



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ADRIANO RAFAEL OLIVEIRA COSTA

**ANÁLISE DE FALHA DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA BASE DO CAVALETE
DE SUSTENTAÇÃO DO MASTRO DE UM CAMINHÃO PERFURATRIZ**

**MARABÁ
2013**

ADRIANO RAFAEL OLIVEIRA COSTA

**ANÁLISE DE FALHA DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA BASE DO CAVALETE
DE SUSTENTAÇÃO DO MASTRO DE UM CAMINHÃO PERFURATRIZ**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. MSc. Márcio
Corrêa de Carvalho.

MARABÁ
2013

ADRIANO RAFAEL OLIVEIRA COSTA

**ANÁLISE DE FALHA DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA BASE DO CAVALETE
DE SUSTENTAÇÃO DO MASTRO DE UM CAMINHÃO PERFURATRIZ**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. MSc. Márcio
Corrêa de Carvalho.

Data de aprovação: 16 de agosto de 2013.

Banca examinadora:

Prof. MSc. Márcio Corrêa de Carvalho

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra

Prof. Dr. Edinaldo Teixeira

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Josineide Tavares, Marabá-PA)

Costa, Adriano Rafael Oliveira.

Análise de falha dos parafusos de fixação da base do cavalete de sustentação do mastro de um caminhão perfuratriz / Orientador, Márcio Corrêa de Carvalho. – 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais, 2013.

1. Engenharia de Materiais. 2. Materiais. 3. Resistência de Materiais. 4. Análise de Falhas. 5. Parafusos. I. Título.

CDD - 22 ed.: 620.11

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Reitor: Prof. PHD Carlos Edilson de Almeida Maneschy

Vice-Reitor: Prof. Dr. Horácio Schneider

Diretor da Faculdade: Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso aos meus pais, Idalvo Ferreira Costa e Maria das Graças Oliveira Costa, pelo amor incondicional, apoio, confiança, paciência e por sempre me colocarem no caminho certo, muitas vezes, mesmo contra minha própria vontade.

AGRADECIMENTOS

“Os que confiam no Senhor são como o monte de Sião, que não se abala, firme para sempre” (Salmos 125:1). Agradeço, acima de tudo e de todos, a Deus, pelo seu infinito amor, bondade, misericórdia e por permitir que eu chegasse até aqui, pois, sozinho, eu jamais teria conseguido. Obrigado Senhor!

Agradeço à minha família, aos meus pais, irmã, avós, tios e primos, por me apoiarem e sempre se posicionarem a meu favor, independente da situação. Agradeço a Mikaelee Limas Brasil e toda sua família, pelo amor, apoio, confiança e paciência durante minha graduação.

Agradeço aos meus amigos das turmas de Engenharia de Materiais dos anos de 2008 e 2009, pelo companheirismo, por todos os trabalhos entregues, pelos seminários apresentados, pelas provas, pelas brincadeiras, pelos sorrisos, pelas brigas, pelas notas boas e ruins. Pra mim, é uma grande honra ter concluído minha graduação ao lado de todos vocês, pois sempre caímos e levantamos juntos, como uma grande equipe. Agradeço, em especial, aos meus amigos: Adilton Rocha, Mayron Saminez, Luís de Lima, Túlio Alves, Daniel Rodrigues, Bárbara Thays, Jholannes Souza, Ronaldo Gama, José Ramos, Rafaela Sousa, Lourival Rodrigues, Susane Moura e Warley Monção. Vocês sempre serão lembrados com carinho!

Agradeço a todos os professores da Faculdade de Engenharia de Materiais, pela paciência, perseverança e por compartilharem seu conhecimento e suas experiências conosco. Enfim, agradeço a todas as pessoas que aqui não foram citadas, mas que, de alguma maneira, participaram da minha formação como engenheiro. À Universidade Federal do Pará, muito obrigado pela oportunidade!

RESUMO

Apesar de, em muitos casos, passarem despercebidos, sabe-se que os parafusos estão presentes entre os elementos de fixação em, praticamente, todas as estruturas e equipamentos construídos pelo homem. Não somente na mineração, mas na indústria como um todo, são empregadas centenas de parafusos nos mais variados equipamentos e máquinas, uma vez que estes proporcionam uma maior facilidade nos processos de montagem, desmontagem e manutenção dos equipamentos. Enquanto cumprem o seu papel, que é promover a união entre duas peças, os parafusos não chamam a atenção. No entanto, quando falham, podem se tornar a fonte de grandes problemas, podendo atingir proporções catastróficas. A Vale S. A. encaminhou ao Laboratório de Metalografia da Universidade Federal do Pará (LABMETAL – UFPA) oito parafusos fraturados, que estavam instalados em dois mancais de fixação da base do cavalete do mastro de um caminhão perfuratriz, e um parafuso novo, para serem realizadas análises de falha, visando identificar os possíveis motivos da falha, que resultou na queda do mastro sobre a cabine do caminhão, que ocorreu na Mina do Sossego, município de Canaã dos Carajás-PA. De acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar que alguns parafusos estavam fora das especificações de resistência mecânica e que o principal mecanismo causador da falha foi a corrosão por pit.

Palavras-chave: Análise de Falhas; Parafusos; Caminhão Perfuratriz.

ABSTRACT

Although in many cases go unnoticed, it is known that the bolts are present between the attachment elements in virtually all structures and equipment built by man. Not only in mining, but in the industry as a whole, are employed hundreds of bolts in various machines and equipment, since they provide greater ease in the process of assembly, disassembly and servicing of the equipment. While performing their role, which is to promote the union of two parts, the bolts do not draw attention. However, when they fail, they can become a source of serious problems and may reach catastrophic proportions. The Vale S. A. sent to the Laboratory of Metallography of the Federal University of Pará (LABMETAL - UFPA) eight bolts fractured, which were installed in two bearings mounting the easel base of the mast of a truck drill, and a new bolt, to be performed failure analysis, to identify possible reasons for failure, which resulted in the fall of the mast on the truck's cab, which took place in Mina do Sossego, municipality of Canaã dos Carajás, PA. According to the results, it can be stated that some bolts were out of specification of mechanical strength and that the main mechanism of failure was the cause of pit corrosion.

Keywords: Failure Analysis; Bolts; Truck Drilling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Queda do mastro sobre a cabine do caminhão perfuratriz -----	13
Figura 02: Partes dos parafusos -----	15
Figura 03: (a) Parafuso com porca e arruela; (b) Parafuso de máquina; (c) Parafuso prisioneiro -----	17
Figura 04: Tipos de roscas -----	17
Figura 05: Tipos de cabeças de parafusos -----	18
Figura 06: Tipos de parafusos de cabeça com encaixe -----	18
Figura 07: Marcas nas cabeças dos parafusos conforme SAE -----	19
Figura 08: Processo de corte de roscas -----	20
Figura 09: Processo de laminação de roscas -----	21
Figura 10: Estágios do processo de recalque da cabeça de um parafuso -----	22
Figura 11: Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho -----	27
Figura 12: (a) Metade do mancal do Lado Oposto à Cabine (LOC) com parafusos numerados de 01 a 04; (b) Metade do mancal do Lado da Cabine (LC) com parafusos numerados de 01 a 04 -----	28
Figura 13: Parafuso Novo (PN) -----	28
Figura 14: Parafuso do lado da cabine (LC01 a LC04) -----	29
Figura 15: Parafusos do lado oposto à cabine (LOC01 a LOC04) -----	29
Figura 16: Parafuso LOC01: fadiga superficial caracterizada por (1) corrosão por pit, (2) fragmentação e (3) corrosão -----	30
Figura 17: Parafuso LOC04: fadiga superficial caracterizada por (1) corrosão por pit, (2) fragmentação e (3) corrosão -----	30
Figura 18: Parafuso LOC03: filetes de rosca parcialmente preenchidos com uma mistura de graxa e pós -----	31
Figura 19: Parafuso LC03: filetes de rosca parcialmente preenchidos com uma mistura de graxa e pós -----	31
Figura 20: Momento da retirada da cabeça do parafuso PN -----	34
Figura 21: Superfície de fratura do parafuso LOC01 -----	34
Figura 22: Esquema de indentações -----	36
Figura 23: Parafuso PN: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical -----	36
Figura 24: Parafuso LC01: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical -----	36
Figura 25: Parafuso LC02: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical -----	37
Figura 26: Parafuso LC03: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical -----	37
Figura 27: Parafuso LC04: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical -----	37
Figura 28: Parafuso LOC01: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical -----	38
Figura 29: Parafuso LOC02: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical -----	38
Figura 30: Parafuso LOC03: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical -----	38

Figura 31: Parafuso LOC04: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical -----	39
Figura 32: Microestrutura do centro do parafuso PN. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X -----	40
Figura 33: Microestrutura do centro do parafuso LC01. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X -----	40
Figura 34: Microestrutura do centro do parafuso LC02. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X -----	40
Figura 35: Microestrutura do centro do parafuso LC03. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X -----	41
Figura 36: Microestrutura do centro do parafuso LC04. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X -----	41
Figura 37: Microestrutura do centro do parafuso LOC01. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X -----	41
Figura 38: Microestrutura do centro do parafuso LOC02. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X -----	42
Figura 39: Microestrutura do centro do parafuso LOC03. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X -----	42
Figura 40: Microestrutura do centro do parafuso LOC04. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X -----	42
Figura 41: Macrografia do parafuso LC01, indicando uma fratura com múltiplas origens a partir de (1) corrosão por pit -----	44
Figura 42: Macrografia do parafuso LOC01, indicando uma fratura com múltiplas origens a partir de (1) corrosão por pit -----	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Resistência dos parafusos conforme SAE -----	19
Tabela 02: Fatores de área para área de cisalhamento de roscas -----	25
Tabela 03: Fotos das cabeças dos parafusos identificando o Grau SAE -----	32
Tabela 04: Composição química dos parafusos analisados -----	35
Tabela 05: Superfícies de fratura dos parafusos -----	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO -----	12
2. JUSTIFICATIVA -----	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	14
3.1. Análise de falhas -----	14
3.2. Parafusos de fixação -----	14
3.3. Breve histórico -----	15
3.4. Classificação -----	16
3.5. Processos de fabricação -----	20
3.6. Tensões em fixadores -----	23
3.6.1. Tensões axiais -----	23
3.6.2. Tensões de cisalhamento -----	24
3.6.3. Tensões torcionais -----	25
3.7. Corrosão -----	26
4. METODOLOGIA -----	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES -----	30
5.1. Inspeção visual -----	30
5.2. Corte e preparação de amostras -----	34
5.3. Análise química -----	35
5.4. Ensaio de dureza -----	35
5.5. Metalografia por microscopia óptica -----	39
5.6. Fractografias e microscopia eletrônica de varredura -----	43
6. CONCLUSÕES -----	45
REFERÊNCIAS -----	46

1. INTRODUÇÃO

A mineração sempre participou da economia do Brasil, desde o período colonial até os dias atuais. Hoje, esse setor é responsável por 3 a 5% do PIB brasileiro. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral, o Brasil é um dos países com maior potencial mineral do mundo, juntamente com a Rússia, Estados Unidos, Canadá, China e Austrália. O Brasil se destaca na produção de bauxita, cobre, ouro, níquel, manganês, ferro, entre outros. Nacionalmente, o minério de ferro é o de maior destaque, explorado por grandes mineradoras, como, por exemplo, a Vale^[1].

Nesse contexto, a utilização dos mais diversos e sofisticados equipamentos de mineração é imprescindível para se alcançar altas produções e, conseqüentemente, aumentar a lucratividade das empresas. Britadores, moinhos, correias transportadoras, perfuratrizes, caminhões fora-de-estrada, retroescavadeiras e pás carregadeiras são alguns dos equipamentos mais comuns utilizados na extração e beneficiamento mineral.

Atualmente, apesar de, em muitos casos, passarem despercebidos, sabe-se que os parafusos estão presentes entre os elementos de fixação em, praticamente, todas as estruturas e equipamentos construídos pelo homem. Não somente na mineração, mas na indústria como um todo, são empregadas centenas de parafusos como elementos de fixação nos mais variados equipamentos e máquinas, uma vez que estes proporcionam uma maior facilidade nos processos de montagem, desmontagem e manutenção dos equipamentos.

Enquanto cumprem o seu papel satisfatoriamente, que é promover a união entre duas peças, os parafusos, normalmente, não chamam a atenção. No entanto, quando falham, podem se tornar a fonte de grandes problemas, como atrasos na produção, aumento do custo de manutenção, entre outros.

Portanto, foram encaminhados ao Laboratório de Metalografia da Universidade Federal do Pará (LABMETAL – UFPA) oito parafusos fraturados, que estavam instalados em dois mancais de fixação da base do cavalete do mastro de um caminhão perfuratriz, e um parafuso novo, totalizando nove parafusos, para serem realizadas análises de falha, visando identificar os possíveis motivos da falha, que resultou na queda do mastro sobre a cabine do caminhão, que ocorreu na Mina

do Sossego, localizada no município de Canaã dos Carajás-PA, conforme mostra a Figura 01.

FIGURA 01 – Queda do mastro sobre a cabine do caminhão perfuratriz.



Fonte: Vale S. A., 2012.

Após os procedimentos de análise, como inspeção visual, metalografia, análise química, microdureza e MEV, foi possível concluir que alguns dos parafusos instalados nos mancais estavam fora das especificações de resistência mecânica recomendadas pelo fornecedor. Observou-se, ainda, que o principal mecanismo causador da falha foi a corrosão por pit.

2. JUSTIFICATIVA

Os parafusos são largamente utilizados entre os elementos de fixação nos mais variados equipamentos, desde os mais simples até os de alta complexidade e responsabilidade. A falha desses elementos pode se transformar na causa de grandes problemas, como atrasos na produção, aumento do custo de manutenção, perdas financeiros, podendo chegar a proporções catastróficas. A análise de falha permitirá a identificação das possíveis causas que levaram os parafusos a falhar, auxiliando na incorporação de medidas preventivas para que acidentes como este possam ser evitados no futuro.

Dessa forma, este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal caracterizar a composição química, microestrutura, dureza e resistência mecânica dos oito parafusos fraturados que estavam instalados nos mancais de fixação do mastro do caminhão perfuratriz, buscando identificar os possíveis motivos que os levaram a falhar.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ANÁLISE DE FALHAS

As falhas de materiais, componentes mecânicos e estruturas constituem um sério problema, tanto para a indústria como um todo, como para a sociedade em geral. Na maioria dos casos, os prejuízos financeiros causados pela falha destes componentes são muito superiores ao custo unitário do componente fraturado. É importante comentar, ainda, que tais falhas podem resultar em acidentes catastróficos, capazes de colocar vidas humanas em risco.

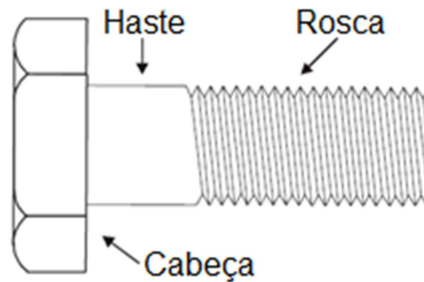
Dentre os principais fatores causadores de falhas, podem ser citados: seleção incorreta de materiais, presença de defeitos de fabricação, erros de projeto ou de montagem, manutenção deficiente e uso impróprio. Em muitas situações é possível identificar as causas das falhas, o que se torna de extrema importância na prevenção de ocorrência de casos semelhantes no futuro. Além disso, a análise de falhas se posiciona como um importante instrumento na evolução contínua dos projetos mecânicos assim como dos níveis de segurança de componentes de engenharia^[2].

3.2. PARAFUSOS DE FIXAÇÃO

Os parafusos podem ser definidos como elementos de fixação utilizados para promover a união entre peças de forma não permanente, isto é, de maneira que tais peças possam ser montadas ou desmontadas com facilidade, quando necessário, bastando apertar ou desapertar os parafusos que promovem a união entre elas.

De maneira geral, os parafusos são compostos por duas partes: cabeça e corpo. O corpo, por sua vez, pode ser dividido em outras duas partes: haste e rosca, conforme pode ser observado na Figura 02.

FIGURA 02 – Partes dos parafusos.



Fonte: Elementos de Máquinas I – Prof. Douglas Roberto Zaians, 2008.

Dentre as principais vantagens da utilização de parafusos para promover a união entre peças, podem ser citadas: facilidade de montagem e desmontagem, versatilidade, padronização e as peças unidas podem ser de naturezas diversas.

Dentre as principais desvantagens, podem ser citadas: distribuição de tensões não uniforme nas peças unidas e grande concentração de tensões nos parafusos, especialmente na região das roscas^[3].

3.3. BREVE HISTÓRICO

O matemático grego Archytas of Tarentum (428 – 350 a.C.) é considerado o responsável pela invenção do parafuso. Os parafusos de madeira foram utilizados em todo o mundo mediterrâneo, no primeiro século a.C., em diversos dispositivos, como prensas de óleo e vinho. Arquimedes (287 – 212 a.C.) desenvolveu o princípio da rosca, que foi utilizado na construção de dispositivos de elevação de água, largamente aplicado a sistemas de irrigação e condução de materiais em minas.

Os parafusos de metal surgiram a partir do ano de 1400. Johann Gutenberg utilizou parafusos entre os fixadores de sua impressora, no início do século XV. Nos cadernos de Leonardo da Vinci do início do século XVI aparecem vários desenhos de máquinas para fabricar parafusos, no entanto, somente em 1568 o matemático francês Jacques Besson concretizou a primeira máquina para esse propósito.

No final do século XVII os parafusos já haviam se tornado componentes comuns em armas de fogo. Em 1797, o britânico Henry Maudslay patenteou o parafuso de fenda e, no ano seguinte, David Wilkinson patenteou um dispositivo similar nos Estados Unidos.

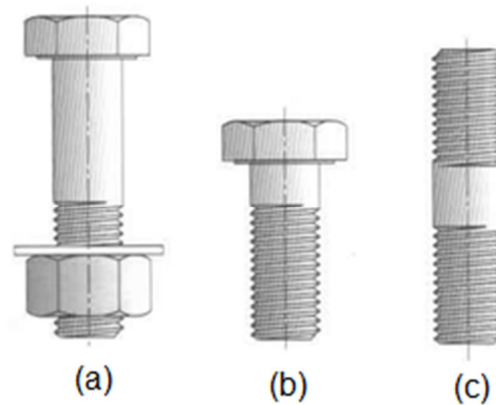
Atualmente, apesar de, em muitos casos, passarem despercebidos, os parafusos estão presentes entre os elementos de fixação em praticamente todos os aparelhos e estruturas construídos pelo homem, desde os mais simples e corriqueiros até os de alta complexidade e responsabilidade. Todavia, quando não cumprem sua principal função, que é promover a união entre duas peças, estes fixadores podem se tornar a fonte de grandes problemas, atingindo, algumas vezes, proporções catastróficas^[4].

3.4. CLASSIFICAÇÃO

Existe uma infinidade de tipos de parafusos. Eles podem ser classificados de várias maneiras: de acordo com a aplicação, com o tipo de rosca, com o tipo de cabeça, com a resistência mecânica, entre outras. Podem ser fabricados a partir de uma grande variedade de materiais, como aço, aço inoxidável, bronze, latão, alumínio, materiais poliméricos, etc.

Dependendo da aplicação, o mesmo parafuso pode ser classificado de maneira diferente. Por exemplo, um parafuso de porca é um fixador que prevê a utilização de uma porca pra promover a união entre duas peças. No entanto, o mesmo parafuso é chamado de parafuso de máquina quando é rosqueado em um furo na peça, dispensando a utilização de uma porca. Já um parafuso prisioneiro é um parafuso sem cabeça que possui rosca nas duas extremidades. Geralmente é aplicado em uniões semipermanentes, isto é, de forma que uma das extremidades é rosqueada em um furo na peça é mantida permanente, enquanto que a outra prevê a utilização de uma porca para promover a união entre as partes. Normalmente a parte permanente possui uma rosca diferenciada, de alta classe, de maneira a resistir ao afrouxamento quando a porca é removida do lado oposto. A Figura 03 ilustra um parafuso com porca e arruela, um parafuso de máquina e um parafuso prisioneiro.

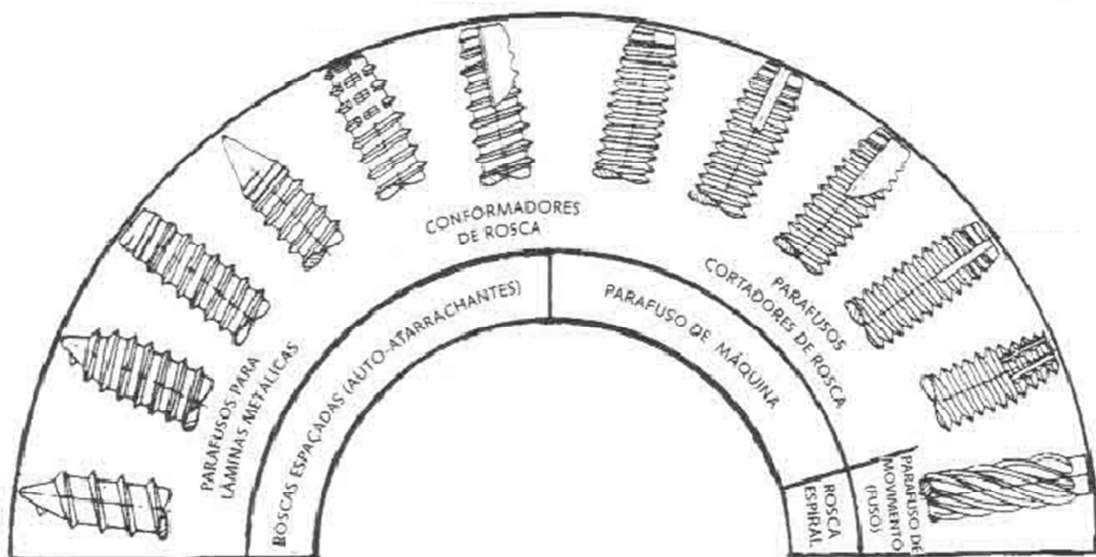
FIGURA 03 – (a) Parafuso com porca e arruela; (b) Parafuso de máquina; (c) Parafuso prisioneiro.



Fonte: Projeto de Máquinas, 2ª ed. – Robert L. Norton, 2007.

No que diz respeito às roscas, todos os fixadores capazes de fazer o próprio furo são chamados de parafusos atarrachantes. Como exemplo, podem ser citados os parafusos auto-atarrachantes, conformadores de rosca, cortadores de rosca e autofurantes. A rosca desse tipo de parafuso é semelhante às roscas padrão, no entanto, com um espaçamento maior, para que o material possa escoar à medida que o parafuso força a entrada e vai formando a rosca. A Figura 04 apresenta os principais tipos de roscas.

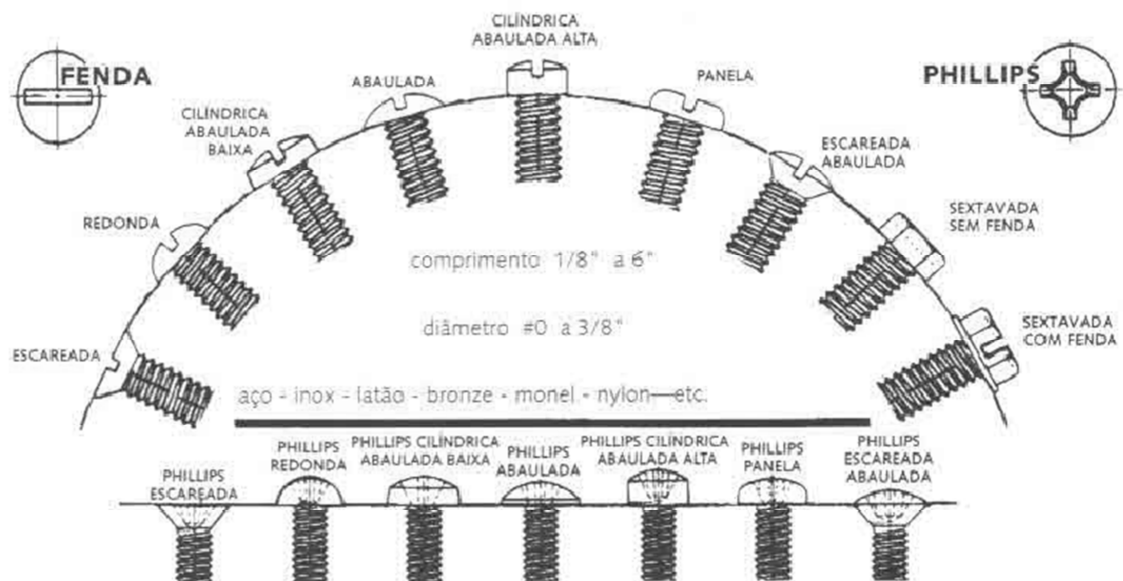
FIGURA 04 – Tipos de roscas.



Fonte: Projeto de Máquinas, 2ª ed. – Robert L. Norton, 2007.

Existem vários tipos de cabeças de parafusos. Entre os mais usuais, podem ser citados os de fenda, fenda em cruz (Phillips), hexagonal, hexagonal com encaixe, entre outros. Em relação ao formato da cabeça, estas podem ser redondas, planas, cilíndricas, abauladas, sextavadas, etc. A Figura 05 mostra vários tipos de cabeças de parafusos.

FIGURA 05 – Tipos de cabeças de parafusos.



Fonte: Projeto de Máquinas, 2ª ed. – Robert L. Norton, 2007.

Parafusos com cabeças de fenda ou Phillips são normalmente utilizados apenas em pequenas máquinas ou em parafusos atarrachantes, uma vez que o torque que se pode transmitir a partir desse tipo de cabeça é limitado. Cabeças hexagonais ou sextavadas são o tipo mais indicado para parafusos que requerem um torque maior. Quando o espaço disponível é limitado, parafusos de cabeça com encaixe são os mais adequados. A figura 06 apresenta vários tipos de parafusos de cabeça com encaixe.

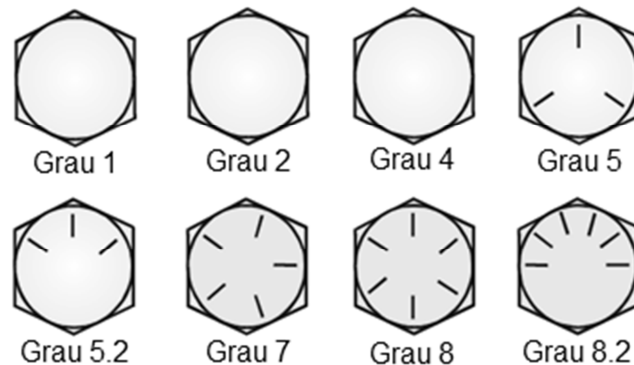
FIGURA 06 – Tipos de parafusos de cabeça com encaixe.



Fonte: Projeto de Máquinas, 2ª ed. – Robert L. Norton, 2007.

Em se tratando de parafusos de porca ou parafusos de máquina para aplicações estruturais, em casos de cargas pesadas ou em situações de alta responsabilidade, estes devem ser selecionados com base, essencialmente, na sua resistência mecânica. Organizações como SAE e ASTM definem graus ou classes para parafusos que especificam a resistência mínima de prova que este deve apresentar. O grau ou classe de cada parafuso é indicado pela presença ou ausência de marcas nas cabeças. A Figura 07 mostra as marcas nas cabeças dos parafusos, conforme as especificações SAE.

FIGURA 07 – Marcas nas cabeças dos parafusos conforme SAE.



Fonte: Elementos de Máquinas I – Prof. Douglas Roberto Zaians, 2008.

A resistência mínima de prova pode ser designada como a tensão a partir da qual o parafuso deixa a região de deformação elástica e começa a apresentar deformação plástica. É importante acrescentar que essa tensão é levemente inferior à tensão de escoamento do material. A Tabela 01 apresenta as especificações SAE para vários graus de resistência de parafusos^[5].

TABELA 01 – Resistência dos parafusos conforme SAE.

Grau SAE	Faixa de Tamanhos [Polegadas]	Carga de Prova (Mínima) [MPa]	Tensão de Escoamento (Mínima) [MPa]	Tensão de Resistência (Mínima) [MPa]
1	0,25 – 1,50	227	248	413
2	0,25 – 0,75	377	392	509
2	0,875 – 1,50	227	248	413
4	0,25 – 1,50	447	689	792
5	0,25 – 1,00	585	633	826

Fonte: Projeto de Máquinas, 2ª ed. – Robert L. Norton, 2007.

Cont. TABELA 01 – Resistência dos parafusos conforme SAE.

Grau SAE	Faixa de Tamanhos [Polegadas]	Carga de Prova (Mínima) [MPa]	Tensão de Escoamento (Mínima) [MPa]	Tensão de Resistência (Mínima) [MPa]
5	1,125 – 1,50	509	558	723
5.2	0,25 – 1,00	585	633	826
7	0,25 – 1,50	723	792	916
8	0,25 – 1,50	826	895	1033
8.2	0,25 – 1,00	826	895	1033

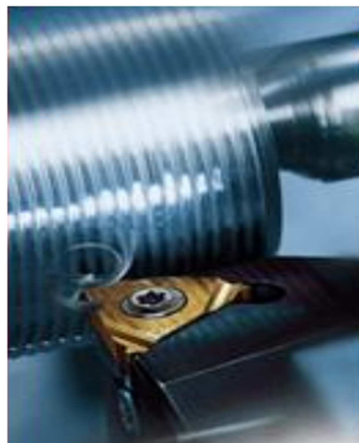
Fonte: Projeto de Máquinas, 2ª ed. – Robert L. Norton, 2007.

3.5. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Existem várias maneiras de fabricar roscas. Dentre os principais processos de fabricação de roscas externas, destacam-se dois: o Corte e a Laminação.

O processo de Corte de Roscas é realizado a partir de uma ferramenta de ponto único fixada em um torno ou, ainda, através da utilização de uma matriz que possui rosqueamento externo. Essas ferramentas de corte são, em geral, produzidas a partir de aço ferramenta endurecido. A barra a ser rosqueada deve apresentar exatamente o mesmo diâmetro externo da rosca que se pretende fabricar. Existem máquinas especializadas para esse fim, conhecidas como Máquinas de Fazer Roscas, que são largamente utilizadas na fabricação de parafusos em geral, em grandes quantidades e a um custo relativamente baixo. A Figura 08 apresenta o processo corte de roscas.

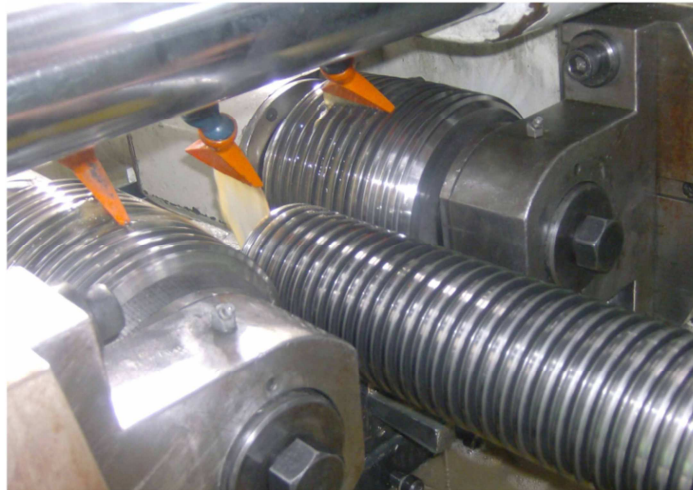
FIGURA 08 – Processo de corte de roscas.



Fonte: Processos de Usinagem de Roscas – Prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau.

O Processo de Laminação, também conhecido como Processo de Conformação de Roscas, é outro método de fabricação de roscas externas. Nesse processo, matrizes de aço endurecido são forçadas contra a superfície da barra que se pretende produzir a rosca. Assim, o material da barra a ser rosqueada escoa a frio, adquirindo o formato da rosca. É importante salientar que o diâmetro externo final da rosca será maior que o diâmetro inicial da barra, uma vez que o material é forçado para o interior das cavidades da matriz. A figura 09 ilustra o processo de laminação de roscas.

FIGURA 09 – Processo de laminação de roscas.



Fonte: Cavour – www.cavour.com.br.

O processo de laminação apresenta algumas vantagens sobre o processo de corte de roscas. A conformação a frio encrua e, portanto, aumenta a resistência mecânica do material além de introduzir tensões de compressão residuais benéficas nas raízes das roscas. Esse processo provoca, ainda, uma reorientação dos grãos do material para o formato de rosca, ao contrário do processo de corte de roscas que interrompe os grãos. Todos esses fatores contribuem para uma maior resistência mecânica de roscas laminadas quando comparadas às roscas cortadas. É importante acrescentar, ainda, que roscas laminadas apresentam menor perda de material que roscas cortadas.

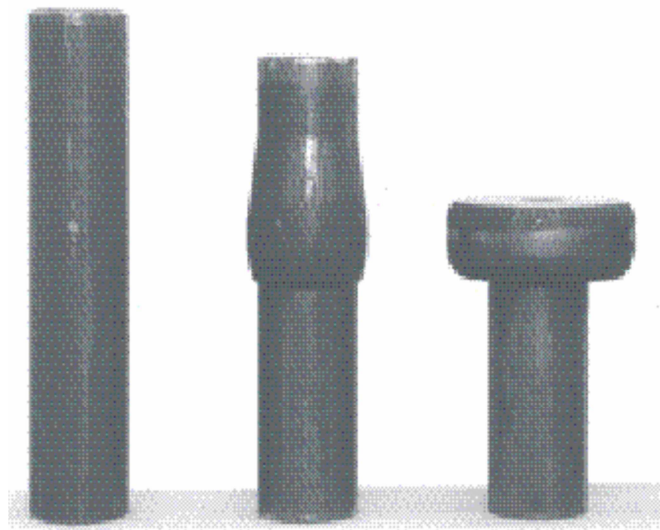
Fixadores de alta resistência são, normalmente, produzidos a partir de aço endurecido. Portanto, é importante que, se possível, o processo de laminação de roscas seja executado após o endurecimento do parafuso, já que o processo de

endurecimento térmico aliviará as tensões residuais introduzidas pela laminação, afetando, dessa forma, a resistência mecânica do material.

Nas aplicações mais críticas em que a carga sobre os parafusos seja alta e onde cargas que causam fadiga estiverem atuando, devem ser utilizadas as roscas laminadas. Em contrapartida, no caso de aplicações não críticas ou onde a carga aplicada nos fixadores seja leve, as roscas cortadas podem ser empregadas, já que o custo de produção é inferior.

As cabeças dos parafusos são fabricadas, geralmente, por conformação a frio por meio de um procedimento conhecido como Recalque. Nesse processo, a barra que irá formar o parafuso é presa firmemente na máquina de trabalho a frio com uma parte de material sobrando deixado em tamanho adequado. Uma matriz com o diâmetro de cabeça desejado é posicionada ao redor dessa extremidade exposta. Assim, quando o martelo desce, faz com que o material flua a frio, originando uma cabeça redonda. É importante acrescentar que, assim como no processo de laminação de roscas, a conformação a frio encrua o material, aumentando a resistência mecânica das cabeças dos parafusos. Recortes hexagonais ou Phillips podem ser produzidos pelo processo de conformação a frio, enquanto que superfícies hexagonais ou fendas devem ser usinadas posteriormente. A Figura 10 apresenta os principais estágios do processo de recalque da cabeça de um parafuso^[5].

FIGURA10 – Estágios do processo de recalque da cabeça de um parafuso.



Fonte: Introdução à Manufatura Mecânica – Prof. Dr. Gilmar F. Batalha, 2003.

3.6. TENSÕES EM FIXADORES

Quando um parafuso é rosqueado em uma porca, teoricamente, a carga deve ser dividida igualmente entre todos os filetes de rosca. Todavia, na prática, espaçamentos imprecisos entre os filetes direcionam praticamente toda a carga aplicada ao primeiro par de filetes, configurando a pior possibilidade. O outro extremo seria assumir a carga igualmente distribuída entre os filetes de rosca. Dessa forma, considera-se que a tensão verdadeira está entre esses extremos, porém, provavelmente muito mais próxima ao caso da carga compartilhada somente por um par de filetes.

Parafusos de fixação utilizados em situações que envolvem elevadas cargas são, geralmente, construídos a partir de aços de alta resistência e, normalmente, passam por processos de endurecimento. Já as porcas são, frequentemente, produzidas utilizando um material mais fraco que aquele aplicado no parafuso. Isso provoca um escoamento local dos filetes de rosca da porca quando o parafuso é rosqueado, melhorando, portanto, o ajuste da rosca e promovendo uma distribuição mais uniforme da carga entre os filetes.

3.6.1. Tensões Axiais

Parafusos de fixação, normalmente, estão submetidos a cargas axiais de tração. A área sob tensão de tração de um parafuso é dada por:

$$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_p + d_r}{2} \right)^2 \quad (1)$$

Onde, para roscas UNS:

$$d_p = d - 0,649\ 519/N \text{ e } d_r = 1,299\ 038/N \quad (2)$$

E para roscas ISO:

$$d_p = d - 0,649\ 519p \text{ e } d_r = 1,226\ 869p \quad (3)$$

Onde d = diâmetro externo, N = número de filetes por polegada e p = passo em milímetros.

Portanto, a tensão de tração axial em um parafuso é dada por:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_t} \quad (4)$$

3.6.2. Tensões de Cisalhamento

Uma possível forma de falha por cisalhamento envolve o rasgamento dos filetes de rosca tanto da porca quanto do parafuso. A ocorrência de um desses casos depende dos materiais empregados na porca e no parafuso. Se o material do parafuso é mais fraco, os seus filetes de roscas podem ser cortados ao longo do seu diâmetro menor, isto é, na raiz da rosca. No entanto, se a porca é mais fraca, como ocorre na maioria dos casos, pode ter seus filetes de rosca rasgados ao longo do seu diâmetro maior, ou seja, na raiz da rosca. Agora, se a resistência é idêntica em ambos os materiais, o conjunto pode ser rasgado ao longo do diâmetro primitivo.

Qualquer que seja o caso, deve-se considerar algum grau de distribuição da carga entre os filetes de rosca, para calcular as tensões. Uma maneira de fazer isso consiste em considerar que, uma vez que para uma falha completa todos os filetes devam ser rasgados, então admite-se uma distribuição de carga uniforme. Para que essa hipótese seja válida, considera-se que a porca ou o parafuso, ou ambos, apresentem boa ductilidade, para que a rosca possa escoar à medida que o conjunto começa a falhar. Todavia, se forem utilizados materiais frágeis, o ajuste entre os filetes de rosca será deficiente e, portanto, a carga será distribuída de maneira desigual. Assim, observa-se que a realidade, mais uma vez, está inserida entre essas duas hipóteses.

A área sob cisalhamento, A_s , para um filete de rosca é a área do cilindro de seu diâmetro menor, d_r :

$$A_s = \pi d_r w_i p \quad (5)$$

Onde p = passo de rosca, w_i é o fator que define a porcentagem do passo ocupado pelo metal no diâmetro menor. Valores de w_i para diversas formas comuns de roscas são mostrados na Tabela 02.

TABELA 02 – Fatores de área para área de cisalhamento de roscas.

Tipo de rosca	w_i (menor)	w_i (maior)
UNS/ISO	0,80	0,88
Quadrada	0,50	0,50
Acme	0,77	0,63
Botaréu	0,90	0,83

Fonte: Projeto de Máquinas, 2ª ed. – Robert L. Norton, 2007.

Para o rasgamento da porca no seu diâmetro maior, a área sob cisalhamento para um filete de rosca é dada por:

$$A_s = \pi d w_0 p \quad (6)$$

Onde w_0 com base no diâmetro maior é encontrado na Tabela 02.

Portanto, a tensão de cisalhamento é calculada por:

$$\tau_s = \frac{F}{A_s} \quad (7)$$

3.6.3. Tensões Torcionais

Quando uma porca é apertada em um parafuso uma tensão de torção pode ser desenvolvida. Se há uma boa lubrificação entre o parafuso e a porca, uma menor quantidade do torque aplicado será transmitida ao parafuso e uma maior é absorvida entre a porca e a superfície engastada. Entretanto, se existir ferrugem entre a porca e o parafuso dificultando o movimento, todo o torque aplicado irá torcer o parafuso. Isso explica o fato de que parafusos enferrujados cisalham mesmo quando se tenta afrouxar a porca. Assim, considerando o pior caso de alto atrito nas roscas, o conjunto das tensões de torção em uma seção circular é dado por:

$$\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d_r^3} \quad (8)$$

Onde o diâmetro menor da rosca, d_r , deve ser utilizado^[5,13].

3.7. CORROSÃO

Em maior ou menor grau, a grande maioria dos materiais interage com os mais diversificados ambientes. Com frequência, tais interações comprometem a utilidade de um material como resultado da deterioração de suas propriedades mecânicas, de outras propriedades físicas ou de sua aparência. Ocasionalmente, o comportamento de um material à degradação para determinada aplicação é negligenciado, acarretando consequências indesejadas.

Os mecanismos de deterioração são diferentes para as três grandes classes de materiais. No caso dos metais, há uma efetiva perda de material, seja por corrosão ou por oxidação. Já as cerâmicas são relativamente resistentes à deterioração, processo também denominado, frequentemente, como corrosão, a qual ocorre, geralmente sob temperaturas elevadas ou em ambientes extremos. No caso dos polímeros, o termo degradação é utilizado com maior frequência. Estes podem se dissolver ou inchar quando são expostos a um solvente líquido. Radiações eletromagnéticas e temperaturas elevadas podem alterar suas estruturas moleculares.

Normalmente, a corrosão é classificada a partir da forma como ela se manifesta. Dentre os principais tipos de corrosão metálica, podem ser citados: uniforme, em frestas, por pites e intergranular.

A corrosão uniforme, um dos tipos mais comuns, é uma forma de corrosão eletroquímica que ocorre com intensidade equivalente ao longo de toda a superfície que está exposta e, geralmente, deixa pra trás uma incrustação ou um depósito. Macroscopicamente, as reações de oxidação e redução ocorrem aleatoriamente sobre a superfície.

A corrosão eletroquímica também pode ocorrer a partir de diferenças nas concentrações de íons ou gases dissolvidos na solução eletrolítica, e entre duas regiões da mesma peça metálica. Para uma pilha de concentração desse tipo, a corrosão ocorre no local que possuir a menor concentração. Um exemplo desse tipo de corrosão ocorre em frestas e recessos. A corrosão que ocorre preferencialmente nessas posições é chamada de corrosão em frestas.

A corrosão por pites é outra forma muito localizada de ataque por corrosão, onde pequenos pites (ou furos) se formam. Ordinariamente, eles penetram a partir do topo de uma superfície horizontal para o interior do material, em uma direção

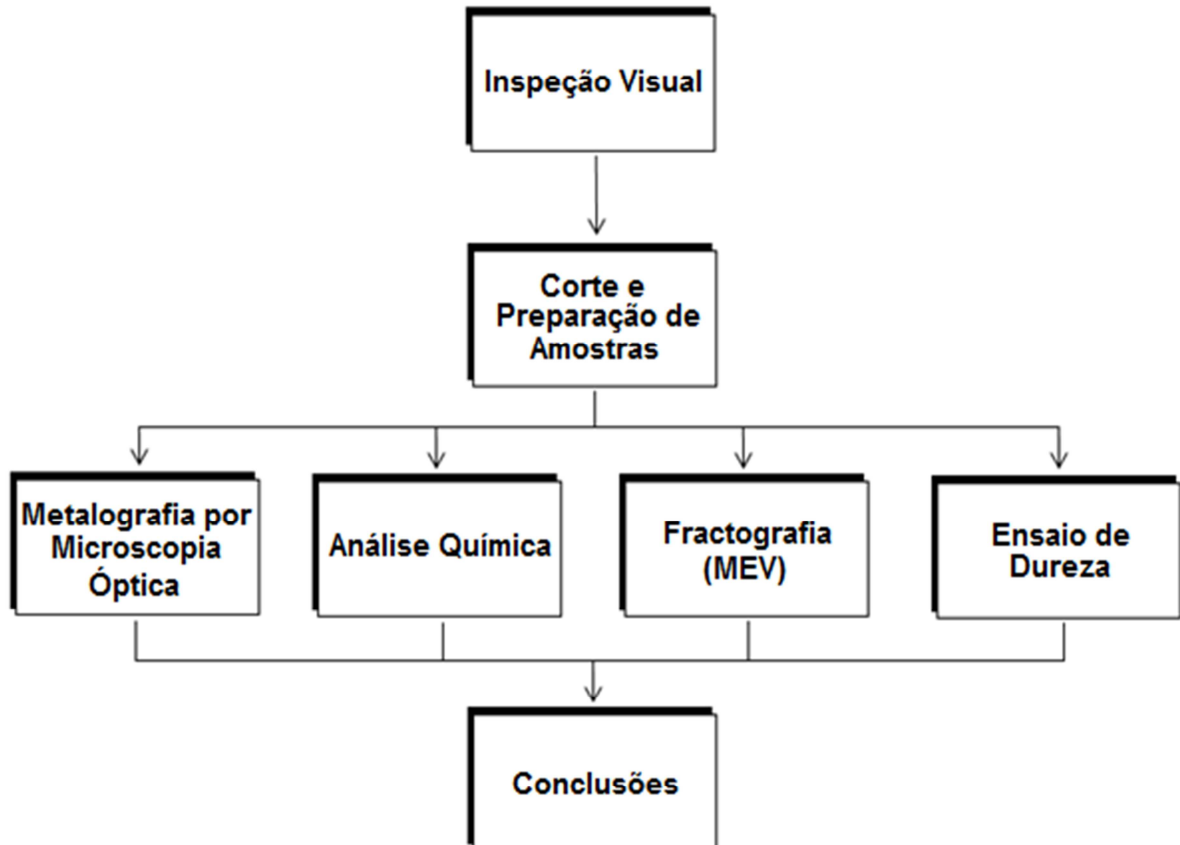
praticamente vertical. Esse é um tipo de corrosão extremamente traiçoeiro, que, frequentemente, fica sem ser detectado e que apresenta uma perda de material muito pequena até que ocorra a falha.

A corrosão intergranular, como o próprio nome sugere, ocorre preferencialmente ao longo dos contornos de grãos para algumas ligas e em alguns ambientes específicos. Como resultado final, tem-se que uma amostra macroscópica se desintegra ao longo de seus contornos de grãos. Esse tipo de corrosão ocorre, principalmente, em alguns aços inoxidáveis^[14].

4. METODOLOGIA

Para a realização das análises, o trabalho foi dividido em várias fases. A Figura 11 apresenta um fluxograma que mostra todas as etapas desenvolvidas, desde a chegada dos parafusos até as considerações finais.

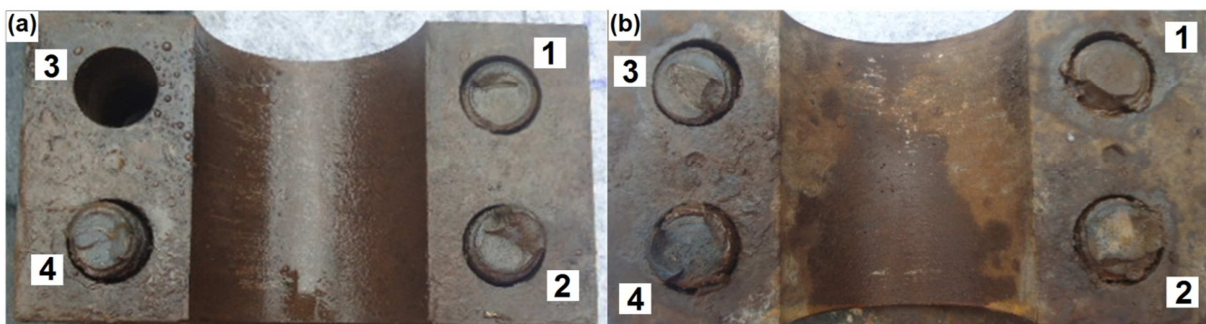
FIGURA 11 – Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.



Fonte: Autor, 2013.

Foram encaminhados ao Laboratório de Metalografia da Universidade Federal do Pará (LABMETAL – UFPA) oito parafusos fraturados e um parafuso novo, totalizando nove parafusos, para análises. Os parafusos fraturados estavam instalados em dois mancais. Um dos mancais é posicionado ao lado da cabine de controle enquanto que o outro é posicionado no lado oposto à cabine. A identificação foi realizada da seguinte maneira: os parafusos foram enumerados de 01 a 04 em cada mancal; os parafusos que fixavam o mancal posicionado ao lado da cabine foram identificados pela sigla LC (Lado da Cabine) seguida pela numeração; da mesma forma, os parafusos que fixavam o mancal posicionado no lado oposto à cabine foram identificados pela sigla LOC (Lado Oposto à Cabine) seguida pela numeração. A Figura 12 mostra o esquema de identificação.

FIGURA 12 – (a) Metade do mancal do Lado Oposto à Cabine (LOC) com parafusos numerados de 01 a 04; (b) Metade do mancal do Lado da Cabine (LC) com parafusos numerados de 01 a 04.



Fonte: Autor, 2013.

O parafuso novo, não fraturado, foi identificado com a sigla PN. A Figura 13 apresenta o parafuso novo.

FIGURA 13 – Parafuso Novo (PN).



Fonte: Autor, 2013.

As análises foram realizadas tanto nos parafusos fraturados como no parafuso novo. A Figura 14 mostra os quatro parafusos fraturados que fixavam o mancal do lado da cabine, enquanto que a Figura 15 apresenta os quatro parafusos fraturados que fixavam o mancal do lado oposto à cabine.

FIGURA 14 – Parafuso do lado da cabine (LC01 a LC04).



Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 15 – Parafusos do lado oposto à cabine (LOC01 a LOC04).



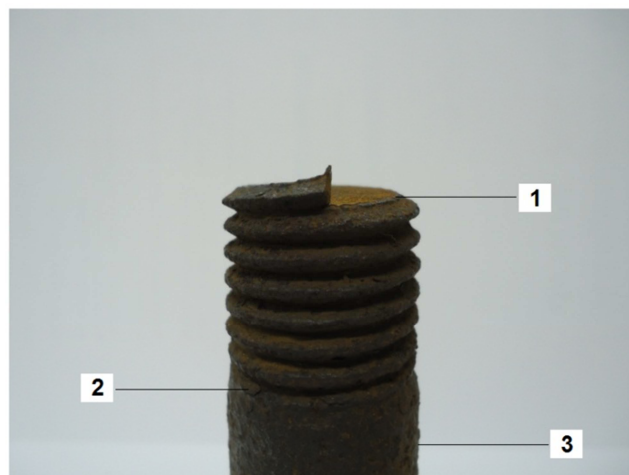
Fonte: Autor, 2013.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. INSPEÇÃO VISUAL

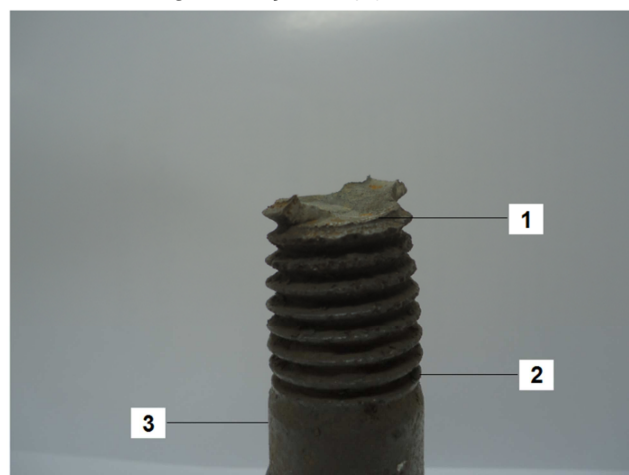
A partir da inspeção visual^[6], observou-se a presença de corrosão superficial, fragmentação e corrosão por pit. Normalmente, o processo de corrosão se origina a partir de trincas superficiais, enquanto que a fragmentação é causada, na maioria dos casos, por trincas subsuperficiais. As Figuras 16 e 17 ilustram as observações.

FIGURA 16 – Parafuso LOC01: fadiga superficial caracterizada por (1) corrosão por pit, (2) fragmentação e (3) corrosão.



Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 17 – Parafuso LOC04: fadiga superficial caracterizada por (1) corrosão por pit, (2) fragmentação e (3) corrosão.



Fonte: Autor, 2013.

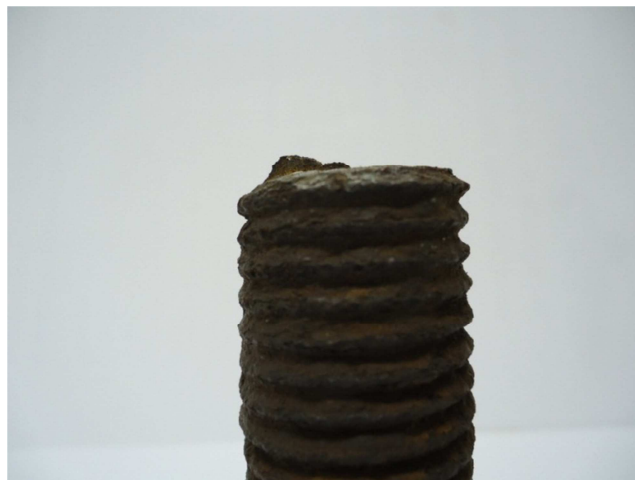
Observou-se, ainda, que alguns parafusos apresentaram os filetes de rosca parcialmente preenchidos com uma mistura de graxa e pós, provavelmente provenientes do processo de perfuração. As Figuras 18 e 19 ilustram esta observação.

FIGURA 18 – Parafuso LOC03: filetes de rosca parcialmente preenchidos com uma mistura de graxa e pós.



Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 19 – Parafuso LC03: filetes de rosca parcialmente preenchidos com uma mistura de graxa e pós.







Fonte: Autor, 2013.

Conforme as especificações SAE^[7], o grau de cada parafuso é indicado pela presença ou ausência de marcas nas cabeças, como pode ser observado na Figura 07, exposta anteriormente. Todos os parafusos apresentaram desgaste nas






cabeças, dificultando a identificação do grau de cada um. A Tabela 03 apresenta as fotos das cabeças dos parafusos.

TABELA 03 – Fotos das cabeças dos parafusos identificando o Grau SAE.

Parafuso	Marcações	Especificação SAE
PN		Grau 8
LC01		Grau 8
LC02		Grau 8
LC03		Grau 5

Fonte: Autor, 2013.

Cont. TABELA 03 – Fotos das cabeças dos parafusos identificando o Grau SAE.

LC04		Grau 5
LOC01		Grau 5
LOC02		Grau 5
LOC03		Grau 5
LOC04		Grau 5

Fonte: Autor, 2013.

5.2. CORTE E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Após a etapa de inspeção visual, por uma questão de dimensões, tanto as cabeças quanto as superfícies de fratura foram cuidadosamente separadas dos parafusos^[8], visando preservar, principalmente, as falhas a serem analisadas. Para isso, foi utilizada uma máquina policorte. Posteriormente, as superfícies de fratura foram limpas, utilizando soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl), e lubrificadas, para evitar oxidação. A Figura 20 mostra o momento em que a cabeça do parafuso PN era retirada, enquanto que a Figura 21 apresenta a superfície de fratura do parafuso LOC01 após todo esse processo.

FIGURA 20 – Momento da retirada da cabeça do parafuso PN.



Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 21 – Superfície de fratura do parafuso LOC01.



Fonte: Autor, 2013.

5.3. ANÁLISE QUÍMICA

A composição química dos parafusos foi determinada por Espectrometria de Emissão Óptica. A Tabela 04 apresenta a composição percentual dos elementos mais relevantes. A Norma SAE J429 recomenda o teor de Carbono, tanto para parafusos de Grau 5 quanto de Grau 8, variando em uma faixa de composição de 0,28 a 0,55%. O teor máximo de Fósforo recomendado, tanto para parafusos de Grau 5 quanto de Grau 8, é de 0,048%. Já o teor máximo de Enxofre recomendado é de 0,058% para parafusos de Grau 5 e 0,045% para parafusos de Grau 8.

TABELA 04 – Composição química dos parafusos analisados.

Parafuso	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb
PN	0,457	0,204	0,755	0,01	0,0256	0,953	0,016	0,069	0,002	0,155	0,0001
LOC01	0,368	0,243	0,767	0,012	0,0103	0,25	0,006	0,026	0,005	0,08	0,0015
LOC02	0,376	0,231	0,75	0,013	0,0143	0,247	0,006	0,027	0,005	0,083	0,0013
LOC03	0,299	0,057	0,725	0,016	0,0045	0,849	0,005	0,015	0,045	0,006	0,0014
LOC04	0,4	0,239	0,906	0,013	0,009	0,298	0,009	0,041	0,032	0,03	0,0016
LC01	0,38	0,22	0,938	0,009	0,0105	0,349	0,208	0,046	0,037	0,114	0,0017
LC02	0,408	0,2	0,982	0,019	0,0106	0,393	0,252	0,023	0,035	0,036	0,002
LC03	0,284	0,065	0,781	0,015	0,0098	0,819	0,005	0,033	0,041	0,021	0,0007
LC04	0,354	0,221	0,737	0,014	0,0155	0,245	0,006	0,029	0,004	0,087	0,0003

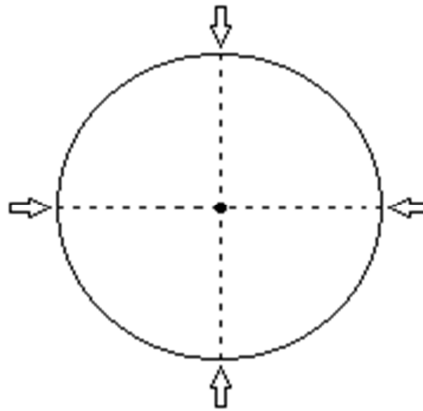
Fonte: Autor, 2013.

5.4. ENSAIO DE DUREZA

Para a determinação da microdureza, foram realizados ensaios de microdureza Vickers^[9]. As indentações foram realizadas a cada 0,5 mm ao longo de dois eixos perpendiculares passando pela seção transversal dos parafusos, conforme pode ser observado no esquema ilustrado pela Figura 22. Assim, a partir dos resultados, foram determinados os perfis de microdureza, conforme pode ser observado nas Figuras de 23 a 31.

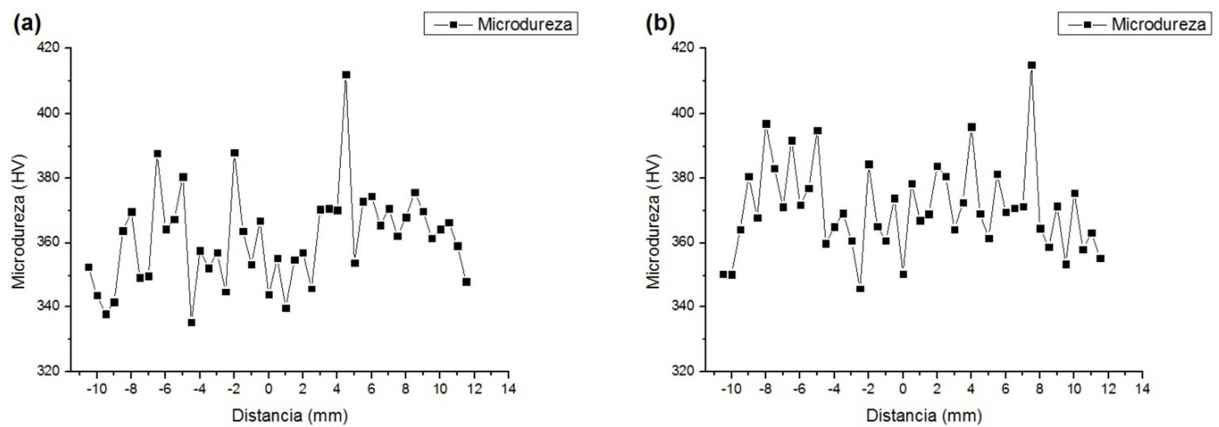
A Norma SAE J429 recomenda, para parafusos de Grau 5, que as durezas do núcleo dos parafusos devem variar de 28 a 34 HRC (280 a 330 HV). Para parafusos de Grau 8, a norma recomenda que as durezas do núcleo dos parafusos devem variar de 33 a 39 HRC (320 a 380 HV).

FIGURA 22 – Esquema de indentações.



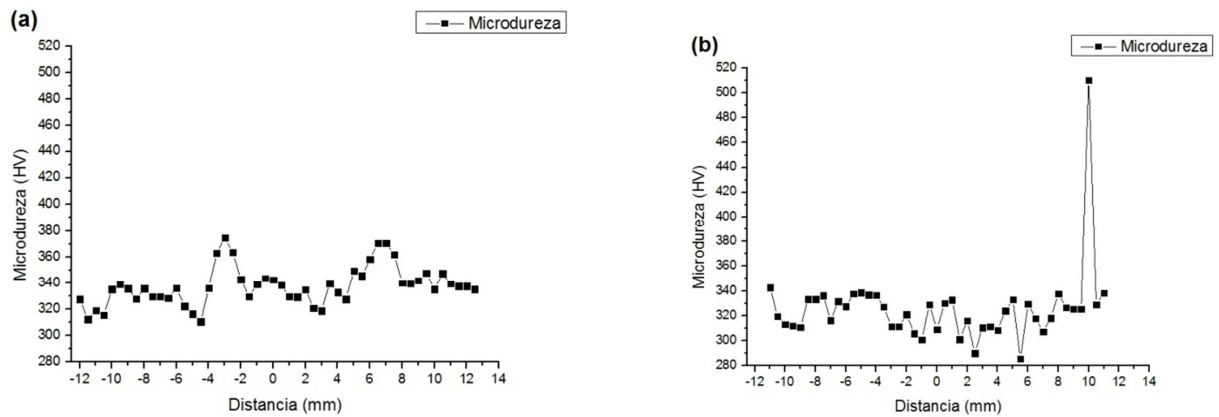
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 23 – Parafuso PN: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical.



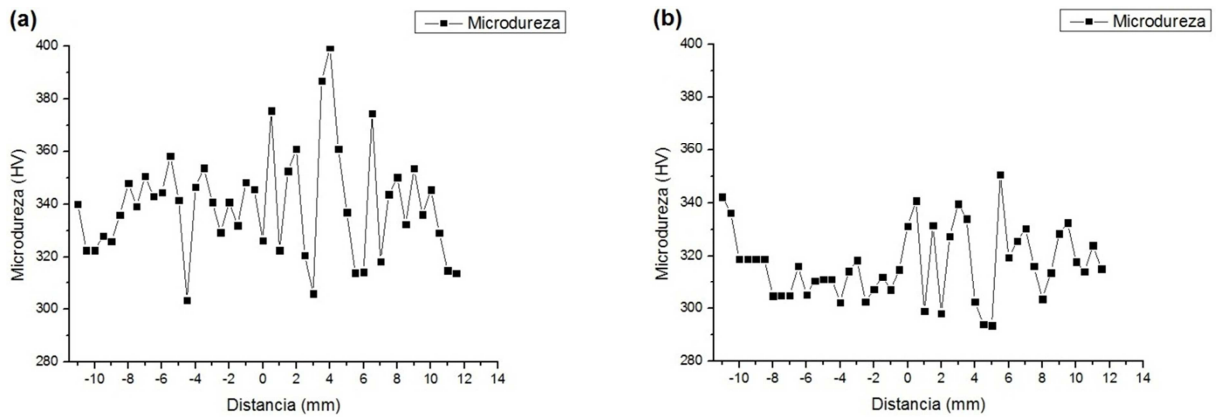
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 24 – Parafuso LC01: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical.



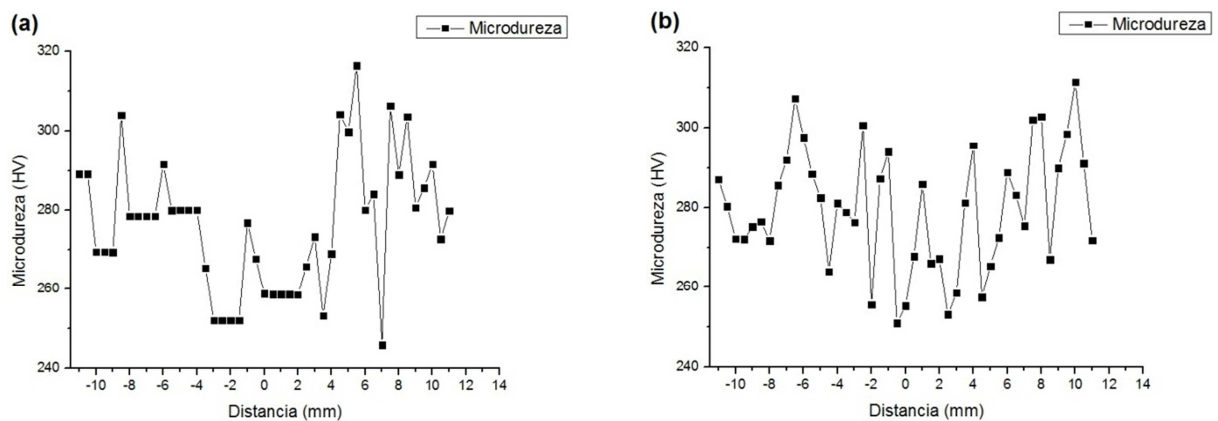
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 25 – Parafuso LC02: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical.



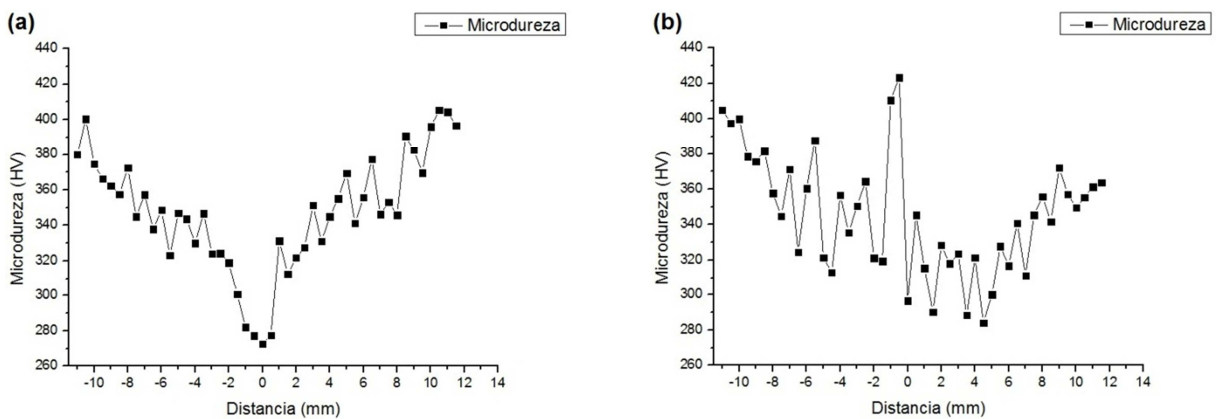
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 26 – Parafuso LC03: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical.



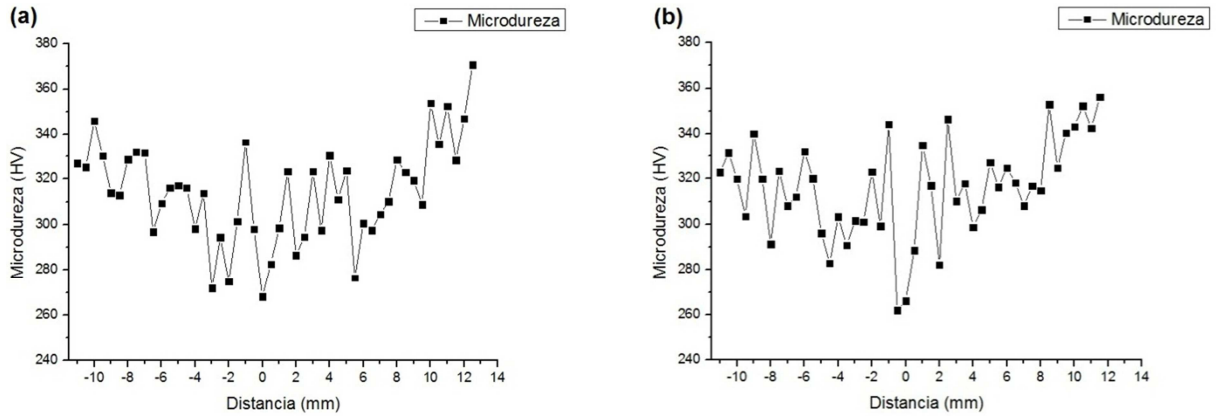
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 27 – Parafuso LC04: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical.



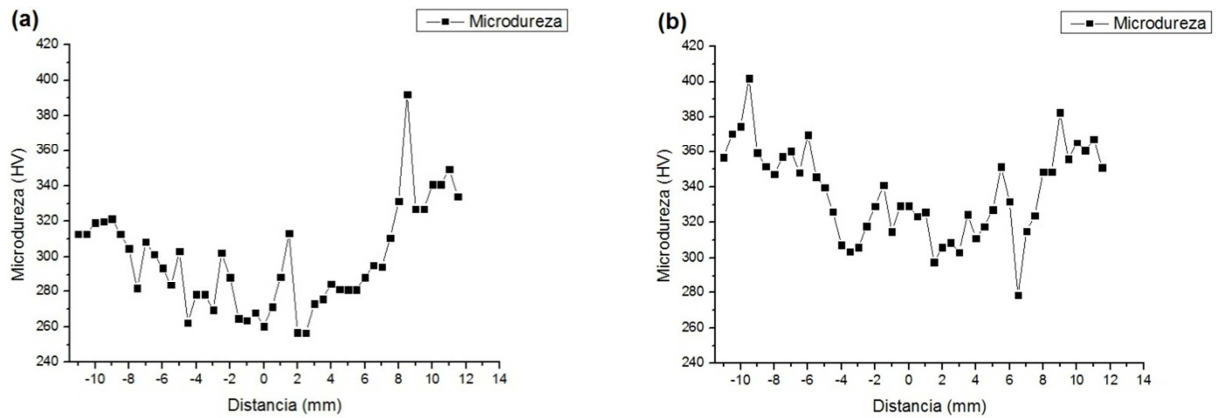
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 28 – Parafuso LOC01: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical.



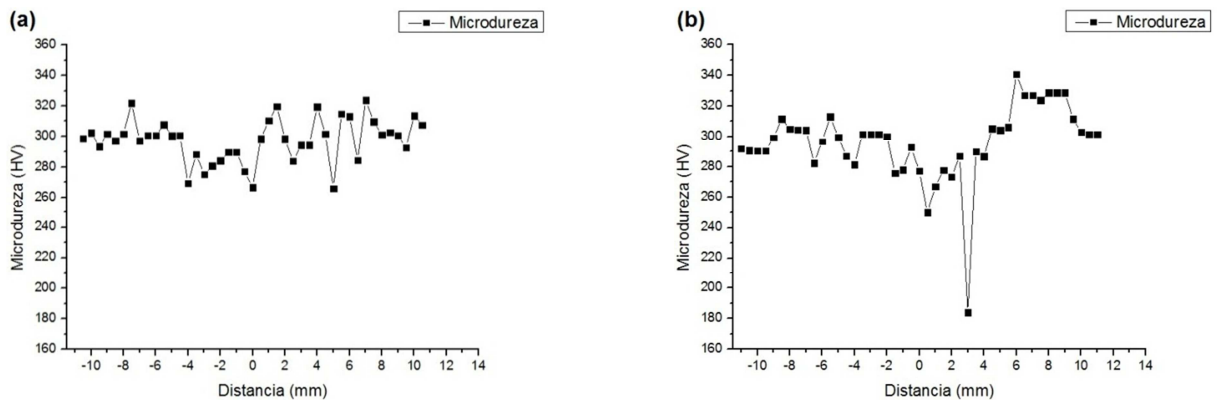
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 29 – Parafuso LOC02: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical.



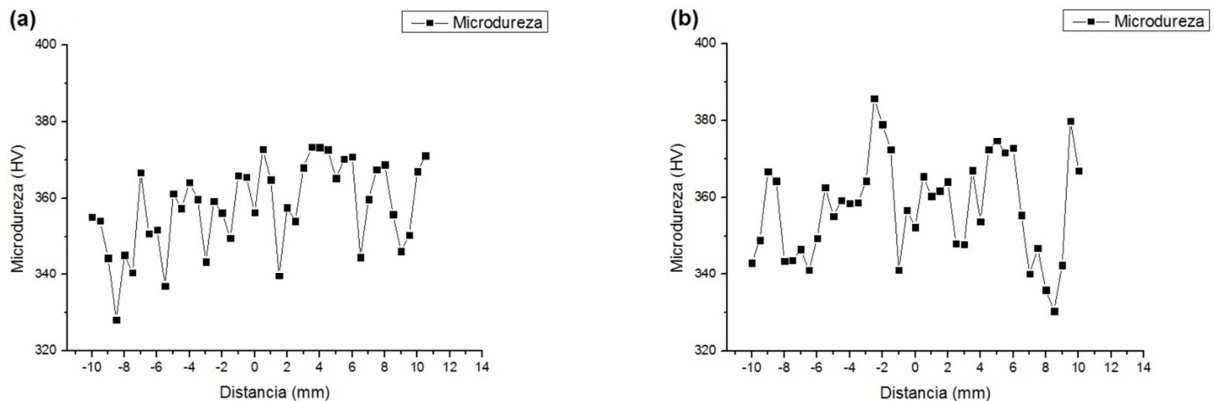
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 30 – Parafuso LOC03: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical.



Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 31 – Parafuso LOC04: perfis de dureza (microdureza Vickers) nas direções (a) horizontal e (b) vertical.



Fonte: Autor, 2013.

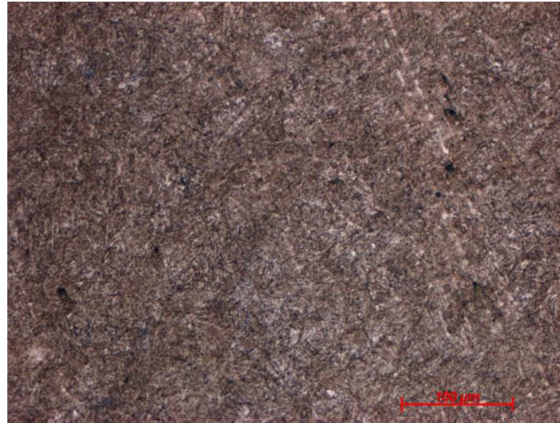
As durezas determinadas para os parafusos PN e LC02 estão, em sua maioria, dentro do intervalo de valores recomendados pela norma para parafusos de Grau 8, como pode ser observado nas Figuras 23 e 25, respectivamente. Já o parafuso LC01 apresentou valores de dureza abaixo do recomendado pela Norma SAE J429, para parafusos de Grau 8, conforme pode ser observado na Figura 24.

As durezas obtidas para os parafusos LOC01, LOC02 e LOC03 obedecem ao padrão da Norma SAE J429 para parafusos de Grau 5, como mostra as Figuras 28, 29 e 30, respectivamente. As durezas determinadas para os parafusos LC04 e LOC04 estão, em sua maioria, acima de 340 HV, conforme pode ser constatado nas Figuras 27 e 31, respectivamente. Já o parafuso LC03 apresentou durezas abaixo de 280 HV, valor mínimo recomendado pela norma para parafusos de Grau 5, como pode ser observado na Figura 26.

5.5. METALOGRAFIA POR MICROSCOPIA ÓPTICA

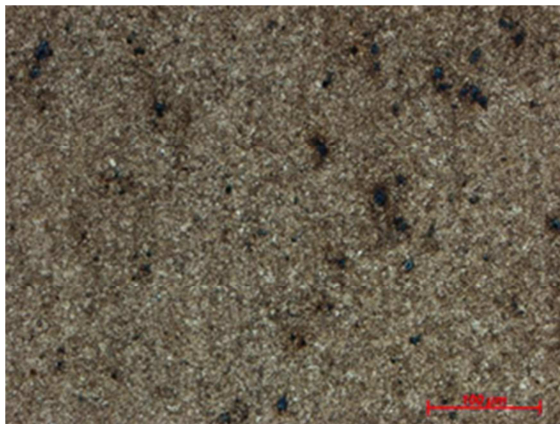
As metalografias por microscopia óptica foram realizadas na superfície da seção transversal dos parafusos. Inicialmente as amostras foram lixadas (sequência de lixas: 100, 220, 340, 400, 600, 800 e 1200), polidas (sequência de pastas de polimento: 9, 6, 3 e 1 micro) e atacadas com Nital 2%^[10,11]. Posteriormente foram levadas ao microscópio óptico^[12]. A partir de comparações com a literatura e com base nos resultados de dureza obtidos, observou-se que todos os parafusos, sem exceção, apresentaram a microestrutura martensita revenida. As Figuras de 32 a 40 apresentam os resultados.

FIGURA 32 – Microestrutura do centro do parafuso PN. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X.



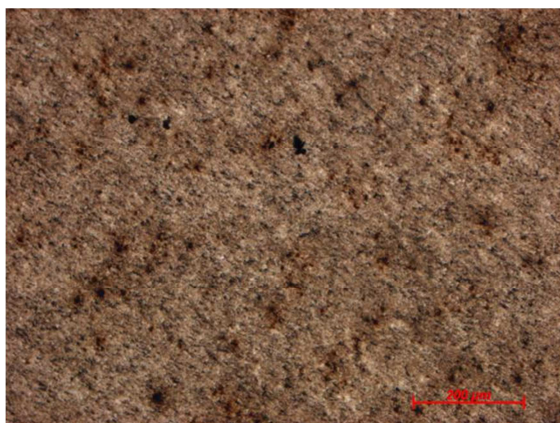
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 33 – Microestrutura do centro do parafuso LC01. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X.



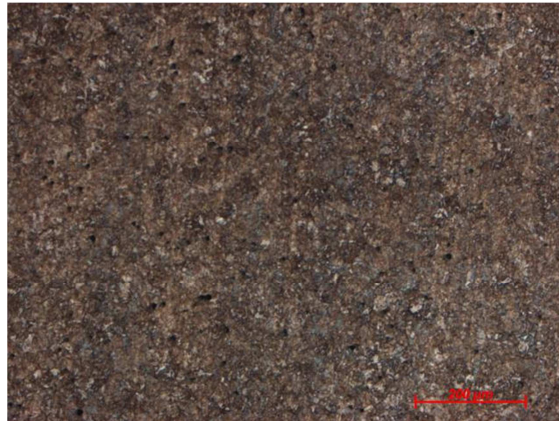
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 34 – Microestrutura do centro do parafuso LC02. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X.



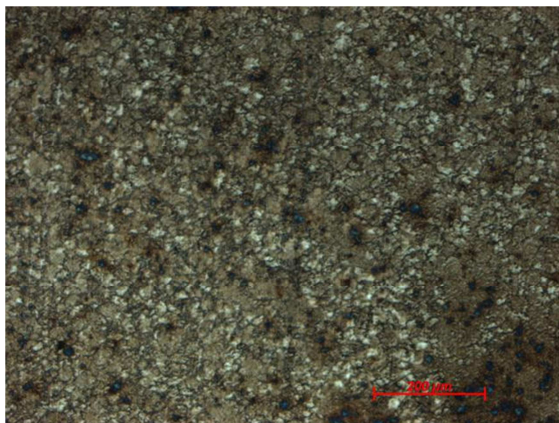
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 35 – Microestrutura do centro do parafuso LC03. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X.



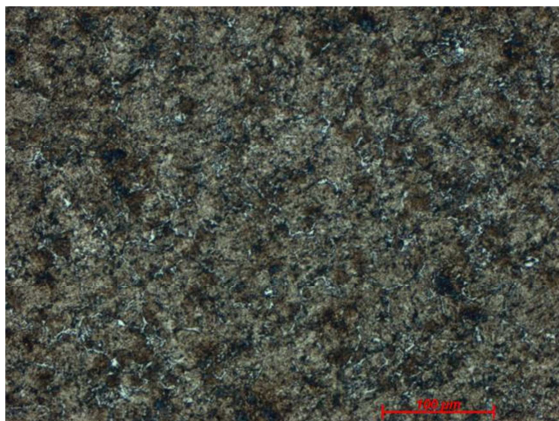
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 36 – Microestrutura do centro do parafuso LC04. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X.



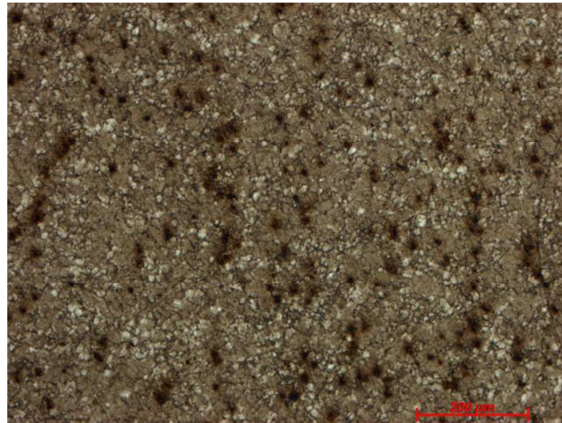
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 37 – Microestrutura do centro do parafuso LOC01. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X.



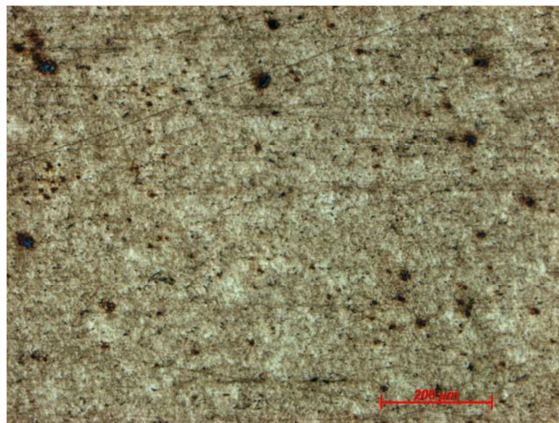
Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 38 – Microestrutura do centro do parafuso LOC02. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X.



Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 39 – Microestrutura do centro do parafuso LOC03. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X.



Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 40 – Microestrutura do centro do parafuso LOC04. Martensita revenida, ataque com Nital 2%, aumento de 100X.











Fonte: Autor, 2013.

5.6. FRACTOGRAFIAS E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Foram realizadas inspeções visuais nas superfícies de fratura dos parafusos após a etapa de separação^[6]. A Tabela 05 apresenta as superfícies fraturadas dos parafusos.

TABELA 05 – Superfícies de fratura dos parafusos.

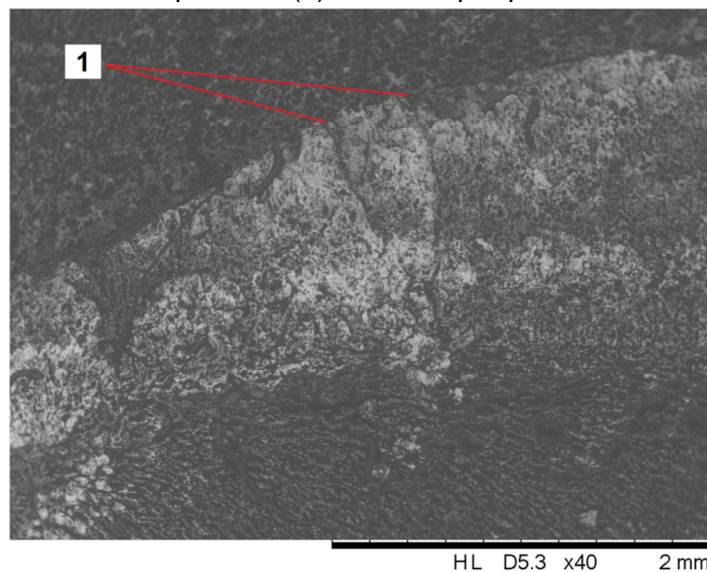
Parafuso	Fratura	Parafuso	Fratura
LC01		LOC01	
LC02		LOC02	
LC03		LOC03	
LC04		LOC04	

Fonte: Autor, 2013.

Todos os parafusos fraturaram transversalmente a partir da raiz das roscas, com exceção do parafuso LOC03, que, apesar da falha também ter se iniciado na

raiz da rosca, apresentou um ângulo de fratura de 45° , indicando que foi o último a falhar após ter suportado uma sobrecarga em tração. Já as demais fraturas apresentaram superfícies aproximadamente planas, comum em propagação de trinca por fadiga. As origens das trincas foram identificadas nas raízes das roscas, especialmente a partir de pits, conforme ilustram as Figuras 41 e 42.

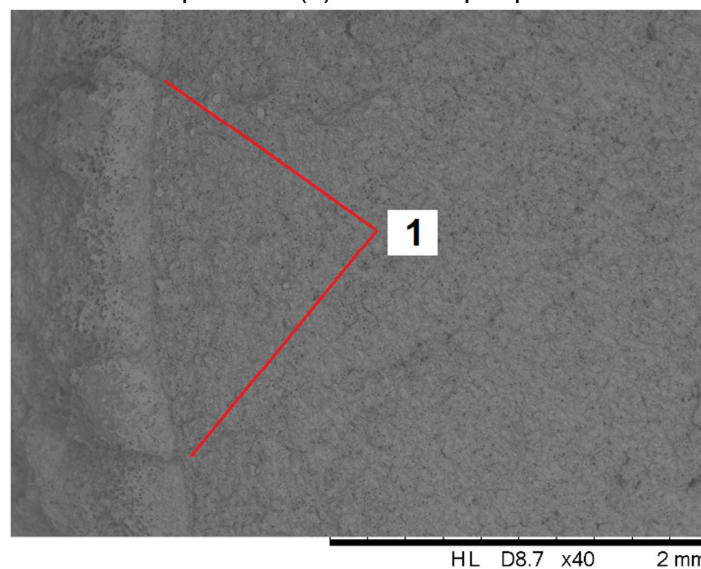
FIGURA 41 – Macrografia do parafuso LC01, indicando uma fratura com múltiplas origens a partir de (1) corrosão por pit.



UFPA - CAMPUS DE MARABA

Fonte: Autor, 2013.

FIGURA 42 – Macrografia do parafuso LOC01, indicando uma fratura com múltiplas origens a partir de (1) corrosão por pit.



UFPA-FEMAT

Fonte: Autor, 2013.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que, dos oito parafusos instalados nos mancais, seis parafusos estavam fora das especificações recomendadas pelo fornecedor, que utiliza parafusos SAE Grau 8 de alta resistência. São eles: LC03, LC04, LOC01, LOC02, LOC03 e LOC04. Portanto, somente os parafusos PN, LC01 e LC02 estavam dentro das especificações, isto é, apresentaram Grau 8.

Todos os parafusos analisados apresentaram composições químicas dentro das faixas recomendadas pela sua respectiva norma. No que diz respeito à dureza, dos oito parafusos instalados nos mancais, somente seis se apresentaram, em sua maioria, dentro das faixas recomendadas pela respectiva norma. São eles: LC02, LC04, LOC01, LOC02, LOC03 e LOC04, além do parafuso PN. Já os parafusos LC01 e LC03 apresentaram pequenos desvios em relação às faixas de dureza recomendadas pelas respectivas normas, posicionando-se abaixo dos valores mínimos especificados.

A partir das análises realizadas, observou-se que o principal mecanismo causador da falha foi a corrosão por pit, uma vez que as trincas se originaram a partir da presença de pits localizados nas raízes das roscas. Tais pits, posteriormente, se propagaram de duas formas distintas: principalmente por fadiga, especialmente devido às altas vibrações do equipamento, observadas durante a operação e, depois, por sobrecarga, que pode ser relacionada, tanto às movimentações bruscas da torre de perfuração durante a operação, quanto aos resultados de resistência e dureza observados.

REFERÊNCIAS

- [01] **Mineração Atual no Brasil**. Disponível em: <<http://www.sempretops.com/informacao/mineracao-atual-no-brasil>>. Acesso em: 10 Julho 2013.
- [02] **Análise de Falha de Componentes e Produtos Metálicos**. Disponível em: <http://www.ipt.br/solucoes/299analise_de_falhas_de_componentes_e_produtos_metalicos.htm>. Acesso em: 17 Agosto 2013.
- [03] ZAIONS, D. R. **Elementos de Máquinas I**. Universidade do Oeste de Santa Catarina. Joaçaba, 2008.
- [04] **História do Parafuso**. Disponível em: <<http://www.reipar.com.br/historia-do-parafuso.php>>. Acesso em: 15 Julho 2013.
- [05] NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 2. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [06] Handbook of Metals Volume 12 of the 9th Edition – **Fractography**.
- [07] SAE J49 - **Mechanical and Material Requirements for Externally Threaded Fasteners**.
- [08] ASTM E3 – 95 – **Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens**.
- [09] ABNT NBR NM ISO 6507 – 1:2008 – **Materiais Metálicos - Ensaio de Dureza Vickers**.
- [10] NBR 8653 - **Metalografia e Tratamentos Térmicos das Ligas Fe-C**.
- [11] NBR 8108 - **Ataque com Reativos Metalográficos das Ligas Fe-C**.
- [12] Handbook of Metals Volume 9 of the 9th Edition. **Metallography and Microstructures**.
- [13] JUVINALL, R. C. **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas**. 4. ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [14] CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [15] SILVA, A. R. **Análise de Falha em Hastes para Brocas Empregadas na Perfuração de Rochas**. Universidade Federal do Pará. Marabá, 2013.