



ANÁLISE DE FALHA DE UM IMPLANTE ORTOPÉDICO FRATURADO POR FADIGA A PARTIR DE MARCAS DE DESGASTE

Barbosa, C.*; Abud, I. C.; Centeno, R. O, Gallo, G. O.; Nascimento, A. M.; Santos, F. C. S. C.

Instituto Nacional de Tecnologia (INT), Avenida Venezuela, 82, Saúde, Rio de Janeiro, RJ, CEP 22.230-001, *cassio.barbosa@int.gov.br .

RESUMO

O aumento do uso de implantes cirúrgicos ortopédicos nas últimas décadas, devido principalmente ao envelhecimento da população e à maior exposição ao risco de acidentes, torna muito importante o estudo do comportamento desses materiais, associado a fatores como a composição química, a microestrutura, fabricação, manuseio, instalação e uso desses dispositivos inseridos no corpo humano. Um estudo microestrutural e fractográfico de análise da falha de um implante cirúrgico ortopédico de aço inoxidável inserido como prótese femoral em uma jovem vítima de acidente, gerou resultados que permitem dizer que, embora o aço inoxidável utilizado na fabricação do implante atenda aos requisitos especificados para composição química e microestrutura, as marcas superficiais observadas, provavelmente resultantes de um processo de usinagem deficiente, ou pelo manuseio/instalação, ou pela utilização inadequada do implante, agiram como concentradores de tensões, que, em condições de carregamento cíclico natural, favoreceram a iniciação da fratura por fadiga que levou à falha.

Palavras-chaves: Aço inoxidável, implante, fratura, fadiga, microscopia.

FAILURE ANALYSIS OF AN ORTHOPEDIC IMPLANT FRACTURED BY FATIGUE FROM WEAR MARKS

ABSTRACT

The increase of surgical orthopedic implants use in the human body in the last decades, due to the population ageing and also higher exposure to the risk of several types of accidents, enhance the importance of study of the performance of these materials in such applications and, consequently, of preponderant factors such as chemical composition, microstructure and characteristics of manufacture, handling and use of these devices that are inserted in the human body. In this work a microstructural and fractographic study on the failure analysis of an orthopedic surgical implant manufactured with stainless steel was inserted as a femoral prosthesis in a young victim of an accident. The results achieved in this investigation allow claiming that, although the stainless steel used in the manufacture of the implant meets the specified requirements for chemical composition and microstructure, the machining marks left on the surface by inadequate machining, or by installation/handling or by inappropriate use of the implant, acted as stress raisers, which, in conditions of natural cyclic loading, favored the initiation of fatigue fracture that led to the material failure.

Keywords: Stainless steel, implant, fracture, fatigue, microscopy.

INTRODUÇÃO

A crescente utilização de implantes cirúrgicos, ortopédicos e dentais, motivada pelo aumento da longevidade da população e pelo aumento da frequência de acidentes de diversos tipos, principalmente de trânsito nas grandes cidades, tem levado a uma necessidade, cada vez maior, de compreender minuciosamente a microestrutura e as propriedades dos materiais usados na fabricação desses implantes, assim como as características do processo de fabricação e da instalação desses dispositivos médicos no corpo humano, principalmente no que se refere ao impacto das características desse implante na qualidade de vida do paciente.

No âmbito deste trabalho, realizou-se uma análise de falha de um implante ortopédico que fraturou por fadiga após somente 3 anos em uso. Na ocasião em que

o implante falhou, a paciente, uma jovem mulher, tinha apenas 33 anos de idade, sofreu um acidente, necessitando de uma prótese femoral.

Para essa análise de falha foram utilizadas as técnicas de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados obtidos permitem dizer que a fratura se iniciou a partir de regiões da superfície do implante de aço inoxidável onde houve severo desgaste por atrito, acarretando nesses locais desgastados a concentração de tensões, que levou à falha por fadiga, evidenciada pela presença de estrias observadas ao MEV.

MATERIAL E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Material recebido para análise no laboratório: Prótese femoral fraturada, conforme mostra a figura 1.

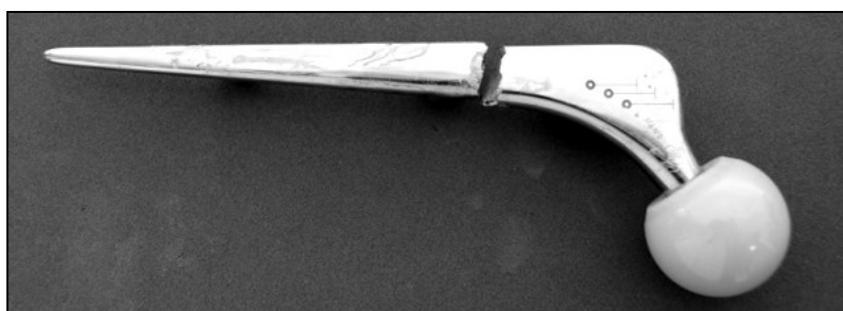


Figura 1. Amostra como recebida.

Esta amostra foi submetida à análise de composição química, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química da amostra (haste femoral).

Elementos	Haste femoral	Especificação da norma NBR ISO 5832-9
Carbono	0,04	0,08 máx.
Silício	0,35	0,75 máx.
Manganês	3,92	2,00 a 4,25
Fósforo	0,019	0,025 máx.
Enxofre	<0,001	0,01 máx.
Nitrogênio	0,42	0,25 a 0,50
Cromo	20,5	19,50 a 22,00
Molibdênio	2,17	2,00 a 3,00
Níquel	9,4	9,00 a 11,00
Cobre	0,09	0,25 máx.
Nióbio	0,29	0,25 a 0,80
Ferro	Restante	Restante

A composição química da amostra encontra-se totalmente dentro dos limites especificados pela norma ABNT NBR ISO 5832-9: 2008 [1].

Amostras retiradas da prótese, porém de locais não muito próximos à superfície de fratura, foram submetidas à análise microestrutural por microscopia ótica. As amostras foram preparadas segundo os critérios estabelecidos na Norma ASTM E 3-11 [2], visando posterior realização dos ensaios metalográficos. As outras normas utilizadas foram: ASTM E 407-07 (2011) [3], ASTM E 112-13 [4] e ASTM E 45-13 [5].

RESULTADOS

MACROGRAFIA

A figura 2 representa o aspecto macrográfico das partes laterais da prótese, evidenciando a presença de danos superficiais pré-existentes: marcas de desgaste, junto à fratura, que poderiam atuar como concentrador de tensões em ambos os lados da prótese.



Figura 2. Macrografia mostrando local desgastado; concentrador de tensões.

MICROESTRUTURA

A figura 3 mostra a microestrutura representativa das diferentes regiões das amostras da haste femoral. Todas apresentam microestrutura austenítica, com variação de tamanho de grão, porém enquadrando-se na norma ABNT NBR ISO 5832-9: 2008.

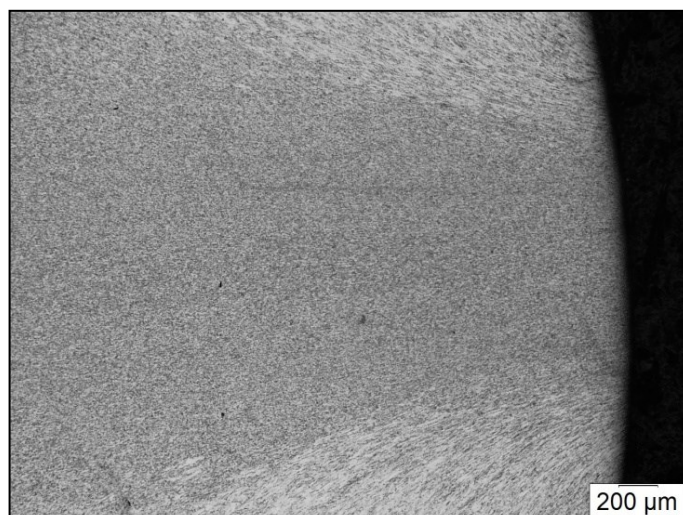


Figura 3. Micrografia indicando a borda com tamanho de grão maior que o centro.
Aumento: 50 X. Ataque: 45 mL HCl, 15 mL HNO₃ e 20 mL de metanol.

TAMANHO DE GRÃO

Pode-se observar que o centro possui tamanho de grão mais fino correspondente a ASTM 10,46 (diâmetro aproximado 9,4 μm) enquanto o tamanho de grão das bordas médio é ASTM 9,22 (15 μm). Deve-se observar que o número ASTM é inversamente proporcional ao diâmetro do grão. Deste modo, ambas as regiões do material estão de acordo com a norma ABNT NBR ISO 5832-9: 2008, que exige que o tamanho de grão seja menor ou igual ao diâmetro correspondente ao número ASTM 5 (63,5 μm).

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE INCLUSÕES

A tabela 2 apresenta os resultados da determinação do teor de inclusões da amostra de aço inoxidável. A tabela 3 mostra os teores máximos permitidos pela norma ABNT NBR ISO 5832-9: 2008. Os resultados obtidos mostram que o material analisado está de acordo com as especificações estabelecidas pela norma citada, pois apresenta teor de inclusões muito baixo.

Tabela 2 – Teor de inclusões da amostra

Tipo de Inclusão	Número de Referencia do Teor de Inclusão da amostra	
	FINA	GROSSA
A – Sulfetos	0,00	0,00
B – Aluminados	0,00	0,00
C – Silicatos	0,00	0,00
D – Óxidos, globular	0,33	0,00

Tabela 3 – Teor máximo de inclusões permitido norma ABNT NBR ISO 5832-9: 2008.

Tipo de Inclusão	Limites de Referencia do Teor de Inclusão da amostra	
	FINA	GROSSA
A – Sulfetos	1,5	1,0
B – Aluminados	1.5	1,0
C – Silicatos	1.5	1,0
D – Óxidos, globular	1.5	1,0

ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

As figuras 4 e 5 mostram aspectos visuais macrográficos da superfície de fratura da haste femoral. A figura 4 apresenta ambas as faces da superfície de fratura,

enquanto a figura 8 apresenta a superfície de fratura na qual foi possível conduzir a análise micrográfica (figuras 6 e 7: MEV), por apresentar-se menos danificada.



Figura 4 – Foto: macrografia das superfícies de fratura. Pode-se observar que a superfície do lado esquerdo da foto está amassada, não permitindo assim uma análise de sua fratura.

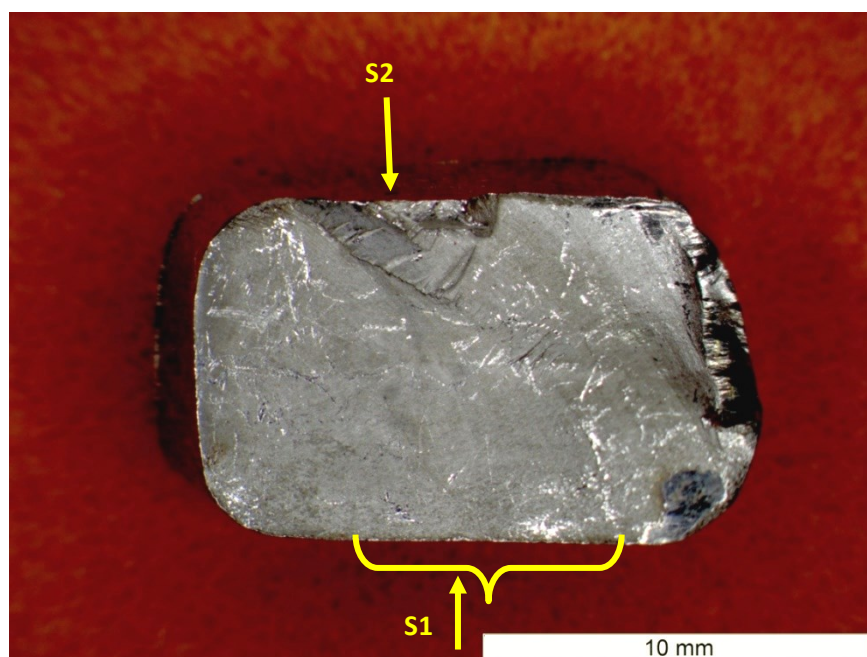


Figura 5 – Foto ampliada da superfície de fratura do lado direito da foto 7. As setas indicam os locais onde foram nucleadas as trincas, que correspondem às regiões danificadas na figura 2.

A figura 6 apresenta um aspecto morfológico da superfície de fratura, evidenciando as chamadas “marcas de praia”, linhas curvas paralelas que sinalizam a ocorrência de fratura por fadiga, mesmo com baixa ampliação.

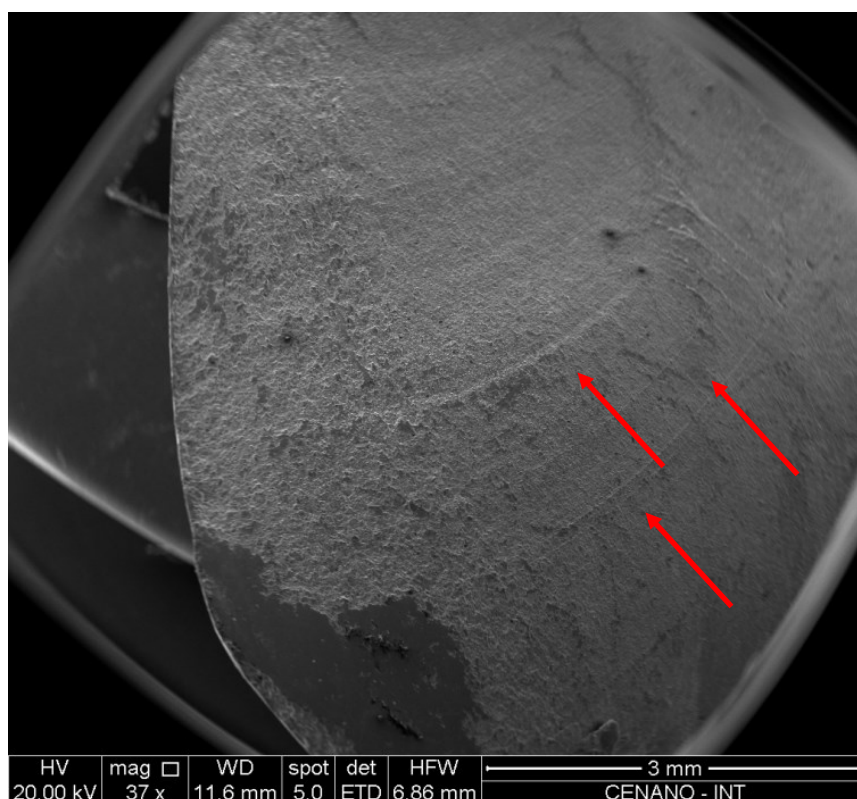


Figura 6 – As setas indicam marcas de praia, características de propagação de trinca por fadiga, correspondente ao início da fratura na região indicada pela seta S1.

MICROMECHANISMOS DE FRATURA

A figura 7 foi obtida próxima à borda da superfície de fratura indicada por S1, mostrando estrias, características de propagação de trinca por fadiga.

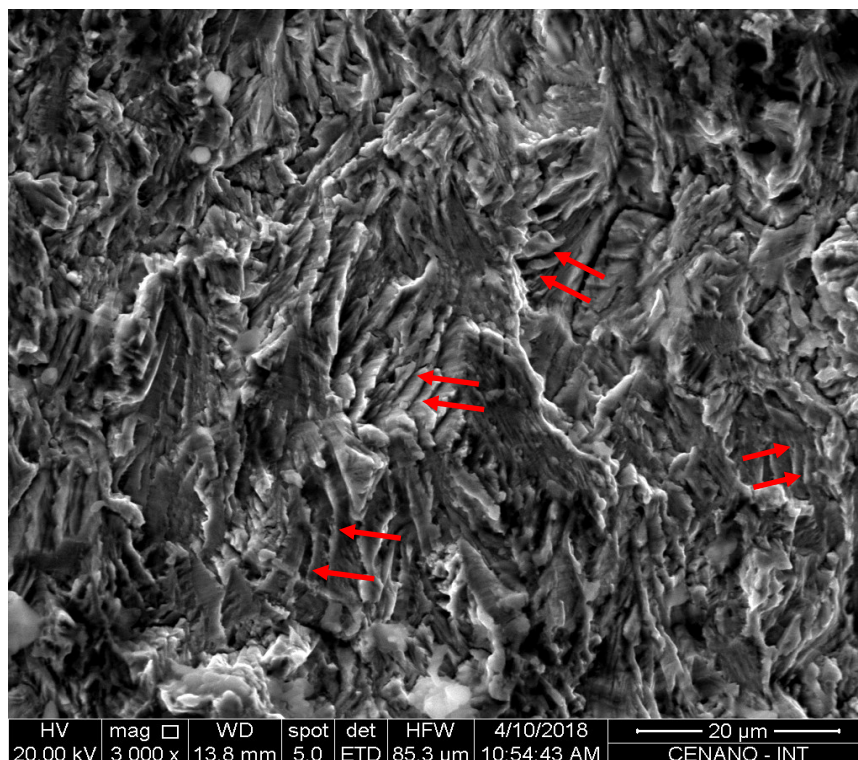


Figura 7 – Imagem de MEV: borda S1 da superfície. Estrias de fadiga.

Foram observadas em outras regiões e também estas mesmas características: estrias de propagação de trinca por fadiga, indicando que houve nucleação de trincas em ambos os lados da haste femoral, e posterior propagação por fadiga. Assim, existem evidências que a nucleação de trinca ocorreu nos locais onde existem marcas de dano superficial, mostrada na figura 2.

DISCUSSÃO

- A composição química da amostra está de acordo com a norma ABNT NBR ISO 5832-9 [1].

A microestrutura, o teor de inclusões e o tamanho de grão também estão de acordo com os requisitos da norma ABNT NBR ISO 5832-9 [2-5].

No entanto a prótese femoral fraturou prematuramente. Os resultados de análise da superfície de fratura, embora com algumas evidências de amassamento, revelam, no aspecto macrográfico, as "marcas de praia" e, em várias regiões, aspectos

micrográficos como “estrias”, ambas as características de propagação de trinca por fadiga, indicando, de forma clara, que este foi o mecanismo que levou à fratura da haste femoral.

A fratura por fadiga de componentes metálicos geralmente está associada à presença de concentradores de tensões, na superfície da peça, que favorecem a iniciação e propagação de trincas. Sob a ação de cargas cíclicas, como as que estão associadas ao movimento normal do paciente no cotidiano, estas trincas se propagam, caracterizando o mecanismo de fadiga do material [6-8]

O implante, analisado neste trabalho, apresenta diversas marcas de desgaste (mostradas nas figuras 2 e 3), que atuaram como concentradores de tensões, favorecendo a formação de trincas superficiais que iniciaram a fratura por fadiga. Supostamente, em parte, os danos apresentados nestas figuras 2 e 3 foram introduzidos na ocasião da retirada da peça do corpo do paciente, não tendo assim influência no processo de fratura. Entretanto, pelo menos em parte, o dano superficial pode ter sido introduzido tanto por quem manuseou, ou inseriu o implante no ato cirúrgico, quanto pelo movimento do paciente no cotidiano. De qualquer modo, sabe-se que o implante fraturou por fadiga prematuramente e essas são as possíveis causas [9-12].

CONCLUSÕES

- O aço inoxidável usado na fabricação do implante atende aos requisitos especificados para composição química e microestrutura.
- As marcas superficiais observadas, provavelmente deixadas por um processo de usinagem deficiente e/ou pelo manuseio/instalação ou uso inadequado do implante, atuaram como concentradores de tensões que, em condições de carregamento cíclico natural, favoreceram a ocorrência/iniciação da fratura por fadiga, evidenciada pelas imagens de MEV.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao laboratório CENANO do INT, pela oportunidade de analisar as amostras nos microscópios eletrônicos de varredura, e ao programa SISNANO do CNPq, ao qual o laboratório está integrado (MCTI/SISNANO/INT-CENANO-CNPQ Processo Nº 442604/2019).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT NBR ISO 5832-9: 2008 – “Implantes para Cirurgia – Materiais Metálicos – Parte 9: Aço Inoxidável Conformado de Alto Nitrogênio”.
2. ASTM E 3 - 11 – “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”.
3. ASTM E 407- 07 (2011) – “Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”.
4. ASTM E 112: 13 – “Standard Test Methods for Determining Average Grain Size”.
5. ASTM E 45 - 13 - "Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel".
6. ASM Handbook, Failure Analysis and Prevention, vol 11, ASM (American Society for Metals), Second printing, Materials Park, Ohio, 1164 p. 2004.
7. ASM Handbook, Fractography, vol 12, ASM (American Society for Metals), Sixth printing, Materials Park, Ohio, 517 p. 2009.
8. Mc EVILY, A.J. Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention. John Wiley & Sons, New York, 324 p., 2002.

9. SIVAKUMAR, M.; DHANADURAI, K.S.; RAJESWARI, S.; Failures in stainless steel orthopaedic implant devices: A survey, *Journal of Materials Science Letters*, v. 14, p. 351-354, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00592147>
10. PROVERBIO, E.; BONACCORSI, L.M.; Microstructural analysis of failure of a stainless steel bone implant, *Practical Failure Analysis*, v.1, p.33-38, 2001. doi.org/10.1007/BF02715331.
11. DE CERQUEIRA ABUD, I., BARBOSA, C., DE JESUS MONTEIRO, M. *et al.* Microstructural and Fractographic Aspects on the Failure Analysis of a Mixed Mode Fractured Ti-6Al-4V Femoral Long Plate. *J Fail. Anal. and Preven.* v. 23, p. 414–419, 2023. doi.org/10.1007/s11668-022-01586-4.
12. XIAOTONG ZHAO, XIU SONG, RAN WANG, LEI WANG, YANG LIU, JIALI HU, Microstructure-dependent corrosion fatigue crack growth behavior of Ti-6Al-4V alloy in simulated body fluid, *Engineering Failure Analysis*, v. 148, 107184, 2023. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107184.