

ANÁLISE DA FALHA DE PARAFUSOS CLASSE 10.9 UTILIZADOS EM GUINDASTE OFFSHORE

FAILURE ANALYSIS OF CLASS 10.9 BOLTS USED IN AN OFFSHORE CRANE

Rafael Gomes de Castro¹; Bárbara Ferreira de Oliveira²; Alessandro da Silva Rolin³;
Eduardo Atem de Carvalho⁴

- 1 Engenheiro Mecânico. Institutos Superiores de Ensino do Censa - ISECENSA, 2015. Campos dos Goytacazes, RJ. rafaelgdcastro@hotmail.com.
- 2 Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 2014. Professora do ISECENSA. Campos dos Goytacazes, RJ. barbara.fo@gmail.com.
- 3 Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 2014. Professor do ISECENSA. Campos dos Goytacazes, RJ. a.rolin@ig.com.br.
- 4 Doutor em Engenharia Mecânica. Texas A&M University, 1997. Professor Associado da UENF. Campos dos Goytacazes, RJ. atem@uenf.br.

Recebido em: 16/10/2016 - Aprovado em: 15/11/2017 - Disponibilizado em: 30/11/2017

RESUMO: Neste trabalho foram avaliadas as propriedades mecânicas de dois parafusos que têm como função a fixação de um guindaste utilizado nas plataformas offshore. Foram retiradas duas seções de cada elemento para a realização de análises de composição química, da fratura e microestrutural e ensaios mecânicos de dureza e de tração. Os resultados obtidos nas análises da composição química mostraram-se condizentes com as normas e que o material utilizado para fabricação dos parafusos trata-se de um aço ASTM 4140, sendo apropriado para fabricação de parafusos da classe 10.9. Através das fraturas foi possível verificar que o parafuso 1 provavelmente foi submetido a um esforço por torção, tendo uma alta concentração de tensão na região da raiz do filete, assim como a existência de marcas de catraca, o que possibilitou a criação da trinca e propagação por fadiga. No parafuso 2 foram observadas marcas de praia originadas em cavidades e uma região de fratura final pequena como indicativo de baixa tensão nominal. Identificou-se que ambos possuem uma matriz microestrutural martensítica, contudo foi encontrada a presença de austenita retida e também inclusões não metálicas, as quais apresentam maior concentração no parafuso 2, indicando que provavelmente estariam presentes nas cavidades produzidas na fratura. Os valores de dureza determinados são apropriados para os valores mínimos estabelecidos por normas técnicas. No entanto, verificou-se que o parafuso 2 não apresenta as porcentagens mínimas de ductilidade estipuladas por uma das normas técnicas analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: Parafuso. Análise de falha. Fratura.

ABSTRACT: The purpose of this article was evaluate the mechanical properties of two bolts that has as function the fixing of a crane used at oil offshore platforms. Two specimens were removed of each bolt for analysis such of chemical composition, fracture and hardness and tensile testing. The results obtained from analysis of the chemical composition proved to be consistent with the standards and the material used to manufacture the bolts consists of a steel ASTM 4140, being appropriate for manufacturing class 10.9 bolts. Through the fractures it was found that the bolt 1 was probably subjected to a load of torsion with a high concentration of stress in the region of bolt's root, well as the existence of ratchet marks, which enabled the creation of fatigue crack. Beach marks were observed originating from cavities and a small final fracture region indicated a low nominal stress on bolt 2. It was identified that both have the martensitic microstructure matrix, however it was found the presence of retained austenite and also non-metallic inclusions, which are more concentrated on the bolt 2, indicating that probably would be present

in cavities produced in the fracture. The hardness values are appropriate to the minimum values established by technical standards. However, it was found that the bolt 2 does not show the minimum ductility percentages prescribed by technical standards analyzed.

KEYWORDS: Bolt. Failure Analysis. Fracture.

1 INTRODUÇÃO

Guindastes de plataformas *offshore* são fixados através de juntas parafusadas. Esse equipamento é de suma importância no auxílio da movimentação das cargas que ultrapassam a capacidade humana de movimentar, como a organização do convés, transição de sondas, descarregamento e carregamento de um rebocador. Durante sua operação, os guindastes são sujeitos a vários tipos de fatores que podem ocasionar falhas, desde mudanças climáticas até o rompimento do cabo de aço devido à sobrecarga ou falha por fadiga. Esses problemas desencadeiam perdas de produção, e, nos piores casos, causam acidentes com perdas humanas que afetam diretamente na credibilidade do fabricante e na confiabilidade dos equipamentos (ROLIN, 2014).

Os fatores mais comuns que ocasionam as falhas em parafusos podem ser identificados como problemas no produto, operacionais, de montagem. Dentre esses, o primeiro é o mais frequente, atingindo 50% dos casos. Essas falhas podem ser promovidas por fadiga, fluência ou súbita, sendo o primeiro modo de falha o mais comum, atingindo 40% das situações e o último ainda dividido em três tipos: fratura frágil, dúctil ou por corrosão (GEITNER; BLOCH, 2015).

Para alcançar os valores necessários das propriedades mecânicas de parafusos de aços, geralmente realiza-se tratamento térmico de têmpera seguido de revenido, sendo possível obter através destes uma alta resistência associada à boa tenacidade e ductilidade devido à formação de martensita revenida. Parafusos como esses são utilizados em máquinas alternativas/rotativas, em que

as cargas são cíclicas, estando, portanto, susceptíveis a falha por fadiga. Embora esses tratamentos térmicos sejam necessários, no caso de cargas variáveis, quanto maior o ganho de resistência em função deles, maior a chance de ocorrência de falha por fadiga do aço (GEITNER; BLOCH, 2015).

A prevenção de fadiga em parafusos submetidos a cargas cíclicas pode ser realizada através de uma pré-carga adequada com a utilização de um torquímetro ou de uma ferramenta hidráulica. Na fixação por torqueamento deve-se ter muita atenção ao fator de torque e ao coeficiente de atrito, pois eles interferem de forma direta na tensão exercida na junta parafusada (AFFONSO, 2012; RODRIGUES, 2015).

Neste trabalho foram caracterizadas a microestrutura e a fratura de dois parafusos provenientes de guindastes de plataformas da indústria *offshore*. As propriedades mecânicas terão seus valores determinados e comparados com o objetivo de verificar se o material utilizado para a sua fabricação se encontra de acordo com os valores exigidos pelas normas.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAL

Neste trabalho foram analisados dois parafusos M33 x 3,50 mm x 85 mm, classe: 10.9, corpo com rosca parcial medindo 30 mm, todos enegrecidos por têmpera, que sofreram a fratura na parte rosqueada do corpo.

2.2 MÉTODOS

Foi retirada uma amostra com as dimensões de 10 mm de espessura x 50 mm de diâmetro, de ambos os parafusos, para que fosse permitido analisar a composição química, realizada num espectrômetro óptico da marca Thermo e modelo ARL 4460.

Em seguida, foi realizado o ensaio metalográfico seguindo as etapas convencionais de preparação: corte, embutimento, lixamento e polimento. Após o polimento, a microestrutura foi revelada através de um ataque químico por imersão numa solução química de Nital 2% (98 mL de álcool etílico e 2 mL de ácido nítrico) por 5 segundos.

Para realizar a análise microestrutural e para a análise da fratura foi utilizado o microscópio confocal de varredura a laser Olympus Lext OLS4000.

A dureza foi determinada em 5 pontos da região central da seção transversal de acordo com as recomendações estipuladas pelas normas ISO 898-1 (2013) e ASTM E140 (2011). Foi utilizado um penetrador de cone de diamante com pré-carga de 10 kgf e carga de 150 kgf, gerando resultados na escala Rockwell C.

Os ensaios de tração foram executados com uma velocidade de 0,2 mm.min⁻¹ na máquina de ensaios universal INSTRON, modelo 8852. Os corpos de prova foram usinados a partir do material do parafuso fraturado. Durante esse procedimento, certificou-se que todos foram retirados do centro e que as suas medidas seguiram as recomendações da norma ASTM E8 (2011) para fabricação de corpos de prova com seção transversal circular com comprimento útil de 30 mm e diâmetro de 6 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES QUÍMICAS

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das composições químicas dos materiais utilizados nas fabricações dos parafusos 1 e 2. Observando os resultados encontrados e os comparando com as normas ASTM A29 (2004) e ISO 898-1 (2013) foi possível classificar o material utilizado como um aço ASTM 4140, sendo da classe 10.9 segundo a segunda norma supracitada.

Tabela 1 - Resultados da análise das composições química dos parafusos 1 e 2

Elementos (%p)	Parafuso 1	Parafuso 2
Al	0,0070	0,0075
As	0,011	0,017
B	0,0002	0,0002
C	0,39	0,35
Ca	-	-
Cr	0,92	0,91
Cu	0,016	0,010
Mn	0,80	0,78
Mo	0,16	0,15
Nb	0,0008	0,0007
Ni	0,030	0,028
P	0,016	0,014
S	0,0083	0,0080
Si	0,23	-
Sn	-	0,014
Ti	0,0033	0,0031
V	0,0050	0,0045

Fonte - Próprio autor.

3.2 ANÁLISE DAS FRATURAS

Nas Figuras 1, 2, 3 são apresentadas macrofractografias da fratura do parafuso 1 obtidas sob diferentes vistas. Na região 1, correspondente à raiz do filete, observou-se a presença de *ratched marks*, também chamadas de marcas de catraca. A existência dessas marcas indica alta concentração de tensão no local e também a presença de múltiplos sítios de nucleação da trinca e, portanto, que cada uma destas regiões deu origem à propagação de sua própria trinca de fadiga. Essa geometria também mostra que provavelmente o esforço principal foi de torção e que tal parafuso fazia conjunto com uma arruela também fraturada. O desaparecimento dessas marcas nas outras regiões é esperado, uma vez que essas trincas de fadiga se fundem para formar uma trinca de fadiga comum e maior. Também pode-se verificar que a trinca se propaga a uma orientação de aproximadamente 45°, característica do primeiro estágio de fadiga no qual a trinca se propaga ao longo de planos de alta tensão de cisalhamento.

Figura 1 - Macrofractografia da fratura do parafuso 1



Fonte - Próprio autor.

Figura 2 - Macrofractografia da fratura do parafuso 1



Fonte - Próprio autor.

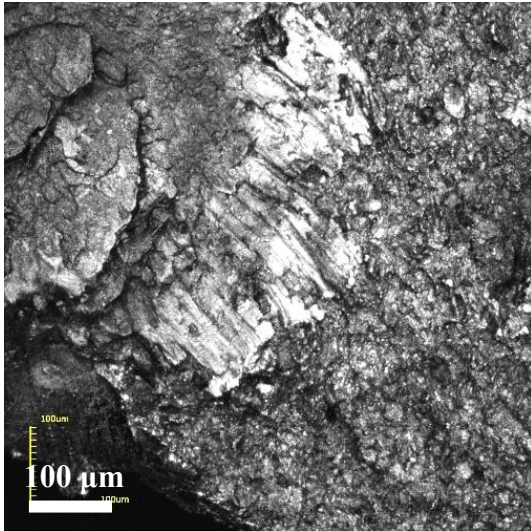
Figura 3 - Macrofractografia da fratura do parafuso 1



Fonte - Próprio autor.

Na Figura 4 é mostrada uma microfractografia da região da região 4. Foi observada uma microtrinca e estrias. Como cada banda de estria corresponde à distância de progresso da trinca em um único ciclo de aplicação da carga e os espaçamentos entre as estrias da região 2 e 4 são diferentes, verifica-se que o parafuso foi submetido a diferentes cargas, sendo o espaçamento maior quando a carga efetuada é maior.

Figura 4 - Microfractografia da região 4 do parafuso 1 (microscópio confocal ótico a laser)



Fonte - Próprio autor.

A macrofractografia do parafuso 2 é mostrada na Figura 5. Observa-se a presença de duas regiões da fratura, assinaladas como região 1 e região 2. Na região 1 é possível verificar a zona progressiva de fadiga devido à presença de marcas de praia características do segundo estágio da ruptura por fadiga em que ocorre o crescimento da trinca. Também foram encontradas cavidades no centro dessa fratura, onde provavelmente havia inclusões não metálicas que atuaram como concentradores de tensão no material. Ainda se verificou que foram assumidas diferentes frentes de propagação em razão da existência de múltiplos sítios de nucleação da trinca de fadiga. Após alcançar o tamanho crítico da trinca, a seção transversal remanescente tornou-se muito pequena para suportar as cargas impostas originando-se então a região 2, que corresponde ao estágio 3, no qual ocorre a fratura final do material. Como o tamanho da região equivalente à zona progressiva de fadiga é bem menor que a região do estágio 3, pode-se constatar que a tensão nominal aplicada foi baixa.

Figura 5 - Macrofractografia da fratura do parafuso 2



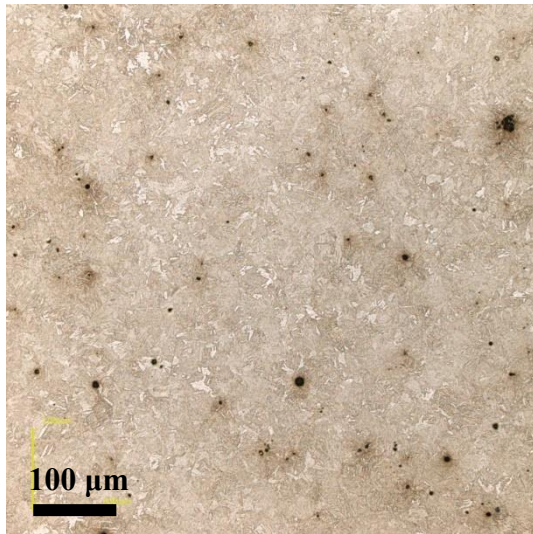
Fonte - Próprio autor.

3.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas micrografias dos parafusos 1 e 2, respectivamente. Em ambos os casos, observa-se uma microestrutura martensítica com a presença de austenita retida (região clara) e inclusões não metálicas dispersas. Tanto a austenita retida como inclusões não metálicas são prejudiciais às propriedades mecânicas.

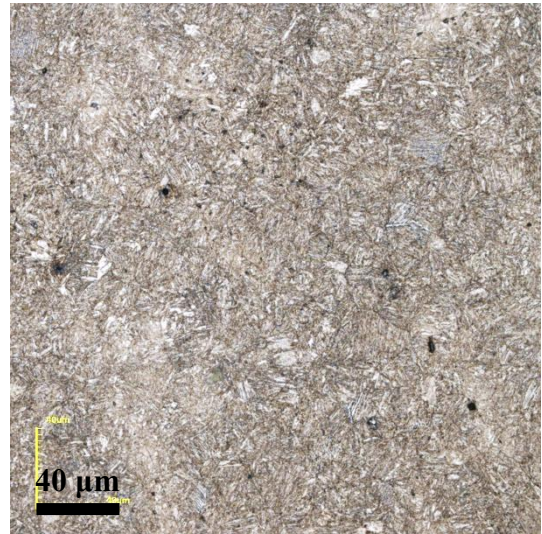
De acordo com Reed-Hill (1982), a quantidade de austenita retida depende da temperatura de austenitização e do tempo de permanência da têmpera, que afetam diretamente o tamanho de grão da austenita primária, mas também do meio de resfriamento, dos elementos de liga e do teor de carbono do aço. Um tratamento térmico de revenido feito de forma eficaz deveria transformar essa fase no constituinte bainita, mas o tempo total para que esta transformação se complete é grande e o aumento do tempo do tratamento de revenido pode ser deletério devido ao crescimento das partículas de cementita (CALLISTER JR., 2008; VOORT, 1991). Dessa forma, uma alternativa seria efetuar um tratamento subzero.

Figura 6 - Micrografia do parafuso 1



Fonte - Próprio autor.

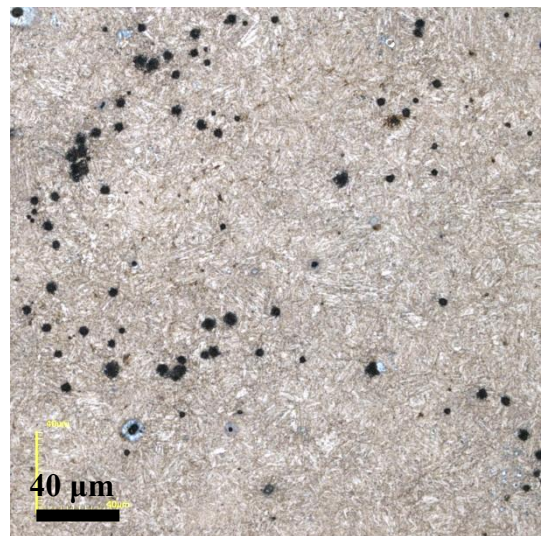
Figura 7 - Micrografias do parafuso 2



Fonte - Próprio autor.

Já a presença de inclusões não metálicas reduz a resistência à fadiga dos aços (ATKINSON; SHI, 2003). Embora a análise da composição química não indique a presença de elementos prejudiciais em excesso, foi evidenciado na análise microestrutural que o parafuso 2 apresenta uma concentração de inclusões maior em relação ao parafuso 1, conforme pode ser observado na Figura 8. Esse resultado é condizente com o aspecto de fratura encontrado anteriormente, uma vez que foram encontradas cavidades relativamente grandes na superfície de fratura que indicavam a nucleação de trincas na interface entre partículas e a matriz martensítica. Sendo assim, é provável que essas inclusões não metálicas que deram origem à trinca sejam grandes devido ao tamanho da cavidade deixada e porque, segundo Atkinson e Shi (2003), inclusões de óxidos que apresentam tamanhos maiores que 20 µm são sítios potenciais de nucleação de trincas.

Figura 8 - Micrografias do parafuso 2



Fonte - Próprio autor.

Os parafusos 1 e 2 apresentaram durezas médias de $33,6 \pm 1$ HRC e $36,5 \pm 2$ HRC, respectivamente. A norma ISO 898-1 (2013) especifica que, para parafusos de classe 10.9, deve-se ter dureza mínima de 32 HRC e máximo de 39 HRC. Sendo assim, pode-se afirmar que os resultados encontrados no material estudado estão em conformidade com os valores estabelecidos pela norma.

Nas Tabelas 2 e 3 são mostradas as propriedades mecânicas encontradas através do ensaio de tração do parafuso 1 e 2, respectivamente.

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas dos corpos de prova do parafuso 1

Propriedades	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2	Média
Tensão de escoamento (MPa)	990	920	955
Limite de resistência à tração (MPa)	1089	1016	1052
Tenacidade (J.cm ⁻³)	207	193	200
Ductilidade (%Alongamento)	21	18	19
Ductilidade (%Redução de Área)	49	50	49

Fonte - Próprio autor.

A partir dos valores apresentados foi possível verificar que todas as propriedades mecânicas do parafuso 1 estão de acordo com os valores mínimos que são exigidos pelas normas ISO 898-1 (2013) e ASTM A490M (2011). Entretanto, na análise referente ao parafuso 2, observou-se que ele só é aprovado simultaneamente nas duas normas em relação à tensão de escoamento e ao limite de resistência à tração e que os valores de ductilidade em porcentagem de alongamento e porcentagem de redução de área somente obedecem aos valores exigidos pela norma ISO 898-1 (2013). Os valores de tenacidade não são estabelecidos pelas normas

citadas, mas seus valores dão um indicativo de que a ductilidade desse parafuso seria menor, visto que o limite de resistência à tração desses materiais é muito próximo e a tenacidade média do parafuso 2 é cerca de 5/3 da tenacidade média do parafuso 1.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas dos corpos de prova do parafuso 2

Propriedades	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2	Média
Tensão de escoamento (MPa)	1000	930	965
Limite de resistência à tração (MPa)	1081	989	105
Tenacidade (J.cm ⁻³)	114	122	118
Ductilidade (%Alongamento)	15	11	13
Ductilidade (%Redução de Área)	29	33	31

Fonte - Próprio autor.

Durante a operação do guindaste, os parafusos foram submetidos a cargas cíclicas e, portanto, provavelmente sofreram o efeito Bauschinger, tendo suas propriedades alteradas mesmo que o material fosse submetido a uma tensão abaixo do limite de escoamento, pois sofreram microdeformações plásticas, acumulando então deformação principalmente nos concentradores de tensão.

Embora tenham sido encontrados sinais de que no parafuso 1 a nucleação das trincas se deu devido ao aperto excessivo, observou-se que sua propagação se deu por fadiga. Portanto, é provável que a causa raiz da falha tenha sido o aperto excessivo deste parafuso que desencadeou o rompimento por fadiga do parafuso 2.

Ainda assim, é importante ressaltar que, apesar de a fadiga ser a principal causa de fraturas desses elementos, as normas ISO 898-1 (2013) e ASTM A490M (2011) estabelecem que o material dos quais são feitos devem apresentar requisitos de propriedades mecânicas obtidas através de um ensaio de tração, que avalia apenas o comportamento estático. Além disso, não são estabelecidos os parâmetros de tratamento térmico, que seriam importantes, já que a formação de alguns microconstituintes prejudica a vida em fadiga.

4 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos através dos ensaios realizados de acordo com normas técnicas, foi possível fazer uma análise geral do material estudado e concluir que:

- O aço utilizado para fabricação dos parafusos 1 e 2 é um aço carbono de alta resistência ligado ao cromo e molibdênio, temperado e revenido, sendo classificado como aço ASTM 4140 da classe 10.9.
- Foram identificadas marcas de catraca na fratura do parafuso 1, as quais representam uma alta concentração de tensão na raiz do filete, e a

existência de múltiplos sítios de nucleação de trinca. Através da geometria das marcas de catraca verificou-se que o material provavelmente sofreu esforço excessivo de torção devido uma operação indevida de aperto.

- Microestruturalmente os parafusos são constituídos de uma matriz martensítica com presença de austenita retida e inclusões não metálicas dispersas, as quais provavelmente atuaram como múltiplos sítios de nucleação de trinca, resultando na criação na trinca por fadiga do parafuso 2.

- Os resultados referentes às propriedades mecânicas encontradas para dureza, tensão de escoamento e limite de resistência à tração de ambos os parafusos estão dentro do mínimo exigido pelas normas técnicas utilizadas. Os valores de ductilidade por porcentagem de alongamento e ductilidade por porcentagem de redução de área do material do parafuso 1 encontram-se de acordo com ambas as normas. No entanto, a ductilidade por porcentagem de redução de área do material do parafuso 2 não atingiu os valores estabelecidos, sendo reprovados em ambas as normas analisadas. A ductilidade por porcentagem de alongamento deste mesmo parafuso teve seu resultado aprovado pela ISO 898-1 (2013), porém reprovado pela ASTM A490M (2011).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Controle de Qualidade e Meio Ambiente da ArcelorMittal Tubarão e ao Laboratório de Materiais Avançados da Universidade Estadual do Norte Fluminense.

REFERÊNCIAS

AFFONSO A. O. L. **Equipamentos Mecânicos: Análise de falhas e soluções de problemas**. 3^o Ed – Rio de Janeiro: Quality Editora, 408p., 2012.

ASTM A29. **Standard Specification for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought, General Requirements for**. 2004.

ASTM A490M. **Standard Specification for High – Strength Steel Bolts, Classes 10.9 and 10.9.3, for Structural Steel Joints [Metric]**. 2011.

ASTM E140. **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness**. 2011.

ASTM E8. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. 2011.

ATKINSON, H. V.; SHI, G. Characterization of inclusions in clean steels: a review including the statistics of extremes methods. **Progress in Materials Science**, v. 48, p. 457-520, 2003.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Sorares. 7ed. LTC, Rio de Janeiro, 2008.

GEITNER, F. K.; BLOCH, H. P. **Análise e Solução de Falhas em Sistemas Mecânicos**. Tradução Eduardo Kraszczuk. 4º Ed – Minas Gerais, 636p., 2015.

ISO 898-1. **Mechanical Properties of Fasteners Made of Carbon Steel and Alloy Steel**. Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread. ISO; 2013.

REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2ªed. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 776p., 1982

RODRIGUES, C. **Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafuso da classe 10.9 para emprego estrutural**. 2015. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

ROLIN, A. **Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafuso de classe 10.9 para emprego em guindaste off-shore**. 2014. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

VOORT, G. F. V. **Atlas of Time Temperature Diagrams**. Materials Park: ASM International, 474 p., 1991.