



ANÁLISE DE FALHA DE UM EIXO DE PINHÃO UTILIZADO EM LINHA DE ZINCAGEM CONTÍNUA¹

Danilo Borges Villarino de Castro²
Jeferson Aparecido Moreto²
Luciana Sgarbi Rossino³
Omar Maluf³
Dirceu Spinelli⁴
José Ricardo Tarpani⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho foi o de investigar as possíveis causas da falha ocorrida em um eixo de pinhão, utilizado em linha de zincagem contínua. O componente rotativo fraturou completamente após cerca de 5000 horas em serviço intermitente. O material que constitui o eixo corresponde a um aço DIN 17CrNiMo6. O componente fora aprovado, após fabricação, através de inspeção por ultra-som e partículas magnéticas. Além da inspeção visual do componente fraturado, foram realizados alguns ensaios mecânicos de dureza, impacto e tração sobre o aço em questão. Foram realizadas análises fractográficas sobre as superfícies de fratura do material investigado, utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura. Concluiu-se que o eixo de pinhão fraturou pelo mecanismo de fadiga. Uma trinca principal de fadiga, cuja extensão ocupou quase a totalidade da seção transversal do componente, nucleou em um defeito de fabricação do eixo, denominado “burst”, gerado durante as operações de forjamento da peça, como decorrência de elevadas concentrações altamente localizadas de porosidades, inclusões e segregações, previamente definidas na etapa do lingotamento.

Palavras-chave: Eixo de pinhão; Aço DIN 17CrNiMo6; Fadiga.

FAILURE ANALYSIS OF A PINION SHAFT USED ON CONTINUOUS ZINC-COATING LINE

Abstract

This work aimed at investigating the possible causes of a pinion shaft failure in a continuous zinc-coating line. The rotating component fractured completely after about 5000 hours of intermittent service. The component was made of DIN 17CrNiMo6 steel, and was inspected by ultrasound and magnetic particles after the manufacture. Besides visual and scanning electronic microscopic inspections of the broken component, hardness, impact and tensile tests were carried out in order to discover the root causes of the failure. It has been concluded that the pinion shaft fractured by fatigue. One main fatigue crack, whose extension occupied the very most area transversal section of the component, nucleated from a manufacturing defect (named burst), which had been formed during the metalwork (forging) of the part. The burst defect resulted from high levels of porosities, inclusions and segregations, which got concentrated in a small volume of the material during the ingot casting process.

Keywords: Pinion shaft; DIN 17CrNiMo6 steel; Fatigue.

- ¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ² Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais – SMM/EESC/USP.
- ³ Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais – SMM/EESC/USP.
- ⁴ Professores Titular e Associado, respectivamente, 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

Os eixos são utilizados em praticamente todas as máquinas que precisam transmitir movimento de rotação de uma peça à outra, como mancais de rolamento, engrenagens e polias. Nas junções destas peças podem ocorrer concentrações de tensão, cujo carregamento existente nas solicitações em serviço envolve a combinação de torção e flexão. Além disto, também pode ocorrer escorregamento nas superfícies de contato das peças. Tais ocorrências não podem ser desprezadas no ato do projeto, bem como também na análise desenvolvida a que o componente é submetido em operação. As engrenagens de cilindros menores (pinhões) que operam no sistema são utilizadas para unir elementos de peças ao eixo e manter o sincronismo de fase de entrada e saída dos eixos das máquinas em operação.⁽¹⁾

O aço é a escolha usual de materiais para obter a rigidez suficiente para pequenas deflexões. Atualmente, ligas de aço Cr-Ni-Mo são utilizadas para peças altamente solicitadas que necessitam de alta resiliência, resistência à fadiga e acabamento superficial duro, através de tratamento térmico de superfície como a cementação.^(1,2)

O elemento níquel eleva o limite de escoamento, a resiliência e a resistência à fadiga de aços estruturais quando em teor de 1,5% a 4,5 % em peso. O cromo eleva a resistência ao desgaste dos aços devido à formação de carbeto de cromo. Já o molibdênio protege os aços contra a fragilização de revenimento e favorece a uniformidade de beneficiamento em maiores espessuras dos aços.⁽²⁾

Causas de falha em serviço de peças como pinhões são apresentadas na literatura.⁽³⁻⁵⁾ Das *et al.*⁽⁴⁾ determinaram, em uma análise de falha de um eixo de pinhão, o qual fazia parte de um gerador a diesel de um sistema de planta de energia, que o componente fraturou por propagação de trinca por fadiga, iniciada no filete de um dos dentes do pinhão. O principal motivo da falha foi uma redução na área de contato especificada no projeto dos dentes do pinhão, causando um desalinhamento entre a engrenagem do pinhão e o anel da engrenagem, submetendo o sistema a desgaste severo na região de contato e a altas tensões de flexão, que estavam acima do limite de resistência do material. Também, o tratamento térmico inadequado das peças e a presença de alongadas inclusões de sulfetos no pinhão contribuíram para a redução na vida da peça.⁽⁴⁾

Já é sabido que este material, submetido à têmpera e revenimento, apresenta uma microestrutura constituída basicamente de bainita globular ou granular. No entanto, durante a fabricação deste aço (e.g. forjamento), pode haver a formação de microvazios, que podem agir como concentrador de tensões, devido ao seu formato irregular. Este tipo de microestrutura também pode apresentar sulfeto de manganês com formato alongado, em virtude dos esforços de forjamento a que foi submetido o eixo durante a sua fabricação. A presença de sulfeto de manganês e de microvazios pode corroborar com a susceptibilidade do componente a uma eventual falha mecânica em serviço.⁽³⁾

A fadiga por contato refere-se à evolução do dano que ocorre quando as superfícies de dois corpos se tocam repetidamente, tais como corrosão, formação de pites e detritos por desgaste e trincas de fadiga, cujo processo de dano pode causar a falha dos componentes que estão em contato. O movimento relativo entre os corpos pode envolver escorregamento, rolamento, ou uma combinação desses modos de contato. Geralmente um ou ambos os corpos em contato podem também estar sujeitos a tensões flutuantes devidas a vibrações ou outras formas de carregamento, que podem ocasionar a propagação das trincas nucleadas e causar a ruptura do material.⁽⁶⁾

O objetivo deste trabalho foi o de investigar as possíveis causas da falha ocorrida em um eixo de pinhão, utilizado em linha de zincagem contínua. O material que constitui o eixo corresponde a um aço DIN 17CrNiMo6.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material que constitui o eixo corresponde a um aço DIN 17CrNiMo6. Após sua fabricação, o componente fora aprovado, para sua real utilização, por intermédio de inspeções por ultra-som e partículas magnéticas.

A Figura 1 mostra um croqui do eixo pinhão, destacando-se o caminho de sua fratura transversal completa do componente.

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

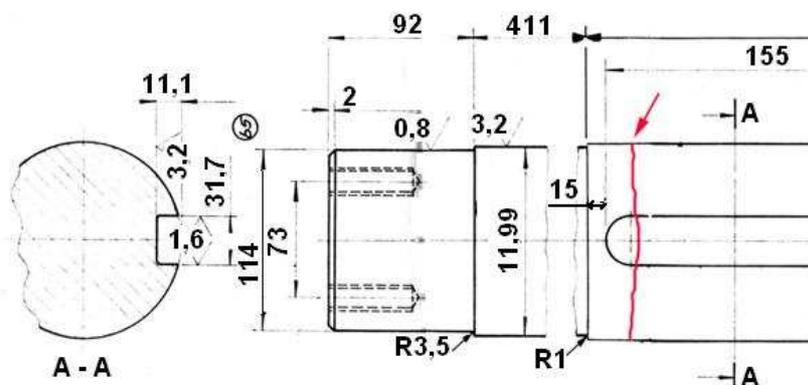


Figura 1. Padrão de fratura do eixo pinhão. A seta aponta para a posição ocupada pelo sítio principal de trincamento. Observa-se que o caminho de fratura não corresponde à região da mudança de seção.

2.1 Ensaios de Dureza

Os ensaios de macrodureza Rockwell na escala C, conforme a norma ASTM E-18-98, foram efetuados sobre a superfície do eixo próximo à região de fratura, nas proximidades do macro-defeito destacado na Figura 3(b). Utilizou-se uma máquina da marca Leco, modelo RT-240, para a realização desses ensaios.

2.2 Ensaios de Tração

Os ensaios de tração, à temperatura ambiente, foram realizados de acordo com a norma ASTM-E8M-01. Foram utilizados três corpos de prova com seção transversal circular com 12,5 mm de diâmetro, os quais foram extraídos segundo a orientação longitudinal de uma região próxima à superfície do eixo. O equipamento utilizado para efetuar os ensaios de tração foi um sistema universal *Instron*, em fundo de escala de 100 kN, sob uma velocidade de deslocamento do travessão de 2 mm/min. Os resultados foram avaliados em função dos limites de escoamento (σ_e) e de resistência à tração (σ_R), alongamento percentual (**A**) e estrição percentual (**RA**) na fratura.

2.3 Ensaios de Impacto

Os ensaios de impacto, na temperatura ambiente, foram realizados de acordo com a norma ASTM E-23-98. Para isso, foram utilizados um total de três corpos de prova Charpy, tipo I, com entalhe em V. Os corpos de prova foram extraídos do eixo segundo a orientação longitudinal, de uma região próxima à superfície do eixo. A velocidade de impacto do martelo foi de 5,52 m/s, sendo ele liberado de uma altura de 1,56 m e possuindo uma energia total no momento do impacto de 300 J. Os resultados foram avaliados em termos de energia absorvida por impacto (E_{abs}).

2.4 Análises Microscópicas

A Figura 2 ilustra a estratégia de retirada dos corpos de prova para análise metalográfica da região que apresentou o macro-defeito que, possivelmente, originou a trinca de fadiga principal do componente que fraturou em serviço. Foram realizadas análises fractográficas sobre as superfícies de fratura do material investigado, utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura, com o intuito de caracterizar os diversos aspectos morfológicos das superfícies de fratura na região do macro-defeito que originou a trinca de fadiga principal do componente.

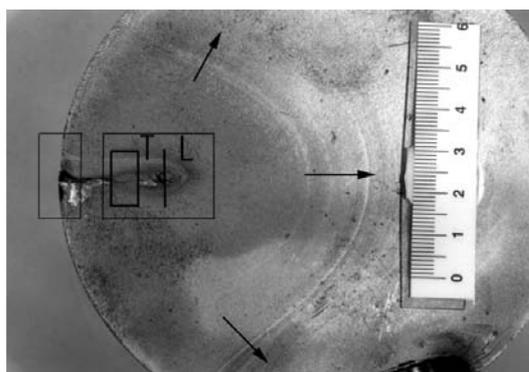


Figura 2. Estratégia de retirada das amostras metalográficas da região de nucleação da trinca de fadiga principal. Sentidos transversal (T) e longitudinal (L).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise Química

A composição química, em peso, do material do eixo fraturado é fornecida na Tabela 1. Os resultados indicam que o material do eixo é um aço de baixa liga com especificação DIN 17CrNiMo6, apesar dos teores de C, Mn e Ni estarem levemente acima do especificado na norma.

Tabela 1. Composição química do material do eixo (% em peso)

<i>Elementos químicos</i>	<i>Nominal</i>	<i>Medido</i>
C	0,17	0,19
Mn	0,50	0,60
Si	0,40	0,22
P	-	0,012
S	-	0,016
Ni	1,55	1,56
Cr	1,65	1,67
Mo	0,30	0,31

3.2 Inspeção Visual

A inspeção visual da superfície de fratura do eixo permitiu verificar que ela apresentava um aspecto extremamente liso, tal como tipicamente exibido por fraturas decorrentes de processos de fadiga (carregamento cíclico, alternado ou flutuante), que ocupava cerca de 90% da seção transversal do componente. Foram prontamente identificados dois sítios de nucleação de trincas por fadiga, um principal, situado à cerca de 90° do rasgo de chaveta, e um secundário, localizado exatamente no raio de curvatura do fundo do referido rasgo.

Na Figura 3(a) são indicadas as direções de propagação das trincas de fadiga principal e secundária (**F**), bem como a região de fratura final do componente (**FF**) por sobrecarga decorrente de uma seção insuficiente para resistir aos esforços desenvolvidos em serviço. Pode-se concluir que a tensão de serviço era relativamente baixa, tendo em vista a pequena área relativa à fratura final do eixo. Na Figura 3(b) são mostradas as frentes de propagação da trinca principal de fadiga, a qual muito provavelmente originou-se no macro-defeito mostrado em destaque na mesma figura. Observam-se nitidamente as marcas de praia, originadas de períodos de interrupção de crescimento de trinca e/ou de alterações nas condições de sua propagação. A presença das marcas de praia define positivamente o diagnóstico de falha por fadiga.

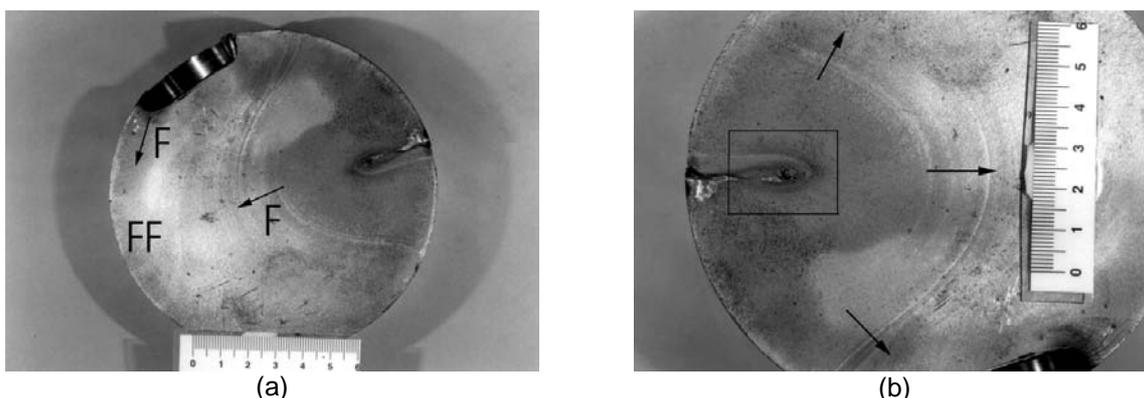


Figura 3. (a) Indicações da trinca principal e da trinca secundária de fadiga, desenvolvidas no eixo rotativo, F, e seção remanescente na fratura final do componente, FF; e (b) frentes de propagação da trinca principal e macro-defeito.

3.3 Propriedades Mecânicas

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios mecânicos realizados sobre o material estudado.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do material estudado

<i>Propriedades mecânicas</i>	<i>Valores obtidos</i>
Dureza (HRC)	30,1 ± 0,5
σ_e (MPa)	672,2 ± 1,8
σ_R (MPa)	998,1 ± 2,1
A (%)*	20,2 ± 0,3
RA (%)	57,7 ± 1,1
E_{abs} (J)	67,2 ± 1,2

* Para $L_0 = 40\text{mm}$.

3.4 Análises Microscópicas

Na Figura 4 é mostrado o fundo do rasgo de chaveta usinado no eixo rotativo, em cujo raio de curvatura nucleou uma trinca secundária de fadiga. Uma medição deste raio de curvatura, utilizando-se um analisador computadorizado de imagens, forneceu um valor de 0,35 mm. Nenhuma trinca secundária foi detectada na superfície da peça em questão, descartando-se, portanto, a possibilidade da trinca principal ter sido nucleada na superfície do componente.

A Figura 5(a) mostra uma vista geral da região mais invasiva do defeito apresentado na Figura 2(b), onde se observa a presença de duas cavidades principais, circundadas por grande quantidade de inclusões incrustadas na matriz metálica. Esta região tem aspecto semelhante ao defeito conhecido como *burst*, desenvolvido durante a operação de forjamento. Nesta região do material ocorre um decréscimo da sua resistência mecânica, causada pela elevada concentração de descontinuidades tais como porosidades, segregação de impurezas e/ou inclusões não metálicas.

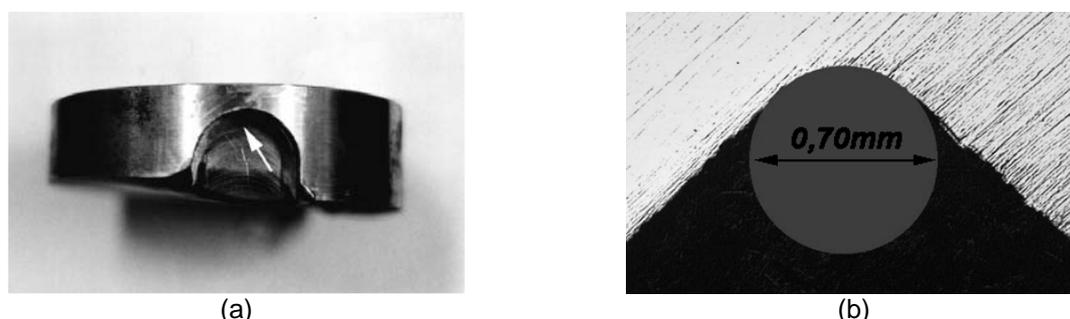


Figura 4. (a) Raio de curvatura do fundo do rasgo de chaveta. (b) Mensuração do raio via analisador computadorizado de imagens.

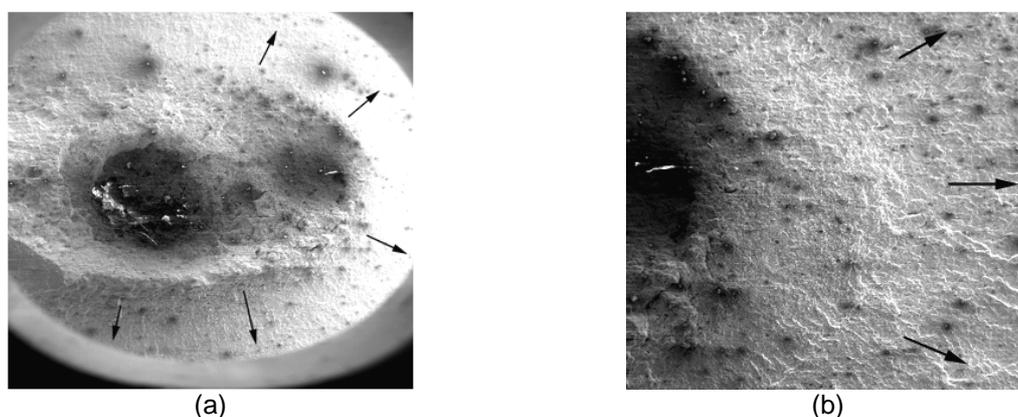


Figura 5. (a) Extremidade do macro-defeito que originou a trinca principal de fadiga, denominado *burst*, com aumento de 8x; (b) Transição para a trinca principal de fadiga, com aumento de 15x. Setas indicam propagação da trinca.

Basicamente, o mecanismo de geração de um *burst* é como segue: durante as operações de forjamento, tensões trativas significantes são produzidas em adição às tensões compressivas aplicadas.

Nas regiões em que o material é mais frágil, por exemplo, onde se concentram aleatoriamente descontinuidades como poros e impurezas como segregações e inclusões, as tensões trativas podem ser suficientemente elevadas para eventualmente rasgar o material internamente, particularmente se a temperatura de forjamento é excessivamente elevada.⁽³⁾

Ainda na Figura 5(a), as setas indicam a frente de propagação da trinca de fadiga originada pelo defeito em questão. Na Figura 5(b) é destacada a região de transição entre o defeito e a trinca oriunda do fenômeno de fadiga.

A Figura 6 mostra as estrias de propagação da trinca principal em estágio II, característica do processo de propagação de trinca pelo mecanismo de fadiga. Já na Figura 7 é observado o aspecto de fratura do tipo frágil desenvolvida no interior de uma das cavidades principais do *burst*. Além disso, observa-se a existência de uma elevada concentração de inclusões não metálicas no interior do macro-defeito (seta), o que comprova o diagnóstico de local de elevada concentração de impurezas.

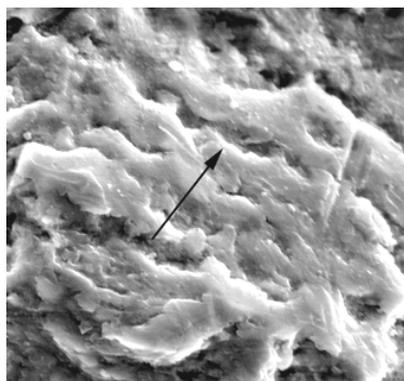


Figura 6. Estrias características de propagação de trinca por fadiga em estágio II. Seta indica direção e sentido de propagação da trinca. Aumento de 5.250x.

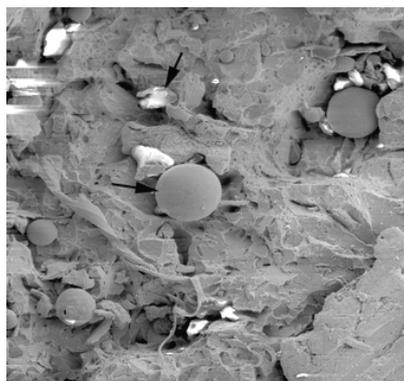


Figura 7. Aspecto do interior da cavidade do macro-defeito denominado "*burst*". Aumento de 100x. Partículas mais claras (indicada por setas) são devidas à contaminação da amostra após o evento da fratura.

Por fim, na Figura 8(a) é mostrada uma região nas proximidades, porém externamente à cavidade do macro-defeito (*burst*), a qual apresenta, em princípio, um aspecto essencialmente frágil. Uma maior ampliação da região na Figura 8(b) permite verificar, no entanto, que o material que constitui o eixo ainda retém certa ductilidade à fratura mesmo na presença de grandes quantidades de impureza.

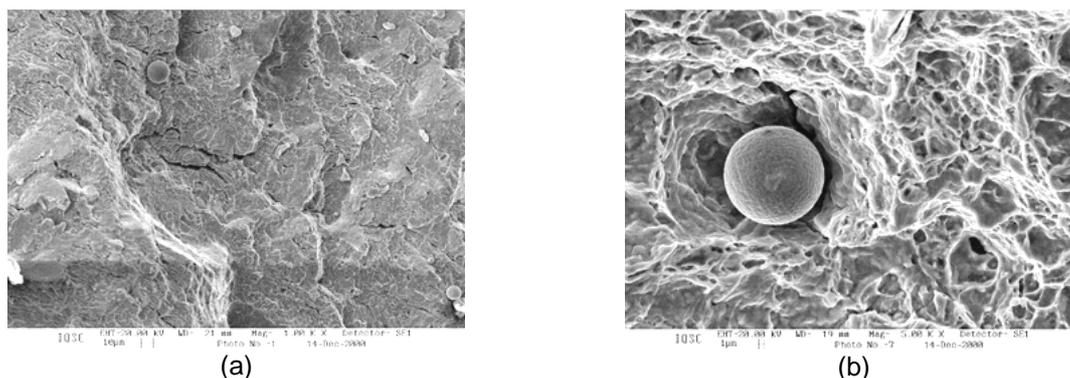


Figura 8. (a) Aspecto aparentemente frágil da fratura nas proximidades da cavidade do *burst*, com aumento de 350x. (b) Maior ampliação permite verificar sinais de ductilidade da matriz metálica, com aumento de 3500x.

4 CONCLUSÕES

Concluiu-se que o eixo-pinhão, utilizado na linha de zincagem contínua principal, fraturou pelo mecanismo de fadiga. Uma trinca principal de fadiga, cuja extensão ocupou quase a totalidade da seção transversal do componente, nucleou em um defeito de fabricação do eixo, denominado *burst*, gerado durante as operações de forjamento da peça, como decorrência de elevadas concentrações altamente localizadas de porosidades, inclusões e segregações, estas previamente definidas na etapa do lingotamento. Uma segunda trinca de fadiga, nucleada no raio de curvatura do rasgo de chaveta, foi considerada secundária devido a sua pequena extensão comparativamente aquela denominada principal, e deve, provavelmente ter surgido somente após o desbalanceamento do sistema.

Os problemas identificados neste estudo de caso originaram-se basicamente na etapa de fabricação do componente. Embora seja durante o forjamento que o *burst* se desenvolva, as concentrações ou gradientes composicionais e de porosidade são definidos já durante o vazamento do aço na etapa de lingotamento. Portanto maior atenção deve ser colocada nesta fase do processo de fabricação do componente.

Por outro lado, uma vez o forjado contenha um defeito tal como o presentemente caracterizado, o mesmo deve ser imediatamente detectado e o componente retirado imediatamente de circulação, ou preferencialmente nem mesmo colocado em serviço. Assim sendo, técnicas de ensaios não-destrutivos, tais como ultra-som e partículas magnéticas são, a priori, suficientemente sensíveis para detectar tal defeito durante inspeção para aprovação, ou não, do componente logo após a sua fabricação.

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 NORTON, R.L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. Editora Bookman, Porto Alegre/RS, 2.ed, 932p, 2004.
- 2 NIEMANN, G. Elementos de máquinas. Editora Edgar Blücher, São Paulos/SP, v.1, 1995.

- 3 ASM HANDBOOK. Failure of lifting equipment. *Failure analysis and prevention*, v.11, 1994.
- 4 DAS, C.R., ALBERT, S.K., BHADURI, A.K., RAY, S.K. Failure analysis of a pinion. *Engineering Failure Analysis*, v.12, p. 287-298, 2005.
- 5 BAYRAKCEKEN, H. Failure analysis of na automobile differential pinion shaft. *Engineering Failure Analysis*, v.13, p. 1422-1428, 2006.
- 6 SURESH, S. Fatigue of materials. Cambridge University Press, Cambridge, 2.ed, p. 435-481, 1998.