

ENSAIOS DE FADIGA DE CONTATO EM MATERIAIS DE CILINDROS DE ENCOSTO¹

*Cláudio Eduardo Rocha dos Santos*²

*Julio Cesar Klein das Neves*³

*Felipe Carneiro Silva*⁴

*Amilton Sinatora*⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho é determinar uma curva de probabilidade de falha para um material utilizado em cilindros de encosto, aplicando-se ensaio de fadiga de contato de rolamento. Os ensaios foram conduzidos em um equipamento desenvolvido no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Esse equipamento é do tipo esfera sobre plano e sua arquitetura é baseada na substituição da pista externa de um rolamento axial de esferas por um corpo-de-prova com a forma de arruela plana. Os corpos-de-prova foram fabricados seguindo as operações de torneamento, têmpera e revenido, retificação e polimento. Como contra-corpos utilizaram-se esferas comerciais de aço ABNT 52100. Os ensaios foram realizados com lubrificação e foi aplicada uma pressão de contato máxima de 4,8 GPa. O critério para final de ensaio foi a ocorrência de lascamento da superfície de rolamento do corpo-de-prova. O principal resultado do presente trabalho é a obtenção de uma curva de probabilidade de falha que servirá como primeiro referencial da vida em fadiga de contato para materiais de cilindros de encosto, fornecendo assim subsídios ao desenvolvimento de novos produtos.

Palavras-chave: Fadiga de contato; Cilindro de encosto; Cilindro de apoio.

CONTACT FATIGUE TESTS OF MATERIALS FOR BACKUP ROLLS

Abstract

The aim of this work is to construct a curve of failure probability for a material used in the production of backup rolling rolls. The tests were conducted in a rig designed and assembled at Phenomena Surface Laboratory in Sao Paulo University. This is a typical ball-on-washer equipment which is based on the substitution of one of the outer races of a double direction thrust ball bearing for a like washer specimen. Specimens were produced by machining, quenching and tempering, grinding and polishing. Regular bearing balls of AISI 52100 steel were used as counter-bodies. The tests were performed under lubrication and with a maximum contact pressure of 4.8 GPa. The criterion of test ending was the occurrence of a spall on the specimen surface. The main result of this work was the construction of a failure probability curve, which will be used as a first reference of life under rolling contact fatigue for backup rolls alloys and will support further developments.

Key words: Rolling contact fatigue; Backup roll.

¹ Trabalho apresentado no 43º Seminário de Laminação, 17 a 20 de outubro de 2006, Curitiba, PR.

² Engenheiro de Desenvolvimento e Aplicação da Aços Villares, Pindamonhangaba, SP.

³ Prof. do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR.

⁴ Estudante de Tecnologia Mecânica da FATEC e estagiário no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

⁵ Prof. do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

INTRODUÇÃO

É observado atualmente um significativo crescimento da demanda mundial de aço fortemente influenciado pelo crescimento da China. Neste contexto, o mercado produtor mundial vem se desenvolvendo rapidamente buscando atender essa demanda. De acordo com o Internacional Iron and Steel Institute (IISI)⁽¹⁾ a produção mundial de aço bruto subiu de 848 milhões de toneladas em 2000 para 1.132 milhões de toneladas em 2005, ou seja, uma taxa de 6% de crescimento médio anual. Desta forma pode-se observar um movimento mundial no sentido de transferir ou implementar novas unidades estrategicamente posicionadas próximas do mercado consumidor, bem como se observam movimentações de compra ou associações de grandes grupos visando aumentar sua competitividade neste novo contexto. A fim de acompanhar o aumento da produção mundial de aço os insumos utilizados na siderurgia também apresentam um forte crescimento de sua demanda, seja em termos de ampliação das capacidades produtivas, seja na melhora de rendimento de itens específicos.

Neste contexto, e levando em conta que cilindros de laminação estão entre os principais insumos da indústria siderúrgica, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um ensaio laboratorial que avalia a vida sob fadiga de contato em ligas usualmente utilizadas para fabricação de cilindros de encosto, também conhecidos como cilindros de apoio. Essa linha de produtos é utilizada na laminação com o principal objetivo de diminuir a flexão do cilindro de trabalho⁽²⁾ durante o processo de laminação de tiras a frio (LTF) ou de tiras a quente (LTQ) e devido a suas grandes dimensões, costumam ser os cilindros que atingem os maiores valores unitários.

Equipamentos de fadiga de contato foram desenvolvidos inicialmente para avaliar materiais destinados a indústria de rolamentos.⁽³⁾ Este estudo serviu de base ao desenvolvimento do equipamento⁽⁴⁾ utilizado na execução dos ensaios em ligas para cilindros de encosto apresentados neste trabalho, o qual justifica-se pelo fato de que fadiga de contato é um dos mecanismos de falha atuantes nesse tipo de componente mecânico.⁽⁵⁾ Na Figura 1a é apresentada a foto de um cilindro de encosto que sofreu falha por fadiga de contato. Já na Figura 1b mostra-se a foto de uma falha gerada no ensaio de laboratório, apresentada em trabalho prévio.⁽⁴⁾

A teoria na qual fundamenta-se esse tipo de ensaio é baseada no estudo do contato entre dois sólidos de geometria não-conforme. Esses corpos ao serem colocados em contato tocam-se inicialmente em um único ponto, ou ao longo de uma linha, e na medida que forças são aplicadas no sentido de pressionar uma superfície contra a outra, as deformações resultantes levam a formação de uma pequena área de contato.⁽⁶⁾ Na Figura 2 é apresentada uma definição visual de contato conforme e não-conforme.⁽⁷⁾

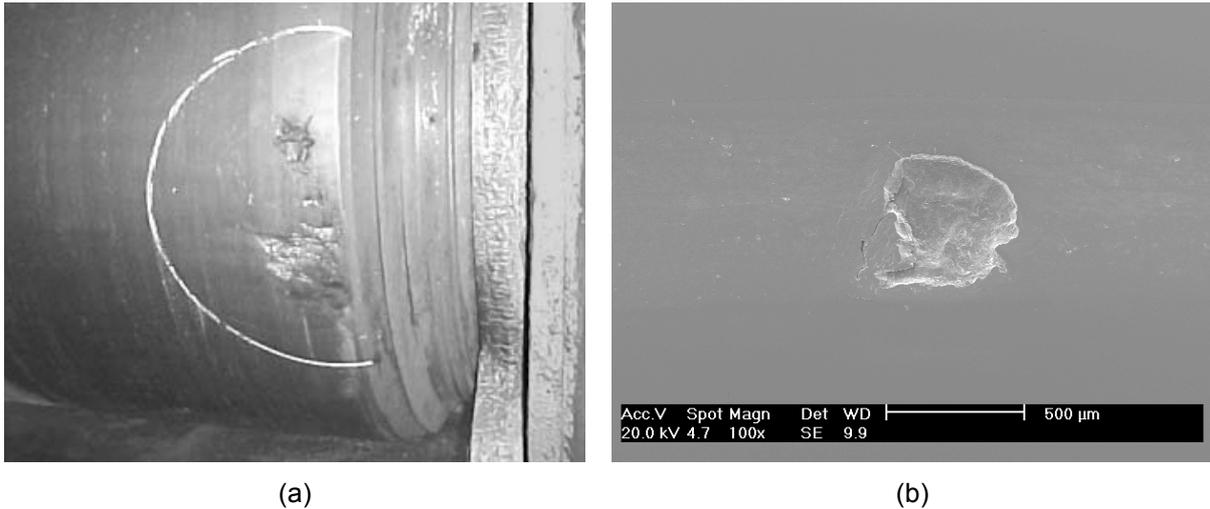


Figura 1. Falhas de fadiga de contato em cilindro de encosto (a) e em corpo-de-prova do ensaio de laboratório⁽⁴⁾ (b).



Figura 2. Contato conforme (a) e não-conforme⁽⁷⁾ (b).

A primeira análise satisfatória das tensões de contato de dois sólidos elásticos foi apresentada por Hertz em 1882. Este modelo pressupõe que ambas superfícies são lisas e que o contato entre elas é isento de atrito.

No presente trabalho foi estudado o caso particular de contato esfera contra plano, onde o raio de circunferência de contato (**a**) e as pressões média (**p_m**) e máxima (**p_o**) de contato são descritos pelas Equações⁽⁶⁾ 1, 3 e 4.

$$a = \left(\frac{3WR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde, **W** é a carga aplicada, **R** é o raio da esfera e **E*** é módulo elástico combinado dos materiais da esfera e do plano e é obtido pela Equação 2.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde, **v₁** e **v₂** são os coeficientes de Poisson dos materiais da esferas e do plano e **E₁** e **E₂** são os módulos elásticos dos materiais da esferas e do plano.

$$p_m = \left(\frac{W}{\pi a^2} \right) \quad \text{Equação 3}$$

$$p_o = \frac{3}{2} \left(\frac{W}{\pi a^2} \right) = \left(\frac{6WE^*2}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Equação 4

O campo de tensões elásticas geradas por um indentador esférico sobre uma superfície plana – análise de Hertz – mostra que a máxima tensão de cisalhamento ocorre a uma profundidade de 0,47a, onde tem início a deformação plástica tão logo a tensão de cisalhamento do material seja atingida.⁽⁷⁾ Caso o material obedeça ao critério de escoamento de Tresca – o qual é aplicável a materiais dúcteis⁽⁸⁾ – o escoamento terá início ao ser atingida a máxima tensão de cisalhamento, que nesse caso corresponde a metade da tensão de escoamento obtida no ensaio uniaxial de tração. Em geral, para os aços (coeficiente de Poisson 0,3) a máxima tensão de cisalhamento é 0,47 da pressão média de contato.

Falhas de fadiga de contato tem início quando as deformações causadas por carregamentos cíclicos nucleiam uma trinca subsuperficial, associada à região de maior tensão de cisalhamento.

Finalmente, os resultados de vida sob fadiga de contato obtidos para o material ensaiado foram utilizados para construir uma curva de probabilidade de falha. A suposição básica assumida nessa etapa é que as falhas observadas seguem uma distribuição de Weibull de dois parâmetros – classicamente empregada na análise de dados de vida em fadiga. Supor isso implica aceitar que a probabilidade de que a vida de um item aleatoriamente selecionado seja menor que algum valor “x” é dada por uma equação como a Equação 5:

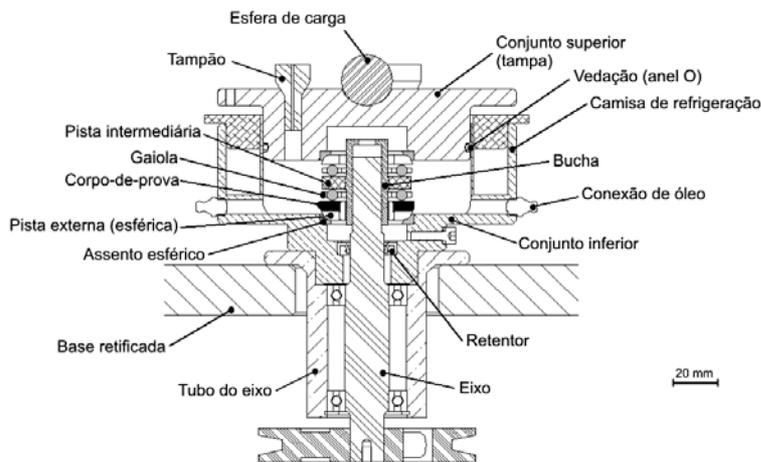
$$\text{Prob [vida} < x] = F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta} \right)^\beta \right]$$

Equação 5

Onde η e β são constantes positivas chamadas, respectivamente, parâmetro de escala e parâmetro de forma. O parâmetro de escala representa o valor de vida para o qual 63% das falhas já terão ocorrido e o parâmetro de forma indica o quão dispersos estão os valores de vida.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de fadiga de contato de rolamento foram realizados em um equipamento que utiliza a geometria de contato esfera sobre plano. Este equipamento, construído no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da escola Politécnica da Universidade de São Paulo, baseia-se na substituição de uma das pistas externas de um rolamento axial de duas fileiras de esferas – o DIN 54206 – por um corpo-de-prova plano, o qual apresenta a forma de uma arruela. Na Figura 3a é apresentado um esquema da câmara de ensaio na figura e na Figura 3b uma foto do equipamento montado no laboratório. O corpo-de-prova é apresentado na Figura 4.



(a) (b)
Figura 3. Esquema da câmara de ensaio (a) e equipamento montado (b).

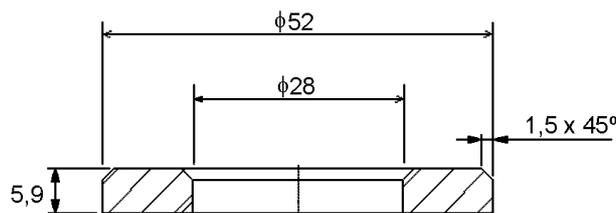


Figura 4. Corpo-de-prova de fadiga de contato.

O material cuja vida em fadiga de contato foi estudada é um aço ferramenta forjado contendo 0,45%C e 5%Cr. A seqüência de fabricação das amostras foi torneamento, têmpera e revenido para 56 HRC, retificação e preparação metalográfica até diamante de 1 μ m. Como contra-corpos foram utilizadas esferas de rolamento com diâmetro de 7,938 mm (ou 5/16 polegadas), fabricadas em aço ABNT 52100.

Os ensaios foram conduzidos sob lubrificação de um óleo para caixa de engrenagens SAE 90 com aditivação API-GL4. A temperatura de ensaio foi mantida entre 40 e 45°C. A carga de ensaio foi aplicada com pesos mortos de forma a gerar uma pressão máxima de Hertz (p_0) de 4,8 GPa. Os parâmetros gerais de ensaio podem ser visualizados na Tabela 1.

Os ensaios foram conduzidos até a ocorrência do primeiro lascamento na superfície dos corpos-de-prova. A vida final de cada ensaio foi utilizada para montar uma curva de probabilidade de falha, segundo uma distribuição de Weibull de dois parâmetros, η e β , os quais foram calculados resolvendo-se as Equações 6 e 7 ⁽³⁾. Ao todo foram ensaiados oito corpos-de-prova do material estudado.

$$\frac{1}{\beta} + \left(\sum_{i=1}^n \ln x_i \right) / n - \left(\sum_{i=1}^n x_i^\beta \ln x_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n x_i^\beta \right) = 0 \quad \text{Equação 6}$$

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^n x_i^\beta / n \right)$$

Equação 7

Onde x_i é a vida do i -ésimo corpo-de-prova, conforme a Tabela 2, e n é o número tamanho da amostra, ou seja, 8, no presente trabalho.

Tabela 1. Condições de ensaio.

Lubrificante	SAE 90 API-GL4
Temperatura do lubrificante	40 a 45 °C
Carga total	2100 N
Número de esferas	3
Carga por esfera	700 N
Diâmetro da esfera	7,938 mm (5/16")
Raio do contato (a)	0,264 mm
Área de contato	0,216 mm ²
Pressão média de contato (p_m)	3,2 GPa
Máxima pressão de contato (p_o)	4,8 GPa
Frequência de carregamento	46 Hz (para o eixo rodando a 1900 rpm)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As vidas totais em fadiga dos corpos-de-prova ensaiados são apresentadas na Tabela 2. Cada um desses ensaios foi encerrado apenas após a ocorrência de lascamento na superfície, o qual foi detectado pelo aumento abrupto do ruído do ensaio.

Tabela 2. Vidas dos corpos-de-prova ensaiados

Amostra	Vida
A	15.000.000
B	23.500.000
C	9.200.000
D	17.000.000
E	13.300.000
F	15.000.000
G	16.000.000
H	27.400.000

As falhas decorrentes de cada teste foram observadas individualmente e identificadas como tendo a mesma morfologia característica. Na Figura 5 são apresentadas vistas de topo de falhas ocorridas em dois corpos-de-prova, o B e o E. Essas imagens representam a aparência geral das falhas observadas nos oito ensaios. Na Figura 6 podem ser vistas as secções transversais dessas mesmas falhas. Observa-se que apesar da diferença de cerca de 10 milhões de ciclos entre uma falha e outra elas apresentam morfologias e dimensões muito semelhantes. Comparando-se as profundidades das falhas com a profundidade da máxima tensão de cisalhamento descrita por Hertz ($0,47a = 124 \mu\text{m}$), verifica-se uma boa

concordância entre esses valores, indicando um processo clássico de fadiga de contato por rolamento onde a máxima tensão cisalhante ocorre na sub-superfície.

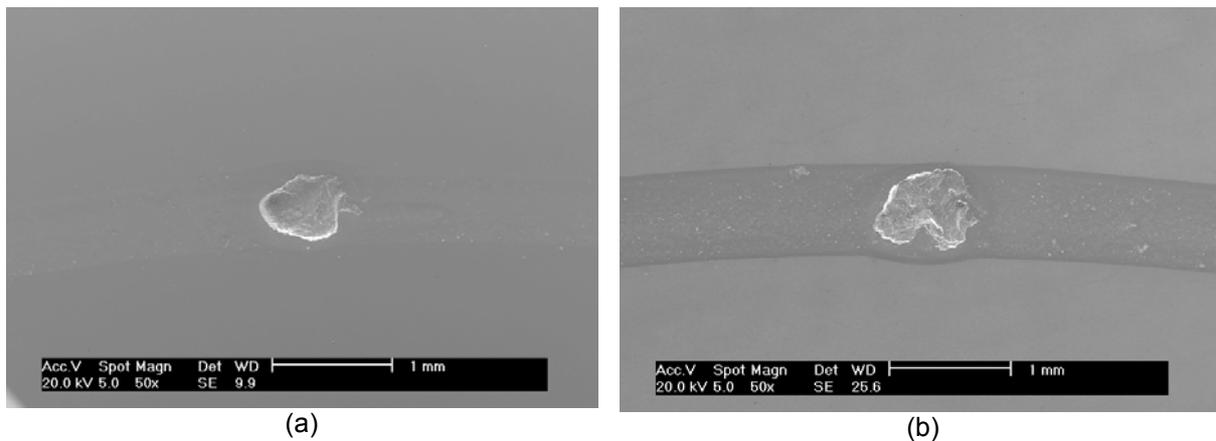


Figura 5. Vistas de topo das falhas dos corpos-de-prova B (a) e E (b).

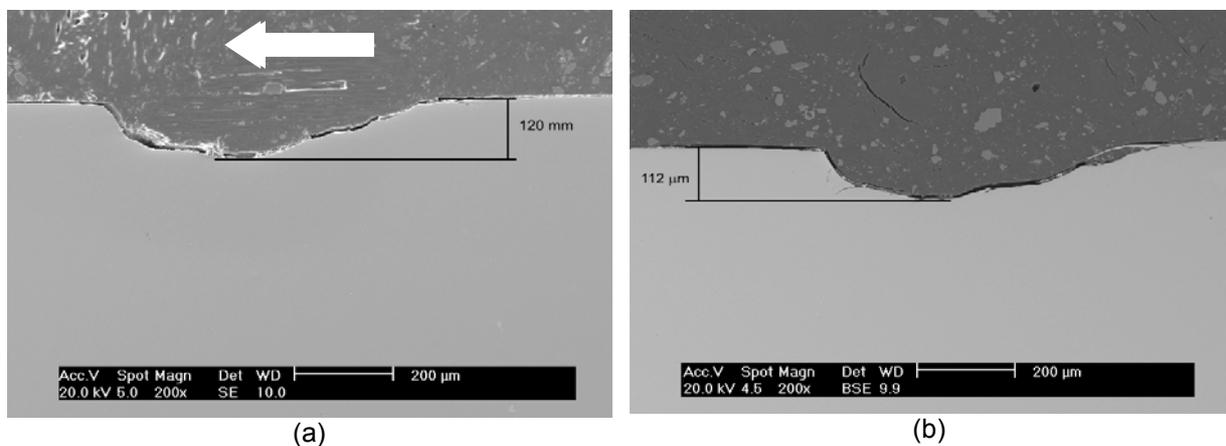


Figura 6. Secções transversais das falhas dos corpos-de-prova B (a) e E (b). A seta indica o sentido de movimento da esfera sobre a superfície de rolamento.

Considerando que as falhas observadas nos ensaios são de mesma natureza, os resultados foram então utilizados na construção de uma curva de probabilidade de falha, a qual é apresentada na Figura 7. Nesta figura, além da curva obtida pelo cálculo dos parâmetros característicos (segundo as Equações 6 e 7), também são apresentados os pontos originais dos oito ensaios realizados.

O resultado apresentado neste trabalho demonstra a validade do ensaio desenvolvido para caracterizar o comportamento de um material submetido à solicitação de fadiga de contato, embora este resultado, analisado isoladamente, seja de baixa aplicação na seleção de materiais e processos que conduzam a maximização da vida de componentes sob esse mecanismo de falha.

No entanto, considerando este trabalho como continuidade de um desenvolvimento iniciado com a construção do equipamento, definição dos parâmetros de ensaio e reprodução do mecanismo de falha, a determinação dessa curva de probabilidade de falha serve como primeira referencia para desenvolvimento de novos produtos.

Entre as alternativas possíveis para futuras investigações incluem-se comparações entre ligas, processos de fabricação, propriedades mecânicas (dureza) e até mesmo de diferentes estados de tensões.

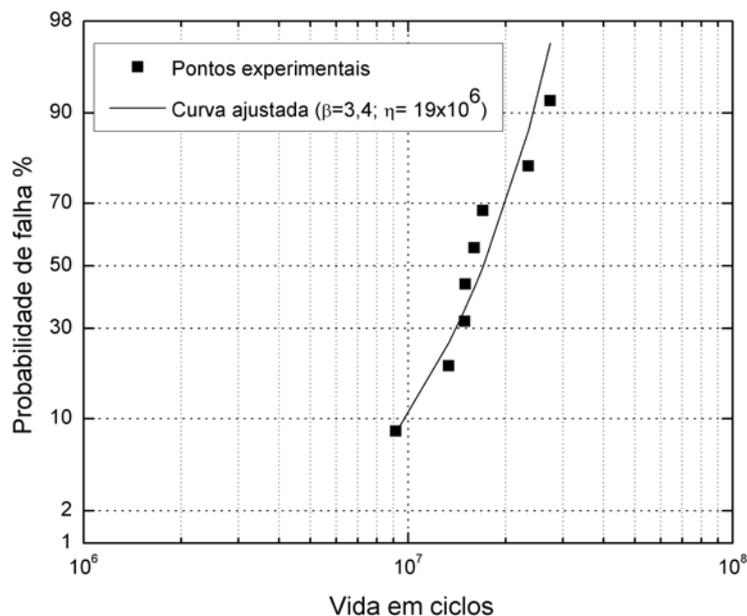


Figura 7. Curva de probabilidade de falha para o material ensaiado.

CONCLUSÃO

Todos os corpos-de-prova ensaiados apresentaram o mesmo mecanismo de falha o que tornou evidente a capacidade do ensaio em reproduzir o mecanismo e possibilitou a construção da curva de probabilidade de falha do material.

Os parâmetros de forma (β) e escala (η) da curva obtida são, respectivamente, 3,4 e 19×10^6 .

Devido ao fato do material ensaiado nesse trabalho ser de uso corrente na fabricação de cilindros de encosto, os resultados obtidos servirão de referência imediata para a comparação com diferentes ligas e rotas de fabricação.

Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Brasimet S.A., na pessoa do Engenheiro Carlos Sartori, pela realização dos tratamentos térmicos dos corpos-de-prova utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 World Steel in Figures. International Iron and Steel Institute, 2006. ISSN 1379-9746. Disponível em:
- 2 <http://www.worldsteel.org/pictures/newsfiles/WSIF06.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2006.
- 3 GINZBURG, V. B., BALLAS, R. **Flat rolling fundamentals**. Pittsburg: Marcel Dekker, 2000. cap 16, p.382.
- 4 HOO, J. J. C. **Rolling contact fatigue testing of bearing steels, ASTM STP 771**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1982.
- 5 NEVES, J. C. K., LEITE, M. V., SILVA, F. C., SANTOS, C. E. R., CARVALHO, M. A., SINATORA, A. Development of an apparatus for rolling contact fatigue tests. Proceedings of International Conference: In: ABRASION 2005 - ABRASION WEAR RESISTANT ALLOYED WHITE CAST IRON FOR ROLLING AND

- PULVERIZING MILLS. 2005, São Paulo, Brazil. São Paulo: Department of Mechanical Engineering, University of São Paulo and Institute for Technological Research - IPT, 2005. p. 129-141.
- 6 SYCHTERZ, J.B., OTT, G.A. Forged steel roll failures, In: Rolls for the metalworking industries, ISS Congress, Warrendale, PA., Ed., Lee G.E., 2002, p.317-336.
 - 7 JOHNSON, K. L. **Contact mechanics**, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1985.
 - 8 HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold, 1992. 273p.
 - 9 BEER, F. P., JOHNSTON Jr., E. R. **Resistência dos materiais**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982. 659p.