



ANÁLISE DE FALHA DO UM PINHÃO Z 18 DASH 9

Omar Maluf²

Jéferson Aparecido Moreto³

Rosamel Melita Muñoz Riofano⁴

Jael Moutinho⁵

Jair Valfré⁶

Marcelo Tadeu Milan⁷

Resumo

O presente trabalho teve por objetivo investigar as possíveis causas de falha ocorrida num pinhão. O trabalho seguiu a metodologia usual empregada em análise de falhas, consistindo de análises visuais do componente, macrodureza Rockwell B, microscopia óptica, ensaios de impacto Charpy e de tração. Uma trinca longitudinal, ao longo da raiz de um dos dentes, atravessando por completo o corpo do pinhão foi identificada através da análise macrográfica. A análise química indica que o material especificado consiste do aço DIN 18CrNiMo06. A análise micrográfica revelou uma microestrutura martensítica, com a presença de algumas regiões de austenita retida próximo à superfície. A análise fractográfica por MEV revelou a presença de estruturas dendríticas expostas, indicando a presença de defeitos de fundição junto ao sítio de nucleação.

Palavras-chave: Pinhão; Nucleação; Fadiga; Defeitos de fundição.

FAILURE ANALYSIS IN THE Z 18 DASH 9 PINION

Abstract

The present work aimed to investigate the possible causes of failure occurred in a pinion. The work followed the usual methodology employed in failure analysis, including visual analysis of the component, Rockwell B macrohardness, optical microscopy, Charpy impact and tensile tests. A through-thickness longitudinal crack along the root of a tooth was identified by visual analysis. Chemical analysis indicated that the specified material is steel DIN 18CrNiMo06. The micrographic analysis revealed a martensitic microstructure and presence of retained austenite near the surface in some regions. The analysis by Scanning Electron Microscope (SEM) revealed presence of dendritic structures exposed, indicating presence of casting defects near de fatigue nucleation site.

Key-words: Pinion; Nucleation; Fatigue; Defects in casting.

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, Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP). Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schmidt, 13566-590, São Carlos-SP. Jmoreto@sc.usp.br

⁴ PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP). Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schmidt, 13566-590, São Carlos-SP. romemuri@sc.usp.br

⁵ Técnico de Processo do Departamento de Gestão Estratégica de Insumos da CVRD, DIPE - Engenharia de Materiais, Prédio Oficina Elétrica, Térreo, Av. Dante Michelini, 5500, Ponta de Tubarão, 29090-900, Vitória-ES. jael.moutinho@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 - Materials Institute of Brazil. Rua Paulino Botelho de Abreu Sampaio, 881, Jd. Bethânia, 13561-060, São Carlos-SP. milan@mib.eng.br



1 INTRODUÇÃO

Este artigo trata da Análise de Falhas do pinhão Z 18 dash 9. A metodologia de Análise do Tipo e Efeito de Falha, conhecida como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), é uma metodologia que objetiva avaliar e minimizar riscos por meio da análise das possíveis falhas (determinação da causa, efeito e risco de cada tipo de falha) e implantação de ações para aumentar a confiabilidade.

O principal objetivo da análise de falhas é evitar novas falhas. A investigação deve determinar as causas básicas da falha e essa informação deve ser utilizada para permitir a introdução de ações corretivas e/ou preventivas que impeçam a recorrência do problema.

Esta dimensão da qualidade, a confiabilidade, tem se tornado cada vez mais importante para os consumidores, pois, a falha de um produto, mesmo que prontamente reparada pelo serviço de assistência técnica e totalmente coberta por termos de garantia, causa, no mínimo, uma insatisfação ao consumidor ao privá-lo do uso do produto por determinado tempo. Além disso, cada vez mais são lançados produtos em que determinados tipos de falhas podem ter conseqüências drásticas para o consumidor.

A função do componente ou do equipamento deve ser considerada na análise, uma vez que conceituamos falha como a ocasião em que o componente ou equipamento não é mais capaz de executar a sua função com segurança. Analisar uma falha é interpretar as características de um sistema ou componente deteriorado para determinar porque ele não mais executa sua função com segurança.

Uma análise de falhas que não serve de subsídio para um conjunto de ações corretivas tem utilidade nula. Por outro lado, se não for possível determinar as causas físicas da falha não será possível introduzir melhorias no sistema.

O material especificado para o pinhão, consiste de um aço DIN 18CrNiMo06 (18H-N-M), forjado plano ou em matriz fechada. Após a retífica, a camada cementada deve ter uma profundidade entre 1,38 mm e 1,85 mm, uniforme em todo o contorno.

Os tratamentos termoquímicos e térmicos consistem das seguintes etapas: cementação, seguido de têmpera e revenimento para dureza entre 55 HRC e 60 HRC nos dentes e dureza de 38 HRC a 42 HRC no núcleo (furo e face lateral). Após o *shot-peening* (jateamento de granalhas), as superfícies de contato dos dentes são retificadas.

As propriedades mecânicas foram especificadas pela norma ASTM A723M-02, classe 4, consistindo de valores mínimos de 1205 MPa para o limite de resistência à tração, 1.105 MPa para o limite de escoamento, 12% para o alongamento total e 35% para a redução de área. O valor mínimo de energia de impacto Charpy é de 27J, para média de 3 corpos de prova, com valor mínimo de 20J para um corpo de prova, a 4,5°C (máximo).

2 EXPERIMENTAL

Foi realizada uma inspeção visual do componente (limpeza, registro fotográfico e identificação dos aspectos de falha). A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica por centelhamento. 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%. Foram efetuados ensaios de microdureza na escala Vickers com uma carga de

1.000 gf, penetrador piramidal de diamante. Ensaios de impacto Charpy tipo A foram realizados de acordo com a norma ASTM E-23⁽¹⁾ em uma máquina Time JB 300, martelo de 300J à temperatura de 0°C. Os 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), $L_0 = 4D = 25\text{mm}$ de acordo com a norma ASTM A370.⁽²⁾ As fractografias foram reveladas via microscopia eletrônica de varredura.

3 RESULTADOS

3.1 Análise Macrográfica

Conforme se pode observar na Figura 1, o pinhão apresenta um trinca longitudinal, ao longo da raiz de um dos dentes, atravessando por completo o corpo do pinhão. Não foram observadas marcas de *pitting* ou outras marcas de dano significativo sobre a superfície dos dentes ou sobre o corpo da engrenagem.

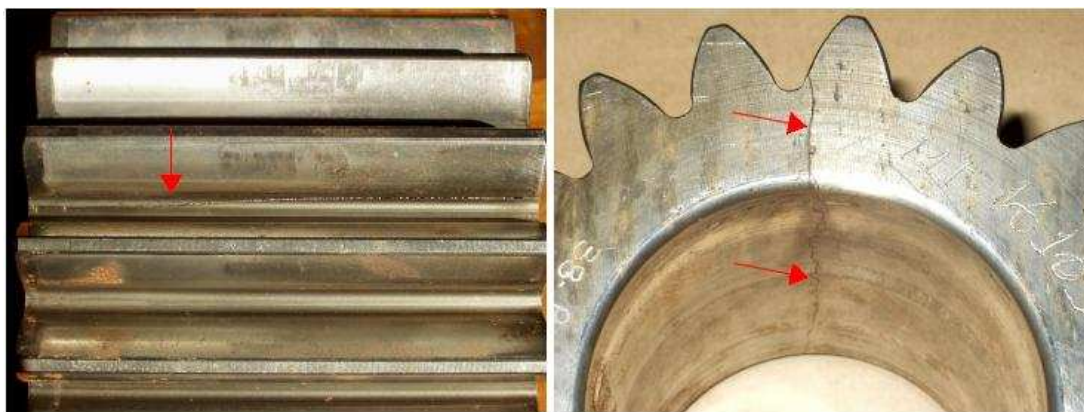


Figura 1. Detalhes da trinca (setas) no pinhão.

Após o seccionamento do pinhão, foi possível observar que a superfície de fratura (Figura 2a) se encontrava impregnada de graxa de lubrificação, infiltrada durante a operação do equipamento. Após a limpeza, Figura 2b, observa-se claramente o sítio de nucleação da trinca, próximo a uma das laterais do pinhão, junto à raiz do dente, e diversas “marcas de praia” irradiando a partir do ponto de nucleação. As “marcas de praia” são uma das características marcantes do processo de propagação de trinca por fadiga, formando-se devido a paradas momentâneas da trinca devido a interrupções da aplicação de carga. À direita da fratura, observa-se a região de fratura rápida catastrófica.

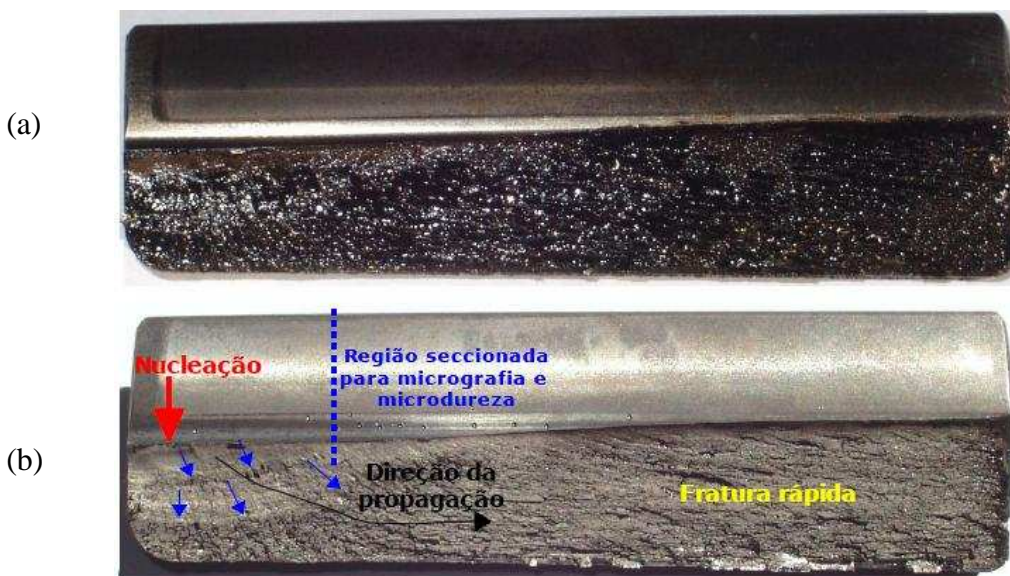


Figura 2. Superfície de fratura do pinhão: (a) antes da limpeza e (b) após a limpeza.

3.2 Análise química

O desenho do pinhão indica que o material especificado consiste do aço DIN 18CrNiMo06, entretanto, tal especificação aparentemente é imprecisa. O mais adequado seria considerar o aço DIN 18CrNiMo7-6 ou DIN 17CrNiMo6. Os resultados de análise química são apresentados na Tabela 1. Considerando-se as incertezas de medição, o material apresenta composição química dentro dos limites impostos para o aço DIN 18CrNiMo7-6, exceto pelo teor de S que se encontra acima do máximo especificado.

Tabela 1. Análise química (% em peso)

| Amostra | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | Al | Fe |
|---------------------|---------------|-------------|---------------|--------------|--------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-----|
| 09-0167 | 0,17 | 0,27 | 0,57 | 0,006 | 0,022 | 1,82 | 1,38 | 0,25 | 0,05 | 0,02 | Bal |
| DIN 18 CrNiMo7-6 | 0,15- 0,21 | 0,40 Máx | 0,50- 0,90 | 0,025 Máx | 0,015 Máx | 1,50- 1,80 | 1,40 - 1,70 | 0,25 - 0,35 | 0,30 Máx | 0,05 Máx | Bal |

3.3 Análise Micrográfica Ótica

A análise micrográfica ótica (Figura 3) mostra uma microestrutura martensítica, com a presença de algumas regiões de austenita retida (regiões brancas), próximo à superfície. A camada cementada apresenta espessura uniforme ao longo da seção do dente. A presença excessiva de austenita retida pode ser prejudicial às propriedades do material, uma vez que sob carregamento, ela tende a se transformar em martensita não-revenida pelo mecanismo de transformação induzida por plasticidade. A martensita não-revenida é extremamente dura e frágil, podendo originar trincas no material. O núcleo do dente apresenta uma microestrutura dendrítica de martensita revenida (regiões claras) e bainita grosseira (regiões escuras). 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 adequado, formam-se bandas

microestruturais com composições químicas localmente diferentes, afetando a temperabilidade do material.

Consequentemente, as regiões mais pobres em elementos de liga (dendritas) têm temperabilidade mais baixa, formando bainita grosseira e/ou ferrita Widmanstätten, e, portanto com menor dureza. As regiões mais ricas em soluto, incluindo-se impurezas, possuem temperabilidade mais alta, formando microestruturas mais duras, compostas de bainita e/ou martensita.

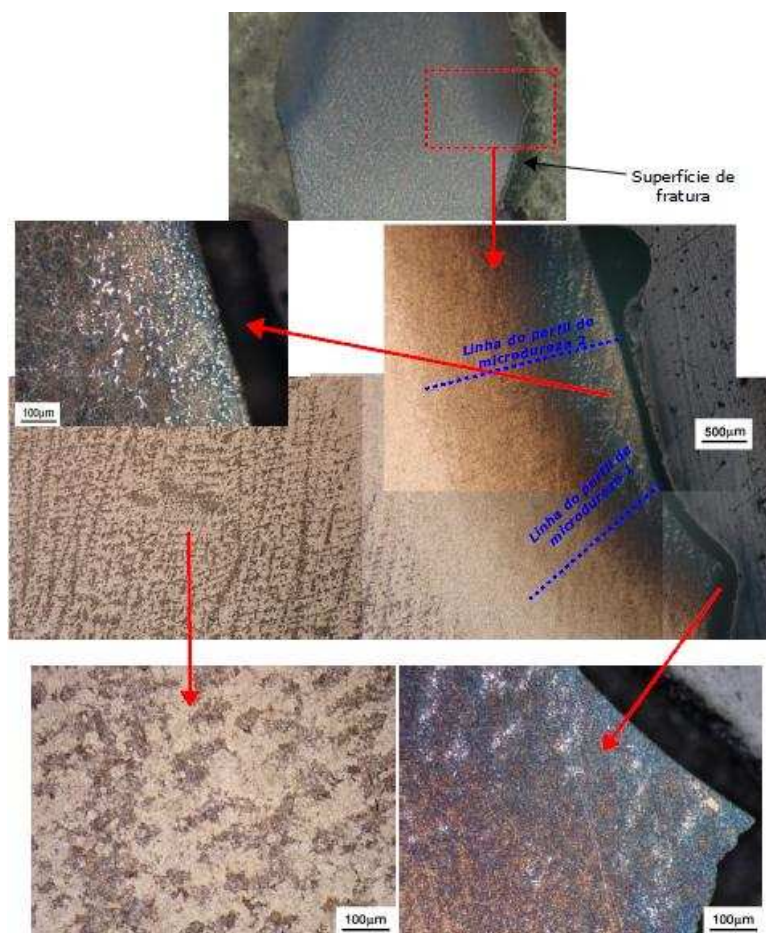


Figura 3. Micrografia óptica da amostra 09-0167.

3.3 Dureza e Perfil de Microdureza

Os resultados de dureza são apresentados na Tabela 2. A lateral do pinhão apresenta dureza elevada, com média acima de 55HRC, e, portanto acima do valor especificado em desenho, que recomenda que toda a camada cementada da lateral e do furo cônico seja removida. A dureza média de núcleo, medida no corpo de prova de impacto 09-0167-004, foi de 34,8 HRC, e, portanto abaixo do valor mínimo especificado.



Tabela 2 - Análise de dureza

| Amostra 09-0167 | Medidas (HRC) | | | | | Média (HRC) | Especificado (HRC) |
|------------------------|---------------|----|----|----|----|-------------|--------------------|
| Lateral do pinhão | 55 | 54 | 56 | 58 | 54 | 55,4 | 38-42 |
| Núcleo (cp de impacto) | 34 | 35 | 34 | 35 | 36 | 34,8 | |

Os perfis de microdureza medidos a partir da superfície do dente, próximo à região de fratura (perfil 1) e mais ao alto, no flanco do dente (perfil 2), são apresentados na Figura 4.

A profundidade medida da camada tratada (Eht) é de 1,25 mm para a região próxima à fratura e de 1,55 mm no flanco do dente. De acordo com a norma DIN 50190-2, o valor de Eht corresponde à profundidade onde a dureza de 550HV1000 (52,3 HRC) é atingida.

O valor obtido para a região próxima à fratura, portanto, está um pouco abaixo da faixa especificada no desenho do pinhão, que impõe uma profundidade de camada cementada entre 1,38mm e 1,85mm após a retífica. Entretanto, no flanco do dente, a profundidade de camada está dentro dos valores especificados.

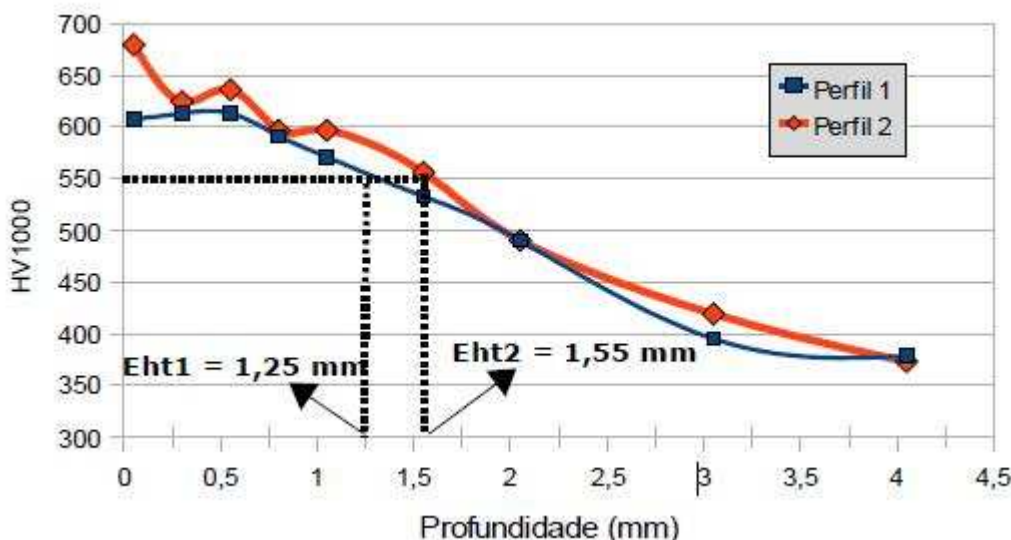


Figura 4. Perfis de microdureza nas proximidades da fratura.

3.4 Ensaios de Tração

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de tração. Os valores de resistência mecânica estão abaixo do especificado pelo desenho do pinhão.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de tração

| Corpo de prova | σ_e (MPa) | σ_r (MPa) | A (%) | RA (%) |
|---------------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|
| 09-0167-001 | 856,7 | 1149,8 | 17,5 | 63,2 |
| 09-0167-002 | 889,2 | 1152,3 | 16,0 | 61,7 |
| 09-0167-003 | 867,3 | 1148,4 | 18,6 | 66,3 |
| Média | 871,1 | 1150,2 | 17,4 | 63,7 |
| Especificado (min) | 1105 | 1205 | 12 | 35 |

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

3.5 Ensaio de Impacto

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de impacto. Os valores obtidos atendem a especificação do desenho do pinhão.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de impacto a 0°C

| Amostra | Energia(J) | | |
|--------------------|------------|-------|--------------------------------------|
| | Valores | Média | Especificado (<4,5°C) |
| 09-0167-004 | 44 | 43,8 | > 27J (média 3 cp's) > 20 J (1cp) |
| 09-0167-005 | 46 | | |
| 09-0167-006 | 42 | | |
| 09-0167-007 | 43 | | |

3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (Mev)

A análise fractográfica por microscopia eletrônica de varredura mostra a presença de estruturas dendríticas expostas, indicando a presença de defeitos de fundição (regiões mais escuras) junto ao sítio de nucleação. Tais defeitos atuam como fortes concentradores de tensão, sendo os principais responsáveis pela nucleação da trinca de fadiga no pinhão.

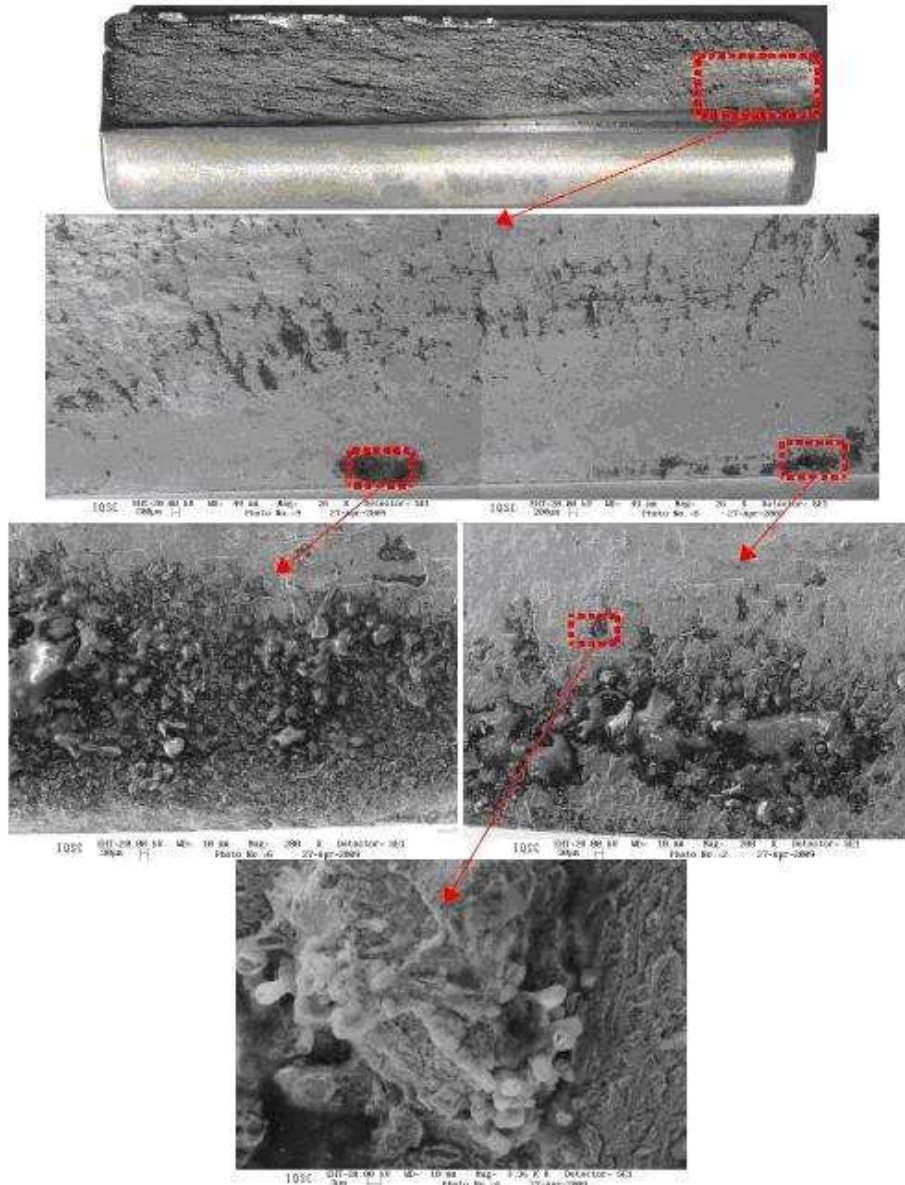


Figura 5. Análise fractográfica.

4 CONCLUSÕES

Uma trinca longitudinal, ao longo da raiz de um dos dentes, atravessando por completo o corpo do pinhão foi identificada através da análise macrográfica. A análise química indica que o material especificado consiste do aço DIN 18CrNiMo06 e/ou DIN 17CrNiMo6. A análise micrográfica revelou uma microestrutura martensítica, com a presença de algumas regiões de austenita retida próximo à superfície. A análise fractográfica por MEV revelou a presença de estruturas dendríticas expostas, indicando a presença de defeitos de fundição junto ao sítio de nucleação.

5 RECOMENDAÇÕES

- Minimizar a presença de defeitos de fundição;

- Reavaliar os processos de tratamentos térmico e termomecânico para se obter uma maior homogeneização química e microestrutural do material.

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*”.