



ANÁLISE DE FALHA DE DOIS ROTORES DE BOMBA INJETORA¹

Danilo Borges Villarino de Castro²
Jeferson Aparecido Moreto³
Luciana Sgarbi Rossino⁴
Omar Maluf⁴
Dirceu Spinelli⁵
José Ricardo Tarpani⁵

Resumo

O presente trabalho teve por objetivo investigar as possíveis causas da falha ocorrida em dois rotores de bomba centrífuga, utilizada no bombeamento de água salobra para poços de extração de petróleo na orla marítima. O material dos rotores é um aço inoxidável duplex da série 420, ferrítico-austenítico na proporção 50/50, sendo os componentes fabricados pelo processo de fundição em molde cerâmico. Foi realizada uma inspeção visual dos componentes fraturados. A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica por centelha. Os ensaios de dureza na escala Brinell foram efetuados de acordo com a norma ASTM E-92. Superfícies metalograficamente polidas, correspondentes a cortes circunferenciais realizados sobre as palhetas dos rotores, foram observadas em um microscópio óptico. Utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura, foram identificados e caracterizados mais detalhadamente os sítios de nucleação das trincas de fadiga. Os rotores da bomba fraturaram em serviço pelo mecanismo de crescimento subcrítico de trincas por fadiga. As trincas de fadiga nuclearam invariavelmente em regiões concentradoras de tensão, ou seja, na junção das palhetas com os discos laterais dos rotores. O método de retirada de rebarbas resultantes do processo de fabricação por fundição produziu marcas profundas na superfície dos rotores, que atuam como sítios nucleadores de trincas. Os riscos de usinagem, deixados durante o processo de acabamento final dos rotores, pode ter contribuído nos processos de nucleação e propagação das trincas de fadiga.

Palavras-chave: Rotores; Bomba injetora; Aço inoxidável duplex; Fadiga.

FAILURE ANALYSIS OF TWO CENTRIFUGAL PUMP ROTORS

Abstract

The present work aimed to investigate the possible causes of failure occurred in two centrifugal pump rotors, used to pump brackish water from oil wells drilling in coastal waters. The material of the rotors is a duplex stainless steel 420 series, austenitic-ferritic 50-50, the components manufactured by casting ceramic mold process. Visual analysis was performed of the component. Chemical analysis was realized in an optical emission spectrometer (OES). Hardness Brinell tests were made according ASTM E-02 standard specification. Metallographic polished surfaces, corresponding to circumferential cuts made on the rotor blades were observed in an optical microscope. The nucleation sites of fatigue cracks were identified and characterized through Scanning Electron Microscope (SEM). The pump rotors fractured in service by fatigue crack growth subcritical mechanism. The fatigue cracks were nucleated invariably in intensity tension areas. The removal of burrs method resulting the manufacture casting process produced deep marks on the surface of the rotors, which act as nucleates of tension sites. The risks of machining, left during the final finishing of the rotors may have contributed in the process of nucleation and propagation of fatigue cracks.

Keywords: Rotors; Pump; Duplex stainless 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 no programa de Pós-Graduação Interunidades da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- ³ Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais no programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Paraná – UFPR.
- ⁴ Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais no programa de Pós-Graduação Interunidades da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- ⁵ Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho foi o de investigar as possíveis causas da falha ocorrida em dois rotores de bomba horizontal centrífuga, utilizada no bombeamento de água salobra para poços de extração de petróleo na orla marítima.

As bombas são máquinas operatrizes hidráulicas que fornecem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro. O uso das bombas ocorre sempre que há necessidade de aumentar a pressão de trabalho de uma substância líquida contida num sistema, a velocidade de escoamento ou ambas. Devido à grande diversidade das bombas existentes as mesmas são divididas em dois grandes grupos: bombas centrífugas e bombas volumétricas.⁽¹⁾

A movimentação do fluido nas bombas centrífugas ocorre pela ação de forças que se desenvolvem na massa do mesmo, em consequência da rotação de um eixo no qual é acoplado um disco (rotor, impulsor) dotado de pás (palhetas, hélice), o qual recebe o fluido pelo seu centro e o expulsa pela periferia, pela ação da força centrífuga.

A bomba centrífuga tem como base de funcionamento a criação de duas zonas de pressões diferenciadas, uma de baixa pressão (sucção) e outra de alta pressão (recalque).

O rotor é o coração da bomba. Ele é constituído de diversas palhetas ou lâminas conformadas de modo a proporcionarem escoamento suave do fluido em cada uma delas.

As bombas centrífugas são equipamentos mecânicos e, portanto, estão sujeitas a problemas operacionais que vão desde uma simples redução de vazão até o não funcionamento generalizado ou colapso completo.

Mesmo que o equipamento tenha sido bem projetado, instalado e operado, estará sujeito a desgastes físicos e mecânicos com o tempo. Os problemas operacionais podem surgir das mais diversas origens: imperfeições no alinhamento motor-bomba, lubrificação insuficiente, colocação e aperto das gaxetas, localização do equipamento, dimensionamento das instalações de sucção e recalque, bem como suas próprias instalações, fundações e apoios na casa de bombas, qualidade da energia fornecida.^(2,3)

2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os rotores fraturaram em serviço, durante o bombeamento de água salobra para poços de extração de petróleo na orla marítima. A água em que operavam os componentes não continha uma quantidade significativa de ácido sulfídrico (H₂S), que é gerado durante a decomposição de algas marinhas.

O material dos rotores é um aço inoxidável duplex da série 420, ferrítico-austenítico na proporção 50/50, sendo os componentes fabricados pelo processo de fundição em molde cerâmico.

Os componentes trabalhavam em condições de serviço (i.e. pressão de operação e rotações por minuto) acima daquelas originalmente previstas em projeto.

A Figura 1 mostra os dois rotores fraturados, respectivamente denominados **A** (maior diâmetro) e **B** (menor diâmetro). O primeiro é um rotor de sucção única, enquanto que o segundo é um rotor de dupla sucção.

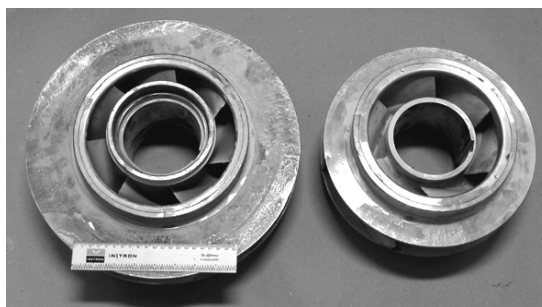


Figura 1. Rotores **A** (maior diâmetro) e **B** (menor diâmetro), avaliados no presente estudo de caso.

Na Figura 2 são exibidos os principais danos por trincamento desenvolvidos nos rotores **A** e **B**. As setas apontam para os pontos de iniciação das trincas identificadas nos componentes. Observa-se um único trincamento no rotor **A**, que se desenvolveu no lado de sucção da bomba injetora, enquanto que, no rotor **B**, o trincamento é simétrico. Verifica-se que as trincas, identificadas como de fadiga, invariavelmente partem de regiões angulares (i.e. ângulos agudos), que naturalmente são concentradoras de tensão. Cabe ser mencionado que, durante a operação da bomba injetora em serviço, as faces das palhetas ilustradas na Figura 2 são submetidas a esforços de compressão.

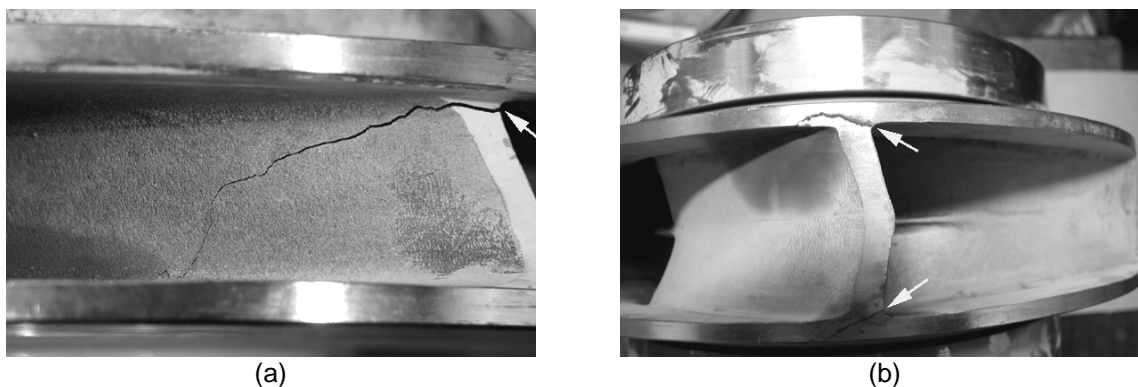


Figura 2. Algumas das trincas de fadiga desenvolvidas em serviço, nos rotores (a) **A** e (b) **B**.

Para esta investigação, foram retiradas amostras para a realização dos seguintes procedimentos experimentais: análise química, medidas de dureza, inspeção visual e análises metalográficas e fractográficas.

A análise química do material foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica por centelha (ARL 3460). A temperatura de análise foi de 26°C com grau de umidade relativa do ar de 43%.

Os ensaios de dureza na escala Brinell, ASTM E-92,⁽⁴⁾ foram realizados em cinco distintas posições sobre os discos laterais dos rotores **A** e **B**. Utilizou-se a esfera de 2,5 mm de diâmetro, sob uma carga de 187,5 kgf.

Uma inspeção visual mais detalhada dos componentes fraturados, utilizando-se uma lupa, permitiu a caracterização de alguns defeitos de fabricação, em especial na região em que se desenvolveram os trincamentos, basicamente na junção entre as palhetas e os discos laterais dos rotores, e que podem (os defeitos) ter contribuído em certa extensão para as falhas observadas em serviço.

Superfícies metalograficamente polidas, correspondentes a cortes circunferenciais realizados sobre as palhetas dos rotores, foram observadas em um microscópio óptico. Estas foram embutidas em baquelite e lixadas com lixas d'água com granulometria #80, #120, #220, #400, #600, #800, #1.200, e #2.000. Em seguida, as

superfícies lixadas foram polidas em três etapas: a primeira com dióxido de cromo, a segunda com solução de alumina 0,3 μm e a última com solução de alumina 0,05 μm . Para o material em estudo, o reagente indicado foi o Behara, que consiste em uma solução de 3,0 g de $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$, 10,0 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, diluídos em 100 mL de água destilada. A duração média da exposição do material ao reagente químico foi de aproximadamente 30 segundos. 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. Utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV), foram identificados e caracterizados mais detalhadamente os sítios de nucleação das trincas, assim como desvendadas as causas que deram origem aos sítios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As composições químicas, em porcentagem em peso, determinadas para os materiais dos dois rotores fraturados são fornecidas na Tabela 1.

Tabela 1. Composições químicas, % em peso, dos rotores fraturados

Rotor / Elementos	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
A (sucção única)	0,05	0,76	0,82	25,12	5,14	2,30	0,018	0,012
B (dupla sucção)	0,05	0,60	0,80	24,99	5,90	2,18	0,014	0,010

Os valores médios obtidos nos ensaios de dureza foram de (266 ± 7) HBS para o rotor **A** e (268 ± 5) HBS para o rotor **B**. Estes valores foram confirmados através de medidas Rockwell na escala B, HRB, posteriormente convertidos para Brinell, HBS. Segundo o fabricante dos rotores, a dureza Brinell dos rotores é de 230 HBS; este dado que não confere com os resultados obtidos.

Na Figura 3(a), referente ao rotor **A**, são claramente observadas marcas de desbaste de rebarbas de fundição, indicadas por setas escura e clara, procedimento provavelmente realizado por intermédio de um esmeril ou ferramenta semelhante. Observa-se que a marca apontada pela seta escura situa-se exatamente no ponto de partida de uma das trincas de fadiga no componente, vide Figura 2(a). A observação desta região sob relativamente grandes ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura demonstrou cabalmente que as marcas da ferramenta proporcionaram um sítio de nucleação de trincas na região, conforme será visto mais adiante. Idêntico efeito é verificado com relação ao rotor **B**, ilustrado na Figura 3(b), onde as setas indicam as regiões de desbaste mecânico da peça.

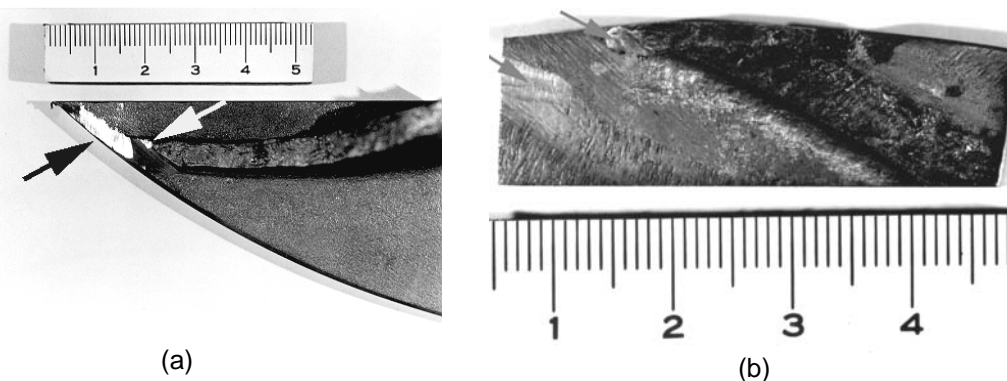


Figura 3. Regiões desbastadas por ferramenta de abrasão: **A** (a) e **B** (b).

Ainda com relação ao rotor **B**, foram observados riscos relativamente profundos formados durante o processo de acabamento por usinagem dos discos laterais, o que inclui a região de transição para as palhetas, onde se desenvolveu a maioria das trincas de fadiga. A observação em MEV destes defeitos do tipo micro-entalhes, apontados pela seta clara, à direita da linha tracejada na Figura 4, introduzidos durante a fabricação do componente, confirmou seu elevado potencial de concentração das tensões de serviço que atuam localmente. O corte e a seta clara (lado direito da linha tracejada) ilustram um padrão de observação metalográfica que será apresentado na Figura 11.

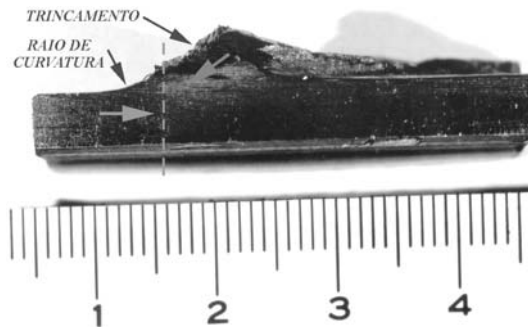


Figura 4. Riscos de usinagem, apontados pela seta clara (lado esquerdo da linha tracejada), sobre a superfície do disco lateral do rotor **B**. O raio de curvatura, na junção entre a palheta e o disco lateral do rotor **B**, e o trincamento ali desenvolvido, são conforme indica a seta clara superior na Figura 2(b).

Na Figura 5, são mostradas as microestruturas dos aços que constituem os dois rotores fraturados, onde se confirma o desenvolvimento de estruturas duplex, formadas por ferrita (indicada por uma seta clara) e austenita (por seta escura).

Na Figura 6, a região indicada pela seta clara na Figura 2(a), qual seja, um sítio de trinca de fadiga no rotor **A**, é ampliada, revelando a extensão dos danos superficiais causados pelo processo abrasivo de remoção de rebarbas do fundido. Estes danos, aliados à sua própria localização em uma região de elevada concentração de tensões, propiciaram a geração de trincas, que podem crescer por fadiga e causar a falha do componente, indicadas pelas setas na Figuras 6.

Na Figura 7, o mesmo efeito é verificado no rotor **B**, onde as setas apontam para o sítio de iniciação de uma trinca de fadiga e para sulcos superficiais gerados durante desbaste mecânico.

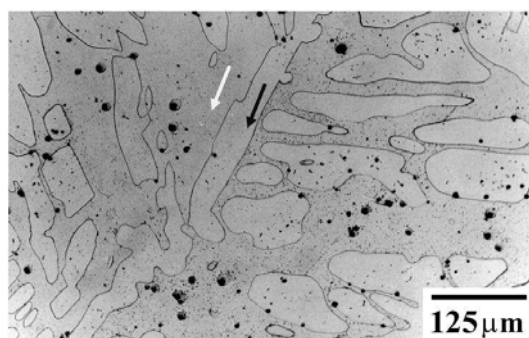


Figura 5. Microestrutura do aço que compõe os rotores fraturados. A fase ferrita é apontada por setas claras, e a fase austenita por setas escuras. Rotor **A** atacado quimicamente com Behara.

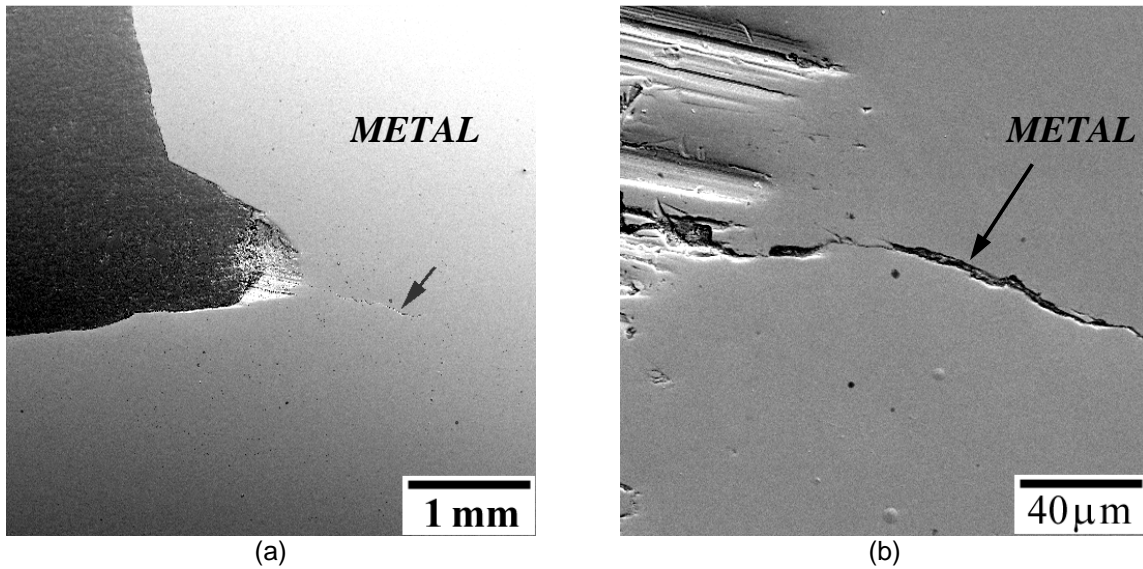
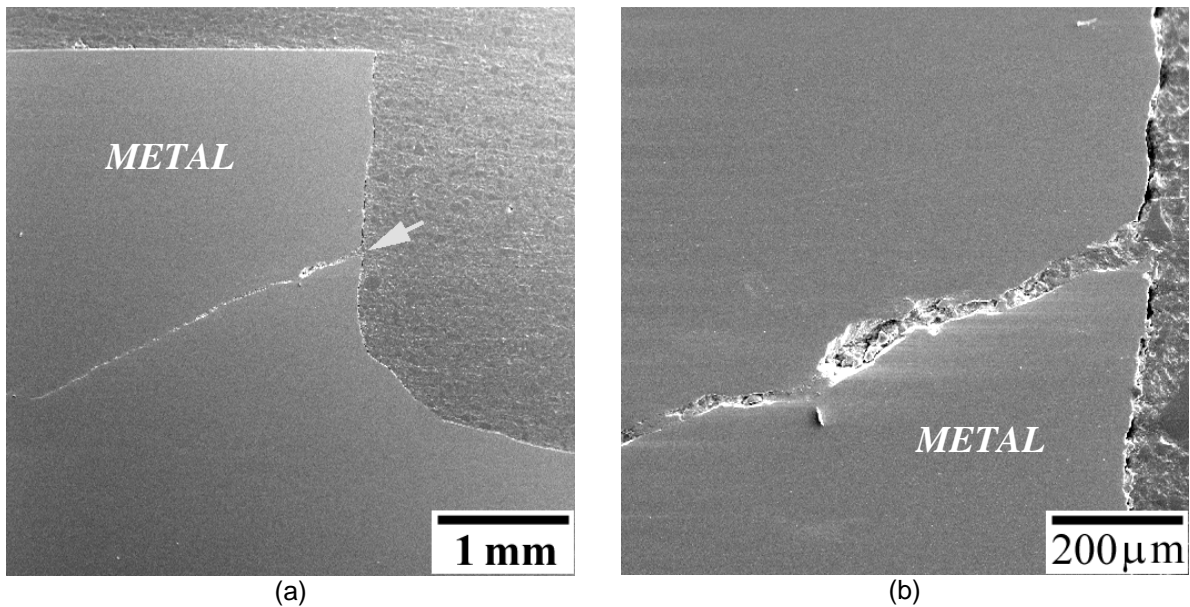
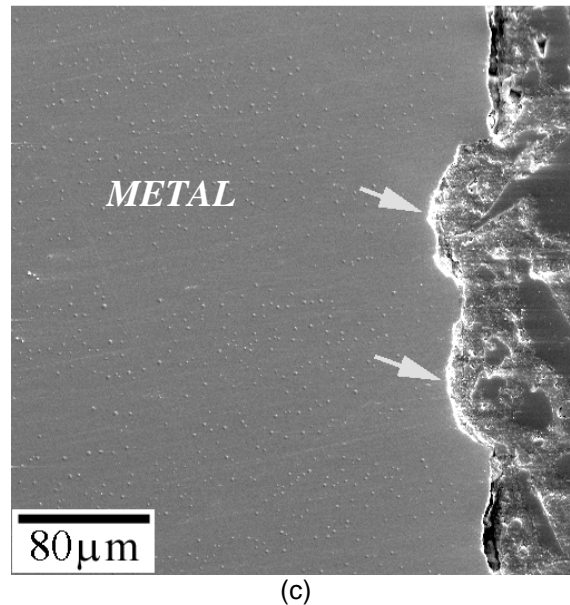


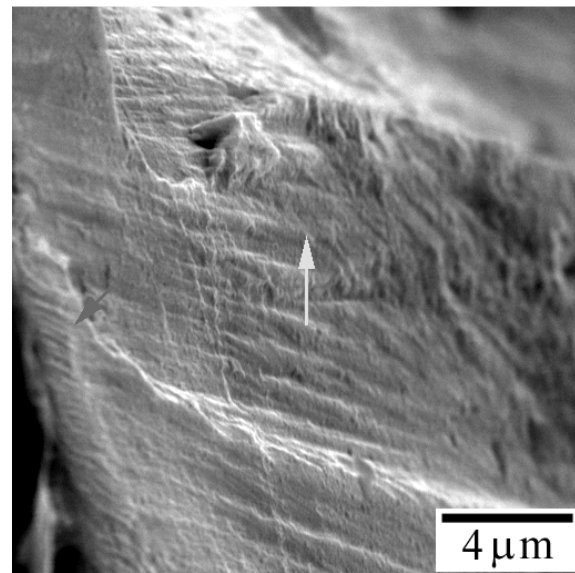
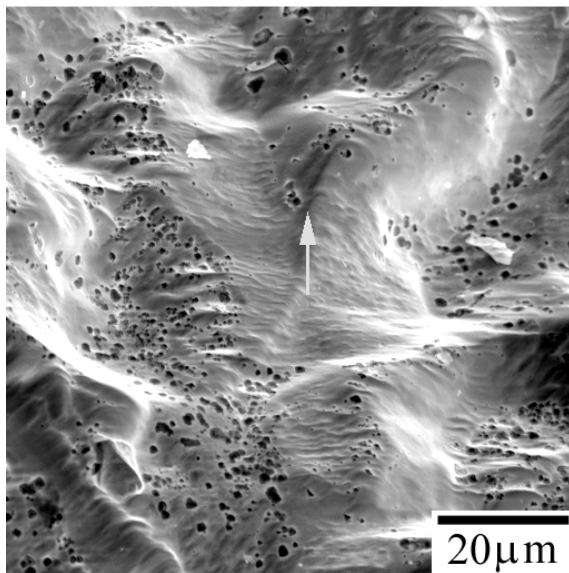
Figura 6. (a) Trinca de fadiga iniciada na região de desbaste de rebarba de fundição no rotor **A**. (b) Ampliação da trinca de fadiga, indicada por setas.

Na Figura 8(a), é mostrada uma vista geral da superfície de fratura gerada pela propagação de uma das trincas de fadiga no rotor **A**. São também observados alguns pites de corrosão, provavelmente causada pelo contato da superfície da trinca com água salina. Na Figura 8(b), a seta aponta para um padrão discreto de estriamento da superfície de fratura, confirmando o diagnóstico de falha do componente por fadiga do material.





(c)
Figura 7. (a) Trinca de fadiga iniciada na região de desbaste de rebarba de fundição no rotor B, indicada por seta. (b) Ampliação do sítio de nucleação. (c) Ampliação de marcas originadas pelo processo abrasivo, apontadas por setas.



(a) (b)
Figura 8. (a) Pites de corrosão na superfície de fratura por fadiga no rotor A. (b) Padrão de estrias de fadiga, apontado pela seta escura. As setas claras apontam na direção e sentido de crescimento da trinca.

Já na Figura 9, é ilustrado o padrão de estrias de fadiga observado sobre a superfície de fratura do rotor MED.

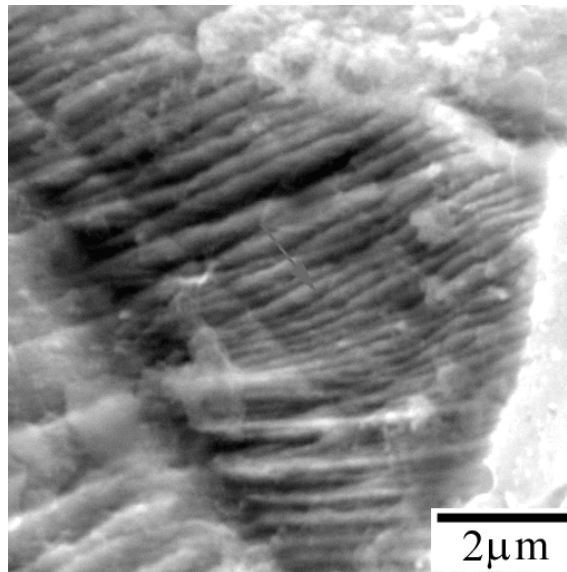
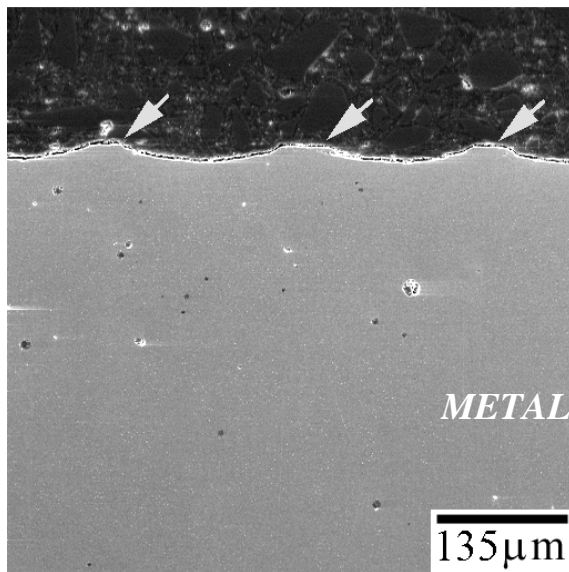
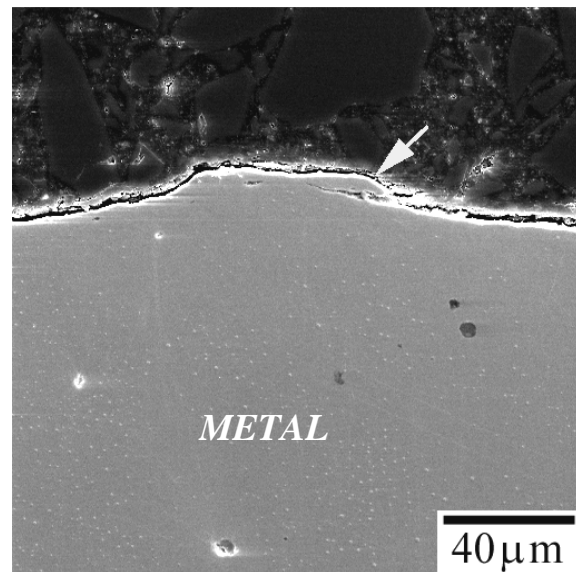


Figura 9. Padrão de estriamento sobre a superfície de fratura do rotor **B**. A seta aponta na direção e sentido de crescimento da trinca.

Na Figura 10(a) é fornecida a vista de um corte longitudinal, executado sobre o disco lateral do rotor **B**. Observa-se a presença dos sulcos gerados pelo processo de usinagem dos discos laterais, de onde, inclusive, pode emanar algum trincamento, tal como aquele apontado pela seta na Figura 10(b).



(a)



(b)

Figura 10. (a) Sulcos de usinagem no rotor **B**. (b) Detalhe de um trincamento.

Na Figura 11, são novamente observados os riscos decorrentes do processo de usinagem, assim como é mostrada uma grande concentração de pites desenvolvidos sobre a superfície do rotor **B**.

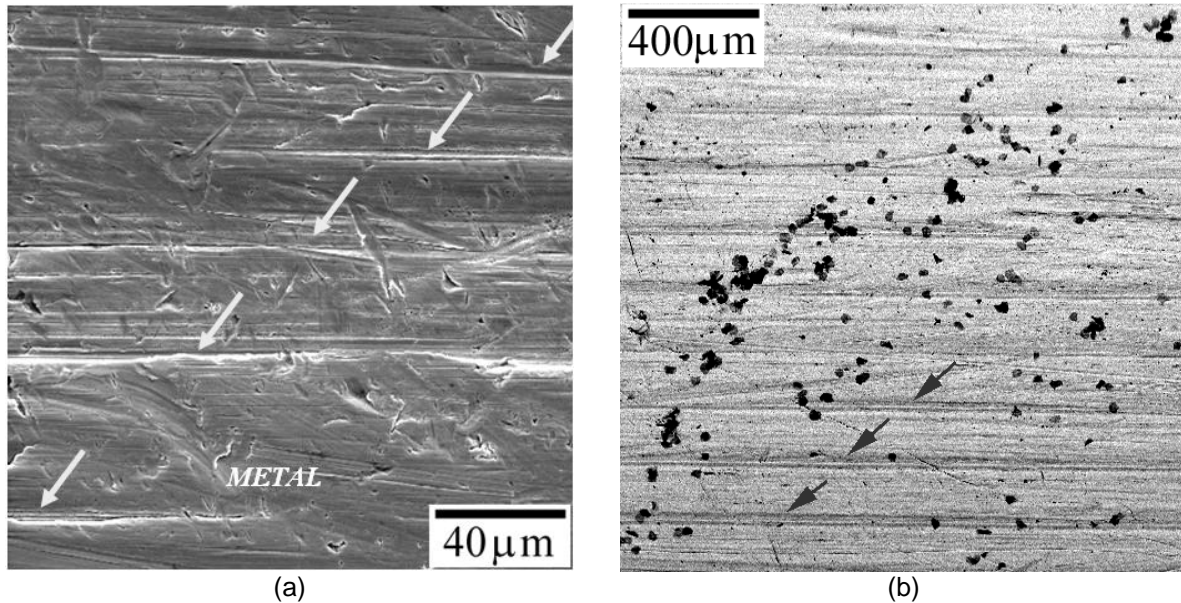


Figura 11. Detalhes dos (a) riscos de usinagem e (b) riscos e pites presentes na superfície do rotor **B**.

Na Figura 12, uma seqüência de quadros mostra que, de fato, os sulcos produzidos na superfície do rotor **B** definem o caminho de propagação da trinca de fadiga. Observa-se que tanto os riscos de usinagem, como as superfícies geradas no processo de fratura, estão paralelamente orientados.

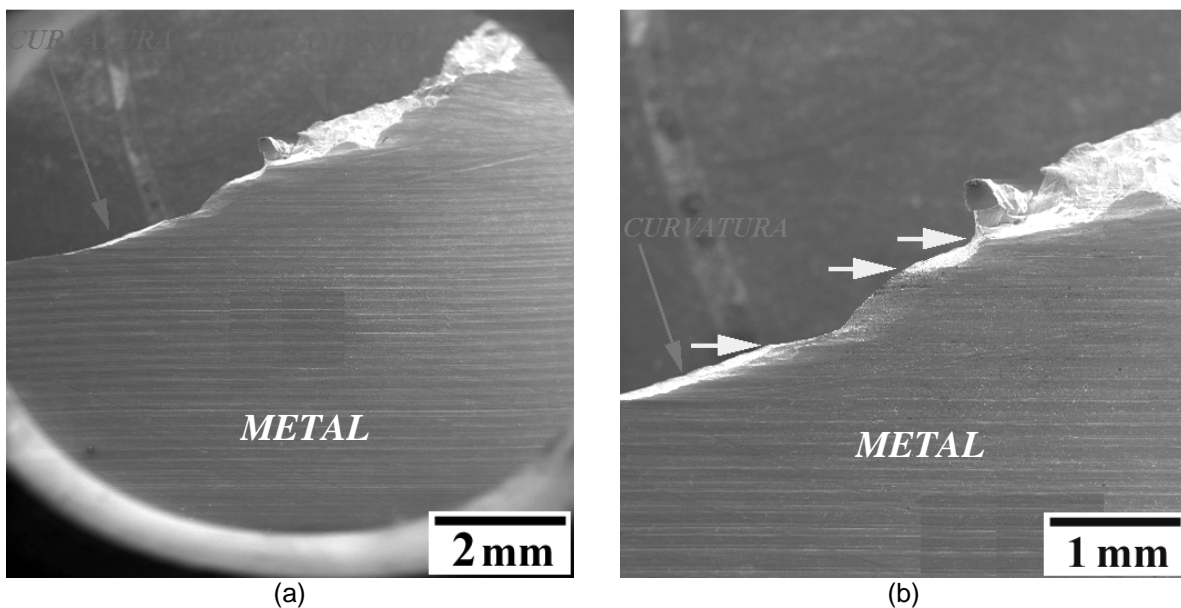


Figura 12. Perfeita correspondência entre as orientações dos riscos de usinagem e os caminhos de fratura no rotor **B**.

5 CONCLUSÕES

Os rotores da bomba injetora fraturaram em serviço através do mecanismo de crescimento sub-crítico de trincas por fadiga. As trincas de fadiga foram nucleadas invariavelmente em regiões concentradoras de tensão, mais precisamente na junção das palhetas com os discos laterais dos rotores, onde cantos com ângulos agudos são formados. Foi verificado que o método de retirada de rebarbas resultantes do processo de fabricação por fundição produz marcas profundas na superfície dos rotores, que são suficientes para atuar como sítios nucleadores de trincas. Foi

também observado que os riscos de usinagem, deixados durante o processo de acabamento final dos rotores, pode ter contribuído em certa extensão em ambos os processos de nucleação e propagação das trincas de fadiga. Estes fatores, associados ao fato de os componentes estarem no momento sendo solicitados em condições mais críticas de serviço, perante às originalmente previstas em projeto, levaram aos eventos de falha dos componentes.

Em vista dos resultados obtidos, um controle mais rígido do processo de acabamento dos rotores, após o processo de fundição, deve ser adotado. Mudanças de projeto, de modo a se evitar a existência de cantos vivos, bem como de forma a se considerarem as condições mais severas em que os componentes trabalham no momento, merecem ser consideradas.

REFERÊNCIAS

- 1 ASM METALS HANDBOOK. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special - Purpose Materials, v.2, pp 17-22, 1990.
- 2 ASM METALS HANDBOOK. Corrosion, Formerly, 9.ed, 1990.
- 3 ASM METALS HANDBOOK. Fatigue and Fracture, v.19, 203-204, 1996.
- 4 ASTM E-92-03. Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, *Book of Standards*, Vol.03.01, 2003.