



ANÁLISE DE FALHA DE UMA PENEIRA COM EIXO DO TIPO EXCÊNTRICO

Omar Maluf²

Jéferson Aparecido Moreto³

Rosamel Melita Muñoz Riofano⁴

Cláudio Ferraz⁵

Jair Valfré⁶

Marcelo Tadeu Milan⁷

Resumo

O presente trabalho teve por objetivo investigar as possíveis causas de falha ocorrida em uma peneira com eixo excêntrico. O trabalho seguiu a metodologia usual empregada em análise de falhas. Os ensaios incluíram análises visuais, análise da morfologia da fratura através de Microscopia Eletrônica de Varredura, metalografia, dureza, impacto Charpy e tração. A análise micrográfica óptica do interior da peça indicou a presença de uma microestrutura bastante heterogênea de bandas de bainita superior/ferrita Widmanstätten alternadas com bandas de bainita inferior/martensita, com diferença de dureza significativa entre elas. Uma marca de deformação plástica (indentação) na superfície do eixo, resultante de algum tipo de impacto, aparentemente atuou como concentrador de tensão favorecendo a nucleação da trinca e, por conseguinte sua propagação.

Palavras-chave: Eixo; Fratura; Propagação de trinca por fadiga.

FAILURE ANALYSIS OF A SIEVE WITH ECCENTRIC SHAFT TYPE

Abstract

The present work aimed to investigate the possible causes of failure occurred in a sieve with eccentric shaft type. The work followed the usual methodology employed in failure analysis. The tests included visual analysis, morphology analysis of the fracture by Scanning Electron Microscopy (SEM), metallography analysis, hardness, Charpy impact and tensile tests. The optical micrographic analysis of the interior part indicated the presence of a very heterogeneous microstructure of alternating bands of bainite / ferrite Widmanstätten and bainite / martensite, with significant difference in hardness between them. An indentation mark on the surface of the shaft, resulted from some kind of impact, apparently acted as a stress concentrator favoring the nucleation of cracks, followed by crack growth.

Key-words: Shaft; Failure; Fatigue crack growth.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Diretor Comercial MIB - Materials Institute of Brazil. Rua Paulino Botelho de Abreu Sampaio, 881, Jd. Bethânia, 13561-060, São Carlos-SP. omar@mib.eng.br

³ Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Dpto. Eng. Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Esc. Eng. São Carlos, USP (SMM-EESC-USP). Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schimidt, 13566-590, São Carlos-SP. Jmoreto@sc.usp.br

⁴ PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Dpto. Eng. Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Esc. Eng. São Carlos, USP (SMM-EESC-USP). (SMM-EESC-USP). Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schimidt, 13566-590, São Carlos-SP. romemuri@sc.usp.br

⁵ Engenheiro Mecânico do Departamento de Gestão Estratégica da Vale. DIPE/GEEIP/GAMAPA. Supervisor da Engenharia de Materiais, Prédio Oficina Elétrica, Térreo, Av. Dante Michelini, 5500, Ponta de Tubarão, 29090-900, Vitória-ES. claudio.ferraz@vale.com

⁶ Engenheiro Mecânico do Departamento de Gestão Estratégica da Vale. DIPE/GEEIP/GAMAPA. Engenharia de Materiais, Prédio Oficina Elétrica, Térreo, Av. Dante Michelini, 5500, Ponta de Tubarão, 29090-900, Vitória-ES. jair.valfre@vale.com

⁷ PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Diretor Superintendente MIB. Rua Paulino Botelho de Abreu Sampaio, 881, Jd. Bethânia, 13561-060, São Carlos-SP. milan@mib.eng.br

1 INTRODUÇÃO

Um esquema da ponta do eixo da peneira 6R1 é apresentado pela Figura 1. O eixo é do tipo excêntrico com aplicação em equipamentos do tipo Haver Boecker. A região de fratura apresenta um diâmetro aproximado de 215 mm.

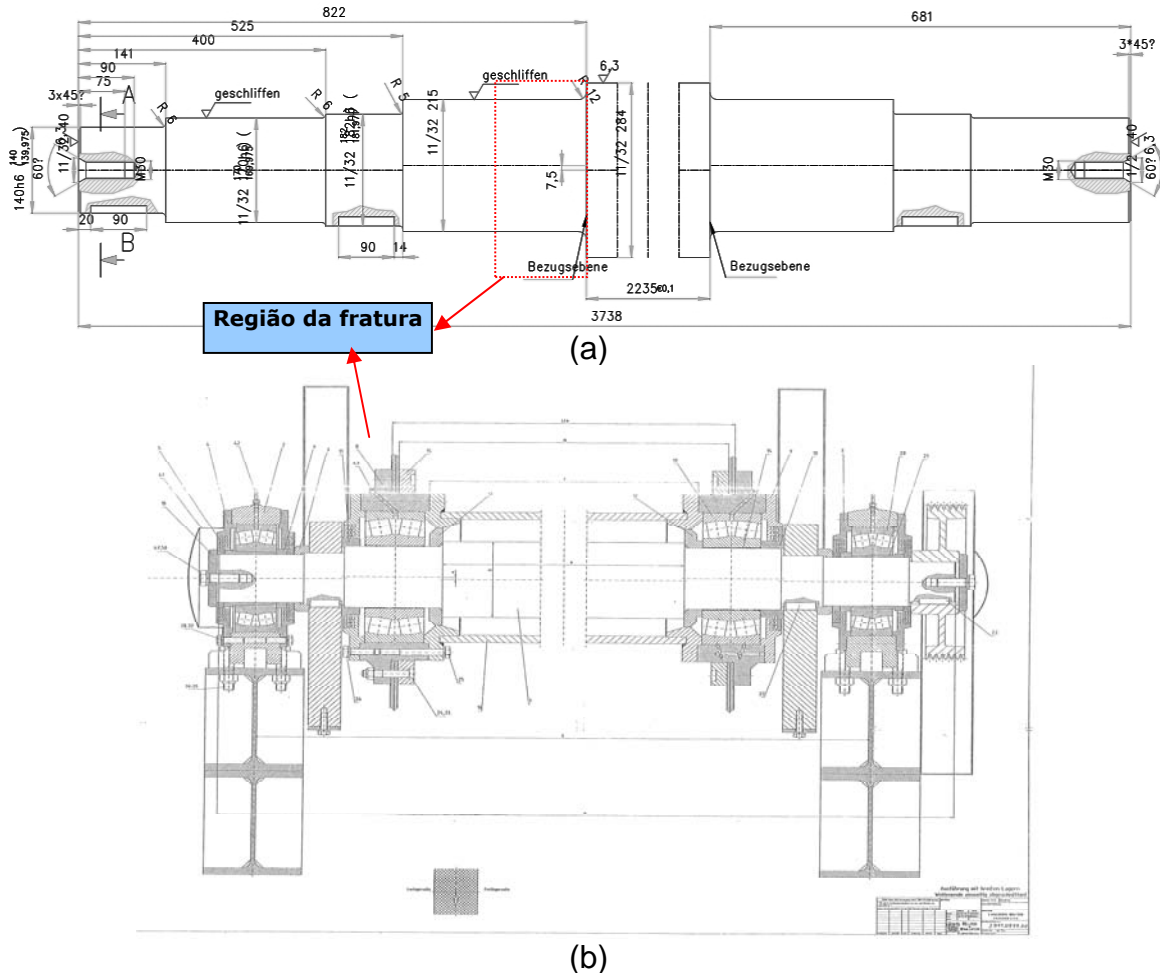


Figura 1. (a) Desenho do eixo excêntrico com detalhe da região da fratura e (b) desenho de montagem dos rolamentos.

A região de fratura coincide com a área de acoplamento de um rolamento de 220 mm de diâmetro, o qual é montado com uma bucha. Entretanto, o interessado não soube precisar a posição exata da fratura em relação ao eixo e ao rolamento acoplado.

Não foi informado a classe de material, nem os tipos de tratamentos térmicos empregados no eixo. A Figura 2 apresenta a amostra recebida para análise.



Figura 2. Amostra recebida para análise.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada uma inspeção visual do componente. A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica por centelha. Foram efetuados ensaios de dureza na escala Rockwell C, utilizando uma carga de 150 Kgf, penetrador cônico de diamante e na escala Vickers com uma carga de 100 gf, penetrador piramidal de diamante. Os ensaios de microdureza foram realizados utilizando uma carga de 1000 gf. Ensaios Charpy tipo A foram realizados de acordo com a norma ASTM E-23A⁽¹⁾ em temperatura ambiente.

Ensaios de tração foram realizados em ar e à temperatura ambiente em uma máquina Instron 2382 (100 kN capacidade), com uma velocidade de 0,5 mm/min (até $\sigma_{0,2}$) e 2 mm/min (até a fratura) de acordo com a norma ASTM A 370.⁽²⁾

Análise microestrutural foi realizada via Microscopia Ótica (MO). As amostras foram preparadas utilizando-se a técnica convencional (lixamento + polimento). O ataque químico utilizado foi nital 2%.

3 RESULTADOS

3.1 Análise Macrográfica

A análise macrográfica da amostra, Figura 3 revela a presença de inúmeras marcas de praia (setas escuras e pontilhadas), que são uma das características macroscópicas marcantes do processo de propagação de trincas por fadiga. Apenas um único sítio de nucleação foi detectado na superfície da peça, conforme evidenciado pelas marcas de praia. Observa-se ainda, junto ao sítio de nucleação, uma região de deformação plástica na peça, sugerindo que a mesma recebeu algum tipo de impacto ou esmagamento. A formação de uma indentação na superfície gera concentração de tensão que facilita o processo de nucleação de trinca por fadiga. Uma vez nucleada, a trinca se propagou radialmente em direção ao centro da peça, por cerca de 30 mm, sendo freada. Em seguida, a trinca se propagou ao longo da parte externa do eixo, em direções opostas, conforme indicado pelas setas claras, formando um degrau na



superfície no momento da fratura final rápida, a qual é caracterizada por uma região com aspecto superficial mais grosseiro.

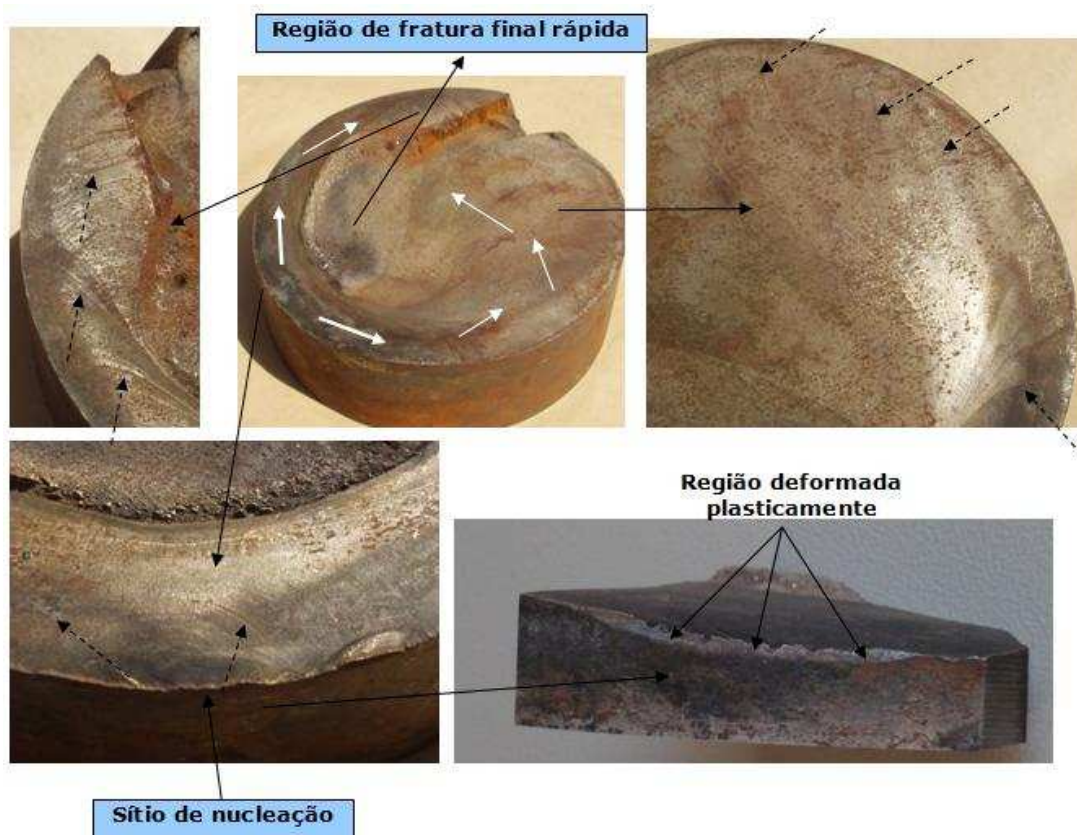


Figura 3. Detalhes da análise macrográfica do eixo fraturado. As setas escuras e pontilhadas indicam a presença de “marcas de praia” e as setas claras indicam a direção de propagação das trincas.



Figura 4 - Detalhe do esquema de secionamento para retirada de sub-amostras.

3.2 Análise Química

De acordo com os resultados de análise química, pode-se afirmar que o material apresenta composição química dentro dos valores especificados para o aço SAE 4340 (Tabela 1).

Tabela 1. Análise química (% em peso)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Fe
Amostra 08-0213	0,42	0,23	0,72	0,015	0,011	0,80	1,74	0,21	0,007	0,024	Bal
SAE 4140	0,38- 0,43	0,15- 0,35	0,60- 0,80	0,035 Máx	0,040 máx	0,70- 0,90	1,65- 2,00	0,20- 0,30	-	-	Bal

3.3 Análise de Dureza

De acordo com os resultados de dureza, os valores obtidos são compatíveis com o aço SAE 4340 na condição temperado/revenido, considerando-se as dimensões da peça. As medidas foram realizadas próximas ao sítio de nucleação, paralelamente à fratura. A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de dureza.

Tabela 2. Análise de dureza

Amostra	Medidas (HRC)					Média (HRC)	Média (HB)*	SAE 4340 temperado e revenido (HRC)#
	30	31	27	33	28			
08-0213	30	31	27	33	28	29,8	285	31

* Conversão feita de acordo com a norma ASTM A370 para fins de comparação

3.4 Análise Micrográfica Óptica

A análise micrográfica óptica de uma amostra removida de região próxima ao sítio de nucleação, cerca de 30 mm abaixo da superfície do eixo e paralelamente ao comprimento do eixo (Figura 5a), indica a presença de uma microestrutura heterogênea de bandas alternadas de bainita grosseira/ferrita de Widmanstätten e de bainita fina/martensita. Durante a solidificação da peça, formam-se dendritas primárias que segregam solutos e impurezas para os espaçamentos interdendríticos. Desta forma, caso não haja tratamento de homogeneização, formam-se bandas microestruturais (devido ao forjamento) com composições químicas localmente diferentes, afetando a temperabilidade do material. Conseqüentemente, as regiões mais pobres em elementos de liga (dendritas) têm temperabilidade mais baixa, formando bainita grosseira e ferrita Widmanstätten, e, portanto com menor dureza (28 HRC). As regiões mais ricas em soluto, incluindo-se impurezas (MnS), possui temperabilidade mais alta, formando microestruturas mais duras (43 HRC), compostas de bainita inferior e/ou martensita. Braços dendríticos de bainita grosseira e ferrita Widmanstätten, cercadas pela martensita/bainita fina interdendríticas podem ser observados através da Figura 5.

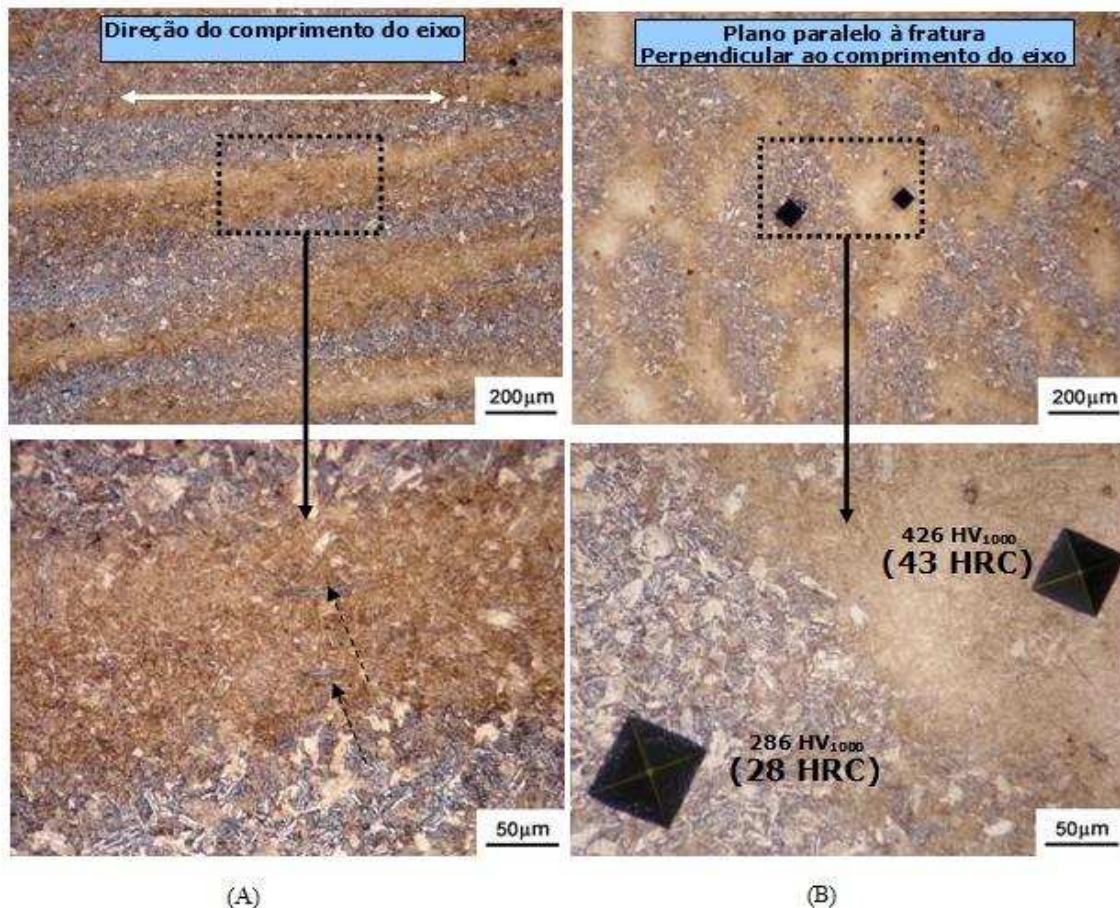


Figura 5. Micrografia óptica: (A) amostra 08-0213-002 e (B) amostra 08-0213-015. Observa-se as diferenças de microdureza, o bandeamento microestrutural e a segregação interdendrítica de MnS (setas pontilhadas).

A Figura 6 apresenta a análise micrográfica óptica de uma amostra removida da superfície do eixo, junto à superfície de fratura e próxima ao sítio de nucleação. Observa-se claramente que, próximo à superfície, a microestrutura é relativamente homogênea. Entretanto, em direção ao centro da peça, o bandeamento microestrutural torna-se muito mais acentuado e refinado, resultando em um aumento de dureza do material, exatamente na região onde a trinca foi freada. Quando uma trinca se propaga de uma região mais mole em direção a uma região mais dura, há uma redução do valor efetivo do fator de intensidade de tensão, devido à restrição imposta à formação da zona plástica da ponta da trinca. Assim sendo, em determinado ponto, a trinca deixa de se propagar radialmente, encontrando menos resistência para se propagar ao redor da circunferência do eixo. Quando a trinca assume proporções maiores, o fator de intensidade de tensão cresce significativamente e a trinca consegue romper o bloqueio imposto pelo bandeamento, no lado oposto ao do sítio de nucleação, resultando na fratura final rápida.

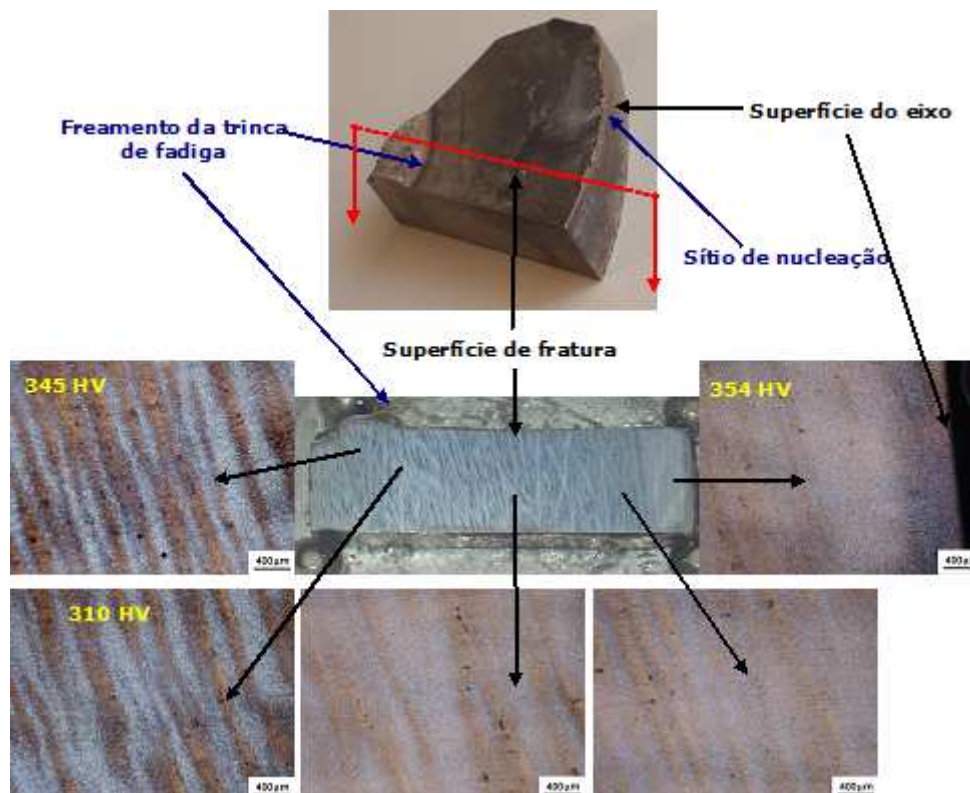


Figura 6. Análise micrográfica óptica da amostra 08-0213-017. Os valores de dureza Vickers com carga de 100 gf, também são apresentados.

3.5 Ensaio de Impacto

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de impacto. Observa-se que o material apresenta uma tenacidade ao impacto muito baixa, à temperatura ambiente, provavelmente devido ao fenômeno de fragilização do revenido (ver quadro), especialmente na orientação T-L, onde o plano de fratura é paralelo ao bandejamento.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de impacto

Amostra	Orientação	Energia(J)		
		Valores	Média	SAE 4340 temperado e revenido
08-0213-003		15		
08-0213-004	T-L	14	12,7	-
08-0213-005		9		
08-0213-006		24		
08-0213-007	L-T	24	23,7	100 (Izod)
08-0213-008		23		

3.6 Ensaio de Tração

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de tração. Os valores obtidos são compatíveis com o aço SAE 4340 na condição temperado e revenido,

considerando-se a razão entre os valores do limite de escoamento e do limite de resistência à tração. Os resultados mostram uma diferença significativa dos valores de redução de área, dependendo da orientação do corpo de prova. Na orientação T-L, o plano de fratura é paralelo ao bandejamento, e, portanto favorece valores de ductilidade menores. Em ambas as orientações, os valores de alongamento são inferiores aos valores de referência apresentados para o SAE 4340. Não há diferença significativa de valores em relação às propriedades de resistência mecânica.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de tração

Corpo de prova	Orientação	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	A (%)	RA (%)
08-0213-009	T-L	843,8	1042,0	12,8	30,6
08-0213-010		846,7	1044,9	11,8	28,5
08-0213-011		833,5	1034,0	13,0	33,8
Média		841,3	1040,3	12,5	31,0
08-0213-012	L-T	868,4	1043,0	14	55,9
08-0213-013		855,5	1015,1	12,8	55,2
08-0213-014		885,5	1058,6	13,6	53,8
Média		869,8	1038,9	13,5	55,0
SAE 4340 temperado e revenido #	L-T	860	1020	20	60

σ_e = limite de escoamento 0,2% offset; σ_r = limite de resistência à tração; A = alongamento em 4D; RA = redução de área

3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 8 apresenta detalhes da região de nucleação de trinca por fadiga, observada ao microscópio eletrônico de varredura, onde se podem notar a região deformada plasticamente (setas pretas) junto ao sítio de nucleação e as marcas de praia na superfície de fratura (setas claras).

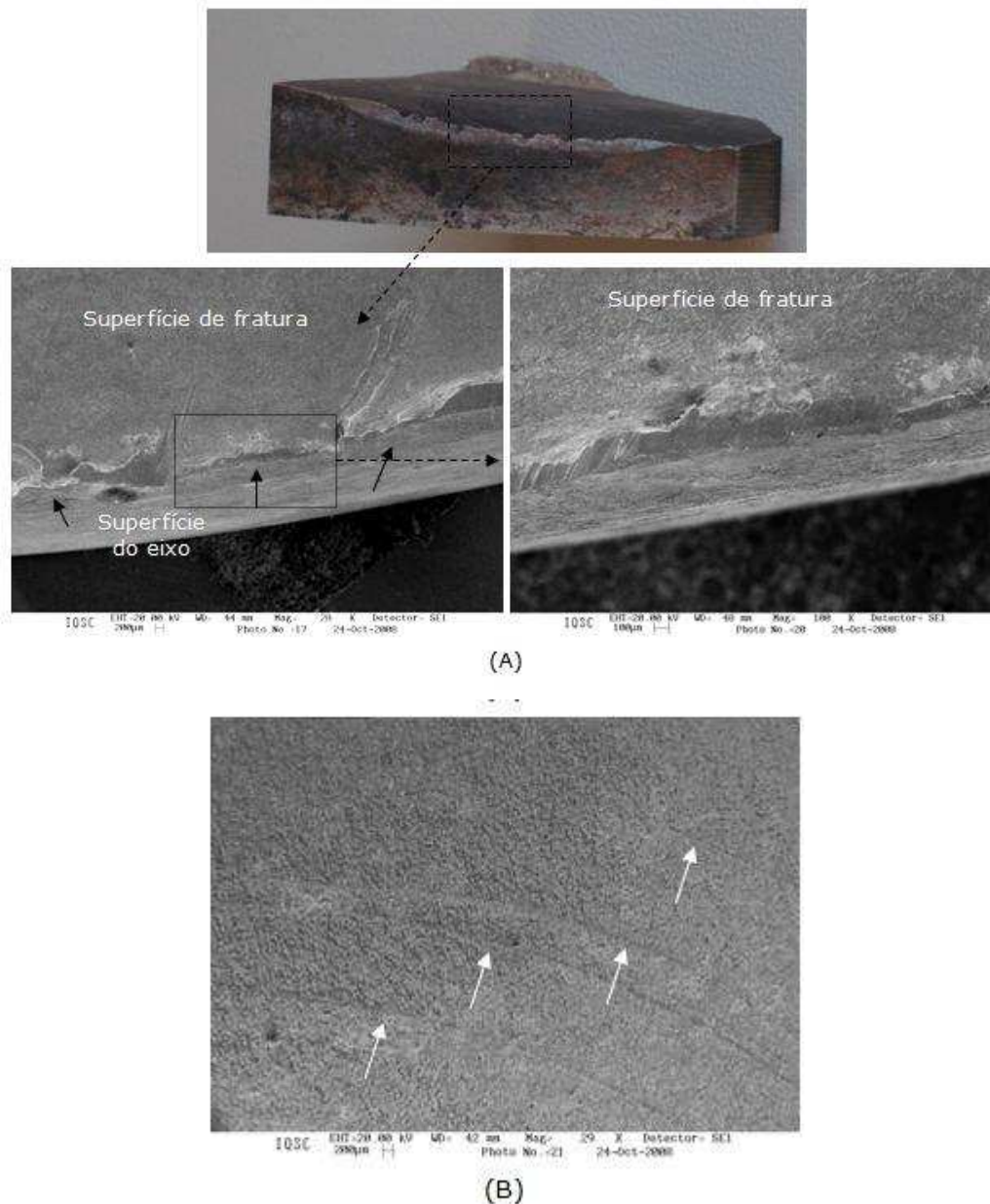


Figura 7. (A) Detalhe do sítio de nucleação de trinca por fadiga na superfície do eixo e (B) marcas de praia na superfície de fratura.

4 CONCLUSÃO

O material do eixo apresenta composição química compatível com o aço SAE 4340. A análise micrográfica óptica do interior da peça indicou a presença de uma microestrutura bastante heterogênea de bandas de bainita superior/ferrita Widmanstatten alternadas com bandas de bainita inferior/martensita, com diferença de dureza significativa entre elas. Na superfície do eixo, a microestrutura apresenta-se mais homogênea. O bandeamento é conseqüência da falta de homogeneidade da peça, devido à microsegregações do processo de solidificação. O material encontra-se fragilizado devido ao fenômeno de “*fragilização do revenido*” conforme atestado pelos baixos valores de energia de impacto. A falha do eixo ocorreu por um processo de nucleação e propagação de trinca por fadiga, a partir da superfície do eixo. Uma marca

de deformação plástica (indentação) na superfície do eixo, resultante de algum tipo de impacto, aparentemente atuou como concentrador de tensão favorecendo a nucleação da trinca. Entretanto, a falta de informação precisa quanto à posição da fratura em relação ao eixo/rolamento dificultou a análise completa do problema, uma vez que mecanismos de dano adicionais poderiam estar atuando no componente, tal como *fretting* entre a bucha e o eixo.

5 RECOMENDAÇÕES

Melhorar o acabamento superficial da peça e evitar impactos que possam introduzir concentradores de tensão que facilitem a nucleação de trincas por fadiga.

Evitar resfriamento lento da peça na faixa de temperatura de 300°C – 550 °C, com o objetivo de minimizar os efeitos deletérios de fragilização do revenido.

Adequar o tratamento térmico de têmpera e revenimento para obter, se possível, maior dureza superficial.

REFERÊNCIAS

- 1 ASTM E 23 A (2002). American Society for Testing and Materials. “*Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*”.
- 2 ASTM E A370 (2007). American Society for Testing and Materials. “*Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*”.