



ANÁLISE DE FRATURA DE DENTE DE ENGRENAGEM UTILIZADA EM SISTEMA DE REDUÇÃO DE MÁQUINA DE ESCAVAÇÃO DE MINA

Reis, M, M, S.;⁽¹⁾ Lima. E, V.;⁽²⁾ Santos, L, L.;⁽³⁾ Santos, E.G.;⁽⁴⁾ Alves, R.S.;⁽⁵⁾ Griza, S⁽⁶⁾.

1 – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS). São Cristóvão, SE

2 - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, CEP 49100-000, SE.
eduardalima98@academico.ufs.br

3 – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS). São Cristóvão, SE

4 – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE.

5 - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE.

6 - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE.

RESUMO:

A exploração e beneficiamento de minérios é uma das principais bases da economia no Brasil, haja vista a riqueza de minérios existe em solo brasileiro, exigindo componentes e equipamentos de alta resistência e robustez, para exploração segura e eficaz no interior das minas. Porém, em muitos casos ocorrem falhas em equipamentos e componentes mecânicos por conta das solicitações mecânicas, desgastes e corrosão em serviço. Dentre os equipamentos utilizados está o minerador, bastante utilizado em escavações. O minerador possui sistemas de redução por engrenagens, que sofrem desgaste durante sua vida útil. Este estudo trata de uma análise de falha em um dente de engrenagem rompido durante serviço. A partir das análises, foi verificado que a peça sofreu reparos a partir de uma deposição de solda, acarretando em mudança microestrutural que por sua vez, diminuiu a resistência à fadiga produzindo diversos pontos de nucleação, e gerando a falha. O material apresentou microestrutura dendrítica, austenita retida na camada cementada com profundidade de 2 mm com dureza máxima de 662 HV e núcleo com média de 435 HV.

Palavras-chave: fadiga, microestrutura, cementação, austenita retida.

INTRODUÇÃO

Processos de exploração de minérios e o beneficiamento de matéria-prima são etapas essenciais na cadeia produtiva de vários setores industriais. A exploração de minérios envolve a busca e identificação de depósitos minerais economicamente viáveis, o que requer estudos geológicos detalhados, mapeamento e perfuração para determinar a quantidade e qualidade dos minérios disponíveis. Após a identificação, a mineração é iniciada para extrair o minério bruto da terra ⁽¹⁾.

O beneficiamento de matéria-prima é a etapa subsequente, onde o minério extraído é submetido a uma série de processos que visam separar os minerais valiosos dos resíduos e impurezas. Isso pode incluir a trituração, moagem, flotação, separação magnética, entre outros métodos ⁽¹⁾. O objetivo é refinar e purificar o minério, transformando-o em uma matéria-prima de alta qualidade que pode ser utilizada na fabricação de produtos ou no desenvolvimento de infraestrutura. Essas etapas são cruciais para garantir que os materiais necessários para a construção civil, fabricação de máquinas, eletrônicos e outros produtos essenciais estejam disponíveis em quantidade e qualidade suficientes para atender à demanda industrial ⁽¹⁾.

A exploração mineral inicia-se com a prospecção para identificar depósitos de minerais valiosos, seguida pela extração, que pode ser realizada por métodos a céu aberto ou subterrâneos, dependendo da localização e características do depósito ⁽¹⁾. Os fragmentos de minérios extraídos são então transportados para as instalações de beneficiamento, onde passam por processos de britagem, moagem e separação para obter um produto com valor agregado ⁽¹⁾. A eficiência das operações de extração e beneficiamento depende diretamente da robustez dos equipamentos utilizados, que precisam suportar as condições adversas e o grande desgaste impostos pelas atividades de mineração. Além da resistência geral dos equipamentos, a durabilidade dos componentes individuais, como as engrenagens, é crítica para garantir a continuidade e a segurança das operações ⁽²⁾.

As engrenagens são componentes essenciais em diversos tipos de maquinário de mineração, desempenhando um papel fundamental na transmissão de movimento e força. Entretanto, as engrenagens estão sujeitas a um desgaste intenso devido às cargas elevadas e ao uso contínuo durante o processo de mineração ⁽²⁾. Esse desgaste pode resultar em falhas significativas, frequentemente associadas ao fenômeno de fadiga de contato. A fadiga de contato é uma forma de deterioração que ocorre quando as superfícies de engrenagens são repetidamente submetidas a tensões cíclicas, levando à formação de trincas e eventual fragmentação do material.

O processo de fadiga de contato envolve a geração de microfissuras nas superfícies de engrenagens, que se desenvolvem e se propagam devido a tensão cíclica aplicada. Essas fissuras podem comprometer a integridade da peça e resultar em falhas catastróficas ⁽²⁾.

A análise detalhada desse fenômeno é essencial para entender as causas das falhas e melhorar a confiabilidade dos componentes de engenharia. Diante disso, o presente trabalho teve o intuito de analisar a causa da falha em um dente de engrenagem que sofreu ruptura durante o serviço. Através de inspeções visuais e caracterização microestrutural, foi possível concluir que a falha da engrenagem foi resultante de um processo de fadiga, associado a alterações microestruturais na superfície da peça ⁽³⁾. As alterações foram promovidas em um reparo de solda prévio.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho utilizou um estereomicroscópio Zeiss Stemi 2000C para a análise macroscópica do dente de engrenagem. As técnicas de análise incluíram cortes metalográficos, polimento com pasta de diamante de 1 µm e ataque químico com Nital 2% (2ml de ácido nítrico e 98 ml de álcool) e água régia (3:1 ácido clorídrico e ácido nítrico) para a metalografia da região metalizada (3:1 ácido clorídrico e ácido nítrico). As medições de microdureza foram realizadas utilizando o método Vickers, através do microdurômetro (HVS-1000A). A análise de composição química foi realizada através de cinco queimas no núcleo da peça, utilizando um espectrômetro de emissão óptica (Oxford Foundry Master Xpert).

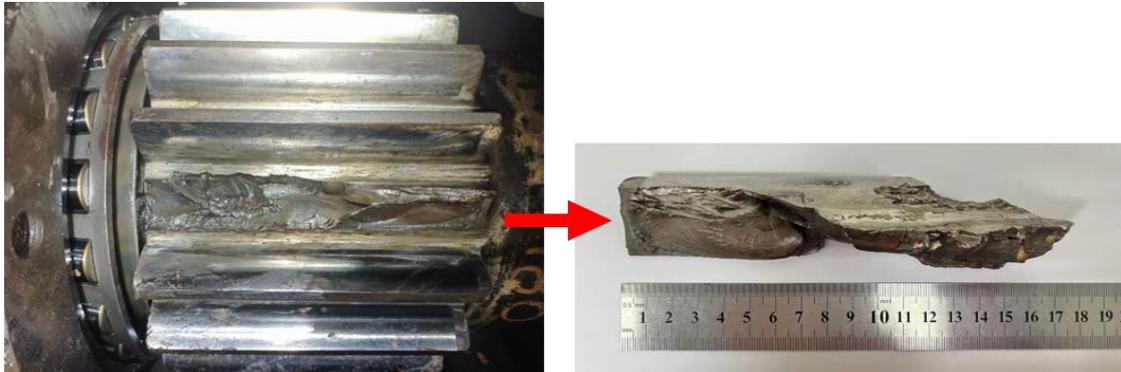
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de falha do dente de engrenagem indicam que a fratura ocorreu por fadiga, com nucleação observada em diferentes planos. O objeto de análise é um dente de uma engrenagem que sofreu ruptura durante o serviço. Este fragmento foi submetido a diversas inspeções visuais e técnicas de caracterização para entender as causas subjacentes da falha.

A engrenagem, cujo fragmento rompeu durante o serviço, faz parte de um conjunto de engrenamento do redutor de um minerador, este redutor é responsável

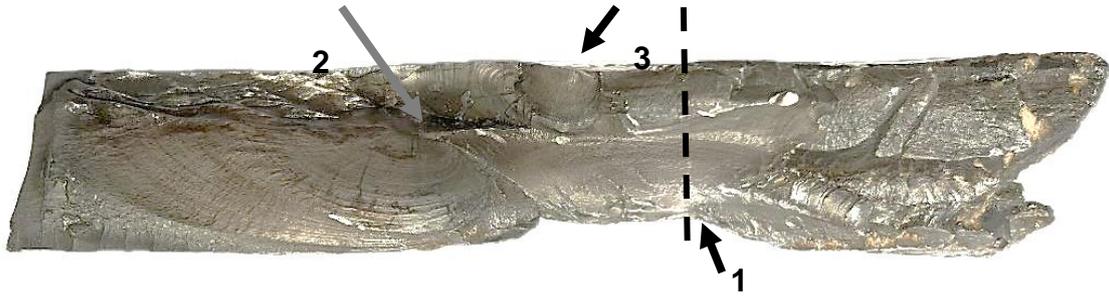
por acionar os rotores que cortam a rocha durante a mineração. A Figura 1, apresenta a engrenagem rompida e o fragmento analisado, em destaque.

Figura 1: Engrenagem fraturada durante serviço (à esquerda). Fragmento rompido (à direita).



A superfície de fratura do fragmento revela múltiplos planos de fadiga, com características típicas de um processo de nucleação e propagação de trincas em diferentes direções. A análise detalhada da superfície mostra a presença de marcas de praia e marcas de catraca, indicando múltiplos eventos de iniciação de trinca que convergiram para uma zona de fratura principal. Essa evidência está de acordo com o fato que o dente de engrenagem estava sujeito a cargas cíclicas variáveis, que levaram ao crescimento das trincas até o ponto de falha catastrófica. O segmento do dente rompido revela três diferentes planos de fratura por fadiga. O corte metalográfico, realizado em um plano transversal ao dente (representado pela linha tracejada), interceptou a Fratura 1, com o ponto de nucleação indicado pela seta. A Fratura 2, cuja nucleação é indicada pela seta cinza, ocorreu de forma subsuperficial, apresentada na Figura 2.

Figura 2. Segmento do dente rompido indicando três dos diferentes planos de fratura por fadiga. O corte metalográfico em plano transversal ao dente (linha tracejada) passou pela Fratura 1, cujo local de nucleação é indicado pela seta. A nucleação da Fratura 2 (seta cinza) foi subsuperficial.



As superfícies dos planos de fratura podem ser vistas em maior detalhe. As Figuras 3 apresentam em maior destaque as marcas de praia características do processo de propagação da trinca durante a fadiga, apresentado nas Figuras 3 a 5.

Figura 3 – Região da Fratura 1 da Figura 2. local de nucleação em maior ampliação.

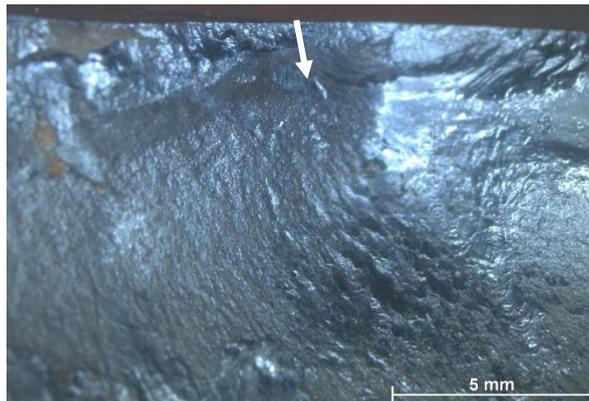
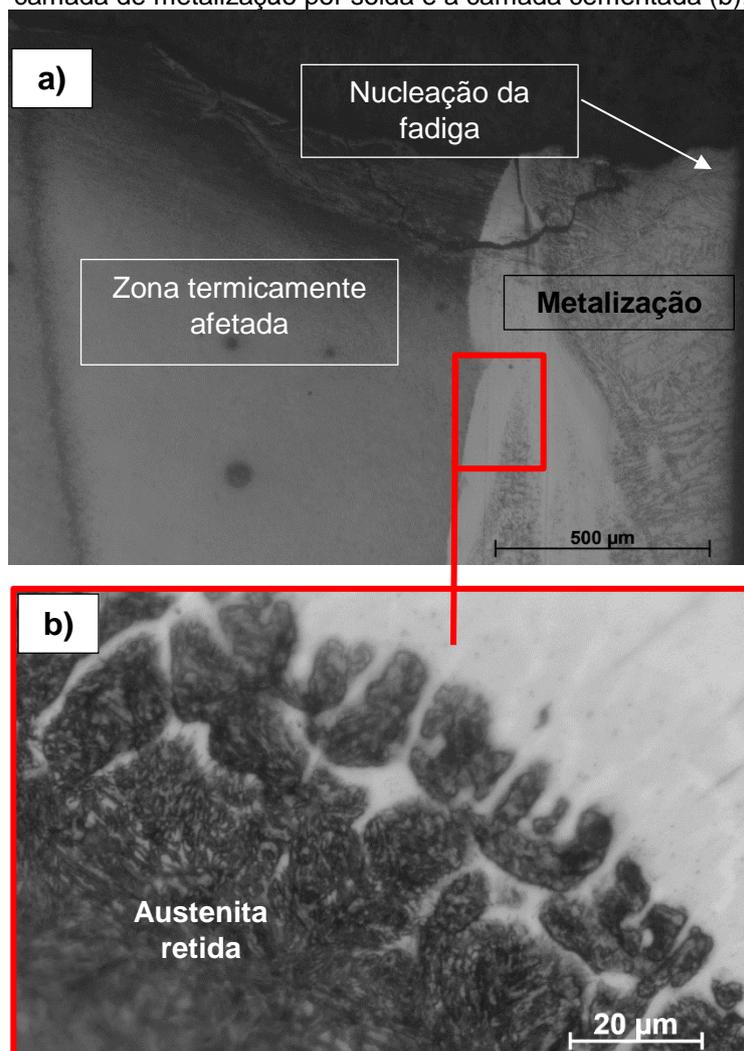


Figura 4 – Superfície de Fratura 2 e 3 da Figura 2. A seta indica a nucleação subsuperficial da trinca. As marcas de praia em formato elíptico convergindo para o local da nucleação são características da propagação de trinca por fadiga.



A nucleação de fadiga aconteceu em ambos os flancos do dente, além de terem sido identificados locais de nucleação subsuperficial. Foi realizado o corte no plano de Fratura "1", para análise metalográfica, e após o ataque químico foi observada a presença de martensita na camada cementada, o que é típico de processos de tratamento térmico para aumentar a dureza superficial. Também foi notado que a engrenagem foi submetida a um processo de deposição metálica adicional, apresentando zona de alteração microestrutural afetada pelo calor. Para revelação da microestrutura da região de solda foi utilizado o ataque adicional utilizando água régia, reagente indicado para ligas contendo elevado teor de cromo e/ou níquel. Logo abaixo de uma dessas soldas houve a formação de austenita retida na camada cementada (Figura 5).

Figura 5 – Regiões de transformação microestrutural encontradas no local da nucleação da Fratura 1 (a). Nota-se a formação de trincas secundárias a partir da camada. Região de interface entre a camada de metalização por solda e a camada cementada (b).



Austenita retida é uma fase metaestável do aço que pode permanecer após o tratamento térmico, especialmente em processos de cementação, onde a peça é aquecida e rapidamente resfriada para formar martensita. Durante o resfriamento, nem toda a austenita se transforma em martensita, resultando em pequenas quantidades de austenita retida. Essa fase pode influenciar negativamente as propriedades mecânicas, como a dureza e a resistência ao desgaste, e, sob certas condições, pode se transformar em martensita durante o uso, levando à distorção dimensional ou à formação de trincas ⁽⁴⁾.

A microestrutura da região de solda apresenta formação de solidificação direcional dendrítica (Figura 6). As micrografias referentes à cada microestrutura estão apresentadas nas Figuras 7 a 10. A zona de deposição de solda é irregular, assim como pode ser visto pelas metalografias. Uma macrografia do segmento do dente submetido a ataque de nital em seus flancos mostra os cordões de deposição de solda identificados (Figura 11).

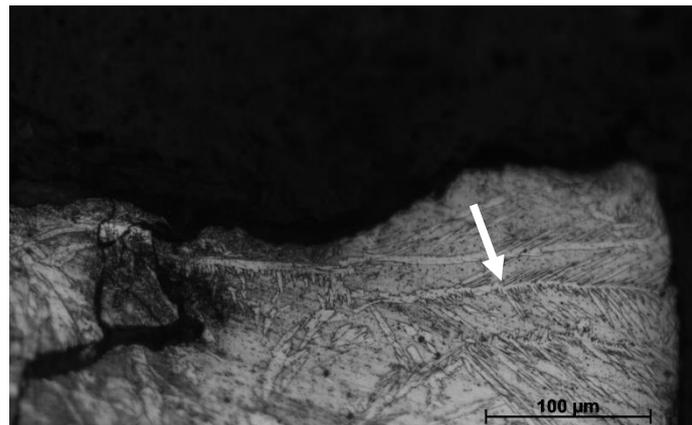


Figura 6 – Região de nucleação da trinca após o ataque químico com água régia na região metalizada por deposição de solda. Seta branca indica a direção preferencial de solidificação da dendrita.

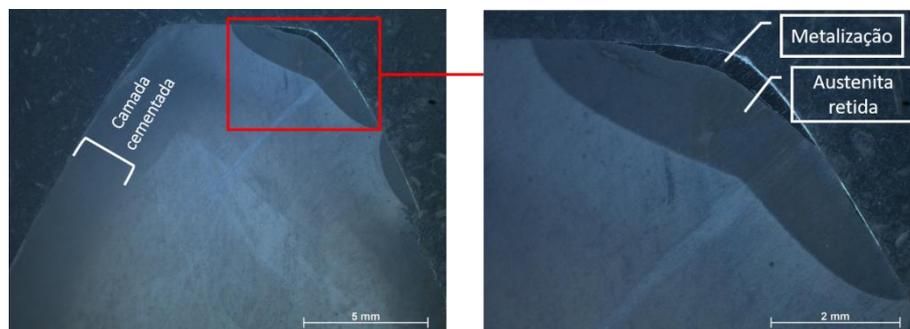


Figura 7 – Plano transversal da região junto ao topo do dente de engrenagem após o ataque químico, apresentando as regiões de mudança microestrutural. Região da camada cementada em destaque (à esquerda) e regiões intermitentes contendo porção proveniente da metalização (deposição por solda), zona afetada pelo calor e austenita retida (à direita). A austenita retida é identificada em maior ampliação nas próximas imagens.

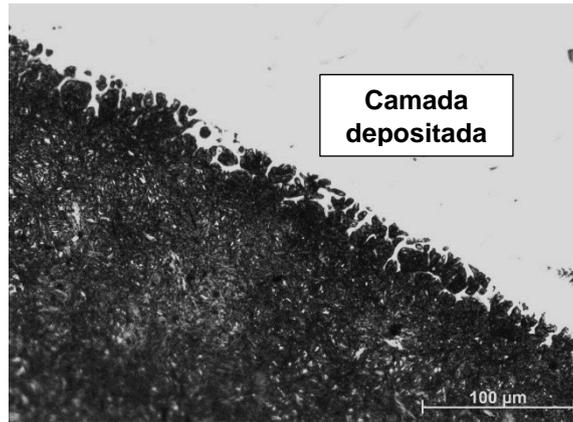


Figura 8 – Presença de austenita retida (fases brancas entre placas de martensita) na região de cementação, em interface com a região de camada de deposição metálica por solda.

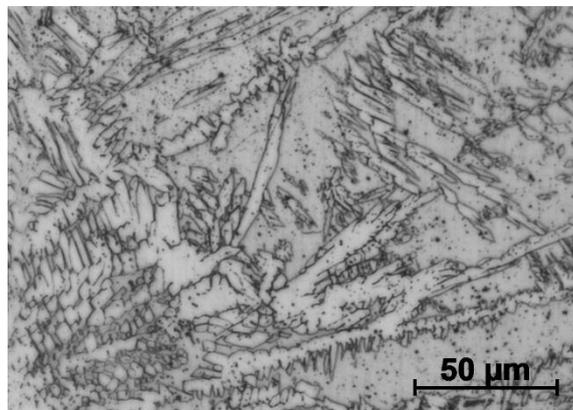


Figura 9 – Microestrutura da região metalizada apresentando grãos colunares dendríticos.

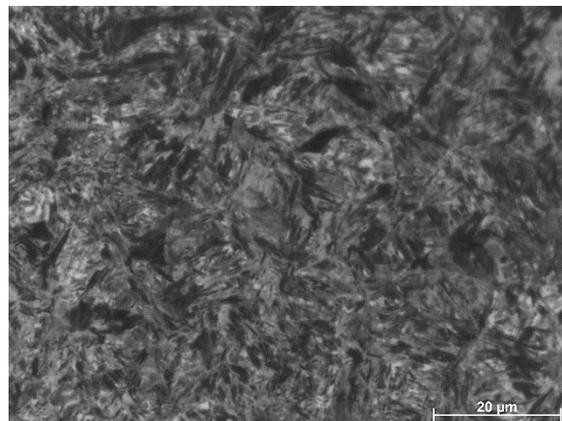


Figura 10 – Microestrutura da camada cementada apresentando placas de martensita.

Figura 11. Segmento do dente após ataque de nital em seus flancos, indicando que a camada depositada por solda não foi atacada pelo reagente. O corte metalográfico foi feito no plano da lateral do dente (setas). Notam-se diversas trincas secundária nesta região da deposição



A microestrutura do núcleo do dente da engrenagem é constituída por martensita revenida (Figura 12).

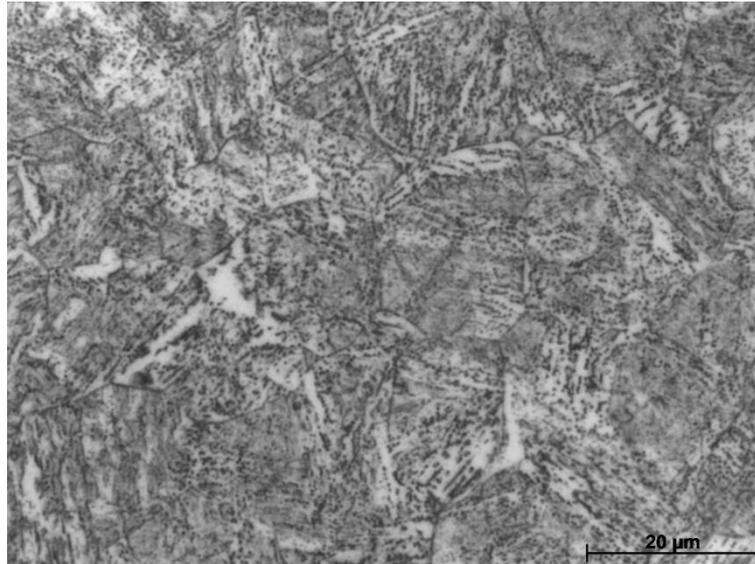


Figura 12 – Microestrutura do núcleo da peça contendo martensita revenida.

O perfil de microdureza está apresentado na Figura 13 e Tabela 1, partindo da superfície do dente (na altura do diâmetro primitivo) e seguindo perpendicularmente ao núcleo, com dureza máxima junto a superfície de 662 HV (58 HRC) até atingir o núcleo, o qual possui microdureza média de 435 HV. A profundidade de camada de cementação é de 2 mm, para dureza limite de camada de 550 HV. A região de deposição metálica apresentou microdureza média de 242 HV (desvio padrão de 2).

Figura 14. Perfil de microdureza partindo da superfície do dente até o núcleo da peça. A profundidade de camada de cementação é de 2 mm.

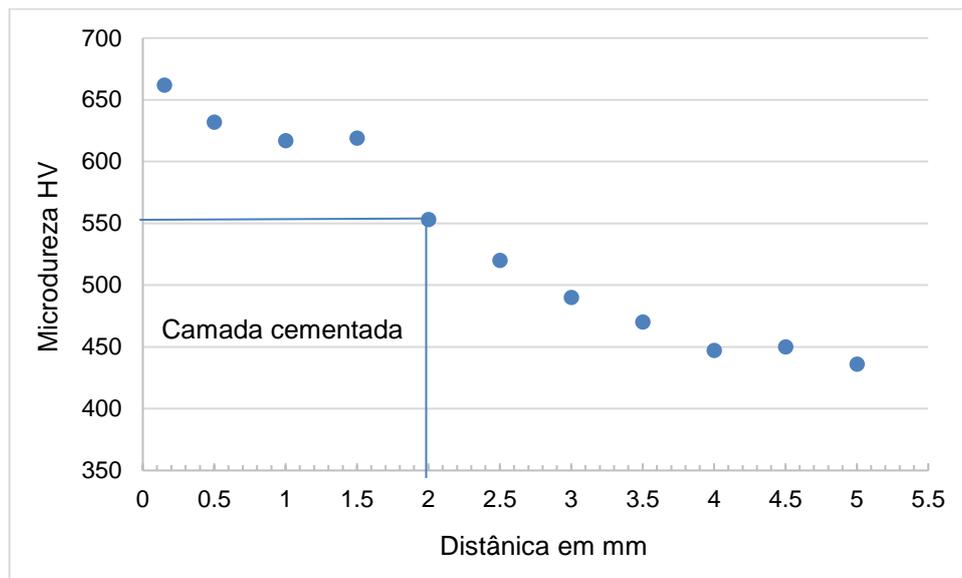


Tabela 1 – Medições de microdureza Vickers.

Distância (mm)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
HV1	662	632	617	619	553	520	490	470	447	450	436

A análise química do dente da engrenagem, representada na Tabela 2, indica a composição dos elementos de liga em comparação com os limites especificados para o aço SAE 4820, material comumente utilizado na fabricação de engrenagens devido à sua boa temperabilidade e resistência ao desgaste. A análise mostra que os teores de carbono (C), manganês (Mn), silício (Si), fósforo (P), enxofre (S) e molibdênio (Mo) estão dentro dos limites especificados para o SAE 4820. No entanto, o teor de níquel (Ni) está ligeiramente acima da faixa especificada, o que pode ter um impacto positivo na tenacidade, mas também pode alterar o comportamento da austenita retida, afetando a resistência ao desgaste e a durabilidade da engrenagem (5).

Tabela 2 – Teor dos elementos de liga que constituem o dente (% em peso).

Elementos	C	Mn	Ni	Si	P	S	Mo
Amostra	0,23	0,64	3,80	0,28	0,01	0,01	0,24
SAE 4820	0,18 – 0,23	0,50– 0,70	3,25 – 3,75	0,20 – 0,30	0,04	0,04	0,20 – 0,30

CONCLUSÕES

A análise do dente de engrenagem revelou que a fratura ocorreu por fadiga, com nucleação em diferentes planos, tanto nos flancos quanto em regiões subsuperficiais. A deposição metálica por solda foi identificada como o fator contribuinte para a nucleação da fadiga, devido à sua baixa dureza em comparação com a camada cementada. As medições de microdureza e a microestrutura observada confirmam a necessidade de otimização dos processos de fabricação para melhorar a resistência e a durabilidade da peça.

REFERÊNCIAS

- (1). KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. *Introduction to Ceramics*. New York: John Wiley & Sons, 1976; RÜHLE, M.; CLAUSSEN, N.; HEUER, A. H. Microstructural studies of Y_2O_3 -containing tetragonal polycrystals (Y-TZP). In: CLAUSSEN, N.; RÜHLE, M.; HEUER, A. H. (Eds.) *Advances in Ceramics v. 12: Science and Technology of Zirconia II*. Columbus, OH: The American Ceramic Society, 1984, p. 352-370.
- (2). DEKSNYS, T. P.; MENEZES, R. R.; FAGURY-NETO, E.; KIMINAMI, R. H. G. A. Synthesizing Al_2O_3/SiC in a microwave oven: a study of process parameters. *Ceramics International*, v. 33, n. 1, p. 67-71, 2007.
- (3). FERREIRA, L. L. H. C.; BALDO, J. B.; RODRIGUES, J. A.; BERNARDI, L. T.; BRESSIANI, J. C. Refratários do sistema $MgO-TiO_2-CaO$ para aplicação em zona de queima de fornos de cimento. In: 51 CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, Salvador, BA, 2007. Anais... São Paulo: ABC, 2007, p. 1-12. Ref. 7-15. Disponível em: http://www.abceram.org.br/51cbc/51cbc_inicial.htm. Acesso em: 12 de dezembro de 2016.
- (4). TAYER, P D N. Avaliação de fadiga de contato em materiais para engrenagens utilizando ensaios de rolamento de esfera sobre disco. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- (5). NEVES, F. F. Estudo da fragilidade ao revenimento em aços 9% ni baixo carbono por técnicas destrutivas e não destrutivas. 2023. Tese de Doutorado. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

ANALYSIS OF GEAR TOOTH FRACTURE USED IN REDUCTION SYSTEM IN MINE EXCAVATION MACHINE, IN THE EXPLORATION OF NATURAL RESOURCES

ABSTRACT

The exploration and processing of minerals is one of the main bases of the economy in Brazil, given the wealth of minerals that exist in Brazilian soil. In view of this, this practice increasingly requires high-strength and robust components and equipment for safe and effective exploration inside mines. However, in many cases, equipment and mechanical components fail due to the high impact generated during the activities. Among the equipment used is the miner, widely used in excavations. The interior of the miner is composed of several parts that together contribute to the functionality of the machinery, such as gears, for example. This type of part undergoes a lot of wear during its useful life and requires a lot of attention during its manufacture. This study is an analysis of a failure in a gear tooth that broke during service. Based on the analyses, it was found that the part underwent repairs from a weld deposition, resulting in a microstructural change that in turn reduced fatigue resistance, producing several nucleation points, damaging and leading to early failure. The material presented a dendritic microstructure, austenite retained in the cemented layer with a depth of 2 mm with a maximum hardness of 662 HV and a core with an average of 435 HV.

Keywords: *fatigue, microstructure, cementation, retained austenite.*