



# ANÁLISE DE FALHA DE ROLAMENTO DE CONTATO ANGULAR UTILIZADO EM SISTEMA DE EXAUSTÃO<sup>1</sup>

Danilo Borges Villarino de Castro<sup>2</sup>  
 Maria Cristina Adami Gatti<sup>3</sup>  
 Dirceu Spinelli<sup>4</sup>  
 José Ricardo Tarpani<sup>5</sup>

## Resumo

Investigaram-se as possíveis causas da falha ocorrida em rolamento de esferas de contato angular empregado no sistema de exaustão de uma fábrica de papel. Foram realizados os seguintes procedimentos experimentais: análises visual, dimensional, metalográfica, fractográfica e quanto ao teor de inclusões, além de ensaios de macrodureza. Concluiu-se que a falha do componente foi sobrecarga de regiões altamente localizadas nos anéis interno e externo do rolamento. Fadiga por contato ocorreu especialmente no anel interno como decorrência de uma maior concentração de inclusões na região. A coloração azulada desenvolvida na superfície do anel externo indicou que a temperatura local atingiu a faixa de 300°C-350°C.

**Palavras-chave:** Rolamento de esferas; Análise de falha; Fadiga por contato.

## FAILURE ANALYSIS OF ANGULAR CONTACT BEARING USED IN EXHAUST SYSTEM

### Abstract

The causes of failure in angular contact ball bearing employed in paper mill exhaust system have been investigated. The following experimental procedures were carried out: visual, dimensional, metallographic, fractographic and inclusion content analyses, besides hardness testing. It has been concluded that the rolling-element bearing failed by overload in highly localized regions in both the inner and outer races. Contact fatigue developed specially in the inner race as a result of high inclusion concentration in this region. The bluish colored outer ring surface indicated that the local temperature reached the range of 300-350°C.

**Keywords:** Ball bearing; Failure analysis; Contact fatigue.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais – SMM/EESC/USP.

<sup>3</sup> Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais – SMM/EESC/USP.

<sup>4</sup> Professor Titular do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística (SMM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

<sup>5</sup> Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística (SMM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

## 1 INTRODUÇÃO

Um rolamento é um dispositivo que permite o movimento relativo controlado entre duas ou mais partes. Serve para substituir a fricção de deslizamento entre as superfícies do eixo e da chumaceira por uma fricção de roladura. Compreendem os chamados corpos rolantes, como bolas, rodízios etc., os anéis que constituem os trilhos de roladura e a caixa interposta entre os anéis. Todos estes elementos são de aço combinado com cromo e as suas dimensões estão submetidas a um sistema de normalização.

A esmagadora maioria das avarias precoces em rolamentos se deve a um conjunto relativamente reduzido de fontes: desalinhamento, desequilíbrio, procedimentos de montagem, problemas de lubrificação e vedação. A fonte desses problemas pode ser identificada pela aplicação de sistemas de análise de condição, antes de a falha ocorrer, ou no caso onde a falha já ocorreu pela intervenção de especialistas que podem “ver as marcas” deixadas no rolamento e associá-las à fonte do problema. Uma vez analisada a fonte de uma falha, metodologias podem ser tomadas, tendo em vista evitar a repetição das mesmas.<sup>(1)</sup>

Geralmente, os defeitos em rolamentos evoluem com certa lentidão e emitem sinais com bastante antecedência da falha final, que pode ocorrer por travamento ou ruptura dos componentes. Defeitos típicos que evoluem dessa forma são: riscos nas pistas, roletes ou esferas, *pitting*, trincas, corrosão, erosão e contaminação.

O processo de degradação de um rolamento pode se iniciar na pista externa ou interna, num dos elementos rolantes (rolos ou esferas) ou na gaiola, alastrando-se depois para os demais componentes. Esse processo pode ser dividido em três estágios básicos de evolução até a falha final: inicial, intermediário ou avançado.<sup>(2)</sup>

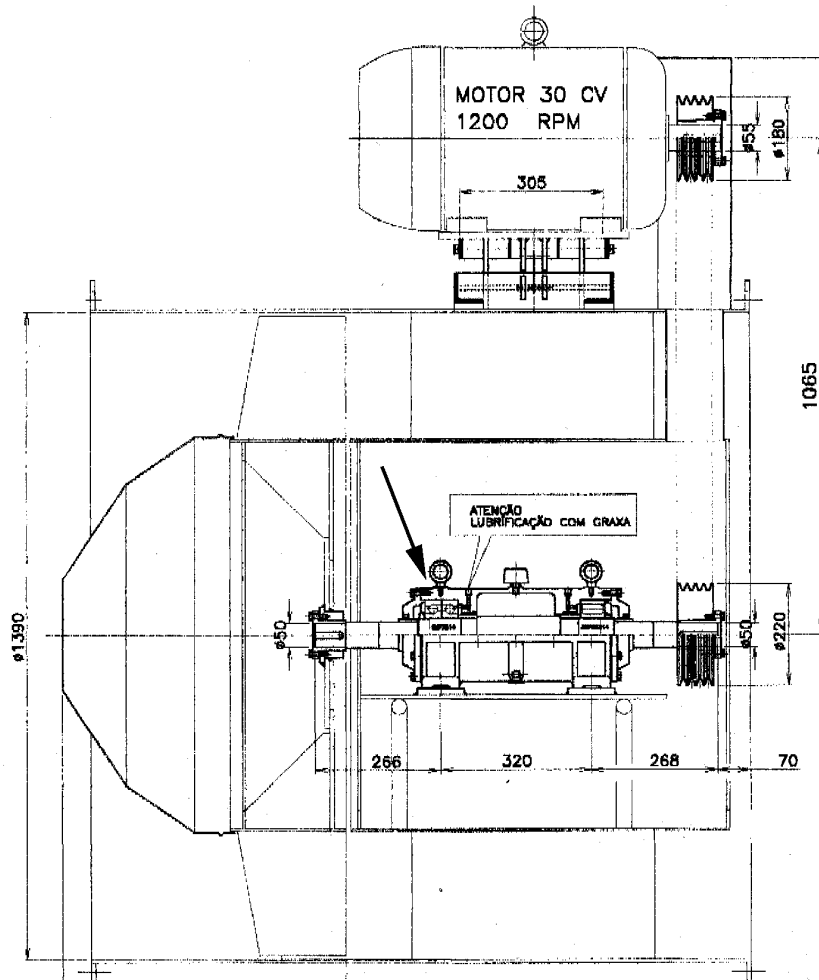
O objetivo deste trabalho foi o de investigar a causa da falha ocorrida em um rolamento de contato angular com uma carreira de esferas, montado em par, após três meses de operação contínua em serviço. O rolamento fazia parte de um equipamento exaustor de uma fábrica de papel.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 mostra um esquema parcial do equipamento em que trabalhava o rolamento que falhou em serviço, com o seu posicionamento no conjunto indicado com uma seta.

Na Tabela 1 são fornecidas algumas informações técnicas, obtidas do catálogo do fabricante, e algumas condições de serviço da peça estudada.

Para a investigação da possível causa da falha do componente, foram realizados os seguintes procedimentos experimentais: análises visual, dimensional, metalográfica, fractográfica e de inclusões, além de ensaios de macrodureza. A seguir, cada procedimento será brevemente detalhado e descrito.



**Figura 1.** Esquemática parcial do equipamento exaustor de máquina de papel, em que trabalhava o rolamento investigado neste estudo.

**Tabela 1.** Informações técnicas e condições de serviço do rolamento estudado

<i>Informações técnicas</i>	
<i>Massa</i>	2,65 kg
<i>Capacidade de carga dinâmica</i>	119 kN
<i>Carga limite de fadiga</i>	3,65 kN
<i>Frequência de rotação máxima</i>	3000 rpm
<i>Temperatura máxima</i>	120°C
<i>Condições reais de serviço</i>	
<i>Diâmetro do alojamento</i>	150 H7
<i>Diâmetro do eixo</i>	70 k6
<i>Posição de trabalho</i>	Vertical
<i>Lubrificação</i>	Graxa sintética Mobil EP SHC 220
<i>Temperatura de trabalho</i>	100°C
<i>Classe de trabalho</i>	24 horas contínuas
<i>Frequência de rotação</i>	900 rpm

Os ensaios de macrodureza Rockwell na escala C, conforme a norma ASTM E-18-08,<sup>(3)</sup> foram efetuados ao longo do perímetro dos anéis interno e externo do rolamento. Utilizou-se uma máquina da marca Leco, modelo RT-240, para a realização desses ensaios. O valor médio foi obtido por intermédio de cinco medições.

Em vista da hipótese de que uma ovalização permanente (plástica) ocorreria nos anéis do rolamento, uma aferição dimensional de ambos os anéis, interno e externo, foi realizada. 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 cinco medições, em diferentes posições regularmente espaçadas, ao longo do perímetro de cada anel.

Para a realização da análise metalográfica, foi cortada uma amostra do componente estudado. Esta foi embutida em baquelite condutora e lixada com lixas d'água com granulometria #80, #120, #220, #400, #600, #800, #1.200, e #2.000. Em seguida, a superfície lixada foi polida em três etapas: a primeira com dióxido de cromo, a segunda com solução de alumina 0,3  $\mu\text{m}$  e a última com solução de alumina 0,05  $\mu\text{m}$ . O ataque químico foi realizado com o reagente Nital 2% com aproximadamente 30 segundos de tempo de imersão.

As análises fractográficas sobre as superfícies de fratura do material investigado, utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura, com o intuito de caracterizar o aspecto morfológico da superfície de fratura na região do macro-defeito.

Por fim, foi realizada uma análise de inclusões, da seguinte maneira: foram selecionadas duas áreas, sendo uma na região do dano e uma na região remota ao dano. Foram quantificadas as concentrações de partículas de segunda fase (inclusões por unidade de área) e estimado o diâmetro médio de inclusões em ambas as posições no anel interno, realizando-se cinco observações aleatoriamente selecionadas no interior dos dois campos. As observações microestruturais e aquisições foram realizadas com o auxílio de um microscópio Olympus BX60M, acoplado a uma máquina fotográfica digital Sony Cyber-shot 5.1 Megapixels.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Macro dureza

Por intermédio dos ensaios de macro dureza efetuados sobre o perímetro dos anéis do rolamento, foram obtidos os seguintes valores (utilizando uma carga de 150 kgf):  $(59,7 \pm 0,1)$  HRC para o anel interno e  $(59,6 \pm 0,2)$  HRC para o anel externo. Os resultados mostram que a dureza do anel interno é praticamente idêntica à do externo, sendo compatível à dureza 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.

#### 3.2 Análise Visual

A Figura 2(a) mostra a 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.<sup>(4)</sup> 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, portanto, o processo de arrancamento 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.

Foram observados 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 (Figura 2a), anteriormente descrito.

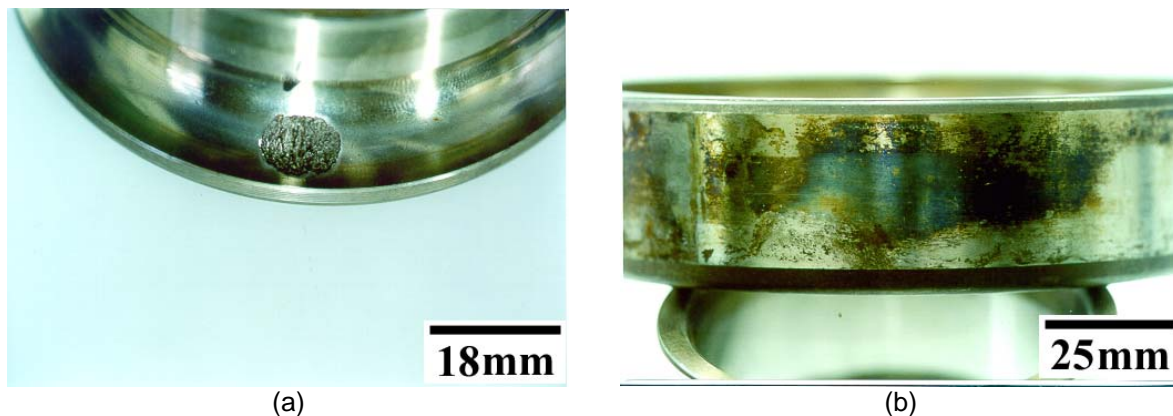
Foram também observadas marcas de trabalho irregular nas pistas de rolamento de ambos os anéis, interno e externo, estando este último acoplado ao mancal e permanecendo fixo durante a operação em serviço. As marcas revelaram uma nítida variação da largura da banda de rolamento das esferas, denotando 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, foi verificado que o dano de fadiga por contato, gerando o descascamento altamente localizado sobre a pista de rolamento do anel interno, ocorreu 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 2(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.

Desta forma, pode-se inferir que regiões específicas e bem determinadas, situadas sobre as pistas de rolamento de ambos os anéis interno e externo foram submetidas a sobre-carregamentos cíclicos ou periódicos, sendo que no anel interno, operou o mecanismo de fadiga por contato.

De modo a comprovar o diagnóstico da falha provocada por problemas decorrentes da montagem e alinhamento do rolamento, além de se verificar o porquê de somente o anel interno ter falhado, foram realizados alguns procedimentos experimentais detalhados.



**Figura 2.** (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.

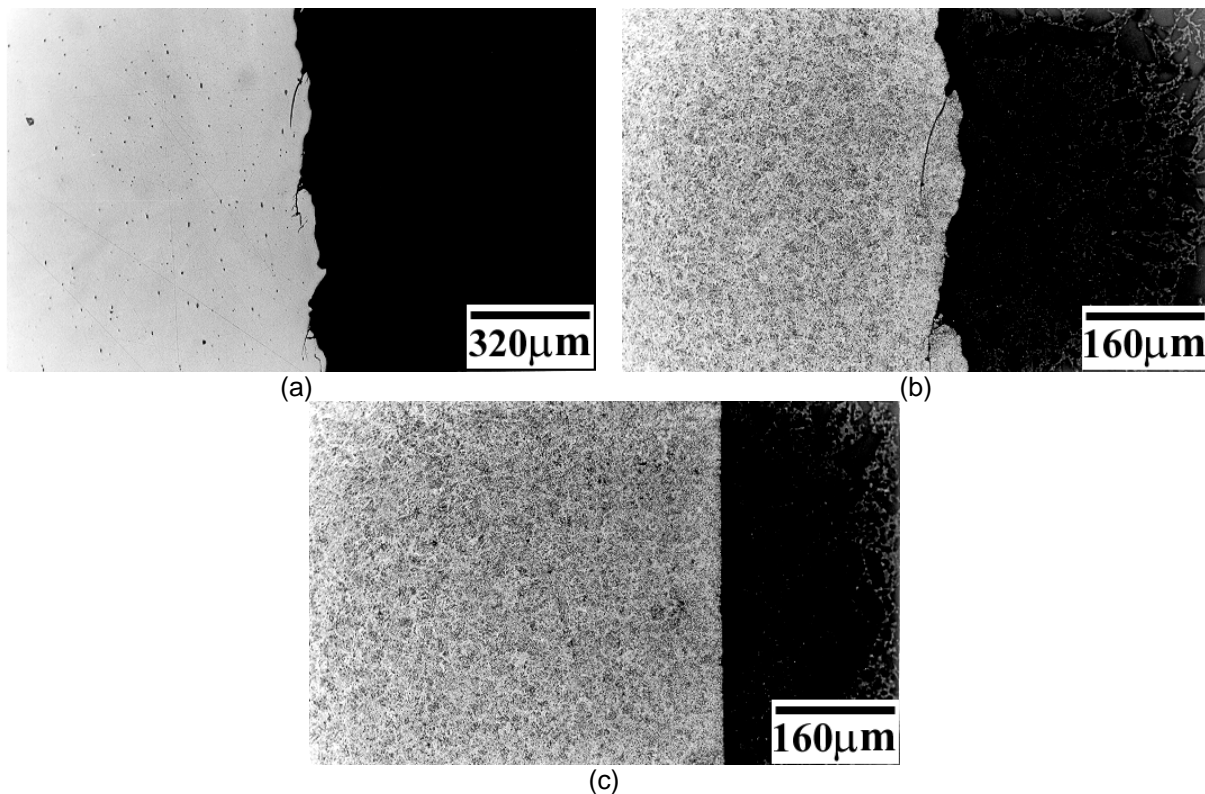
### 3.3 Análise Metalográfica e de Inclusões

A Figura 3(a) 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. A Figura 3(b) apresenta uma ampliação da Figura 3(a), mostrando o trincamento da superfície da pista de rolamento e a correspondente microestrutura constituída por martensita revenida bastante refinada. Já na Figura 3(c), evidencia-se 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.

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. Dessa maneira, fez-se uma análise de inclusões do material estudado, cujos resultados se encontram na Tabela 2.

**Tabela 2.** Análise de inclusões em duas regiões do anel interno.

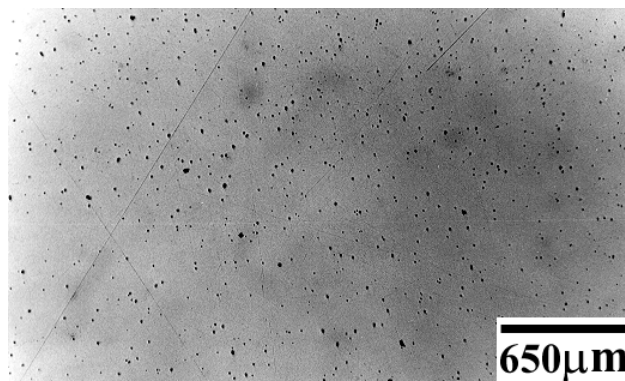
<i>Região do anel interno</i>	<i>Concentração média de inclusões (partículas/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Diâmetro médio das inclusões (μm)</i>
<i>Próximo ao dano</i>	43	5,75
<i>Remoto ao dano</i>	48	5,48



**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) Trincamento sub-superficial na pista de rolamento interna e microestrutura da região. Ataque químico com Nital 2%. (c) Microestrutura de uma região íntegra da pista de rolamento, constituída de martensita fina revenida. Ataque químico com Nital 2%.

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 partículas de segunda fase. 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.

Dessa forma, optou-se 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 vários aglomerados de inclusões, em que a concentração destas partículas atingia o valor de até 130 partículas/mm<sup>2</sup>, 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 expressiva marca de 130 partículas/mm<sup>2</sup>, próximo ao dano por fadiga de contato no anel interno.

Assim, pode-se concluir que, possivelmente, a existência de determinada 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.

### 3.4 Análise Dimensional

Os resultados de análise dimensional são fornecidos na Tabela 3. Utilizou-se uma ponta esférica nas medidas realizadas sobre a pista de rolamento, e uma ponta paralela nas medidas tomadas fora da pista.

**Tabela 3.** Diâmetros dos anéis (interno e externo), medidos na pista de rolamento e fora dela. Resultados em milímetros

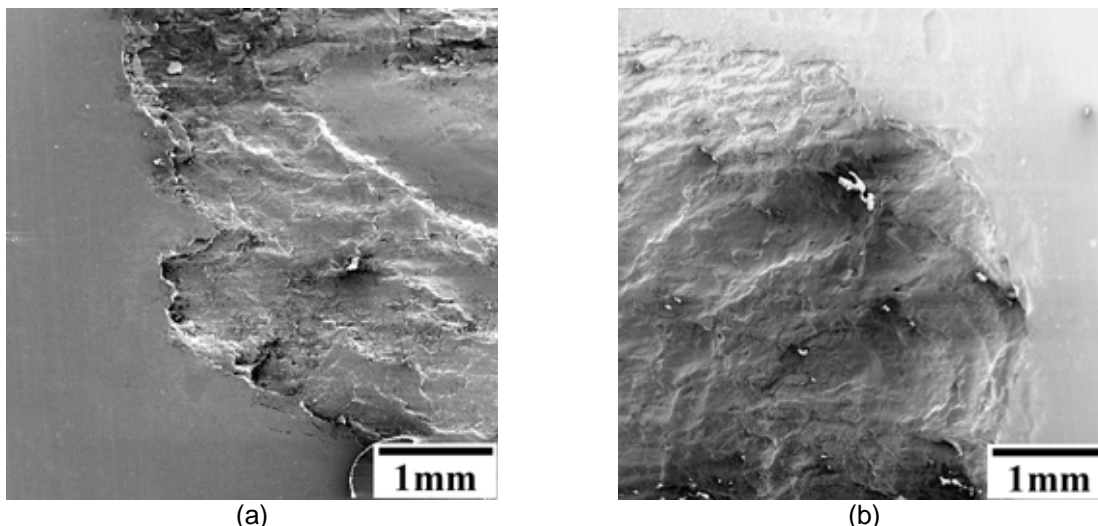
<i>Anel externo (Diâmetro interno)</i>		<i>Anel interno (Diâmetro externo)</i>	
<i>Na pista</i>	<i>Fora da pista</i>	<i>Na pista</i>	<i>Fora da pista</i>
150,034 ± 0,002	150,031 ± 0,001	83,682 ± 0,013	84,405 ± 0,001

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 28,7 μm, 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 o diagnóstico 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 distorcidos dentro do regime elástico, sendo esta deformação recuperada na desmontagem do componente, não sendo, portanto, cabalmente revelada por esta análise dimensional.

### 3.5 Análise Fractográfica

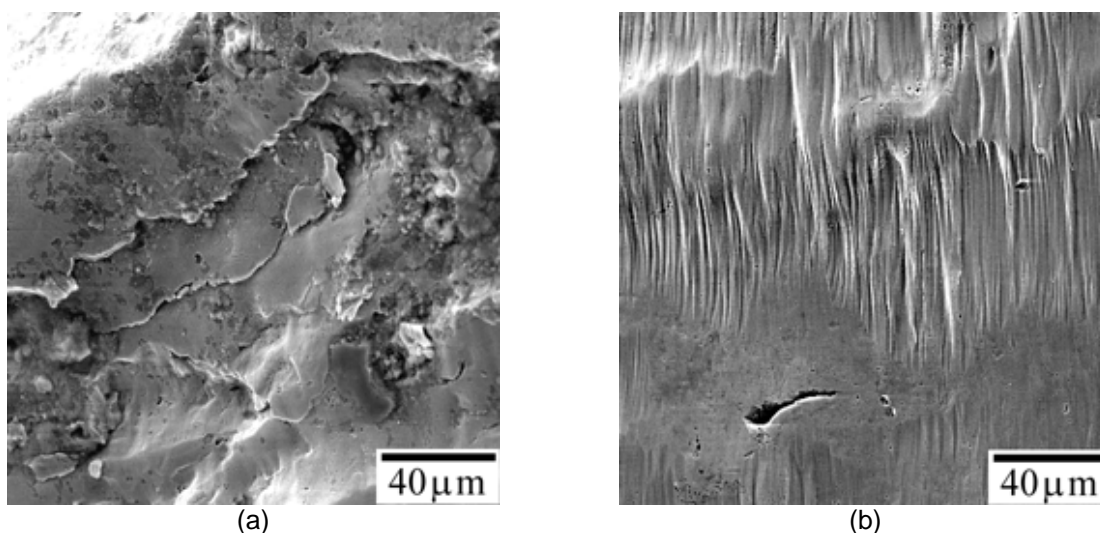
Utilizando-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura, foi observada mais detalhadamente a região de descascamento do anel interno do rolamento. A Figura 5 mostra a interface entre a região descascada e o material ainda íntegro na superfície da pista de rolamento do anel interno, em duas posições distintas.





**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.

A Figura 6(a) 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 6(b) 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 6.** (a) Descascamento por esfoliação progressiva da superfície de contato com as esferas, na pista de rolamento do anel interno. (b) Enrugamento da superfície metálica no interior da cratera, devido ao atrito com a carreira de esferas. Aumento de 500x.

#### 4 CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos a partir das análises realizadas, pode-se concluir que a causa da falha do rolamento foi uma 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 300-350°C naquela região.

### **Agradecimentos**

Os autores expressam os seus agradecimentos ao Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC – USP pelo uso de seus equipamentos e instalações.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 PONCI, L.P., CUNHA, P.M.R. Previsão de falha de rolamentos por análise espectral e de envelope. Documento interno da Teknikao Indústria e Comércio Ltda., 11p.
- 2 SKF Reability Systems. Análise de falha em rolamentos: condições reais e soluções reais. Documento interno da SKF Portugal – Rolamentos Lda., 2000.
- 3 ASTM E-18-08 *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*, ASTM International, 2008.
- 4 ASM Metals Handbook. *Failure analysis and prevention: failure of bearings*, 9.ed, vol.11, 1986.