicionamento no conjunto indicado com uma preta.

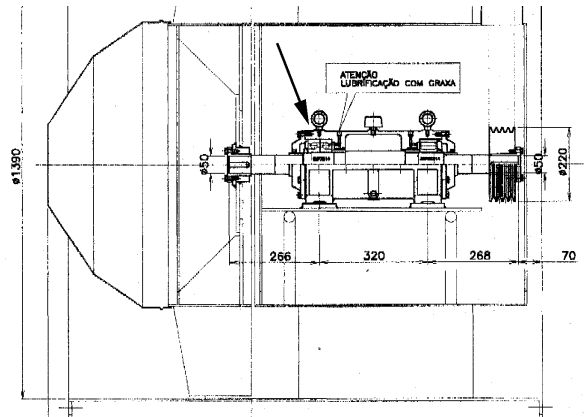


Figura 2. Esquematização parcial do equipamento, exaustor de máquina de papel VCP, em que trabalhava o rolamento SKF 7314 BECBJ.

De modo a determinar com precisão a causa da falha do rolamento, além de se verificar o porquê de somente o anel interno ter falhado, foram realizados alguns procedimentos experimentais detalhados tais como: ensaios de dureza; análise metalográfica; análise de inclusões; análise dimensional; e análise fratográfica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quanto aos ensaio de dureza, foram realizadas 5 medidas de dureza Rockwell-C (Tabela 2) ao longo do perímetro dos anéis interno e externo do rolamento.

Tabela 2. Resultados de dureza dos anéis do rolamento SKF 7314 BECBJ.

	Valores medidos	Média
ANEL INTERNO (HRC 150kgf)	59,5	59,7
	59,6	
	59,8	
	59,7	
	59,7	
ANEL EXTERNO (HRC 150kgf)	59,1	59,6
	59,9	
	59,6	
	59,4	
	59,8	

Os resultados mostram que a dureza do anel interno é praticamente idêntica à do externo e compatível à de um aço temperado e revenido para este tipo de aplicação. A pequena variação de dureza ao longo do perímetro dos anéis indica boa homogeneidade microestrutural em ambas as partes.

Quanto a análise metalográfica, a Figura 3 mostra um corte circunferencial da pista de rolamento, onde se observa o desenvolvimento de trincas sub-superficiais, com o conseqüente arrancamento de material da superfície da pista, gerando pites e culminando na formação da cratera que inutilizou o componente.

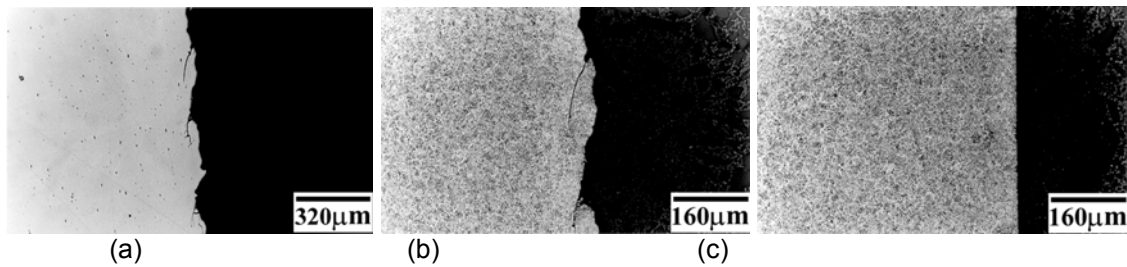


Figura 3. (a) Formação de trincas sub-superficiais na pista de rolamento do anel interno na região de descascamento localizado (amostra polida e sem ataque); (b) detalhe do trincamento sub-superficial na pista de rolamento interna (Nital 2%) e (c) microestrutura de uma região íntegra da pista de rolamento, constituída de martensita fina revenida (Nital 2%).

Na Figura 3(b), uma ampliação da Figura 3(a) mostra o trincamento da superfície da pista de rolamento e a correspondente microestrutura constituída por martensita revenida bastante refinada. A Figura 3(c) mostra uma região, também na superfície a pista de rolamento, porém ainda íntegra. A microestrutura é, assim como na Figura 3(b), bastante homogênea e típica de um aço que sofreu tratamento térmico de têmpera e revenido.

Quanto a análise de inclusões, visto não ter sido encontrada qualquer deficiência na microestrutura temperada e revenida do aço que constitui o anel interno do rolamento, que pudesse conduzir ao seu enfraquecimento localizado e conseqüentemente aos danos sofridos em serviço, foi realizada uma análise quanto ao teor e ao tamanho médio das inclusões no material. É assumido, com base na amplamente reconhecida lei de ação e reação, que a carga de rolamento era igualmente distribuída entre as pistas de rolamento dos anéis interno e externo do componente, não havendo portanto qualquer possibilidade de uma pista de rolamento ser sobrecarregada relativamente à outra. Desta forma, o desenvolvimento de um dano preferencial em um dos anéis, deve ser creditado a fenômenos relacionados às suas propriedades ou deficiências localizadas no material, em escala microscópica.

Selecionou-se, portanto, uma área na região do dano e uma área em uma região remota ao dano. Foram quantificadas as concentrações de segundas fases (inclusões por unidade de área) e estimado o diâmetro médio de inclusões em ambas as posições no anel interno, realizando-se 5 observações aleatoriamente selecionadas no interior dos dois campos (Tabela 3).

Tabela 3. Análise de inclusões em duas regiões do anel interno.

Região do anel interno	Concentração média de inclusões (partículas/mm ²)	Diâmetro médio das inclusões (μm)
Próximo ao dano	43	5,75
Remoto do dano	48	5,48

Verifica-se que os resultados são bastante próximos entre si, indicando, a priori, uma homogeneidade do metal quanto à distribuição espacial e de tamanho das segundas fases. A seleção aleatória do material não fornece, portanto, subsídios para se concluir por um efeito deletério das inclusões em um eventual favorecimento do fenômeno de fadiga por contato, no anel interno.

Decidiu-se então por uma abordagem mais determinística, isto é; menos estatística ou probabilística, quanto ao teor de inclusões no aço. Foi conduzida uma inspeção mais detalhada e pormenorizada das duas áreas previamente selecionadas, a saber, próximo e mais remotamente do dano no anel interno, no

intuito de se encontrarem propositadamente regiões de grande concentração de inclusões. Surpreendentemente, em ambas as regiões, foram encontrados aglomerados de inclusões, em que a concentração destas partículas atingia o valor de até 130 partículas/mm², ou seja, cerca do triplo dos valores médios obtidos numa seleção aleatória de campos de inspeção. A Figura 4 mostra uma destas regiões de alto teor de inclusões.

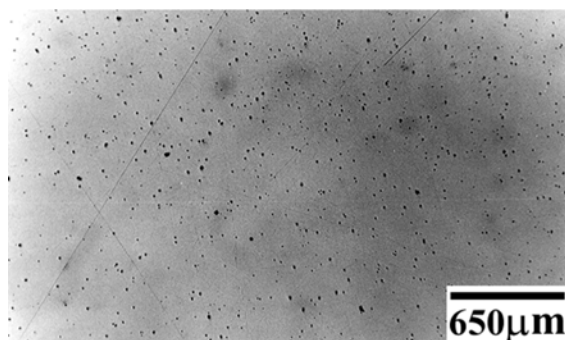


Figura 4. Região em que a concentração de inclusões atingiu a marca de 130 partículas/mm², próximo ao dano por fadiga de contato no anel interno.

Assim, pode-se concluir que, possivelmente, a existência de uma tal região, nas proximidades da superfície da pista de rolamento do anel interno, tenha favorecido o desenvolvimento local e preferencial de pites, segundo o mecanismo de fadiga por contato, culminando na falha do componente.

Quanto a análise dimensional, foi realizada uma aferição dimensional de ambos os anéis, interno e externo. Utilizou-se nesta tarefa uma máquina de medição universal SIP – SOCIETE GENEVOISE MOD: SIP302M. Foram medidos, com precisão micrométrica, o diâmetro interno do anel externo e o diâmetro externo do anel interno, respectivamente sobre a pista de rolamento e fora dela. Foram realizadas 5 medidas, em diferentes posições regularmente espaçadas, ao longo do perímetro de cada anel (Tabela 4). Utilizou-se uma ponta esférica nas medidas realizadas sobre a pista de rolamento, e uma ponta paralela nas medidas tomadas fora da pista.

Tabela 4. Diâmetros dos anéis interno e externo, medidos na pista de rolamento e fora dela. Resultados em milímetros.

		Valor 1	Valor 2	Valor 3	Valor 4	Valor 5	Média
ANEL EXTERNO (diâmetro interno)	Na pista	150,035	150,034	150,034	150,032	150,030	150,033
	Fora da pista	150,032	150,030	150,031	150,031	150,030	150,031
ANEL INTERNO (diâmetro externo)	Na pista	83,668	83,669	83,682	83,693	83,696	83,682
	Fora da pista	84,405	84,404	84,404	84,405	84,407	84,405

As máximas variações de diâmetro interno, medidas no anel externo, foram de 2,5 µm, fora da pista de rolamento, e de 5,3 µm, sobre a pista. No caso do anel interno, as variações do diâmetro externo foram de 2,8 µm, fora da pista de rolamento, e 28,7µm, sobre a mesma. Os resultados mostram, portanto, indícios de deformação permanente dos anéis, quando as medidas são realizadas sobre as

respectivas pistas de rolamento. Porém, as medidas tomadas fora das pistas, não evidenciam a ovalização dos anéis. Este fato confirma a suspeita de que a sobrecarga ocorreu em regiões muito bem definidas sobre as pistas de rolamento dos anéis, tal como preconizado durante a inspeção visual das mesmas, que indicou uma sensível variação da largura das bandas de rolamento. Conclui-se assim, que as pistas de rolamento foram plasticamente deformadas em serviço, gerando folga no rolamento, enquanto os anéis foram, no mínimo, deformados ou distorcido dentro do regime elástico, sendo esta deformação recuperada na desmontagem do componente, não sendo, portanto, cabalmente revelada por esta análise dimensional.

Quanto a análise fractográfica, utilizou-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura para observar mais detalhadamente a região de descascamento do anel interno do rolamento.

A Figura 5 mostra a interface entre a região descascada e o material ainda íntegro na superfície da pista de rolamento do anel interno, em duas posições distintas.

A Figura 6 mostra claramente a natureza progressiva do descascamento, ao longo da espessura do anel interno, segundo um mecanismo de esfoliação da superfície de contato da pista de rolamento com a carreira única de esferas.

A Figura 7 mostra um tipo de dano observado na porção mais profunda da cratera originada pelo descascamento localizado. Observa-se o enrugamento do metal no interior da cratera, com as rugas orientadas exatamente a 90° da direção de deslocamento da carreira de esferas. Estas rugas constituem-se em obstáculos bastante severos ao rolamento destas esferas, gerando calor e aumento da temperatura local.

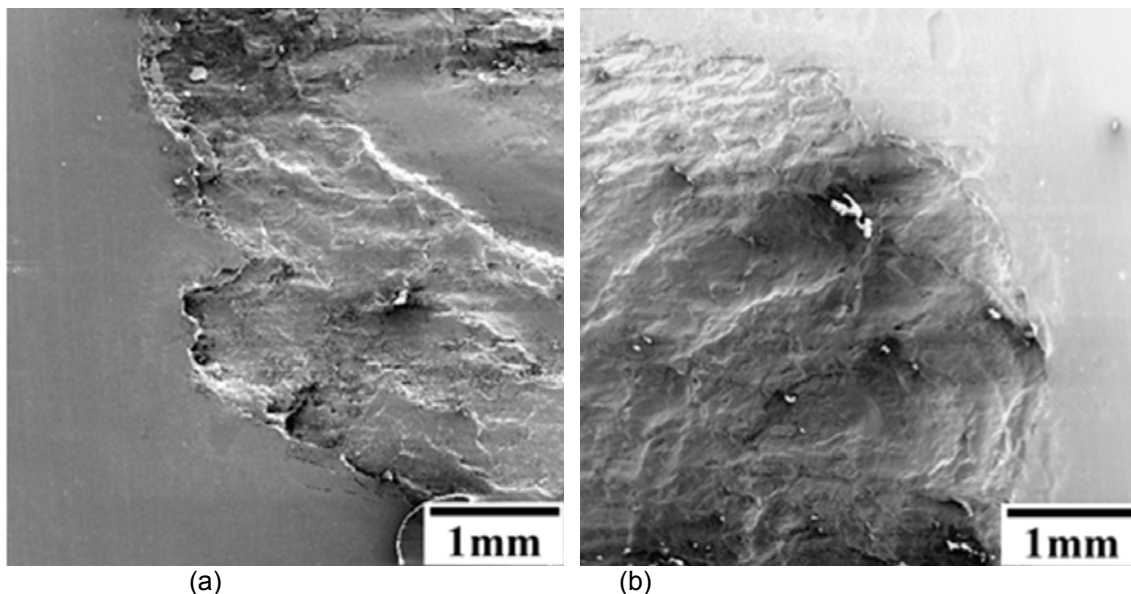


Figura 5. Progressão, à esquerda (a) e à direita (b) do dano, do fenômeno de descascamento da superfície da pista de rolamento do anel interno.

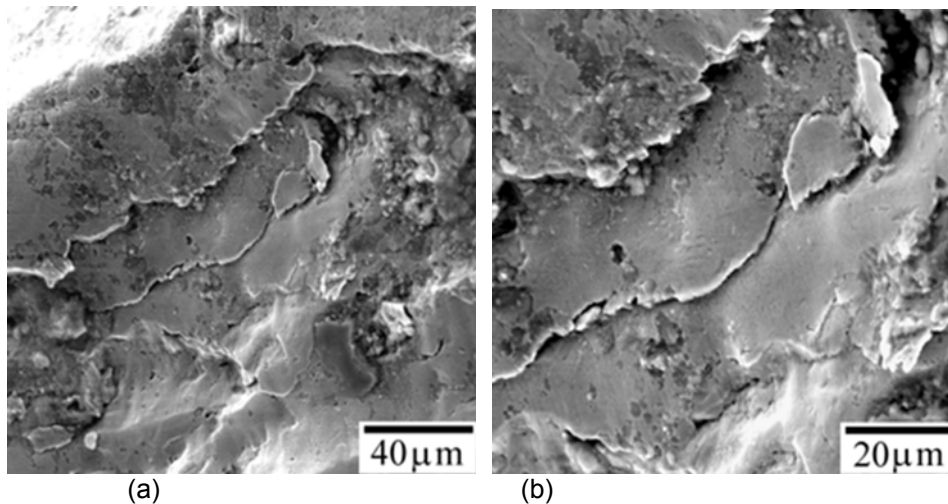


Figura 6. Descascamento por esfoliação progressiva da superfície de contato com as esferas, na pista de rolamento do anel interno. (a) 500 X; (b) Detalhe 1000 X.

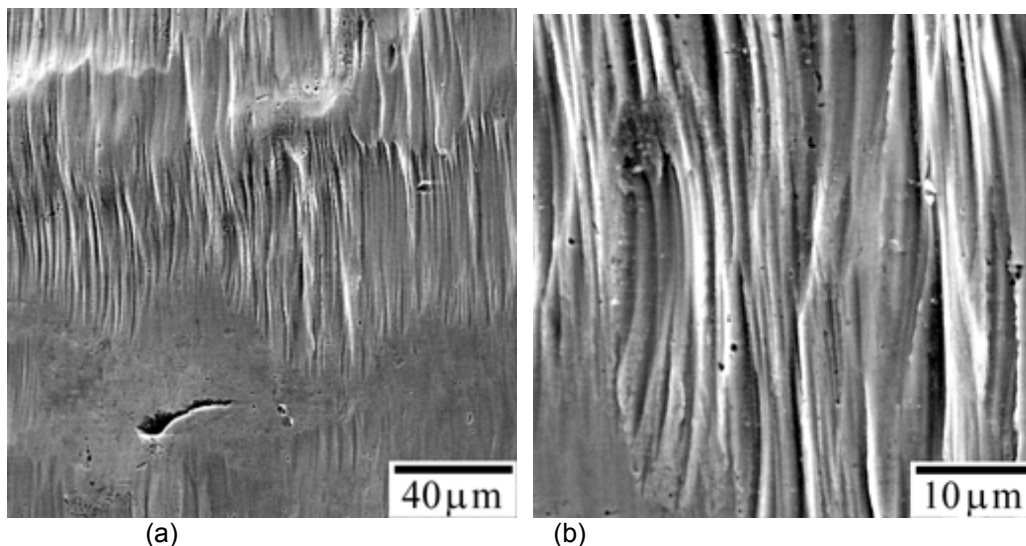


Figura 7. Enrugamento da superfície metálica no interior da cratera, devido ao atrito com a carreira de esferas. (a) 500 X e (b) Detalhe 2000 X.

4 CONCLUSÃO

Considerando-se os resultados obtidos a partir das análises realizadas, pode-se concluir que a causa da falha do rolamento foi a sobrecarga de regiões bem determinadas sobre as pistas de rolamento dos anéis interno e externo do componente. O fenômeno de fadiga por contato ocorreu preferencialmente no anel interno, como decorrência de uma maior concentração aleatória de inclusões nesta região. A oxidação verificada no anel externo foi simplesmente uma consequência do aquecimento excessivo da região pelo contato mais intenso, ou seja, menor folga, entre a pista de rolamento e as esferas, exatamente naquela posição. A coloração azulada da oxidação desenvolvida na superfície do anel externo indica que a temperatura atingiu valores na faixa de 300°C a 350°C naquela região.

REFERÊNCIA

- 1 ASM Metals Handbook, 1986, Ninth Edition, Vol.11, Failure Analysis and Prevention, Failure of Bearings.