

ANÁLISE DE FALHA DO EIXO ROTATIVO DE BOMBA HORIZONTAL CENTRÍFUGA UTILIZADA EM INDÚSTRIA SIDERÚRGICA¹

Danilo Borges Villarino de Castro²
Jeferson Aparecido Moreto²
Otávio Contart Gamboni²
Dirceu Spinelli³
José Ricardo Tarpani⁴

Resumo

O eixo rotativo de uma bomba horizontal centrífuga fraturou completamente após cerca de 1.500 horas em serviço operando em uma frequência de 4.000 rpm. O equipamento bombeava água industrial em uma siderúrgica, sendo o componente manufaturado por forjamento de aço inoxidável duplex austenítico-ferrítico 1.4462 (UNS S31803). A investigação da causa da falha da peça envolveu inspeção visual, análise química, metalográfica e fractográfica, assim como ensaios de dureza. Concluiu-se que o eixo falhou segundo o mecanismo de fadiga, com o sítio de nucleação da trinca localizado na camada de cromo que revestia o componente, tendo sido originado pelo processo de frete entre o eixo e o correspondente disco de apoio.

Palavras-chave: Análise de falha; Eixo de bomba centrífuga; Fadiga; Frete.

FAILURE ANALYSIS OF A ROTATING SHAFT OF HORIZONTAL CENTRIFUGAL PUMP USED IN STEEL MAKING INDUSTRY

Abstract

The horizontal rotating shaft of a centrifugal pump fractured completely after 1,500 hours in service, operating at the frequency of 4,000 rpm. The equipment pumped water in a steel making industry, with the ruptured component manufactured by forging 1.4462 duplex austenitic-ferritic steel (UNS S31803). The failure investigation comprised visual inspection, chemical, metallographic and fractographic analyses, as well as hardness measurement. It has been concluded that the axle failed according to fatigue mechanism, with the crack nucleation site located at the chromium coating layer and originated by fretting between the piece and the corresponding bearing disc.

Key words: Centrifugal pump shaft; Failure analysis; Fatigue; Fretting.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, SMM/ EESC/ USP.

³ Professor Titular do Departamento de Engenharia de Materiais (SMM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

⁴ Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais (SMM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

1 INTRODUÇÃO

Bombas centrífugas são turbomáquinas utilizadas com extrema frequência no saneamento básico, na irrigação de lavouras, nos edifícios residenciais e na indústria em geral, elevando, pressurizando ou transferindo líquidos de um local para outro. A ocorrência de fratura nestes sistemas, em especial no eixo rotativo em que acopla o rotor que contém as palhetas que transferem energia ao fluido sendo transportado, causa enormes transtornos e perdas de produtividade. Felizmente, avanços no campo de análise dos mecanismos das fraturas têm auxiliado na redução dos potenciais riscos associados ao aumento da complexidade tecnológica destes equipamentos.⁽¹⁾

Para a solução de problemas recorrentes de falha nesta classe de equipamentos é essencial que a causa básica do problema seja identificada. Existem muitas categorias gerais de causas básicas de falhas em bombas centrífugas, dentre as quais se podem destacar:

- erro de projeto;
- matéria prima defeituosa;
- deficiências no processo de manufatura;
- deficiência nas etapas de montagem e/ou de instalação do equipamento;
- operação do equipamento em condições inadequadas; e
- manutenção inadequada e/ou deficiente.

Em quaisquer dos casos acima apontados, pode se desenvolver o mecanismo de falha por fadiga mecânica nos componentes que se encontram sob a ação de cargas repetidas ou cíclicas, tal como é especialmente o caso do eixo da bomba. De fato, fadiga é responsável por pelo menos metade das falhas mecânicas destes componentes.⁽²⁾

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Foi informado pelo interessado que o eixo rotativo fraturou completamente após cerca de 1.500 horas em serviço a uma frequência de 4.000 rpm. Ainda, segundo o mesmo, o equipamento bombeava água industrial de empresa siderúrgica nacional, porém, foi assegurado que a região de avaria do eixo não teve qualquer contato com o produto bombeado. Em certificado emitido pela fornecedora da matéria-prima do componente, foi declarado que o material corresponde a um aço inoxidável duplex austenítico-ferrítico 1.4462 (UNS S31803), fornecido na condição de forjado. No mesmo certificado, foi especificado para o material um tratamento térmico de solubilização com resfriamento em água e posterior alívio de tensões. Não foi feita qualquer referência às temperaturas destes tratamentos.

A Figura 1 mostra a ponta do eixo em serviço, região em que a fratura ocorreu.

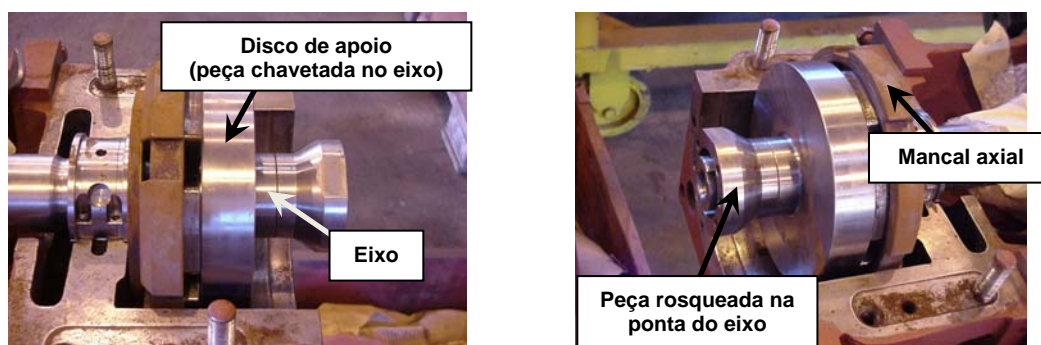


Figura 1. Vistas do eixo da bomba centrífuga horizontal, na região em que a fratura se estabeleceu.

3 COMPONENTE, MATERIAL E MÉTODOS

O eixo recebido passou por uma inspeção visual para análise da superfície de fratura e demais regiões de interesse. As Figuras 2 e 3 apresentam o eixo fraturado.

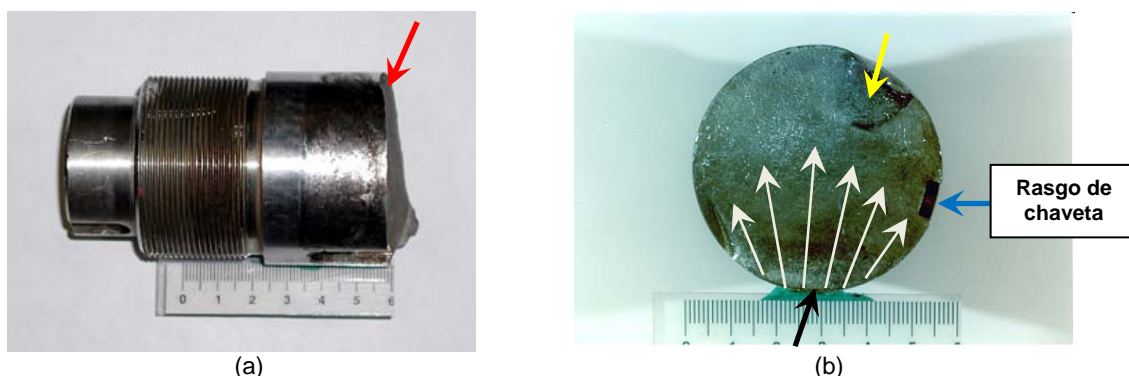


Figura 2. (a) Região de fratura indicada pela seta vermelha, próxima à extremidade do eixo; e (b) detalhe da superfície de fratura, com o sítio de nucleação de trinca de fadiga indicado pela seta preta. Na mesma figura, o conjunto de setas brancas indica a direção de avanço da trinca de fadiga devida ao carregamento cíclico do eixo quando em serviço. Fratura final sinalizada pela seta amarela.



Figura 3. Desgaste verificado na superfície do eixo fraturado, na região de acoplamento com o disco de apoio. A coloração marrom avermelhada exibida na superfície de contato entre as partes é típica de frete em ligas metálicas ferrosas.

Foram realizadas análises químicas, fratógráficas, metalográficas e ensaios de dureza. Para a realização das análises químicas da liga em questão foi utilizado um espectrômetro óptico por centelha modelo ARL 3460, sendo os resultados comparados com os valores nominais especificados pelo fornecedor do eixo.

Utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura, foram observadas mais detalhadamente tanto a região de fratura do eixo nas proximidades do sítio de nucleação da trinca de fadiga (Figura 2b), quanto os locais de desgaste da superfície de contato por acoplamento entre o eixo e o disco de apoio (Figura 3).

A preparação das amostras para análises metalográficas foi realizada utilizando-se lixas d'água de granulometria 120 a 2.000, sendo o acabamento final da superfície de inspeção realizado com auxílio de óxido de cromo e pasta de diamante de granulometria 1 μ m. O ataque químico das amostras foi feito com água-régia durante 15 s.

Ensaio de dureza Rockwell B foram realizados utilizando-se pré-carga de 10 kgf, carga principal de 100 kgf e um endentador esférico diretamente sobre a secção transversal do eixo, em um plano próximo e paralelo ao de fratura da peça.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos da análise química em comparação com os dados emitidos pelo fornecedor do componente mecânico rotativo.

Tabela 1. Composição química do núcleo do eixo fraturado m serviço.

Elementos	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
Medidos	0,030	0,51	0,96	22,80	5,34	2,80	0,020	0,009
Fornecedor	0,017	0,51	0,76	22,10	5,49	3,19	0,023	0,003

Apesar de algumas diferenças relativamente elevadas entre as percentagens em massa dos elementos C e S, respectivamente determinadas pelos analistas e emitidas pelo fornecedor do componente, ambas as composições químicas da Tabela 1 satisfazem a especificação da norma ASTM A182⁽³⁾ para este tipo de aço.

A Figura 4 mostra o sítio de iniciação da trinca de fadiga, numa vista ampliada da região anteriormente indicada pela seta preta na Figura 2b. Observa-se que a região foi danificada, com amassamento localizado da superfície de fratura, durante ou posteriormente ao evento da fratura do componente, estando bastante contaminada por material estranho na forma de partículas brancas. Através da Figura 4 é possível perceber a existência de uma camada de revestimento depositada sobre a superfície usinada do eixo. A presença da camada foi posteriormente confirmada através do uso de maiores ampliações de imagens no microscópio eletrônico de varredura. Ela foi identificada por intermédio de micro-análise por energia dispersiva (EDX) como sendo do elemento químico cromo.

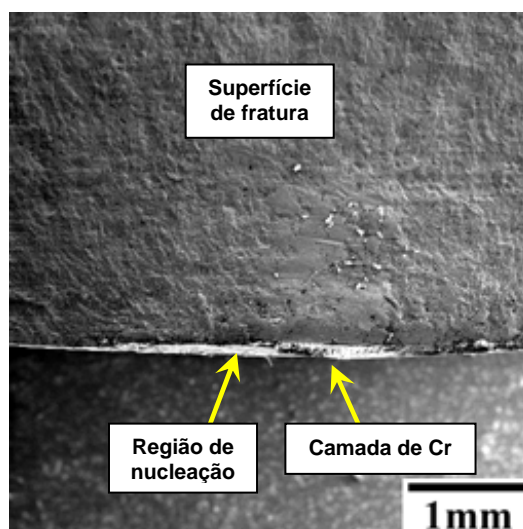


Figura 4. Sítio de nucleação da trinca de fadiga e camada depositada sobre a superfície do eixo.

A Figura 5 mostra duas regiões próximas ao sítio de nucleação de trinca por fadiga, que apresentam, respectivamente, um aspecto de fratura mais dúctil e mais frágil. A primeira exhibe claramente deformação plástica, decorrente da separação do material por fratura, bem como pelo atrito entre as faces da trinca durante o carregamento cíclico que se seguiu. Na segunda, é claramente observado o caráter cristalográfico (mais planar) da fratura, que se propaga em planos preferenciais, propícios para a clivagem do metal. Pode ser ainda observada, em especial na Figura 5b a extensiva presença de micro-poros sobre a superfície de fratura do eixo. Estes micro-poros

são tipicamente desenvolvidos em condições de fragilização do metal por absorção de hidrogênio. Visto que uma camada metálica (Cr) foi depositada sobre a superfície original do eixo, provavelmente através de um processo eletrolítico que necessariamente libera hidrogênio, pode-se postular que a absorção deste elemento pelo metal base situado nas proximidades do revestimento tenha contribuído para a sua fragilização altamente localizada. Isto deve ter favorecido, em alguma extensão, a nucleação e os estágios iniciais de propagação da trinca de fadiga no componente, culminando na sua fratura completa. A não observância dos micro-poros em regiões situadas mais abaixo da superfície do eixo (Figura 6) reforça a hipótese de captação de hidrogênio, e consequente fragilização do aço, durante o processo de deposição de Cr apenas pelas regiões mais externas no diâmetro do componente.

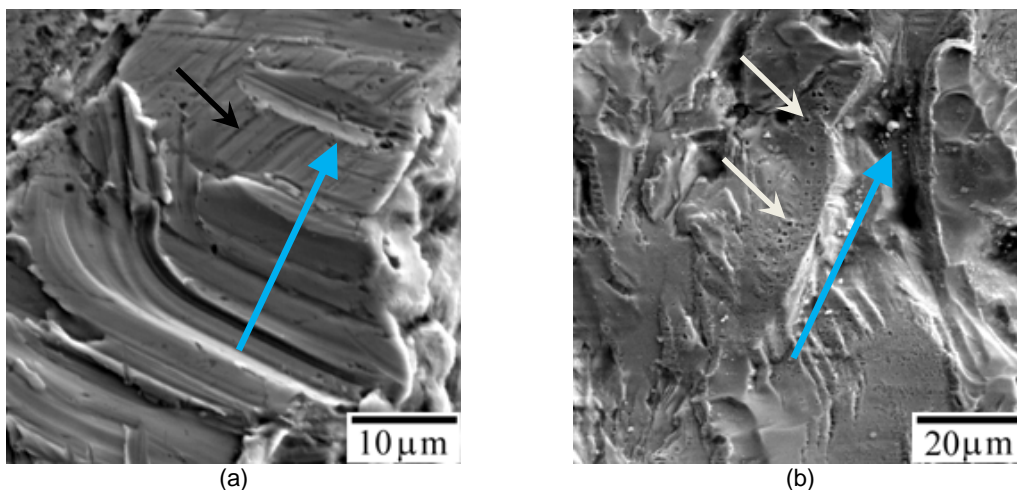


Figura 5. Duas vistas ampliadas da região onde ocorreu a nucleação da trinca de fadiga (a) Mais dúctil, com a seta preta indicando marcas de atrito entre as faces da trinca; e (b) mais frágil, de aspecto planar, com as setas brancas indicando os micro-poros presentes na superfície de fratura. Em ambos os casos, a seta mais longa indica a direção e sentido de propagação da trinca de fadiga.

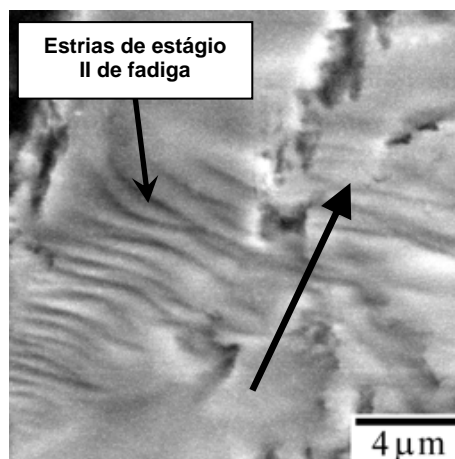


Figura 6. Estrias de fadiga observadas em região situada a aproximadamente 5 mm a partir do sítio de nucleação da trinca. A seta preta indica a direção e sentido de propagação da trinca sub-crítica.

A Figura 6 também comprova cabalmente que o mecanismo de fratura do eixo rotativo foi, de fato, por fadiga mecânica. É possível observarem-se estrias típicas do mecanismo de propagação de trincas por fadiga no estágio II de Forsyth, localizadas numa região situada a aproximadamente 5 mm a partir do sítio de nucleação da trinca.

Na Figura 7, o eixo é observado longitudinalmente, numa região bastante desgastada devido ao seu contato com o disco de apoio. Uma grande ampliação da região desgastada permitiu confirmar a existência de uma camada de revestimento da superfície do componente, a qual apresenta expressivo trincamento, e que é geralmente denominado “barro seco”, além da formação de alguns pites (Figura 8). Este trincamento é mais frequentemente encontrado em camadas metálicas depositadas eletroliticamente do que naquelas obtidas por imersão a quente. Pode-se, portanto, inferir que, independentemente da camada de cromo ter sido depositada sobre a superfície do eixo para minimizar o fenômeno de frete, ou para suprir material adicional devido à perda de tolerância do diâmetro do eixo durante a sua usinagem, o procedimento foi conduzido de modo equivocado, originando um revestimento de natureza frágil bastante propensa à geração de sulcos com alto potencial para concentração de tensões (efeito de entalhe), os quais, durante o período de serviço do componente, atuam como potenciais sítios de nucleação de trincas de fadiga. Estas, uma vez tenham atravessado a camada cromada, encontram um substrato (eixo metálico) também superficialmente fragilizado por absorção de hidrogênio do processo de eletrodeposição de Cr, o que favorece sobremaneira a sua propagação, podendo levar, a longo termo, à fratura completa do componente.

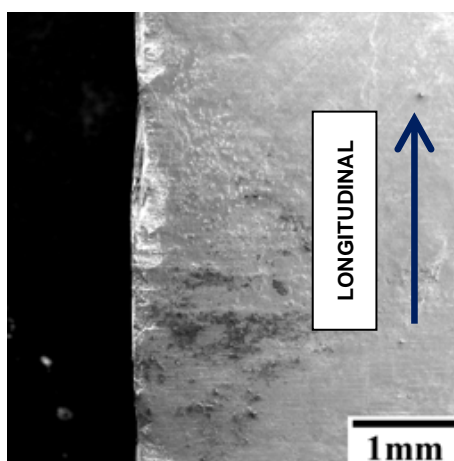


Figura 7. Vista ampliada de uma porção da superfície danificada do eixo (indicada por seta na Figura 3), na região de contato por acoplamento com o disco de apoio.

A Figura 9 ilustra o desenvolvimento de um dano mais grave na camada de cromo, originado pelo acúmulo de danos decorrentes do mecanismo de frete entre as superfícies dos diâmetros externo do eixo revestido e interno do disco de apoio. Observa-se a expressiva degradação da camada cromada e o desenvolvimento de entalhes muito mais críticos que os decorrentes do fenômeno de “barro seco”, que são vistos ao fundo na Figura 9, ou mais detalhadamente na Figura 8a, para idênticas magnitudes de aumento da imagem. Verifica-se que os entalhes devidos ao frete desenvolvem-se na direção circunferencial do eixo, acompanhando o movimento de rotação do mesmo em serviço e, conseqüentemente, de atrito entre as superfícies do eixo e do disco de apoio. Deste modo, uma trinca originada nesta direção seria paralela ou coincidente àquela que originou a fratura do componente em serviço. Pode-se, portanto, inferir que uma trinca originada pelo mecanismo de frete, sobre a superfície de revestimento do eixo, tenha se propagado por fadiga ao longo da espessura da camada de cromo devido ao esforço rotativo em torção aplicado ao componente em serviço. Uma vez atravessada a camada de Cr, a trinca

atingiu o eixo propriamente dito (e superficialmente fragilizado), o que, com o passar do tempo sob o esforço repetidamente aplicado, causou a sua fratura final catastrófica.

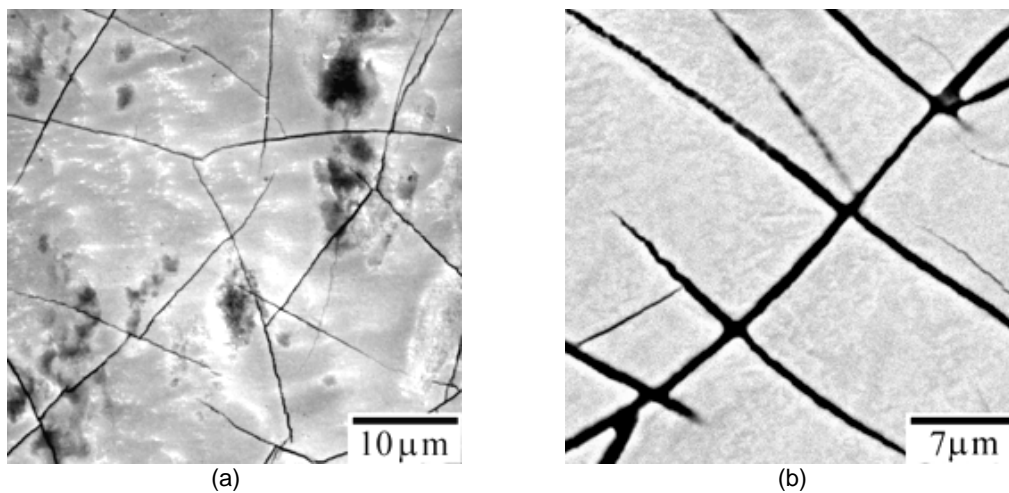


Figura 8. Vistas ampliadas da região desgastada ilustrada na Figura 7, mostrando um revestimento metálico (cromado) com estrutura do tipo “barro seco”. (a) 2.000 X; (b) 3.000 X.

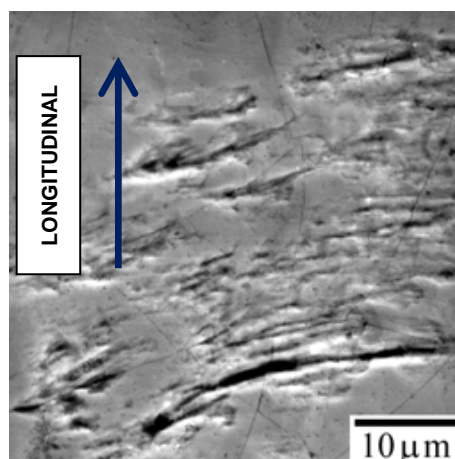


Figura 9. Detalhe de região localizada na superfície da camada de Cr. Estes danos de desgaste foram causados pela ação abrasiva de partículas oxidadas, que foram removidas de ambas as superfícies metálicas em contato, pelo atrito oscilatório entre as mesmas (mecanismo de frete).

A Figura 10 mostra uma trinca secundária, com um comprimento da ordem de 0,5 mm e uma profundidade não determinada, que ilustra bem a elevada probabilidade da ocorrência dos eventos acima referidos.

Superfícies metalograficamente polidas e atacadas, relativas a cortes longitudinais da interface eixo-camada de cromo, foram observadas ao microscópio eletrônico de varredura. Objetivou-se verificar a qualidade da aderência entre a camada e o substrato, a qualidade do acabamento original da superfície usinada do eixo, assim como a espessura e a natureza da camada de cromo depositada. Nestes termos, as seguintes observações são possíveis, com relação à Figura 11: (i) a camada depositada tem espessura da ordem de 100 μm (0,1 mm), que pode ser considerada excessiva qualquer que tenha sido a sua finalidade; (ii) a aderência entre a camada e o substrato aparenta ser suficientemente forte para que, na eventualidade de uma trinca propagar-se através da camada, a partir da sua superfície externa, ela se transponha facilmente através da interface camada-substrato.

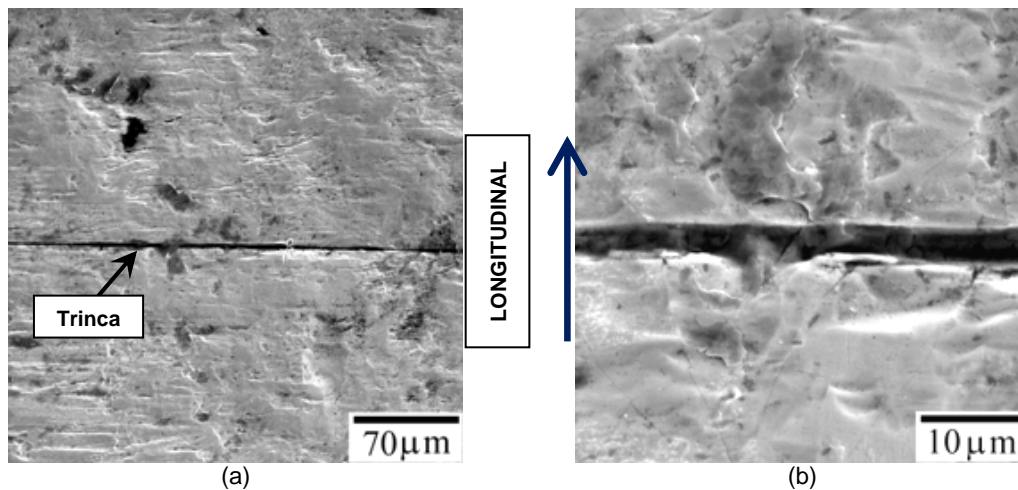


Figura 10. Trinca secundária circunferencial desenvolvida na camada de recobrimento metálico sobre a superfície do eixo fraturado. (a) 300 X; (b) 2000 X.

O acabamento da superfície externa do eixo apresenta-se bastante irregular e defeituoso, com a presença de marcas de usinagem do tipo-entalhe. Estas marcas de usinagem poderiam, inclusive, potencialmente originar trincas tais como a que conduziu à falha do componente, sendo esta uma possibilidade não descartável.

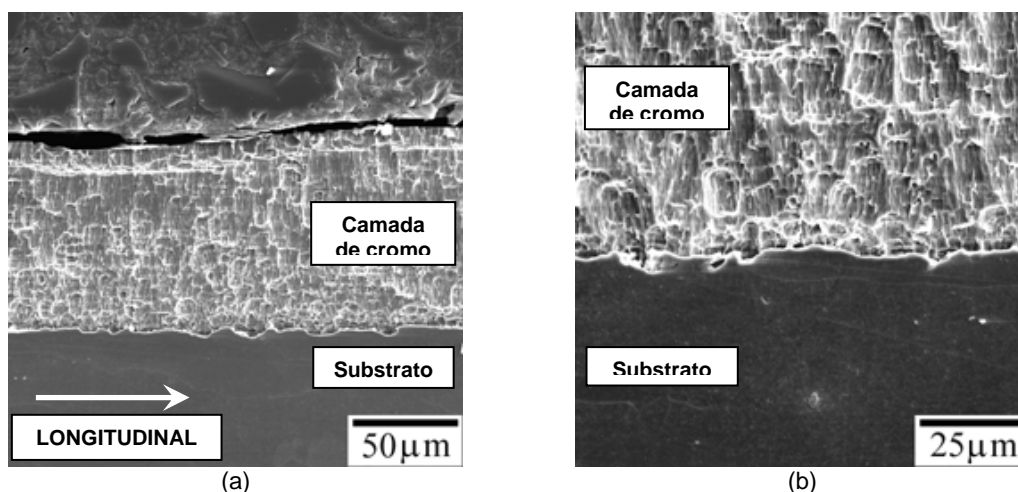


Figura 11. Corte longitudinal da interface camada-eixo, mostrando o aspecto e as dimensões do recobrimento metálico, a adesão ao substrato e o acabamento superficial do componente fraturado em serviço. (a) 400 X; e (b) 800 X.

A morfologia da camada sugere fortemente a deposição da camada através de um processo eletrolítico, confirmando suspeitas feitas anteriormente neste texto.

A Figura 12a mostra o trincamento sub-superficial da camada de cromo, gerado possivelmente por elevadas tensões cisalhantes localmente desenvolvidas durante a operação do componente em serviço em contato com berço metálico. Nota-se que a trinca não corre em direção à superfície externa do eixo. A estrutura “barro seco” gera entalhes rasos (Figura 12b), mas capazes de nuclear trincas invasivas à camada.

A Figura 13 apresenta a micrografia do aço que compõe o eixo fraturado, conforme um corte longitudinal. Confirma-se o desenvolvimento de uma estrutura duplex com matriz ferrítica, de coloração mais escura, e austenita como fase dispersa de coloração mais clara (típicas de maclas de deformação). Observa-se também a

elevada texturização da estrutura do aço na direção longitudinal do eixo, denotando o elevado grau de deformação experimentalado pelo material durante o trabalho a quente a que foi submetido na manufatura.

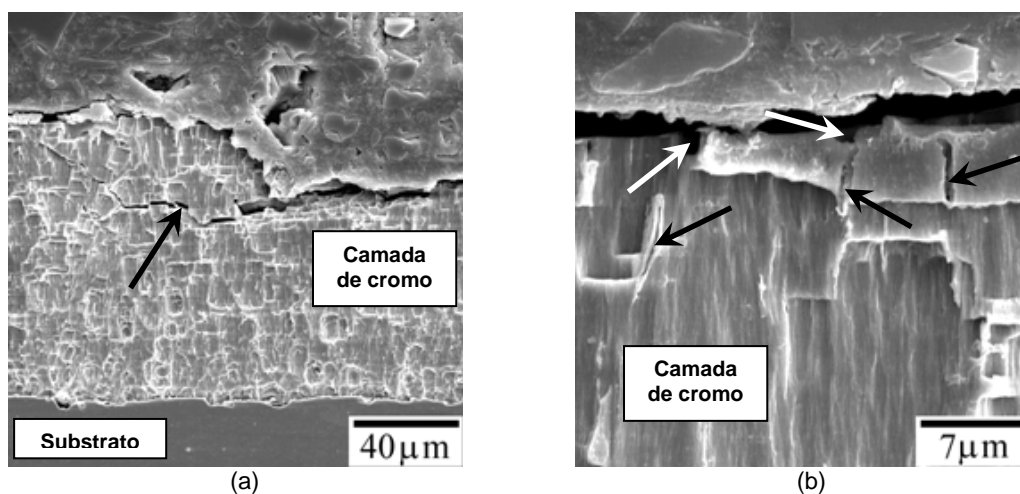


Figura 12. Trincamento da camada de cromo. Setas pretas indicam (a) Macro-trinca; e (b) microtrincas internas, eventualmente nucleadas na estrutura “barro seco”, a qual é formada por entalhes rasos, estes indicados por setas brancas.

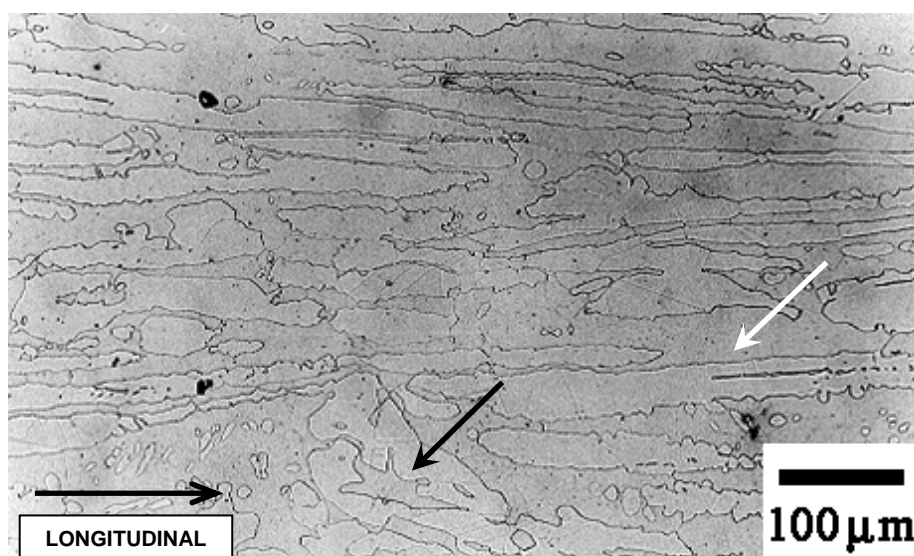


Figura 13. Microestrutura do aço do eixo fraturado. A seta branca indica a fase ferrita e seta preta aponta para a fase austenita. Ataque: água-régia.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de dureza encontrados em duas diferentes regiões do componente rotativo

Camada de Cr sobre a superfície do eixo		Seção transversal do eixo	
HV	HRC	HRB	HB
860	66	65	207

A camada de Cr depositada na superfície do eixo apresentou uma elevada dureza como haveria de se esperar, enquanto a seção transversal do eixo exibiu um valor bastante próximo ao informado pelo fornecedor do componente, de 214 HB.

5 CONCLUSÃO

O eixo rotativo metálico forjado fraturou segundo o mecanismo de fadiga. A nucleação da trinca ocorreu na camada de Cr que revestia o componente, e foi originada por frete entre o eixo revestido e o respectivo disco de apoio. A nucleação da trinca de fadiga na interface entre o eixo e a camada de Cr é uma hipótese que não pode ser descartada. A fragilização superficial do material do eixo por intermédio da absorção de hidrogênio durante a etapa de revestimento metálico pode ter favorecido a nucleação e os estágios iniciais de propagação da trinca de fadiga ao longo da seção transversal do componente. Como possíveis medidas de prevenção de falhas similares a esta presentemente avaliada podem-se citar, no campo do projeto e manutenção: (i) redução da vibração do sistema; (ii) redução do escorregamento na interface eixo-disco de apoio, via redução da folga entre as partes; (iii) uso de material elastomérico no acoplamento entre as partes; e (iv) lubrificação do acoplamento (requer aumento da folga entre as partes). Já no campo da manufatura do componente, tratamentos superficiais de natureza térmica, química e/ou mecânica, visando induzir tensões residuais compressivas e/ou gerar um acabamento mais resistente ao desgaste, seriam recomendáveis. Isto incluiria mesmo o tratamento de cromação tentativamente realizado no eixo, porém tomando-se os devidos cuidados para evitar-se o fenômeno de fragilização por absorção de hidrogênio, típico da modalidade de deposição eletrolítica.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (SMM-EESC-USP) pelo uso de seus equipamentos para condução das análises e ensaios.

REFERÊNCIAS

- 1 GONÇALVES, E., Análise de Falha por Fadiga em Eixo de Motores para Sistemas de Arrefecimento. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2008.
- 2 FUCHS, H. O.; STEPHENS, R. I., Metal Fatigue in Engineering. New York, Wiley-Interscience, 1980.
- 3 ASTM A182-11, Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service. ASTM International Standard. Philadelphia-PA. 2011.