



ANÁLISE DE FALHA POR FRATURA DE UM PARAFUSO PRISIONEIRO DA CARÇAÇA DE UM REDUTOR DE VELOCIDADE¹

Maria Cristina Adami Gatti²
Danilo Borges Villarino de Castro³
Dirceu Spinelli⁴
José Ricardo Tarpani⁵

Resumo

Investigaram-se as possíveis causas da falha por fratura de um parafuso prisioneiro com rosca rolada M100x4-h13 confeccionado em aço SAE 4340, o qual era utilizado para fixar a carcaça de uma caixa de redução de velocidade. Para tanto, foram realizados os seguintes procedimentos: análise química, ensaios mecânicos de tração, macro- e microdureza, análise metalográfica por microscopias óptica e eletrônica de varredura, e análise de tensões. Concluiu-se que o componente mecânico falhou em virtude do mau acabamento superficial gerado durante o processo de rolagem da rosca.

Palavras-chave: Análise de falha; Parafuso prisioneiro; Redutor de velocidade; Rosca rolada.

FRACTURE FAILURE ANALYSIS OF A GEARBOX CASING CLAMPING STUD BOLT

Abstract

The causes of fracture failure of M100x4-h13 rolled thread stud bolt made with SAE 4340 steel utilized to clamp a gearbox casing have been investigated. For this purpose the following procedures were carried out: chemical analysis, tensile, macro- and microhardness mechanical testing, metallographic analysis by optical and scanning electron microscopies, and stress analysis. It has been concluded that the mechanical component failed due to poor finishing practices originated during the thread rolling procedure.

Keywords: Failure analysis; Rolled thread; Speed gearbox; Stud bolt.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

³ Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

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

⁵ Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

1 INTRODUÇÃO

Na indústria atual, a utilização do aço como material de construção mecânica ainda se faz presente de forma ostensiva, mesmo com o surgimento de materiais alternativos. Isto se deve ao fator custo, visto que estes novos materiais exibindo características próximas às do aço geralmente possuem valor agregado muito mais elevado. O aço possui a grande vantagem de ter suas características substancialmente alteradas mediante tratamentos térmicos adequados realizados a um relativamente baixo custo.

O aço SAE 4340 é um aço de elevada temperabilidade e boa forjabilidade, porém sua usinagem é relativamente pobre. Dependendo do teor de carbono, a dureza na condição temperada varia de 54 HRC a 59 HRC. Devido à sua alta temperabilidade, não é aconselhável a sua aplicação em soldagem por métodos convencionais, somente via processos mais sofisticados.

Os aços são empregados na confecção de parafusos, que são elementos de fixação utilizados na união não-permanente de peças, ou seja, as peças podem ser montadas e desmontadas facilmente. Os parafusos, além de apresentarem esta característica, são de fácil reposição quando ocorre uma falha em serviço.

De maneira geral, os parafusos são subdivididos em três classes: parafuso e porca, parafuso com porca, e parafuso prisioneiro. Os parafusos prisioneiros são parafusos sem cabeça, com rosca em ambas as extremidades, sendo recomendados nas situações que exigem montagens e desmontagens frequentes do equipamento. Em tais situações, o uso de outros tipos de parafusos acaba por danificar a rosca dos furos ⁽¹⁾.

As roscas dos parafusos prisioneiros podem ter passos diferentes ou sentidos opostos, isto é, um horário e o outro anti-horário, além de possuírem roscas totais ou parciais, tais como ilustradas na Figura 1.

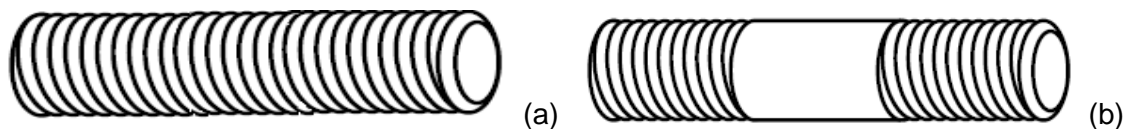


Figura 1. Exemplos de parafusos prisioneiros: (a) Rosca total; (b) Rosca parcial.

Os parafusos devem apresentar resistência mecânica satisfatória, além de propriedades compatíveis com o processo de fabricação, o qual pode ser por usinagem em tornos e roscadeiras ou forjamento com posterior laminação da rosca, este último processo frequentemente empregados nos parafusos com grandes diâmetros. Em geral, a rosca é obtida pelo rolamento do corpo entre matrizes (laminação), as quais comprimem o material para conformação da raiz do parafuso e o expandem para conformar a crista. O processo de *shot peening* pode ser utilizado para aumentar o gradiente de tensões residuais compressivo no fundo do filete, requerendo, entretanto, o devido cuidado visto que o fundo do filete é agudo e a camada plastificada deve ser a mais uniforme possível de modo a que o processo seja eficiente. ⁽¹⁾

Segundo Fukuoka e Takaki, ⁽²⁾ os principais pontos onde ocorrem as fraturas nos parafusos em serviço são o raio do primeiro filete (65% dos casos), rupturas na saída da rosca (20%) e fraturas no raio entre a cabeça e a haste (15%).

2 OBJETIVO

Objetivou-se determinarem as causas da falha ocorrida em um parafuso prisioneiro da carcaça de um redutor de velocidade empregado no sistema de moendas de uma usina de açúcar e álcool, o qual fraturou em serviço na região do primeiro filete rolado engastado na respectiva porca.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A Figura 2 mostra as dimensões em milímetros do parafuso prisioneiro analisado, bem como a posição aproximada em que ocorreu a fratura. Foi verificado que a fratura desenvolveu-se no engaste com o primeiro filete da porca, tal como tipicamente verificado neste tipo de falha, tendo em vista as máximas tensões trativas desenvolvidas localmente.

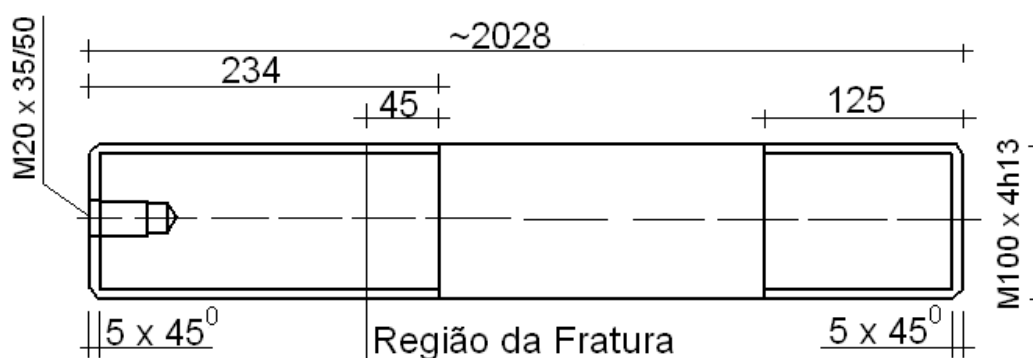


Figura 2. Croqui do parafuso prisioneiro M100x4 com a posição da fratura.

A Figura 3 ilustra a superfície de fratura de parte do componente onde foi realizada a análise da falha neste trabalho.

Deve-se enfatizar que a porção analisada do parafuso não foi submetida ao contato direto com a porca aprisionadora, ou seja, os filetes da parte avaliada nunca foram, em princípio, submetidos ao contato direto com os filetes da referida porca.

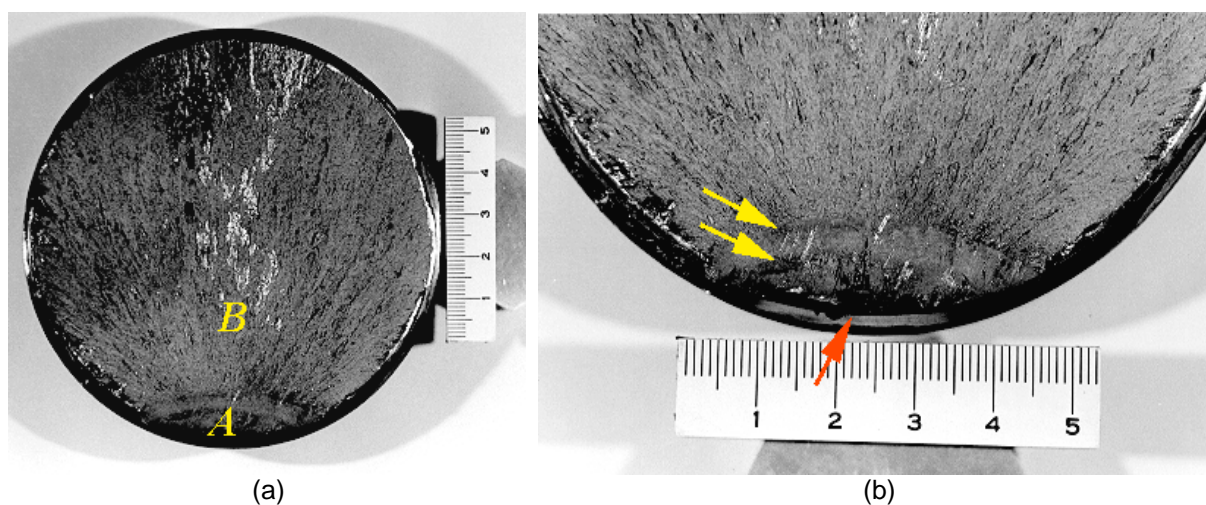


Figura 3. Vista geral (a) e detalhe (b) da superfície de fratura do parafuso. Em (a), a superfície de fratura por fadiga é indicada por A e a gerada durante a fratura final catastrófica, por B. Em (b), a seta laranja indica o sítio de nucleação de fadiga, e as amarelas as chamadas “marcas de praia”.

A análise inicial da superfície de fratura permitiu concluir que a falha ocorreu pelo mecanismo de fadiga. Na Figura 3a estão especificadas as regiões de nucleação e crescimento subcrítico de trinca por fadiga (A), e de propagação catastrófica da trinca (B), quando a seção remanescente já não mais suporta o carregamento aplicado no componente. Tendo em vista a pequena proporção de área ocupada pela trinca de fadiga, relativamente à área total da seção transversal do componente fraturado, pode-se inferir que a fratura do componente ocorreu sob cargas bastante elevadas. Na Figura 3b o ponto provável de iniciação da trinca de fadiga é apontado por seta laranja e observa-se a existência de “marcas de praia” (seta amarelas), que tipicamente se desenvolvem durante variações das condições de carregamento do componente. Estas marcas são provas cabais de que a falha do componente deveu-se à fadiga do material durante operação em serviço.

4 MATERIAL

Neste trabalho, foi estudado o parafuso prisioneiro de redutor constituído pelo aço SAE 4340, com rosca rolada M100x4-h13, ângulo da rosca de 60° e raio de curvatura na raiz do filete de 0,58 mm. A Tabela 1 fornece a composição química do parafuso prisioneiro, em percentagem de peso.

Tabela 1. Composição química do parafuso prisioneiro (% em peso)

Elemento químico	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
% em peso	0,41	0,27	0,76	0,80	1,71	0,20	0,017	0,019

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos em um sistema eletromecânico Instron[®] modelo 2382, com célula de carga de 100 KN, sob controle de deslocamento do travessão a uma velocidade constante de 5 mm/min, segundo diretrizes da norma ASTM E8M-09.⁽³⁾ Os corpos de prova foram usinados seguindo a norma ASTM A370-10,⁽⁴⁾ com diâmetro de 8,75±0,18mm, no qual foram retirados da haste do parafuso prisioneiro fraturados.

Os ensaios de tração foram executados à temperatura ambiente nas amostras submetidas após tratamento térmico de têmpera e revenimento.

5.2 Ensaios de Dureza

Para a aquisição das medidas de dureza foi utilizado o método Vickers, segundo a norma ASTM E92-03,⁽⁵⁾ com carga de 5 kgf (HV5) e posteriormente convertido segundo a norma ASTM E140-07⁽⁶⁾ para dureza Brinell.

As medidas foram realizadas em uma região próxima à superfície de fratura, porém suficientemente afastadas da raiz dos filetes, de modo a excluir a zona encruada durante a conformação mecânica dos filetes, executada através do processo de rolagem.

5.3 Análises Metalográficas

O procedimento de preparação das amostras para análises macro- e micrográfica consistiu na retirada da amostra do material base, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico para revelar a microestrutura com Nital 2%.

5.4 Ensaios de Microdureza

As medidas de microdureza foram realizadas de acordo com a norma ASTM-E384-10,⁽⁷⁾ a partir de uma região imediatamente próxima à raiz do filete, deslocando-se em direção ao interior da peça, e mantendo-se um espaçamento regular entre os pontos de medidas (Figura 4). Empregou-se o método Vickers, com carga de 100 gf (HV100gf).

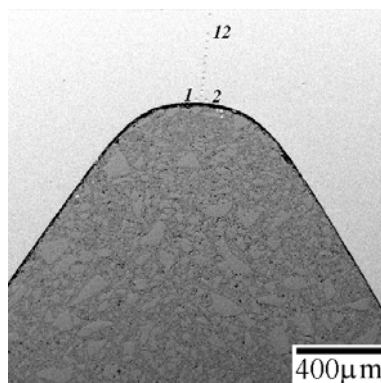


Figura 4. Raiz do filete de rosca onde foram realizadas as medidas de dureza. O raio de curvatura do filete (r) foi estimado em 0,49-0,50mm, a altura (h) em 2,35mm e o seu passo (b) em 4,10mm. Os números indicam as posições das medidas.

5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises por microscopia foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura, com o intuito de caracterizar o aspecto morfológico da superfície de fratura na região do macro-defeito, nas faces (flancos e raiz) dos filetes do parafuso prisioneiro.

5.6 Análise de Tensão

A análise de tensão foi realizada considerando-se a tensão σ aplicada no parafuso prisioneiro no momento de sua fratura, de acordo com a teoria da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL). A teoria prevê que a tensão crítica para a fratura do componente trincado (σ_F) e o comprimento crítico da trinca presente no mesmo (a_c) estão inter-relacionados através do parâmetro de tenacidade à fratura K_{IC} , tida como uma propriedade inerente do material, calculado através da Equação 1:⁽⁸⁾

$$K_{IC} = \sigma_F \sqrt{\pi \cdot a_c} \cdot Y \quad (1)$$

A partir da Equação 1, a tensão σ_F foi determinada:

$$\sigma_F = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi \cdot a_c \cdot Y}} \quad (2)$$

A função da flexibilidade elástica (Y), que considera os efeitos da introdução de uma trinca nas características de flexibilidade (i.e. inverso da rigidez) de um componente tracionado, foi determinada por meio do gráfico apresentado na Figura 5.⁽⁹⁾

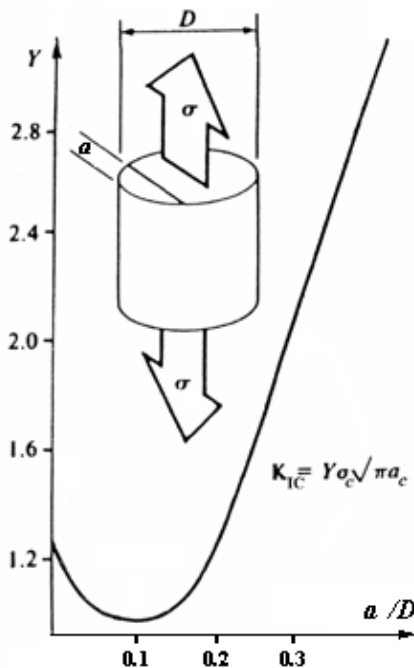


Figura 5. Função flexibilidade elástica (Y) para a geometria de carregamento em questão.⁽⁹⁾

A tensão σ_F , estimada como a que realmente atuava no componente no momento de sua fratura, foi comparada à tensão de projeto para o componente operante, que consiste na soma da tensão inicial de aperto (σ_a) mais a tensão atuante em serviço (σ_s). Portanto essas tensões foram determinadas dividindo-se a força de aperto e a força máxima atuante, cujos valores foram fornecidos pelo fabricante, de respectivamente $3,6 \times 10^6$ N e $5,1 \times 10^5$ N, pela área de tensão do parafuso, que segundo a norma SAE J429 é de $7,298 \text{ mm}^2$.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Tração

Os resultados das propriedades mecânicas após tratamento térmico de têmpera e revenimento constam na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do material estudado na condição recebida

Propriedades mecânicas	Valores
Limite de escoamento (MPa)	900
Limite resistência à tração (MPa)	1100
Alongamento total (%)	10
Dureza Brinell (HB)	325-385

6.2 Dureza

As medidas de dureza realizadas na região próxima a superfície de fratura, porém afastadas da raiz dos filetes de modo a excluir a zona encruada durante a conformação mecânica dos filetes, executada através do processo de rolagem apresentou-se dentro da faixa de dureza especificada pelo fabricante do parafuso prisioneiro, de 335 HB a 385 HB.

6.3 Análises Metalográficas

Na Figura 6a observa-se o perfil de um filete íntegro do parafuso em corte longitudinal, e, na Figura 6b, verifica-se o perfil do filete fraturado.

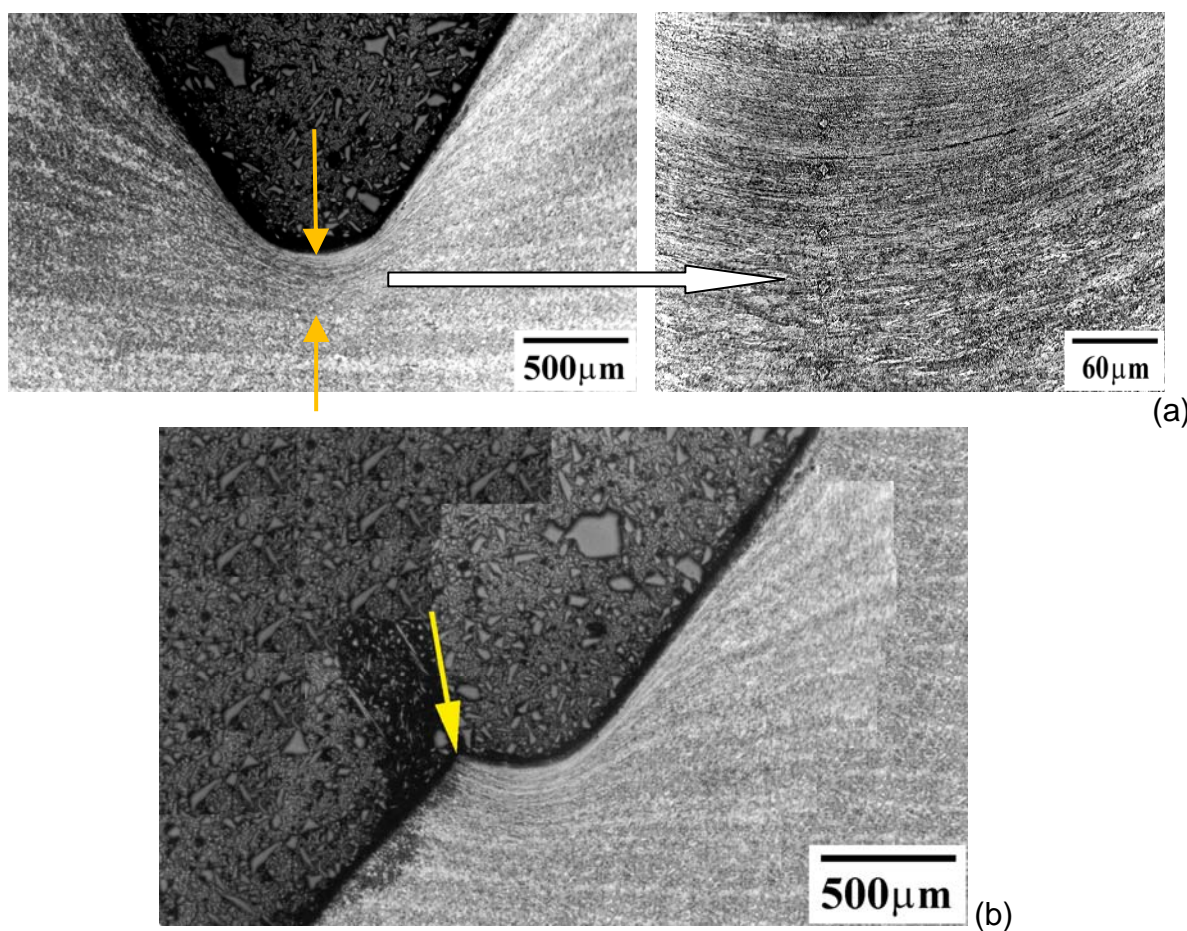


Figura 6. (a) Filete íntegro e região logo abaixo da sua raiz (as setas laranja definem a espessura da camada rolada); (b) Filete fraturado (seta amarela) do parafuso prisioneiro M100x4.

Observa-se na Figura 6a que as linhas de fluxo acompanham o contorno dos filetes confirmando que os mesmos foram conformados através do processo de rolagem (filetes rolados). Nota-se que a microestrutura do material é constituída de partículas de carbeto dispersas numa matriz martensítica revenida. A matriz apresenta-se bastante deformada nas proximidades da raiz do filete, indicando que a rolagem dos filetes deu-se, provavelmente, após o tratamento térmico do componente, tal como preferencialmente deve ocorrer. Na Figura 6b, a profundidade da camada rolada, cujos limites são definidos por setas laranja na Figura 6a, é estimada como sendo da ordem de 300 μm .

6.4 Ensaio de Microdureza

O gráfico plotado de microdureza vs. profundidade a partir da raiz do filete indicou que a dureza da camada rolada atinge o valor da dureza da matriz metálica (368 HV \approx 348 HB) numa posição localizada a aproximadamente 320 μ m da raiz do filete, corroborando assim a estimativa anteriormente realizada da espessura da camada encruada/rolada tomando-se apenas como base o seu aspecto microestrutural.

6.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na Figura 7a tem-se uma vista do filete que fraturou em serviço e verifica-se que a fratura iniciou-se em um ponto fora da raiz do filete (seta amarela) o que corrobora as observações feitas com relação à Figura 6. Na Figura 7b observa-se o filete situado logo abaixo daquele que ocorreu o rompimento, com a presença de riscos e sulcos (apontados por setas laranja), e que provavelmente foram gerados durante o processo de rolagem dos filetes. Observa-se que a posição ocupada pelos sulcos corresponde exatamente àquela em que se deu a fratura do filete (Figura 7a). Pode-se, portanto, concluir que a baixa qualidade de acabamento superficial proporcionado pelo processo de fabricação dos filetes por rolagem tenha, muito possivelmente, sido a principal causa da falha do componente em serviço.

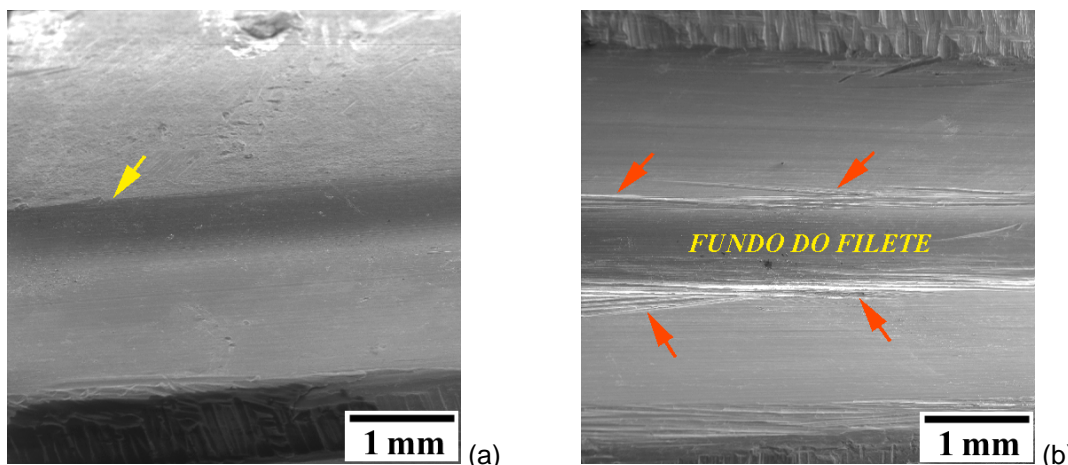


Figura 7. (a) Vista frontal do filete que rompeu causando a falha do componente em serviço; (b) Vista frontal do segundo filete (b).

A Figura 8a apresenta o quarto filete, contado a partir daquele que rompeu em serviço, onde novamente observam-se sulcos bastante profundos, que atuam como concentradores de tensões trativas.

Observa-se na Figura 8b que o sétimo filete, contado a partir daquele que rompeu em serviço, apresenta novas evidências dos danos introduzidos durante a etapa de conformação mecânica dos mesmos, e até mesmo pode-se notar um trincamento indicando deficiências no processo de rolagem da rosca.

A Figura 9 apresenta a vista frontal da face do filete rompido, porém utilizando-se elétrons retro-espalhados ao invés dos elétrons secundários, evidenciando a existência de inclusões (material mais leve que a matriz metálica, e aparecendo, portanto, com uma coloração mais clara que a liga) na região de iniciação da fratura por fadiga. Este fato sugere que um teor de inclusões acima do normal pode ter contribuído adicionalmente para a falha do componente em serviço.

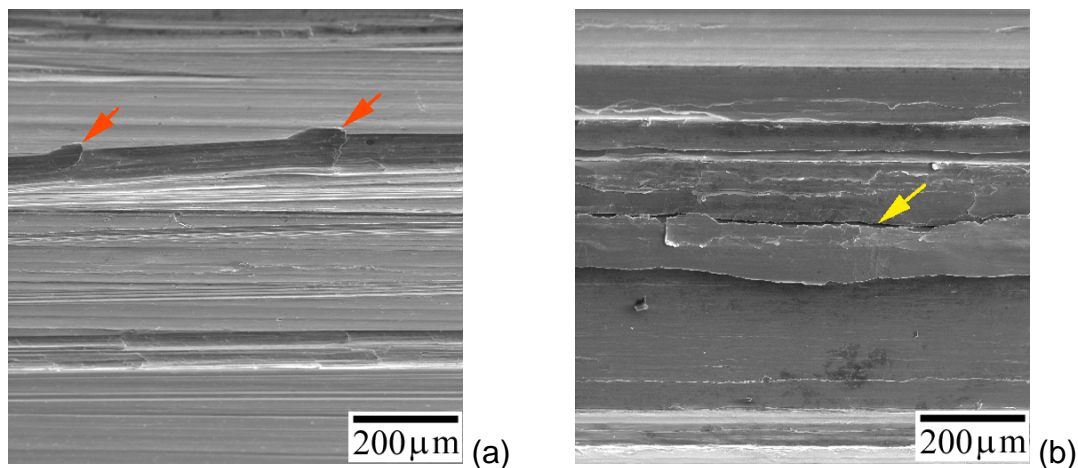


Figura 8. Detalhes do fundo dos filetes: (a) Quarto filete exibindo sulcos e marcas (apontados por setas vermelhas) introduzidos na sua fabricação; (b) Sétimo filete, com a seta amarela apontando para um trincamento desenvolvido.

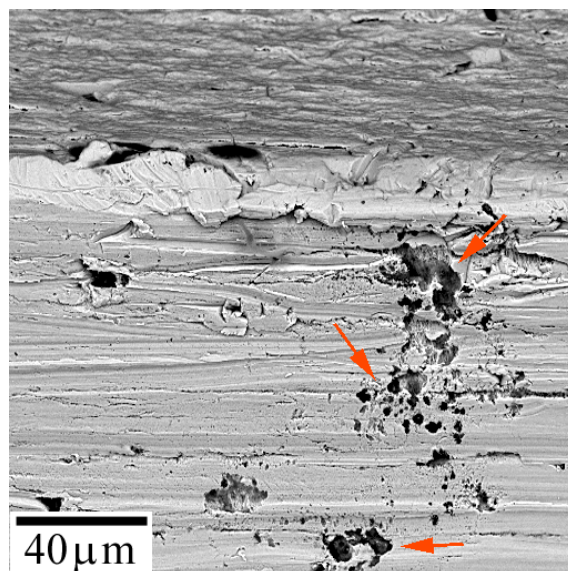


Figura 9. Raiz do filete de rosca rompido em serviço, onde se visualiza uma grande concentração de partículas de segunda fase, algumas delas indicadas por setas laranja, sendo provavelmente inclusões não-metálicas.

6.6 Análise de Tensão

De acordo com a Figura 3, o comprimento ou a profundidade crítica da trinca (a_c) foi estimado como sendo de 10,44 mm, para um diâmetro D aproximado da seção transversal do parafuso prisioneiro da ordem de 100 mm, levando a uma razão a_c/D próxima de 0,1.

Por meio da Figura 5 obtém-se o valor de flexibilidade Y da ordem da unidade ($Y=1$). A tenacidade à fratura K_{Ic} do material (aço 4340 temperado e revenido) foi estimada como sendo aproximadamente de $110 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ⁽¹⁰⁾ Assim sendo, a tensão aplicada σ_F de 607 MPa, foi calculada de acordo com a Equação 2.

Os valores da tensão inicial de aperto (σ_a) e tensão atuante em serviço (σ_s) obtidos foram respectivamente 493 MPa e 70 MPa, o que resultou em uma tensão total nominal aplicada de 563 MPa. Este valor é cerca de 10% inferior à tensão de fratura

da peça (σ_F), e, dadas às aproximações adotadas na estimativa de σ_F , os valores foram surpreendentemente próximos, indicando que tanto o procedimento de aperto inicial do parafuso, quanto às cargas de serviço do componente apresentavam-se estava dentro das condições de normalidade.

7 CONCLUSÕES

- Considerando-se os resultados obtidos a partir das análises realizadas, pode-se concluir que o mau acabamento gerado durante o processo de rolagem dos filetes foi o principal responsável pela falha do componente em serviço;
- Riscos e sulcos presentes na superfície do primeiro filete engastado com a porca, que naturalmente experimenta as máximas tensões trativas em condições normais de serviço, atuaram como locais de concentração de tensão, favorecendo, portanto, a nucleação e o crescimento da trinca de fadiga, o que culminou na fratura final catastrófica do parafuso prisioneiro;
- Índícios de uma elevada concentração local de inclusões sugerem que estas partículas de segunda fase podem, em certa extensão, ter contribuído adicionalmente para a nucleação da trinca de fadiga, e, portanto, para a ocorrência da falha do componente.

Agradecimentos

Os autores expressam os seus agradecimentos ao atual Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos - USP pelo uso de seus equipamentos e instalações.

REFERÊNCIAS

- 1 PIZZIO, E. *Avaliação da vida em fadiga de uniões parafusadas - estudo de caso* 120p. Dissertação Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- 2 FUKUOKA, T.; TAKAKI, T. Mechanical behaviors of bolted joints in various clamping configurations. *Journal of Pressure Vessel Technology*, v.120, p.226-231, 1998.
- 3 ASTM E8M-09, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, 2009.
- 4 ASTM A370-10, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, 2010.
- 5 ASTM E92-03, *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*, 2003.
- 6 ASTM E140-07, *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*, 2007.
- 7 ASTM-E384-10, *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, 2010.
- 8 ANERSON, T.L. *Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications*. 2nd Ed., 1995, CRC Press, Boca Raton - FL.
- 9 DAUOD, O.E.K.; CARTWRIGHT, D.J.; CARNEY. M. Strain energy release rate for a single-edge-cracked circular bar in tension. *Journal of Strain Analysis*, v.13, p.83-89, 1978.
- 10 METALS HANDBOOK, Vol. 1. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. *American Society for Materials*, 9th Ed., p.426, 1986.