



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**VINÍCIUS TEIXEIRA DE MORAES**

**ANÁLISE DA FALHA DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DAS SAPATAS DE UM  
ALIMENTADOR DE MINÉRIOS**

**MARABÁ - PA**  
**2018**

VINÍCIUS TEIXEIRA DE MORAES

**ANÁLISE DA FALHA DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DAS SAPATAS DE UM  
ALIMENTADOR DE MINÉRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador:

Prof. Dr. Márcio Corrêa de Carvalho.

MARABÁ - PA  
2018

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA**

---

Moraes, Vinícius Teixeira de

Análise da falha dos parafusos de fixação das sapatas de um alimentador de minérios / Vinícius Teixeira de Moraes ; orientador, Márcio Corrêa de Carvalho. — 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2018.

1. Minas e recursos minerais - Canaã dos Carajás (Pa). 2. Localização de falhas (Engenharia). 3. Equipamentos industriais. 4. Companhia Vale do Rio Doce. I. Carvalho, Márcio Corrêa de, orient. II. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. III. Título.

CDD: 22. ed.: 622

VINÍCIUS TEIXEIRA DE MORAES

**ANÁLISE DA FALHA DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DAS SAPATAS DE UM  
ALIMENTADOR DE MINÉRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

**DATA DA AVALIAÇÃO:** 09/03/2018

**CONCEITO:** EXCELENTE.

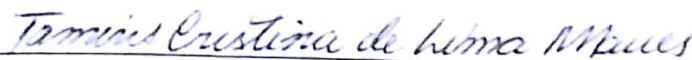
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Márcio Corrêa de Carvalho  
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientador)



Prof. Dr. Luis Moreira Gomes  
(FAFIS – ICÉ – UNIFESSPA – Membro)



Prof. Ma. Tamiris Cristina de Lima Maues  
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

Dedico este trabalho a minha mãe, meu pai e meus avós que, independente das circunstâncias, nunca mediram esforços para realização deste sonho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus que me capacitou de sabedoria e discernimento para chegar onde estou.

Agradeço aos meus pais que me apoiaram e incentivaram diversas vezes.

Aos meus avós que sempre me orientaram e confortaram com sua sabedoria.

A Daniele Naine Guimarães de Souza, pela paciência, compreensão, carinho e companheirismo concedido durante esta fase universitária.

Agradeço a empresa Vale S.A. pela oportunidade.

Aos meus colegas da FEMAT 2013, obrigado pela paciência.

Aos meus amigos de infância “GALERA DA RUA – G.D.R” por todas as risadas e companheirismo. Valeu Galera!

Ao meu orientador Márcio Corrêa de Carvalho pela paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores da Faculdade de Engenharia de Materiais, em especial aos professores Renata Lilian Ribeiro Portugal Fagury e Elias Fagury Neto que contribuíram para minha formação profissional.

*Deus é a lei e o legislador do Universo.*

*Albert Einstein*

## **RESUMO**

Para que a mineração exista, se faz necessário, diversos equipamentos e máquinas que facilitam a produção em larga escala. Um dos problemas encontrados, não só nas mineradoras, mas em qualquer empresa, são as paradas de produção inesperadas por falhas de equipamentos ou máquinas. Visando entender os motivos que levaram a falhas catastróficas de parafusos de uma alimentadora de sapata na região de Canaã dos Carajás no estado do Pará, realizou-se um estudo de análise de falhas dos mesmos para identificar as causas do problema, bem como propor uma solução para as adversidades em questão. Os resultados obtidos indicam que os parafusos analisados estão dentro dos padrões da análise química contendo 0.64% de C, dureza que variam de 39HRC a 44 HRC, a análise de falhas mostra que os mesmos fraturaram devido a esforços de fadiga.

**Palavras-chave:** Análise de Falhas, Parafusos, Equipamentos de Mineração.



## **ABSTRACT**

For mining to exist, if necessary, various equipment and machines that facilitate large-scale production. One of the problems encountered, not only in the mining companies, but in any company, is the unexpected production stops due to equipment or machinery failures. In order to understand the reasons that led to catastrophic screw failures of a shoe feeder in the region of Canaã dos Carajás in the state of Pará, a study of their failure was carried out to identify the causes of the problem, as well as to propose a solution to the adversities in question. The obtained results indicate that the bolts analyzed are within the chemical analysis standards containing 0.64% C, hardness ranging from 39HRC to 44 HRC, the failure analysis shows that the same fractured due to fatigue efforts.

**Keywords:** Failure Analysis, Screws, Mining Equipment.

## LISTAS DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Principais investimentos na mineração (em milhões de dólares). .....	17
<b>Figura 2:</b> Alguns equipamentos que participam do processo de tratamento/beneficiamento de minério.....	18
<b>Figura 3:</b> Alimentador de sapatas.....	18
<b>Figura 4:</b> Exemplo de uma porca, parafuso e rosca, além do conjunto completo.....	19
<b>Figura 5:</b> Alguns tipos comuns de cabeças de parafusos. ....	20
<b>Figura 6:</b> Propriedades mecânicas pela ISO 898-1. ....	20
<b>Figura 7:</b> Composição química requerida segundo a ASTM F568M. ....	21
<b>Figura 8:</b> Comparação da microestrutura após o processo de fabricação das roscas externas. ....	22
<b>Figura 9:</b> Flexão no parafuso causada por deformação dos componentes quando carregados. (Observe a tendência de pivotamento em relação ao ponto A; neste caso, a flexão é reduzida se a dimensão a for aumentada).....	22
<b>Figura 10:</b> Perfil básico para roscas métricas ( $d$ = diâmetro maior; $d_r$ = diâmetro menor; $d_p$ = diâmetro de passo; $p$ = passo; $H = \sqrt{3/2} p$ ) . ....	23
<b>Figura 11:</b> Fluxo de forças para um parafuso sob tração. ....	23
<b>Figura 12:</b> Evidência visível de plasticidade em falhas de sobrecarga de cisalhamento e torsão do Ti-6Al-4V barras redondas recozidas. ....	25
<b>Figura 13:</b> Representação das zonas cisalhadas, radial e fibrosa na fratura de um corpo cilíndrico liso após ensaio de tração (falha Taça-Cone).....	26
<b>Figura 14:</b> Coalescência de microsvazios devido à carga de tração, o que leva à morfologia conhecida como “Dimples equiaxiais”: (a) Imagem no TEM mostra "dimples" esféricos; (b) Imagem no SEM mostra "dimples" como depressões verdadeiras. ....	26
<b>Figura 15:</b> Coalescência de micros vazios devido à carga de cisalhamento, o que leva à morfologia conhecida como “Dimples alongados”: (a) Imagem no TEM mostra "dimples" com parabolos alongadas; (b) Imagem no SEM mostra "dimples" como depressões alongadas verdadeira. ....	27
<b>Figura 16:</b> Formação de dimples alongados devido às condições de carregamento de flexão e cisalhamento; (a) fratura por flexão; (b) fratura por cisalhamento.....	27
<b>Figura 17:</b> Aspectos macroscopicos da falha de um parafuso SAE 4340 que fraturou por fadiga (No lado esquerdo temos ambas as faces da mesma fratura, onde que na face que contém a porca, é possível notar as duas regiões mais distintamente). ....	28
<b>Figura 18:</b> Exames fractográficos microscopicos revelando estrias de fadiga encontradas em superfícies de fratura e dentro de bandas macroscópicas. (a) TEM, intervalo de carga constante; (b) SEM intervalo de carga constante; (c) TEM, carregamento aleatório; (d) TEM, estrias dúcteis; (e) TEM, estrias frágeis. ....	29
<b>Figura 19:</b> Mudança na aparência da superfície da fratura no aço inoxidável 305 em função do nível $\Delta K$ . ....	30
<b>Figura 20:</b> Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho. ....	32
<b>Figura 21:</b> Parafusos recebidos da empresa Vale S.A.....	33
<b>Figura 22:</b> Esquema dos cortes realizados nos parafusos recebidos. ....	33
<b>Figura 23:</b> Esquema a esquerda para a realização do mapeamento de dureza. ....	34

<b>Figura 24:</b> Representação gráfica dos elementos Solid95 e Solid92. ....	35
<b>Figura 25:</b> Parafuso já exportado para o Ansys e com os respectivos pontos fixados. ....	36
<b>Figura 26:</b> Malhas utilizadas no parafuso. ....	36
<b>Figura 27:</b> Força sendo aplicada na face da cabeça do parafuso. ....	37
<b>Figura 28:</b> Fratura nas hastes e desgastes nas cabeças dos parafusos. ....	38
<b>Figura 29:</b> Gráfico dos resultados referente ao parafuso 1 (lado do ponto de solda). ....	39
<b>Figura 30:</b> Gráficos dos resultados referente ao parafuso 1 (lado oposto ao ponto de solda). ....	39
<b>Figura 31:</b> Gráfico dos resultados referente ao parafuso 2 (lado oposto ao ponto de solda). ....	40
<b>Figura 32:</b> Macrografia realizada na região 1 (no lado direito temos o início da rosca). ....	40
<b>Figura 33:</b> Microestrutura do centro do parafuso novo, aumento 10x. ....	41
<b>Figura 34:</b> Microestrutura próximo ao filete da rosca, aumento 20x. ....	41
<b>Figura 35:</b> Superfície da fratura do parafuso 1. ....	43
<b>Figura 36:</b> Superfície da fratura do parafuso 2. ....	43
<b>Figura 37:</b> Esquema representando o motivo que levou ambos os parafusos a falhar. ....	44
<b>Figura 38:</b> Evidência de parafuso que foi encontrado afrouxado. ....	45
<b>Figura 39:</b> Desgastes encontrados nas sapatas e cabeça do parafuso. ....	46
<b>Figura 40:</b> Região 1 da superfície da fratura do parafuso 1. ....	46
<b>Figura 41:</b> Possível início da fratura e evidência de diples equiaxiais na superfície da fratura do parafuso 1. ....	47
<b>Figura 42:</b> Coalescência de Microvazios por toda a região 2 da superfície do parafuso 2. ....	48
<b>Figura 43:</b> Evidências de dimples alongados na região 1 do parafuso 2. ....	48
<b>Figura 44:</b> Traçado do contorno de Deformação Total do parafuso 1. ....	49
<b>Figura 45:</b> Traçado do contorno de Deformação Total do parafuso 2. ....	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
3.1	MINERAÇÃO	16
3.1.1	Mineração e sua contribuição	16
3.1.2	Produção mineral	16
3.1.3	Equipamentos	17
3.2	ALIMENTADOR DE SAPATAS	18
3.3	PARAFUSOS DE FIXAÇÃO	19
3.3.1	Descrição	19
3.3.2	Classificação	20
3.3.3	Processos de Fabricação da Rosca	21
3.3.4	Tensões Atuantes	22
3.4	ANÁLISE DE FRATURAS	24
3.4.1	Causas Primordiais de Falhas	24
3.4.2	Processos de Fratura Macroscópica	24
3.4.3	Processos de Fratura Microscópica	25
3.4.4	Fadiga	28
3.5	SOFTWARE PARA ANÁLISE COMPUTACIONAL	30
3.5.1	Software Solid Edge	30
3.5.2	Software Ansys	31
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
4.1	CORTE E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	33
4.2	ANÁLISE COMPUTACIONAL	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>38</b>
5.1	INSPEÇÃO VISUAL	38
5.2	ANÁLISE QUÍMICA	38
5.3	ENSAIO DE DUREZA	38
5.2	MACROGRAFIA POR ESTEREOSCÓPIO	40

5.3	MICROGRAFIA ÓPTICA.....	40
5.4	EXAME FRACTOGRÁFICO.....	42
5.5	ANÁLISE ESTRUTURAL COMPUTACIONAL .....	49
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma nação e o bem-estar de seus contribuintes não existe sem o uso intensivo, porém racional, dos bens minerais. E vista disso qualquer um que olhar à sua volta dificilmente conseguirá identificar objetos do dia a dia que não contenham minérios em sua produção ou composição (IBRAM, 2014).

Tanto para empresas de mineração de pequeno, médio e grande porte, se faz a utilização de equipamentos ou máquinas para viabilizar esse processo, e uma das máquinas é o alimentador/transportador de sapatas. Esse tipo de equipamento é projetado para suportar impacto de pedras brutas bem como realizar, a alimentação e dosagem do fluxo em diversos estágios de plantas de britagem, atuando na maioria das vezes, em regime fechado.

O Transportador de sapatas é composto por diversos elementos de máquinas como, por exemplo, engrenagens, mancais, correias, polias, correntes, porcas, arruelas, roscas e parafusos, em que estes últimos são de vital importância para a união e fixação dos mais diversos elementos de máquinas (MECÂNICA: Noções Básicas de Elementos de Máquinas, 1996.).

A manutenção preditiva, preventiva ou até mesmo corretiva, de máquinas e equipamentos é importante para garantir a confiabilidade e segurança dos mesmos, esses métodos tem a finalidade de melhorar a qualidade e reduzir os custos de produção evitando desperdícios ou possíveis falhas (REVISTA M&T, p. 85-88, 2014.). Os engenheiros e cientistas de materiais, no entanto, desempenham um papel fundamental ao se retirar informações técnicas sobre as falhas, bem como propor soluções para essa problemática dentro das empresas.

Tendo em vista isso, o presente trabalho, visa investigar os fatores decisivos que levaram as falhas catastróficas dos parafusos do alimentador de sapatas da empresa Vale S.A, realizando estudos da análise de falhas bem como simulações desses fatores decisivos, utilizando software de modelagem em 3D e análise estrutural, além de propor uma possível solução para o problema em questão.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar os possíveis fatores que levaram as falhas catastróficas dos parafusos que compõem uma transportadora/alimentadora de sapata da empresa Vale S.A. Bem como tentar propor uma solução corretiva para os problemas aqui estudados.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar inspeção Visual
- Realizar análise química (na superfície da fratura e internamente);
- Realizar mapeamento de dureza;
- Realizar macrografia
- Realizar micrografia;
- Realizar caracterização das falhas (macroscópicas e microscópicas);
- Realizar análise estrutural por elementos finitos, utilizando o software Ansys 2018;
- Propor uma possível solução para o problema.

### **3 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 MINERAÇÃO**

##### **3.1.1 Mineração e sua contribuição**

“Desde os tempos pré-históricos até o presente, a mineração tem desempenhado um papel importante para a existência do ser humano” (MADIGAN, 1981).

Muitos marcos na história humana como a jornada de Marco Polo para a china, as viagens de Vasco da Gama para a África e a Índia, a descoberta de Colombo do Novo Mundo e as modernas corridas de ouro que levaram a criação da Califórnia, do Alasca, da África do Sul, da Austrália e do Canadá tiveram como maior incentivo minerais importantes (HARTMAN, 2002).

Isso geralmente resulta em que os países possuidores de grandes riquezas minerais se tornem grandes civilizações no mundo enquanto que país sem riquezas minerais tem grandes dificuldades em relação ao seu crescimento (HARTMAN, 2002).

##### **3.1.2 Produção mineral**

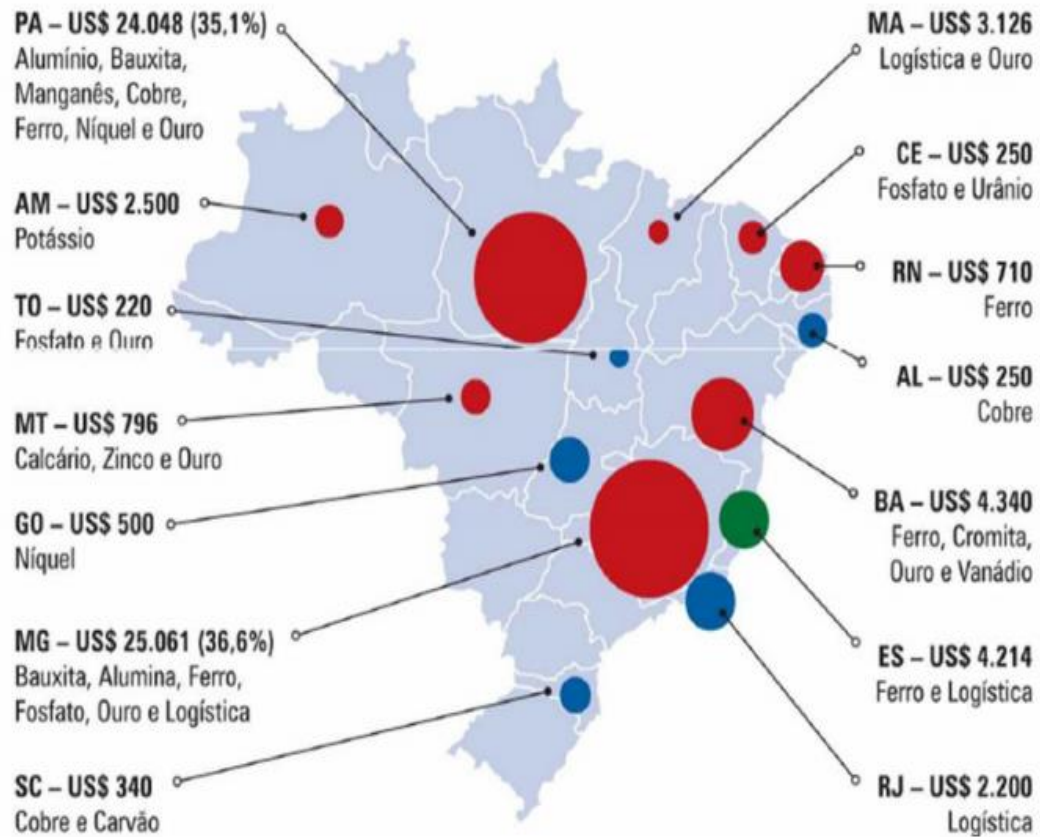
A produção mineral é estimada em apenas uma fração de 1% da superfície da terra que está subjacente a depósitos minerais de valor comercial. A partir desse recurso, os Estados Unidos extraíram cerca de 60 bilhões em valores minerais em 1997: \$ 27 bilhões de dólares das indústrias minerais, \$ 20 bilhões de carvão e \$ 12 bilhões de dólares de metais (NATIONAL MINING ASSOCIATION, 1998).

Segundo IBRAM (2011), nos anos de 2011 a 2015, foram investidos cerca de US\$ 64,8 bilhões espalhados por todo País, nos quais, os principais estados mineradores eram Minas Gerais que recebem 36% desse total, seguido do Pará com 35% (figura 01). “O levantamento do IBRAM (2011) aponta que o Pará será o novo líder do ranking, com aportes estimados em mais de US\$ 24 bilhões, nos próximos cinco anos”

O intercâmbio comercial de produtos de origem mineral pelo Brasil envolve mais de 200 países. Nas exportações (2010) o minério de ferro gerou receita de US\$ 30,8 bilhões, representando 15,3% do valor total exportado (PINHEIRO, 2011). Em 2016 o intercâmbio comercial ultrapassou os US\$ 25 bilhões em exportações e US\$ 3 bilhões em importações.



**Figura 1:** Principais investimentos na mineração (em milhões de dólares).



Fonte: Ibram (2011).

### 3.1.3 Equipamentos

Dentro da mineração diversos equipamentos são utilizados para facilitar o processo de beneficiamento de minério. Em qualquer etapa desse processo, se tem uma máquina ou equipamento exercendo uma determinada função.

Para ter uma melhor explanação é necessário entender que o tratamento ou beneficiamento de minérios consiste em operações que buscam modificar a granulometria, a concentração relativa e/ou a forma dos minerais, sem que haja a modificação das identidades química e física destes (LUZ, 2010), ou seja, para as etapas de fragmentação, classificação, concentração, amostragem, manuseio dos materiais, disposição dos rejeitos e desaguamento há um equipamento com tal funcionalidade, (figura 02).

No início de cada fase principal de processamento, há uma área de retenção, onde o minério é empilhado para assegurar que a fase seguinte do processo tem material suficiente para um funcionamento contínuo. O minério deve então ser guiado através de cada uma destas diferentes fases a um ritmo controlado. Isto é conseguido pela utilização de transportadores de velocidade variável ou alimentadores ajustáveis (LUZ, 2010).

**Figura 2:** Alguns equipamentos que participam do processo de tratamento/beneficiamento de minério.



Fonte: Autor.

### 3.2 ALIMENTADOR DE SAPATAS

Se tratando de alimentadores, existem basicamente três tipos utilizados na mineração e britagem em geral: alimentadores vibratórios, alimentadores de correia e alimentadores de sapatas. Este último é o mais robusto e é constituído de diversos elementos como esteira metálica, placas fundidas ou laminadas, parafusadas em duas correntes de esteira de trator, onde estas por sua vez, são suportadas por roletes de trator e um chassi estrutural, com ou sem trilhos de impacto (REVISTA M&T, p. 85-88. 2014), (figura 03).

**Figura 3:** Alimentador de sapatas.



Fonte: Tgend (2018).

Por se tratar de um equipamento tão importante no setor da mineração, seus elementos como os parafusos que fixam as sapatas nas correntes (objetos foco deste trabalho) são de extrema importância para um bom funcionamento do equipamento.

### 3.3 PARAFUSOS DE FIXAÇÃO

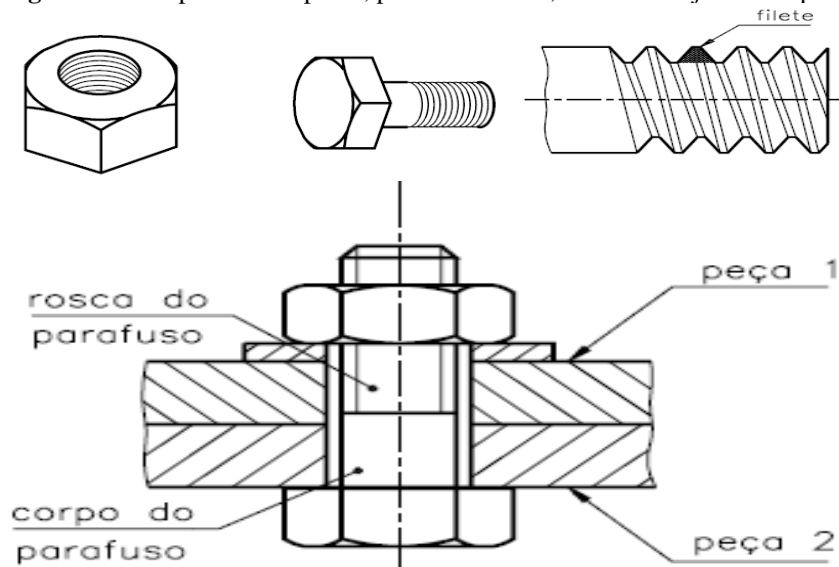
“Os parafusos são os tipos mais comuns de fixadores existentes, e a diferença entre eles está apenas na aplicação a que se destinam.” (JUVINALL, 2013). Os parafusos podem ser utilizados de diversas maneiras, porém, em via de regra, um parafuso pode ser concebido, principalmente, para ser utilizado com porcas ou parafusado em furos determinados. Existem exceções, como por exemplo, o parafuso de cabeça guiada, que é utilizado em materiais macios (particularmente madeira), de modo que uma guia quadrada aplicando uma força sobre a cabeça do parafuso força o mesmo para dentro do material ou componente a ser fixado.

#### 3.3.1 Descrição

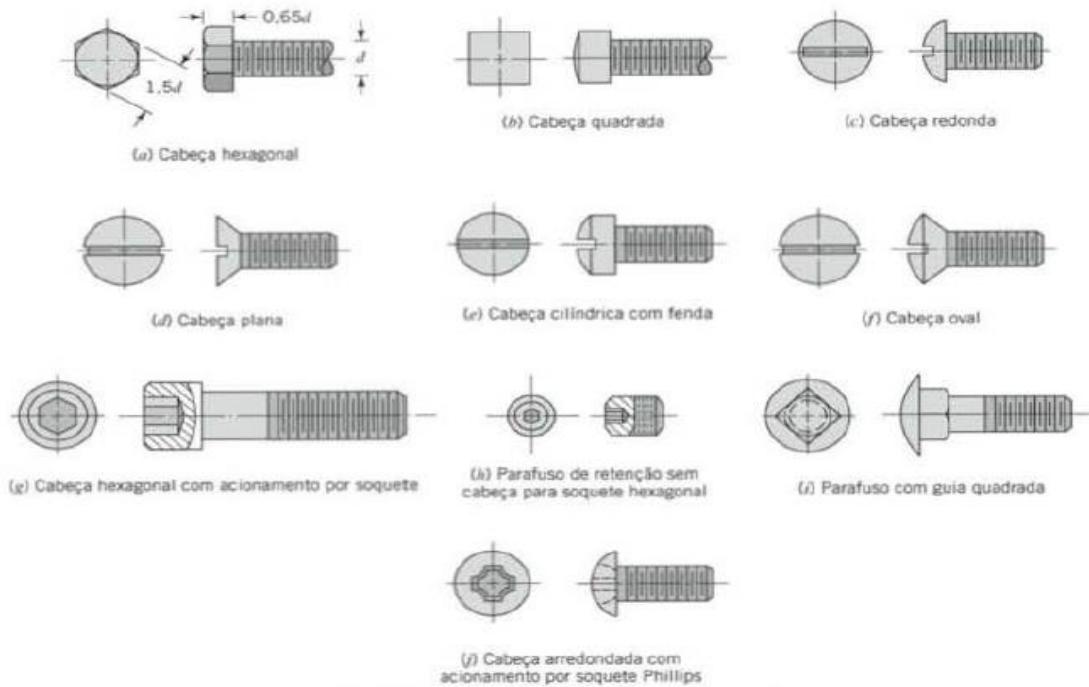
Para compreender melhor esse tipo de fixador se faz necessário conhecer suas regiões distintas como a rosca e cabeça, que diferenciam um parafuso do outro, além das forças que atuam sobre o mesmo.

A rosca, nada mais é que um conjunto de filetes em torno de uma superfície cilíndrica, a mesma, pode ser interna ou externa, serve para realizar uma união ou desmontagem de peças, além de permitir também, a movimentação de outros elementos de máquinas. As roscas internas encontram-se no interior das porcas, já as externas se localizam no exterior do parafuso (GORDO, 2000), (figura 04 e 05).

**Figura 4:** Exemplo de uma porca, parafuso e rosca, além do conjunto completo.



Fonte: Gordo (2000).

**Figura 5:** Alguns tipos comuns de cabeças de parafusos.

Fonte: Juvinal (2013).

### 3.3.2 Classificação

Tanto a ASTM F568M como a ISO 898-1 descrevem vários graus de fixação métrica, de parafusos com baixo teor de carbono / baixa resistência, até alta resistência / tratamento térmico. Segundo as normas, os parafusos ARS de grade 12.9, que são os utilizados nos alimentadores de sapatas, são dotados de microestrutura martensítica revenida, a qual, para se obter, é necessário a realização dos tratamentos de têmpera e revenimento. Esse tipo de microestrutura proporciona a melhor combinação de resistência mecânica/dureza e tenacidade. As propriedades mecânicas dos mesmos pela ISO 898-1 (figura 06), e composição química segundo a ASTM F568M (figura 07).

**Figura 6:** Tabela de propriedades mecânicas.

Classe da Propriedade Métrica	Material	Faixa de Tamanhos	Mín. Resistência a Tração (Mpa)	Mín. Resistência a Deformação	Dureza Rockwell		Marca de Identificação de Grau
					Mín.	Máx.	
4.6	Aço de Baixo ou Médio Carbono	M5 - M39	255	400 (58.000 psi)	B67	B99	
8.8	Aço de Médio Carbono: Temperado e Revenido	M5 - M16	580	800 (116.000 psi) 830 (120.000 psi)	C22	C32	
		M18-M39	600		C23	C34	
10.9	Ligas de Aço: Temperado e Revenido	M5 - M39	830	1040 (150.800 psi)	C32	C39	
12.9	Ligas de Aço: Temperado e Revenido	M1.6 - M39	970	1220 (177.000 psi)	C39	C44	

Fonte: ISO 898-1 (2013).

**Figura 7:** Composição química requerida segundo a ASTM F568M.

Classe de Propriedade	Diâmetro Nominal do Produto	Material e Tratamento	Análise dos Elementos no Produto (% em peso)					Temperatura de Tratamento, °C	
			C		Mn	B	P	S	Min.
			Min.	Máx.	Min.	Máx.	Máx.		
4.6	M5-M100	Aço de Baixo e Médio Carbono	---	0.55	---	---	0.04	0.05	---
4.8	M1.6-M16	Aço de Baixo e Médio Carbono, parcialmente ou totalmente recozido, conforme o necessário	---	0.55	---	---	0.04	0.05	---
5.8	M5-M24	Aço de Baixo e Médio Carbono, trabalhado a frio	0.13	0.55	---	---	0.04	0.05	---
8.8	M20-M30	Aço de Médio Carbono, temperado e revenido	0.25	0.55	---	---	0.04	0.05	425
8.8	M20-M31	Aço Martensítico de Baixo Carbono, temperado e revenido	0.15	0.40	0.74	0.00	0.04	0.05	425
9.8	M1.6-M16	Aço de Médio Carbono, temperado e revenido	0.25	0.55	---	---	0.04	0.05	425
9.8	M1.6-M17	Aço Martensítico de baixo carbono, temperado e revenido	0.15	0.40	0.74	0.00	0.04	0.05	425
10.9	M5-M20	Aço de Médio Carbono, temperado e revenido	0.25	0.55	---	---	0.04	0.05	425
10.9	M5-M100	Ligas de Aço de Médio carbono, temperado e revenido	0.20	0.55	---	---	0.04	0.05	425
10.9	M5-M36	Aço Martensítico de baixo carbono, temperado e revenido	0.15	0.40	0.74	0.00	0.04	0.05	425
12.9	M1.6-M100	Ligas de Aço, temperado e revenido	0.31	0.65	---	---	0.00	0.00	380

Fonte: ASTM F568M (2003).

### 3.3.3 Processos de Fabricação da Rosca

Existem dois métodos principais de fabricação de roscas externas, são eles: Usinagem, e Laminação. O processo de usinagem pode ser realizado através de um torno ou, através de uma matriz contendo um rosqueamento externo pré-existente. No torno é utilizado aços endurecidos, denominados aços ferramentas. A barra a ser rosqueada deve apresentar exatamente o mesmo diâmetro externa da rosca que se deseja obter. Alguns equipamentos como as Máquinas de Fazer Rosca, são largamente utilizados na fabricação de parafusos em geral, com alta produtividade e baixo custo. Já no processo de Laminação, têm-se matrizes de aço endurecido sendo forçadas contra a superfície da barra que se pretende produzir a rosca. Dessa maneira o material sofre um processo de conformação a frio adquirindo o formato da rosca, entretanto, o diâmetro externo final da rosca será maior que o diâmetro inicial da barra (STOETERAU, 2007).

O processo de laminação apresenta algumas vantagens sobre o processo de usinagem de roscas externas. A conformação por laminação a frio encrua a microestrutura mais externa da barra, que por sua vez aumenta a resistência mecânica da rosca do parafuso, devido a tensões de compressão residuais benéficas nas raízes das roscas. Provocando assim um processo de reorientação dos grãos do material para o formato de rosca, ao contrário do processo de usinagem que interrompe os grãos, devido à retirada de material da extremidade da barra, (figura 08). Todos esses fatores contribuem para uma maior resistência mecânica de roscas laminadas quando comparadas às roscas cortadas (COSTA, 2013).

**Figura 8:** Comparação da microestrutura após o processo de fabricação das roscas externas.

### Usinagem X Conformação



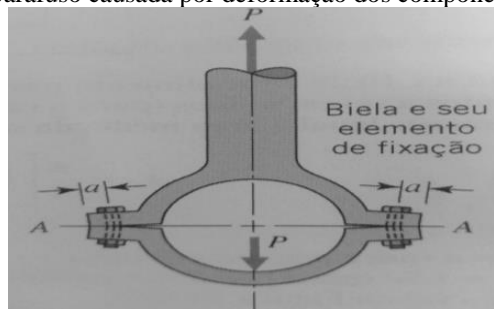
Fonte: Stoeterau (2007).

#### 3.3.4 Tensões Atuantes

Os parafusos quando em serviço, estão sujeitos a diversas tensões e forças combinadas como torção e carga axial por exemplo. Tensões cisalhantes de torção surgem quando se aplica um aperto nos elementos de fixação rosqueados (parafusos e porcas), já cargas axiais de tração ou compressão, surgem devido ao mecanismo de forças atuantes tanto na rosca do parafuso como na rosca da porca respectivamente. “Normalmente, no caso dos elementos de fixação o atrito no colar está presente e, nesta situação, é comum admitir-se que o torque equivalente transmitido ao longo da seção é aproximadamente igual à metade do torque aplicado pela chave de aperto” (JUVINALL, 2013).

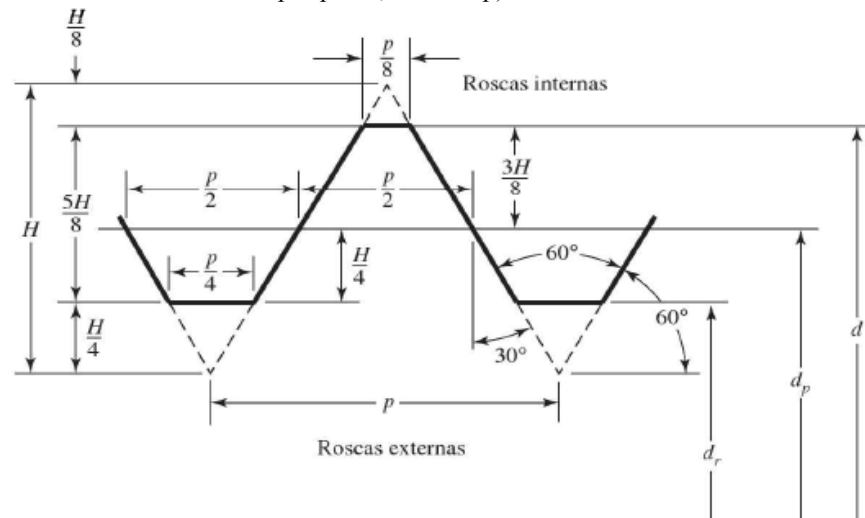
Geralmente, os parafusos e porcas apresentam uma ductilidade suficientemente alta, de maneira a proporcionar um escoamento localizado na raiz da rosca sem produzir algum dano. Entretanto ao se considerar uma situação de fadiga nos mesmos, essa concentração de tensão é extremamente importante. Isso porque a fadiga nesses elementos envolve uma tração flutuante, geralmente acompanhada por uma pequena carga de flexão alternada (figura 09), observe a tendência de pivotamento em relação ao ponto A; neste caso, a flexão é reduzida se a dimensão  $a$  for aumentada. O perfil de rosca MJ (figura 10) é especialmente útil quando o assunto é alta resistência à fadiga e é o básico da ISO 68 com roscas simétricas de  $60^\circ$ , o mesmo tem um filete arredondado na raiz da rosca externa e um diâmetro menor aumentado das roscas internas e externas (BUDINAS, 2011).

**Figura 9:** Flexão no parafuso causada por deformação dos componentes quando carregados.



Fonte: Juvinal (2013).

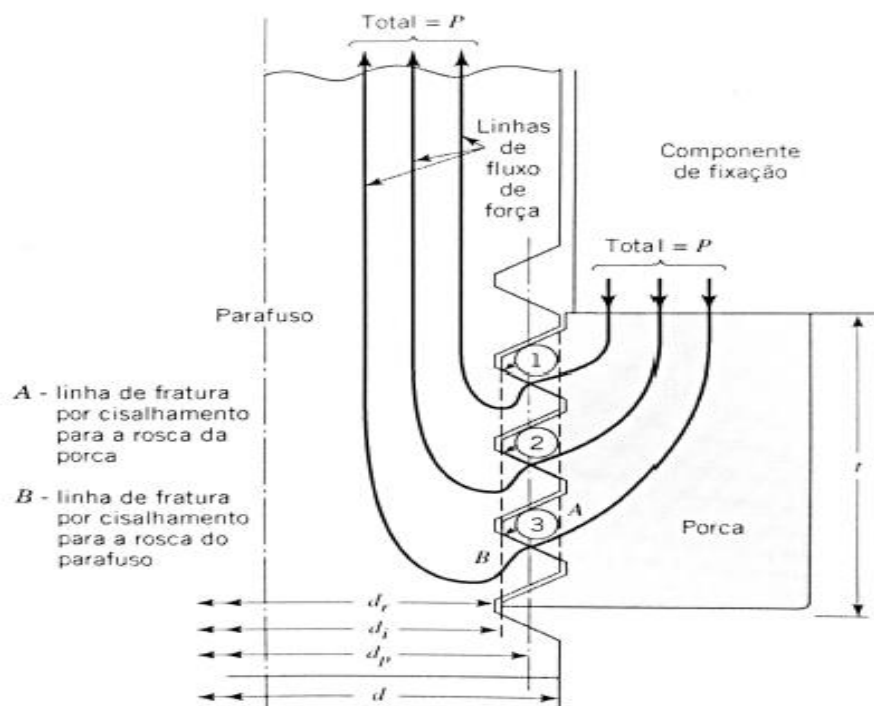
**Figura 10:** Perfil básico para roscas métricas ( $d$  = diâmetro maior;  $d_r$  = diâmetro menor;  $d_p$  = diâmetro de passo;  $p$  = passo;  $H = \sqrt{3/2} p$ ).



Fonte: Budinas (2011).

Essas cargas axiais de tração e compressão são distribuídas entre as roscas em contato, conseqüentemente a necessidade de se obter forças mais uniformemente distribuídas, representa um problema importante. Isso se dá devido ao fato que, alguns fatores fazem com que o filete 1 das roscas em contato, suporte uma cara maior do que a parcela a ele dividido em função de uma distribuição uniforme. 1 – A carga é distribuída entre os três primeiros filetes considerados como elementos redundantes para suportar a carga (figura 11).

**Figura 11:** Fluxo de forças para um parafuso sob tração.



Fonte: Juvinal (2013).

O caminho mais próximo, passa pelo filete 1, fazendo-o assim, suportar uma parcela maior de carga. 2 – A força aplicada gera na região rosqueada do parafuso uma tração, enquanto que na região acoplada correspondente da porca, ocorre uma compressão (JUVINALL, 2013). As resultantes dessas deformações tendem a aumentar e diminuir ligeiramente o passo do parafuso e da rosca respectivamente.

### 3.4 ANÁLISE DE FRATURAS

#### 3.4.1 Causas Primordiais de Falhas

A análise de falhas de todo e quaisquer elemento mecânico é de extrema importância para a engenharia de um aspecto geral, determinando as causas da falha e todas as informações possíveis, para que se possam ter melhorias no projeto, uso de novos equipamentos e tais procedimentos de operação (MONTEIRO, 2004). As causas primordiais de falhas são descritas como: Falhas no projeto; Falhas na seleção de materiais; Imperfeições no material; Deficiência de fabricação; Erros de montagem ou instalação; Erros de operação ou manutenção inadequada (MONTEIRO, 2004).

“As falhas na seleção do material são latentes, pois o material é à base de toda estrutura, podendo-se considerar como erros básicos utilizar materiais dúcteis em lugar de frágeis ou mesmo materiais não resistentes à corrosão em ambientes quimicamente agressivos” (MONTEIRO, 2004). Em investigações industriais a maior frequência de causas de falhas é a seleção inadequada de materiais, perfazendo um total de 38% do total das causas pesquisadas (BROOKS, 2002).

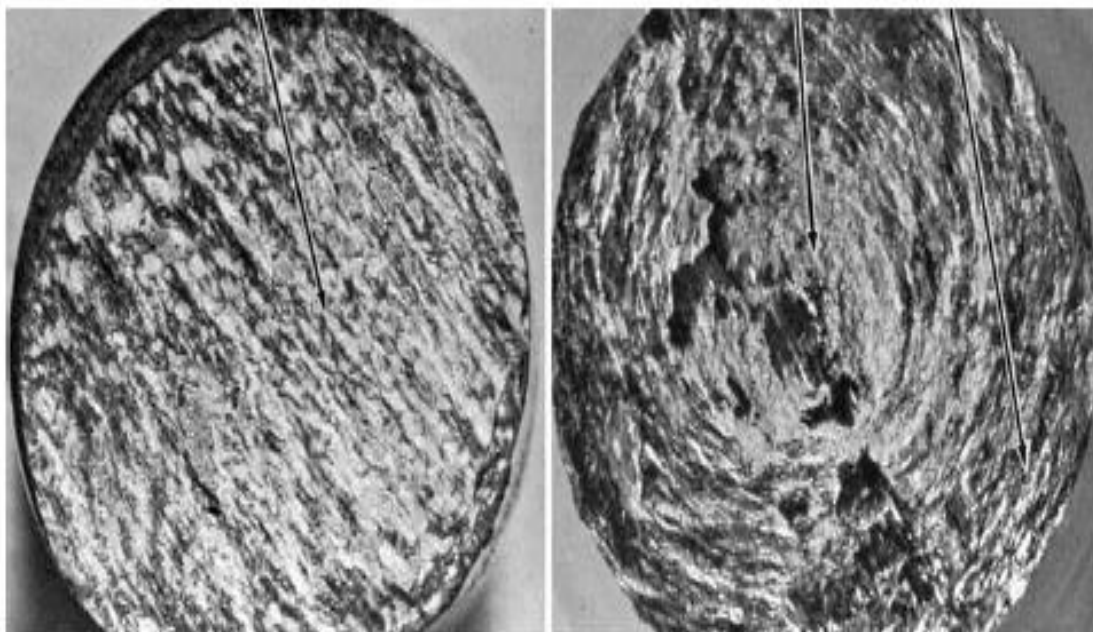
#### 3.4.2 Processos de Fratura Macroscópica

Para a maioria das situações de falhas que ocorrem nos materiais, têm-se grandes áreas de fratura para se analisar e investigar, devido a isso, análises microscópicas ou até macroscópicas podem se tornar extremamente longas, mas felizmente, toda fratura deixa uma série de marcas características que indicam a direção relativa e o caráter de movimento da trinca. Essas marcas se diferem de um material para o outro bem como de um modo de falha para outro, mas o nível de tensão, as condições de cargas e a direção do crescimento da fratura são na maioria das vezes evidentes (HERTZBERG, 2013). De maneira geral a fratura de um componente qualquer é descrita por três características gerais: energia de fratura, textura e trajeto da fratura macroscópica e mecanismo de fratura microscópica.



Quando os metais sofrem cisalhamento ou torção, os mesmos não apresentam laminas na superfície de fratura devido a esses esforços, mas sim, “rasgos” lineares e espirais em relação a esses esforços respectivamente (figura 12). As falhas de metais dúcteis tendem a resultar em uma única fratura, simplificando a determinação da origem.

**Figura 12:** Evidência visível de plasticidade em falhas de sobrecarga de cisalhamento e torção do Ti-6Al-4V barras redondas recozidas.



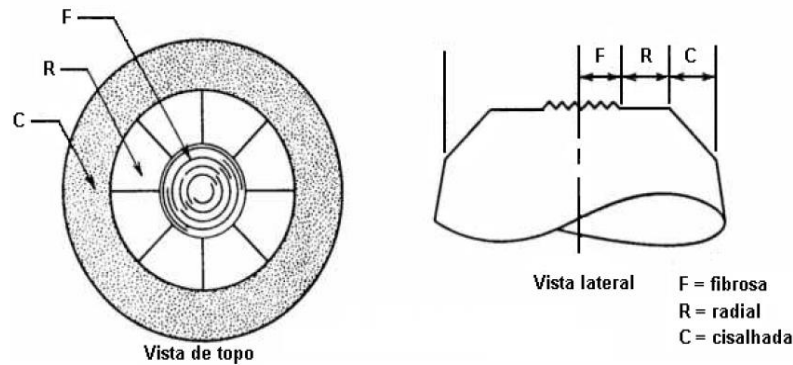
Fonte: Phillips *et al.* (1965) *apud* Hertzberg (2013).

### 3.4.3 Processos de Fratura Microscópica

Essas análises são feitas através de varreduras na superfície fraturada com microscópios eletrônicos de transmissão ou de varredura, TEM e SEM respectivamente. Os metais que apresentam uma maior tenacidade, ou seja, capazes de uma maior deformação plástica, tendem a falhar através de um processo conhecido como Coalescência de Microvazios (CMV), estando presente em metais de alta dureza, que apresentam boa ductilidade em escala macroscópica e em fraturas de baixa dureza induzidas por geometria para as quais plasticidade visível é limitada. A aparência dos microvazios na superfície da fratura depende do estado de tensão (BEACHEM, 1965).

Em condições de cargas uniaxiais, os microvazios tendem a crescer em um plano normal ao eixo de tensões, pois se formam devido à associação com partículas e/ou interfaces fraturadas. Para um ensaio de tração convencional de um aço, esses CMV estão presentes na região fibrosa da superfície de fratura do material ensaiado (figura 13).

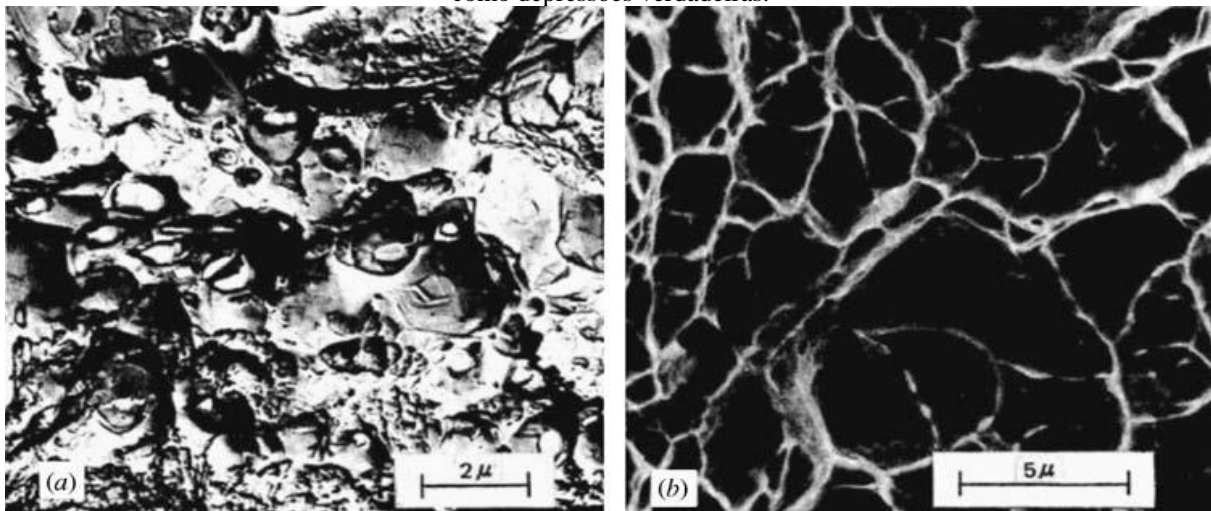
**Figura 13:** Representação das zonas cisalhadas, radial e fibrosa na fratura de um corpo cilíndrico liso após ensaio de tração (falha Taça-Cone).



Fonte: Parker (1983).

Os microvazios equiaxiais de tamanho micrométrico apresentam geralmente um formato esférico (figura 14).

**Figura 14:** Coalescência de microsvazios devido à carga de tração, o que leva à morfologia conhecida como “Dimples equiaxiais”: (a) Imagem no TEM mostra "dimples" esféricos; (b) Imagem no SEM mostra "dimples" como depressões verdadeiras.



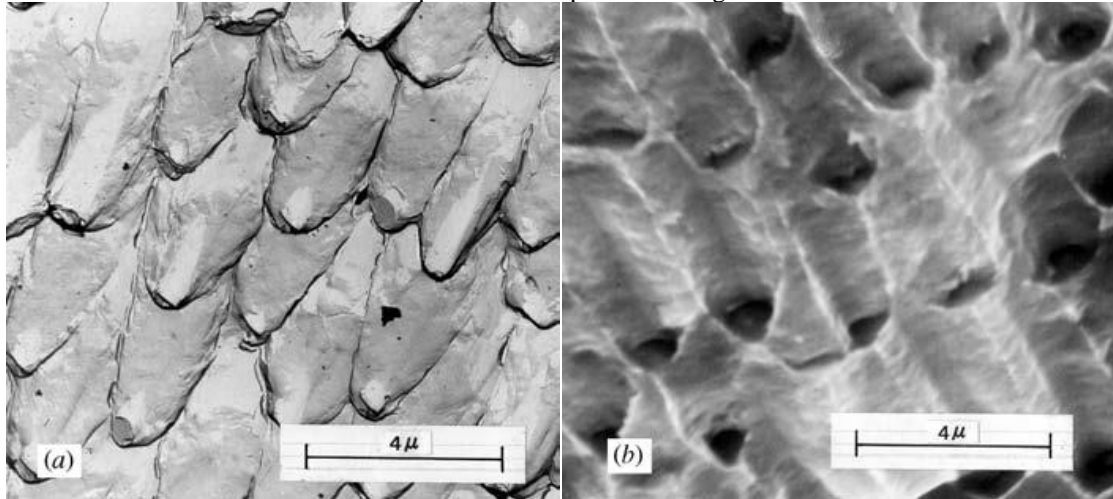
Fonte: Hertzberg (2013).

Quando a falha sofre influência de tensões externas de cisalhamento, esses vazios ficam dispostos de maneira um pouco diferente, pelo fato que, após nuclearem e crescerem, os mesmos se juntam ao longo de planos de tensão de cisalhamento máximo. Conseqüentemente esses dimples tendem a ser alongados e resultam em depressões parabólicas na superfície da fratura (figura 15). Esta configuração pode ser facilmente encontrada ao se realizar um exame fotográfico na região de cisalhamento de uma fratura Taça-Cone.

Finalmente, quando o esforço em excesso flexiona o material, os dimples resultantes desta falha, apresentaram as mesmas características encontradas nas falhas por cisalhamento, entretanto com uma pequena diferença. Quando a falha é por cisalhamento, as faces da fratura

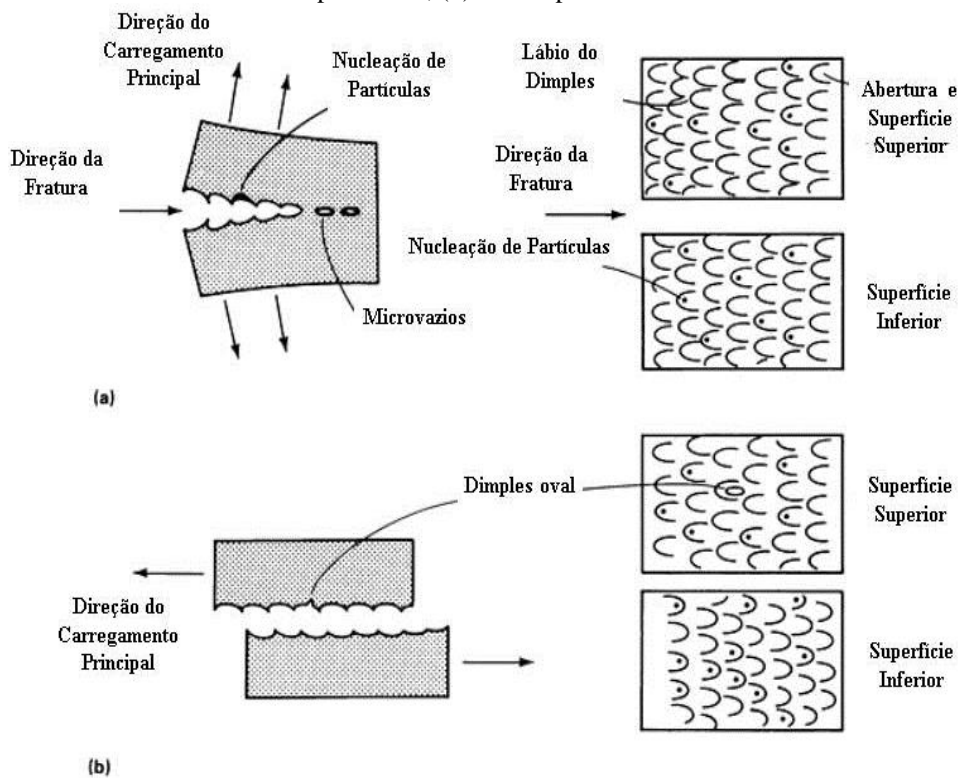
apresentaram os dimples alongados, mas, os mesmos apontam em direções opostas. Já em estado de tensão de flexão, as faces apresentam dimples alongados, porém, eles apontam para mesma direção (figura 16).

**Figura 15:** Coalescência de micros vazios devido à carga de cisalhamento, o que leva à morfologia conhecida como “Dimples alongados”: (a) Imagem no TEM mostra "dimples" com parábolas alongadas; (b) Imagem no SEM mostra "dimples" como depressões alongadas verdadeira.



Fonte: Hertzberg (2013).

**Figura 16:** Formação de dimples alongados devido às condições de carregamento de flexão e cisalhamento; (a) fratura por flexão; (b) fratura por cisalhamento.

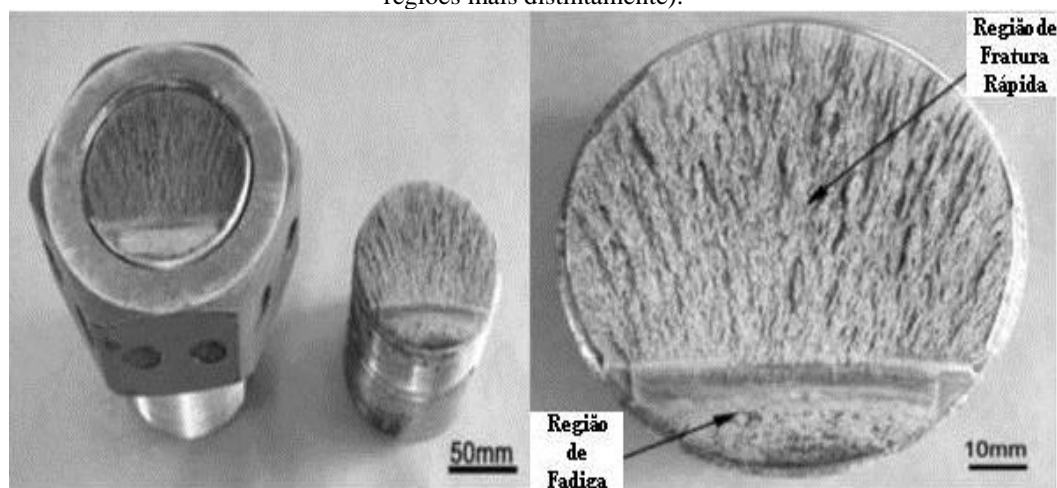


Fonte: Passoja (1974) *apud* Hertzberg (2013).

### 3.4.4 Fadiga

Diferente dos outros modos de falha comentados anteriormente, esse mecanismo mais insidioso, se produz de maneira imperceptível. Ocorre quando um determinado componente metálico é carregado externamente, porém, não falha devido a este esforço, mas sim, após um ciclo de flutuações desta carga. Essa falha ocorrida em condições dinâmicas, quase sempre é observada após um período consideravelmente longo de serviço (DIETER, 1981). Entretanto, esse mecanismo pode ser identificado realizando uma simples inspeção macroscópica da fratura. Isso porque, três características morfológicas típicas da fratura de fadiga, incluindo região de fadiga lisa (área cinza clara), região de fadiga áspera (área de cinza escura) e região de sobrecarga ou fratura final (área com inclinação de 45°) podem ser observadas na superfície de fratura de um parafuso (MOLAEI, 2015). Dependendo da intensidade da carga cíclica aplicada, na região de fadiga aparecem demarcações denominadas de marcas de praia, marcas essas que na maioria das situações são detectadas em materiais metálicos de estrutura cristalina CCC, CFC e HC e é orientada paralelamente à frente da fenda da fratura que avança indicando a origem. As características macroscópicas, além de marcas de praia na região de fratura rápida, são visíveis (figura 17).

**Figura 17:** Aspectos macroscópicos da falha de um parafuso SAE 4340 que fraturou por fadiga (No lado esquerdo temos ambas as faces da mesma fratura, onde que na face que contém a porca, é possível notar as duas regiões mais distintamente).

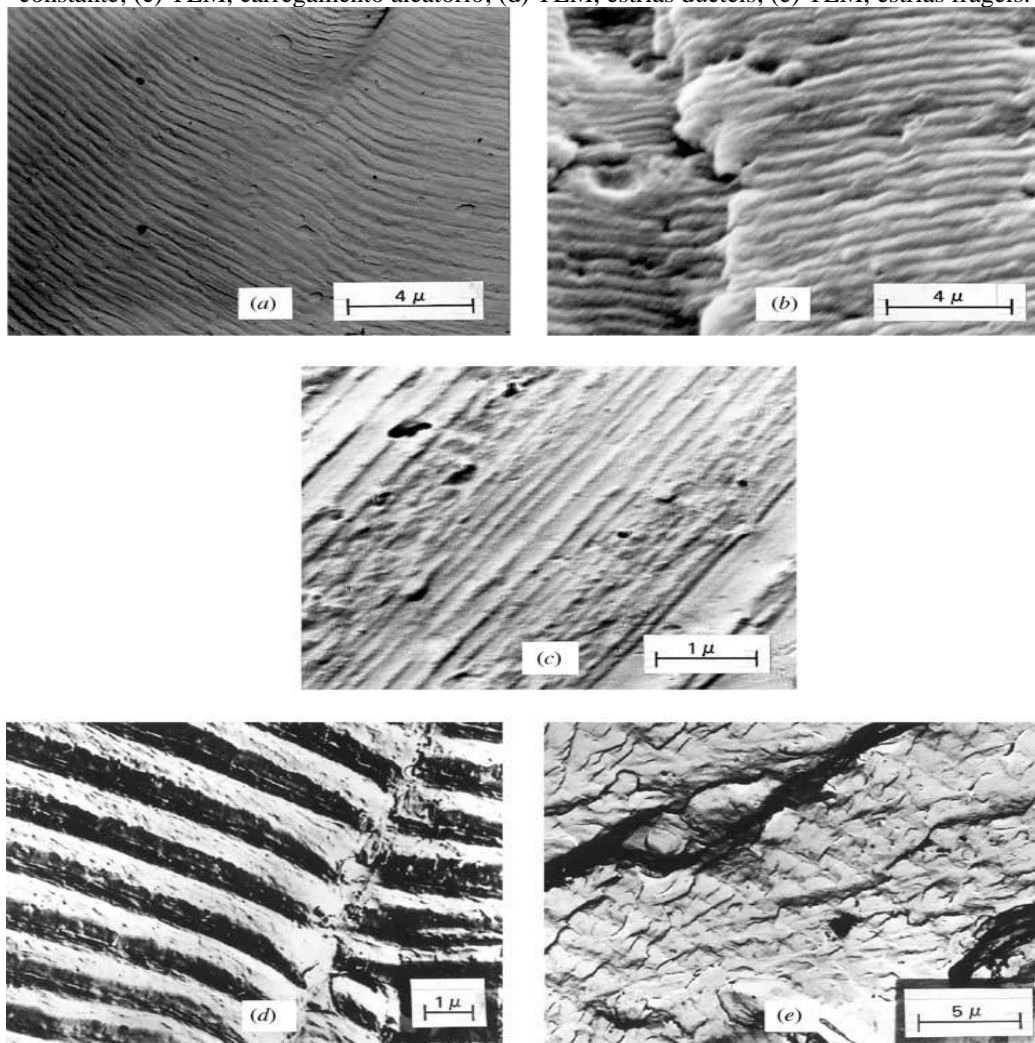


Fonte: Milan (2004).

Para exames microscópicos, as marcas de praia revelam a presença de muitas linhas paralelas menores, referidas como estrias de fadiga. Essas fornecem provas críticas de que a cada avanço incremental da frente da fratura é resultado de um ciclo de carregamento e que a extensão deste avanço varia com o intervalo de tensão aplicado. Na figura 18 (c) que revela estrias de largura diferentes resultando em um padrão de carregamento aleatório.

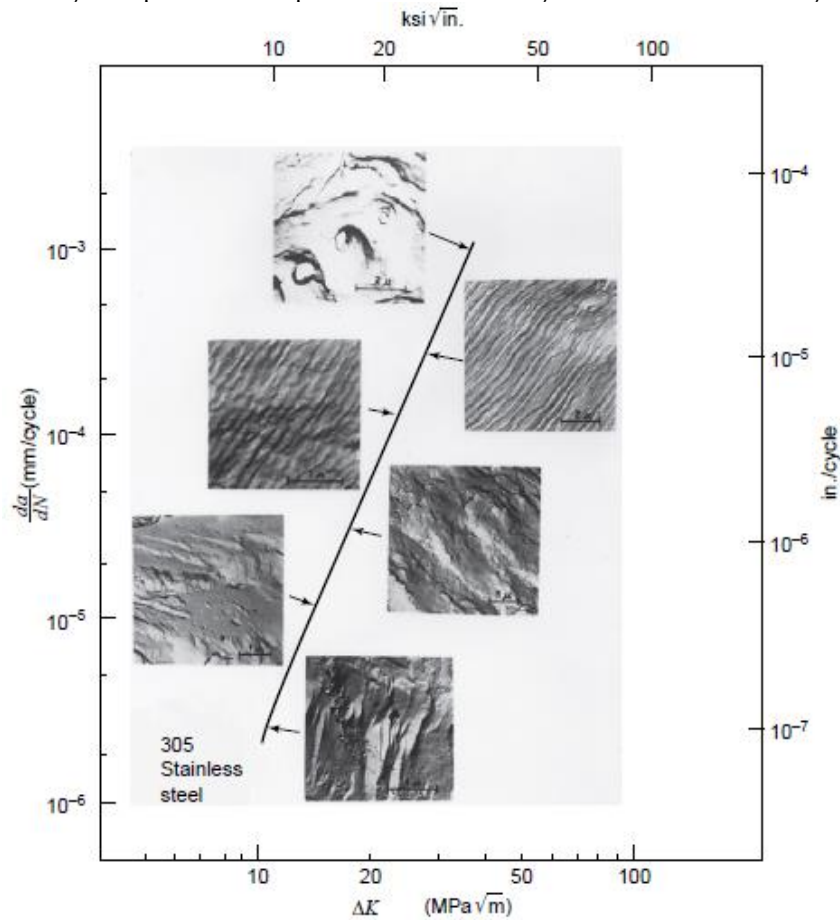
Vale ressaltar que a diferença entre marcas de praia observadas macroscopicamente e marcas de estrias observadas microscopicamente, marcas macroscópicas representam períodos de crescimento durante os quais milhares de ciclos de carregamento podem ter ocorrido já às microscópicas representam a extensão da frente da fratura durante uma excursão de carga. Podendo haver milhares ou até mesmo dezenas de milhares de estrias dentro de uma única marca de praia (FORSYTH, 1961). Embora essas estrias forneçam evidências de que o componente durante a vida de serviço acumulou danos por fadiga, à propagação de fraturas por fadiga podem ocorrer sem a formação das mesmas. Normalmente, em níveis elevados de variação da tenacidade a fratura ( $\Delta K$ ) a coalescência de microvazios é mais evidente, e uma aparência de clivagem áspera e rostada dominam em muitos materiais com níveis muito baixos de  $\Delta K$  (figura 19), (HERTZBERG, 1967; 1976).

**Figura 18:** Exames fractográficos microscópicos revelando estrias de fadiga encontradas em superfícies de fratura e dentro de bandas macroscópicas. (a) TEM, intervalo de carga constante; (b) SEM intervalo de carga constante; (c) TEM, carregamento aleatório; (d) TEM, estrias dúcteis; (e) TEM, estrias frágeis.



Fonte: McMillan (1968).

**Figura 19:** Mudança na aparência da superfície da fratura no aço inoxidável 305 em função do nível  $\Delta K$ .



Fonte: Hertzberg (1976).

### 3.5 SOFTWARE PARA ANÁLISE COMPUTACIONAL

Simulação computacional é uma das mais poderosas ferramentas de análise disponíveis para os responsáveis por projeto e operação de processos complexos ou sistemas envolvendo produtos ou serviços. No mundo crescente da competitividade, a simulação se tornou uma ferramenta muito poderosa para projeto, controle de sistemas e planejamento. Se tornando hoje como uma metodologia indispensável de solução de problemas para engenheiros, analistas e gestores. (PEGDEN, 1995. *apud* DREVNA, 1994).

#### 3.5.1 Software Solid Edge

O Solid Edge é um portfólio de ferramentas de software acessíveis, fáceis de usar, que abordam todos os aspectos do processo de desenvolvimento de produto - desenho 3D, simulação, manufatura, gestão de projeto dentre outros. O mesmo utiliza tecnologia síncrona para acelerar o design dos produtos, fazer revisões mais rápidas e melhorar a reutilização dos dados do design. Com detalhamento 2D mais rápido, melhor design de peças em chapa de sua classe, modelagem flexível de peças e montagens, renderização fotorrealista incorporada e

excepcional mobilidade (SIEMENS, 2018). Desta maneira é possível criar melhores projetos para a simulação computacional.

### **3.5.2 Software Ansys**

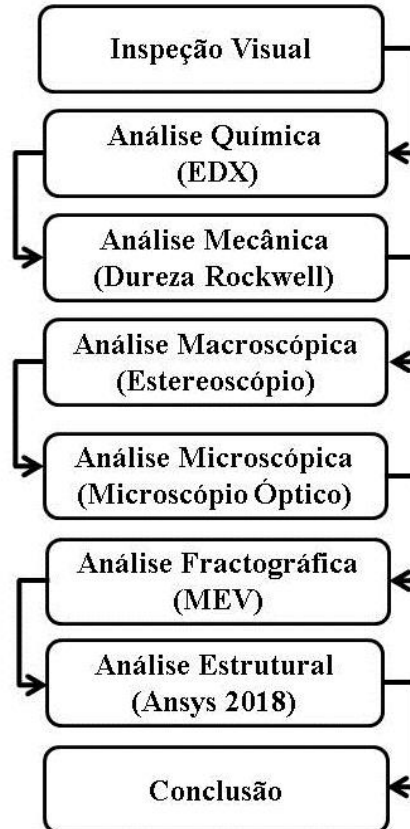
Com este software é possível realizar programas de simulação para engenharia. O software ANSYS trabalha em três níveis distintos, que são: Pré-processamento; Processamento que se denomina “Solução” e Pós-processamento.

O pré-processador constrói o modelo; no processador de soluções são aplicadas as cargas e obtidos os dados numéricos das soluções, o pós-processador possibilita visualizar os resultados da solução para debater em pontos específicos no modelo, inclusive em função de tempo, se necessário (MONTEIRO, 2004).

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização das análises, o trabalho foi dividido em algumas etapas. O fluxograma que mostra todas as etapas desenvolvidas (figura 20)

**Figura 20:** Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.



Fonte: Autor.

Foram encaminhados ao Laboratório de Ensaios Destrutivos da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (LED – UNIFESSPA) dois parafusos fraturados e um novo para análise. Os mesmos vieram “pré-preparados inadequados”, com um corte longitudinal em todo o seu eixo, dividindo assim, a superfície das fraturas em duas partes, dificultando ou impossibilitando a realização das análises de maneira mais satisfatória e eficiente, além de terem inserido um ponto de solda em ambos os parafusos para a realização desses cortes. Os parafusos também se encontravam completamente revestidos de uma camada de minério de ferro (figura 21).

Como o foco deste trabalho é realizar uma investigação reversa nas superfícies fraturadas dos parafusos, de modo a identificar o real motivo pelo qual ambos vieram a falhar, com exceção da Análise de Dureza Rockwell, todas as outras etapas do trabalho foram realizadas somente nos parafusos fraturados.



**Figura 21:** Parafusos recebidos da empresa Vale S.A.

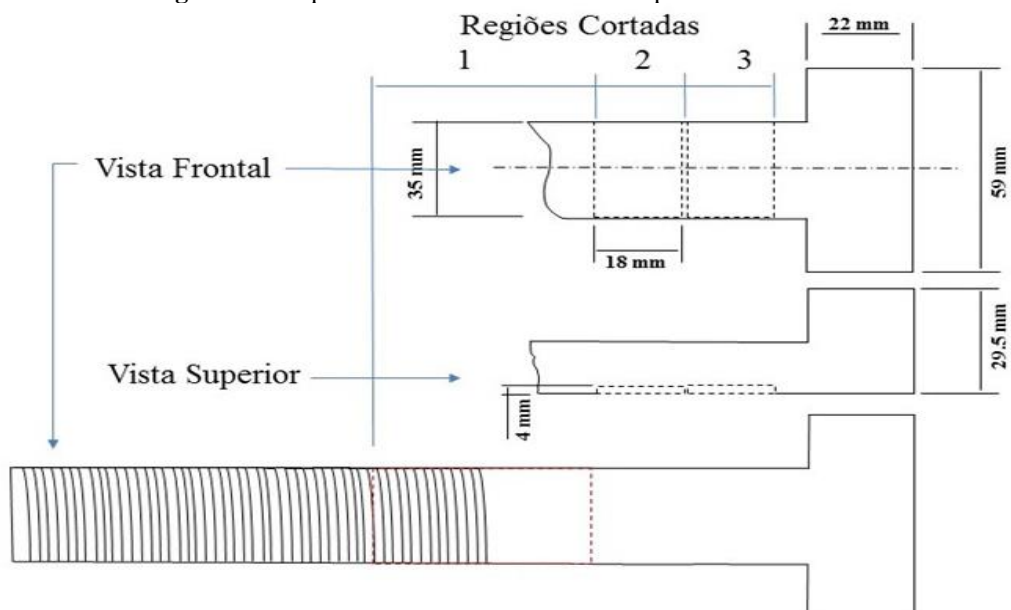


**Fonte:** Autor.

#### 4.1 CORTE E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Nesta etapa do trabalho, os parafusos foram cuidadosamente analisados, para se identificar as regiões necessárias e possíveis de se retirar amostras para as análises de Fractografia, Dureza, Química e Metalográfica. A figura 22 mostra essas regiões, referente ao corte longitudinal que os parafusos recebidos já continham, onde que, a região 1, retirada somente do parafuso novo, foi utilizada para a análise metalográfica, já a região 2, retirada dos parafusos fraturados, utilizada na análise de dureza e por fim, a região 3, também retirada somente dos parafusos fraturados, para análise química, restando somente as amostras das superfícies fraturadas que foram preservadas para o exame fractográfico. Para isso, utilizou-se uma máquina de Policorte, modelo CFIII da marca FORTEL.

**Figura 22:** Esquema dos cortes realizados nos parafusos recebidos.



**Fonte:** Autor.

Posteriormente, as superfícies das fraturas foram limpas, utilizando um Limpador de Ultrason da marca PANTEC modelo LIMPSON contendo uma solução de Alconox 3%, por 13 horas e 25 minutos. Logo em seguida as mesmas, foram fotografadas e encaminhadas ao MEV para evitar um dano maior por oxidação.

Para a determinação da composição química das amostras, através da técnica de Espectrometria de Emissão Óptica, no equipamento da OXFORD modelo FOUNDRY MASTER, as mesmas foram lixadas (sequência de lixas: 100, 220, 340, 400, 600), para evitar interferência na análise devido a oxidação na superfície.

Para a análise mecânica, foram realizados ensaios de Dureza Rockwell C, no Durômetro Automático da marca PANTEC. Cinco endentações foram realizadas a cada 3 mm ao longo do eixo perpendicular, referente ao corte longitudinal do seu eixo, partindo do centro da amostra, que é o mesmo do parafuso, até sua extremidade, de modo a se obter um mapeamento de dureza (figura 23).

**Figura 23:** Esquema para a realização do mapeamento de dureza.



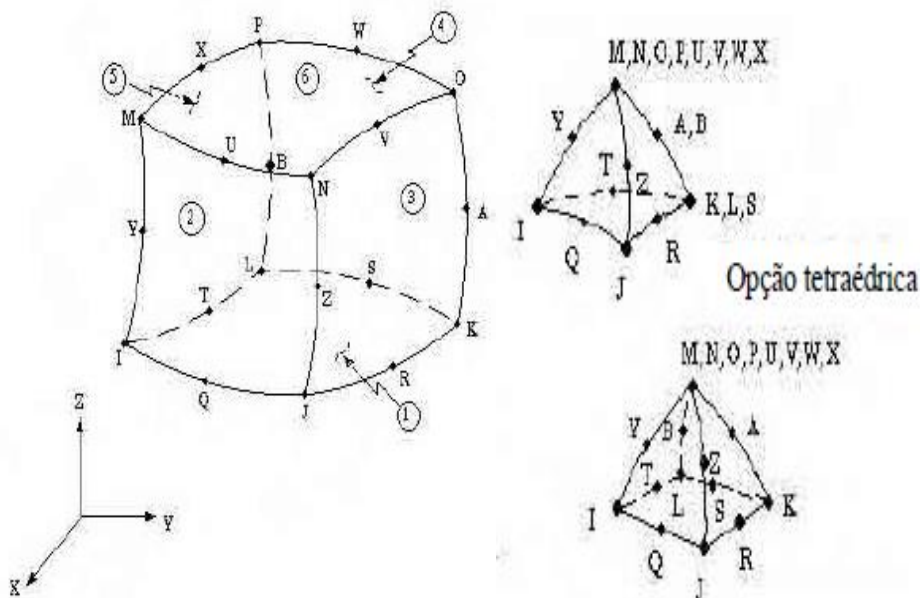
**Fonte:** Autor.

A metalografia por microscopia óptica foi realizada na amostra da região 1. Inicialmente a amostra foi lixada (sequência de lixas: 100, 120, 150, 220, 280, 340, 400, 600, 800 e 1200), polidas (sequência de pastas de polimento: 6 e 1 micro) e atacadas com Nital 2% (tempo de ataque: 3s). Em seguida as amostras foram encaminhadas ao microscópio óptico. Esse processo foi repetido oito vezes para se obter análises macroscópicas e microscópicas.

## 4.2 ANÁLISE COMPUTACIONAL

Visando obter resultados referentes a haste dos parafusos, região a qual as falhas ocorreram, esta análise, foi executada utilizando dois tipos de elementos finitos, Solid95 (sólido hexagonal) e Solid92 (sólido tetraédrico). O solid95 foi utilizado para caracterizar a região da rosca, pelo fato de, facilitar o processo de execução desta análise, pois se trata de uma região de baixo interesse. Já o solid92 é a forma de elemento mais apropriada para modelar estruturas 3D, pois consiste em três graus de liberdade para cada nó e deslocamentos nas três posições nodais, x, y e z (DE CARVALHO, 2003), (figura 24). Para essa análise não foi realizada uma verificação de critérios de convergência.

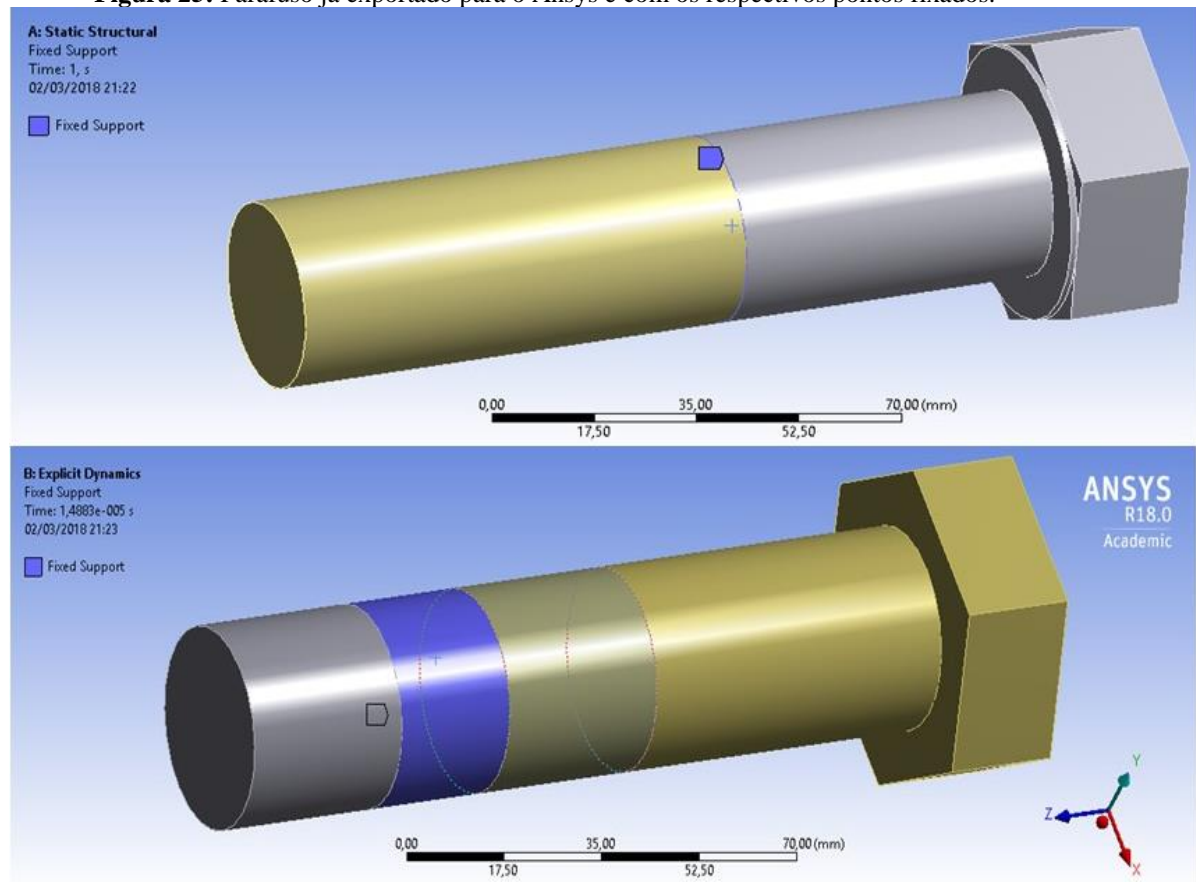
**Figura 24:** Representação gráfica dos elementos Solid95 e Solid92.



**Fonte:** Monteiro (2004).

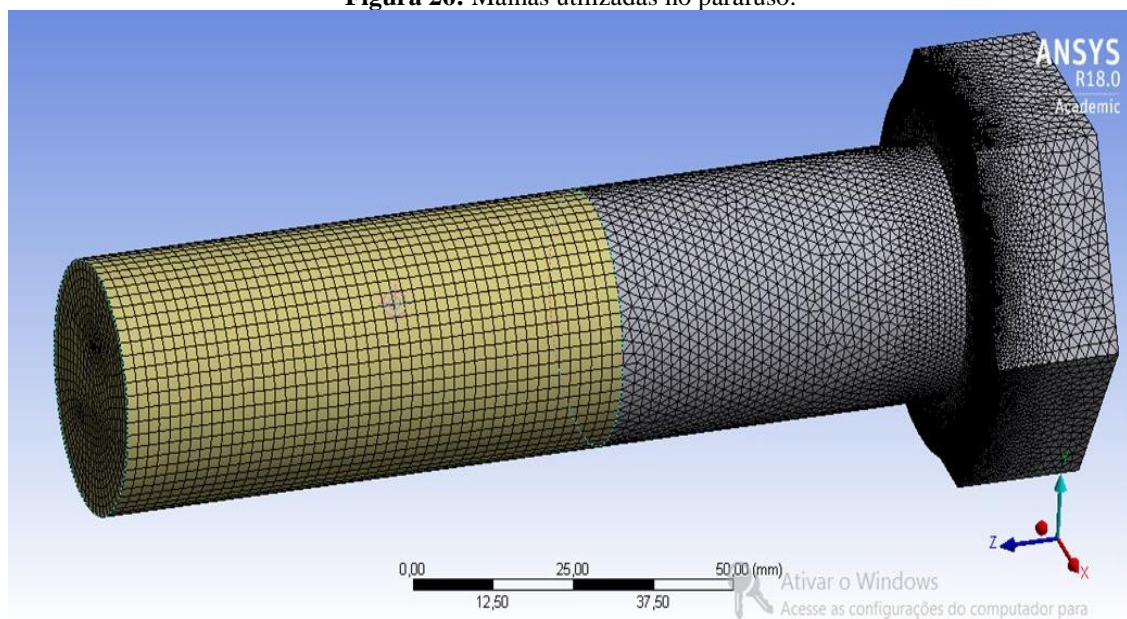
A geometria 3D do parafuso foi construída em software Solid Edge ST9 e exportada como um arquivo IGES ou PAR (extensão do Solid Edge) para ser analisado no programa ANSYS. O parafuso foi limitado em duas regiões distintas da rosca para simular o aperto na rosca sofrido por uma porca apertada e folgada respectivamente, de modo a se obter dois resultados (figura 25). A malha de 200.000 elementos finitos foi gerada de maneira a ficar disposta no corpo 3D, como discutido anteriormente (figura 26). Finalmente, a carga de pressão foi aplicada na face da cabeça do parafuso em uma direção normal com inclinação de 45°, (figura 27).

**Figura 25:** Parafuso já exportado para o Ansys e com os respectivos pontos fixados.



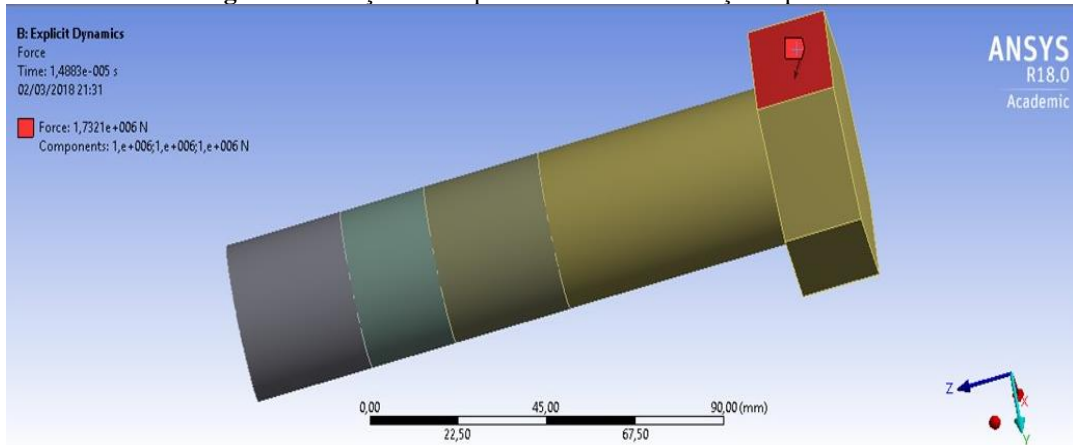
Fonte: Autor.

**Figura 26:** Malhas utilizadas no parafuso.



Fonte: Autor.

**Figura 27:** Força sendo aplicada na face da cabeça do parafuso.



**Fonte:** Autor.

A solução foi feita com o solucionador linear ANSYS. O traçado do contorno de Deformação Total foi obtido com o ANSYS pós-processador.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 INSPEÇÃO VISUAL

A partir da inspeção visual, observou-se que, ambas as fraturas se encontravam na região da haste dos parafusos. Outro ponto extremamente importante detectado, foi o fato de um desgaste agressivo, está presente nas cabeças dos parafusos, entretanto, ao se comparar esses desgastes é notório que o presente na cabeça do parafuso 1 está bem mais acentuado em relação ao parafuso 2. Isso indica é claro que, ambos os fixadores estavam sujeitos a esforços externos extremamente altos, além de pressupor que o parafuso 1 resistiu a maior parte dessa carga externa, (figura 28).

**Figura 28:** Fratura nas hastes e desgastes nas cabeças dos parafusos.



Fonte: Autor.

### 5.2 ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados percentuais dos elementos mais relevantes da análise química referente aos parafusos 1 e 2 (tabela 01). Demonstram que ambos os fixadores estão em conformidade com a norma ASTM F568M, além de terem resultados muito próximos, quando se comparados um com o outro.

**Tabela 1:** Análise química por Espectrometria de Emissão Óptica.

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
<b>Nominal</b>	---	0.31-0.65	---	---	0.045 máx.	0.045 máx.	---	---
<b>P01</b>	95.70	0.6490	0.2300	0.8440	0.0248	0.0360	0.9810	0.1800
<b>P02</b>	96.50	0.6370	0.2240	0.8440	0.0255	0.0334	1.000	0.1870

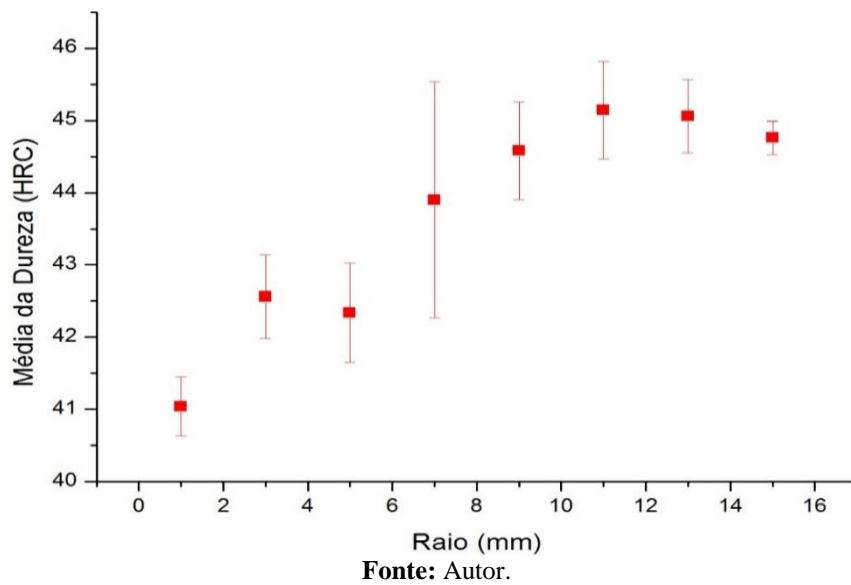
Fonte: Autor.

### 5.3 ENSAIO DE DUREZA

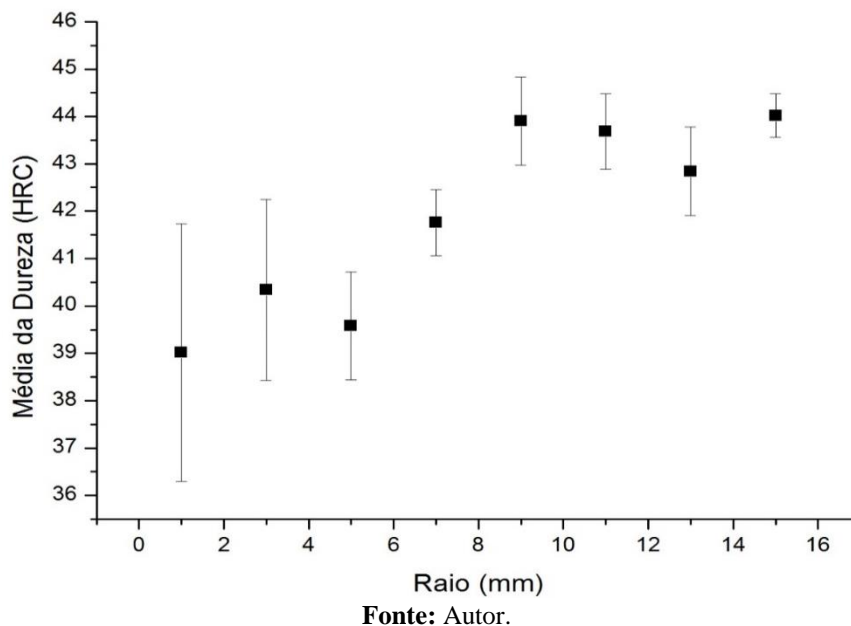
Como o parafuso novo e os fraturados vieram da empresa com um corte longitudinal em todo o seu eixo e com pontos de solda em um dos lados desses cortes, em cada um dos parafusos. Dois tipos de resultados foram obtidos, um referente a região oposta da zona

termicamente afetada pelo calor (ZTA) e outro, na mesma região da ZTA, para cada um dos parafusos. Assim, foi possível comparar os dados de ambas as regiões bem como os resultados recomendados pela norma ISO 898-1. Os mapeamentos de dureza das respectivas regiões são demonstrados nos gráficos a seguir. É notório, que independente da região estar afetada ou não, pelo calor gerado no processo de soldagem, os resultados de dureza que variam do centro dos parafusos até sua extremidade, estão de acordo com os exigidos pela ISO, que são de 39HRC à 44HRC respectivamente. Além de provar que os mesmos têm elevada dureza, (figuras 01 a 03).

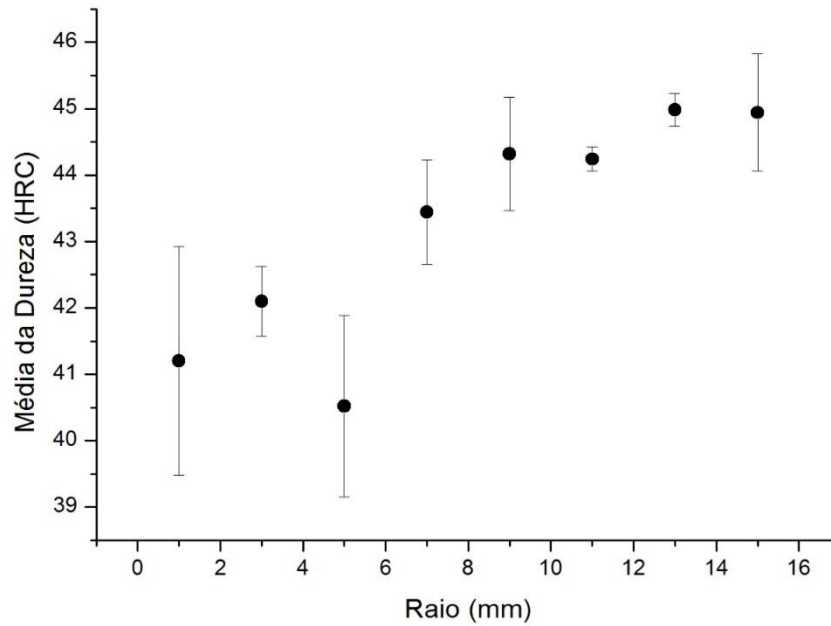
**Figura 29:** Gráfico dos resultados referente ao parafuso 1 (lado do ponto de solda).



**Figura 30:** Gráficos dos resultados referente ao parafuso 1 (lado oposto ao ponto de solda).



**Figura 31:** Gráfico dos resultados referente ao parafuso 2 (lado oposto ao ponto de solda).

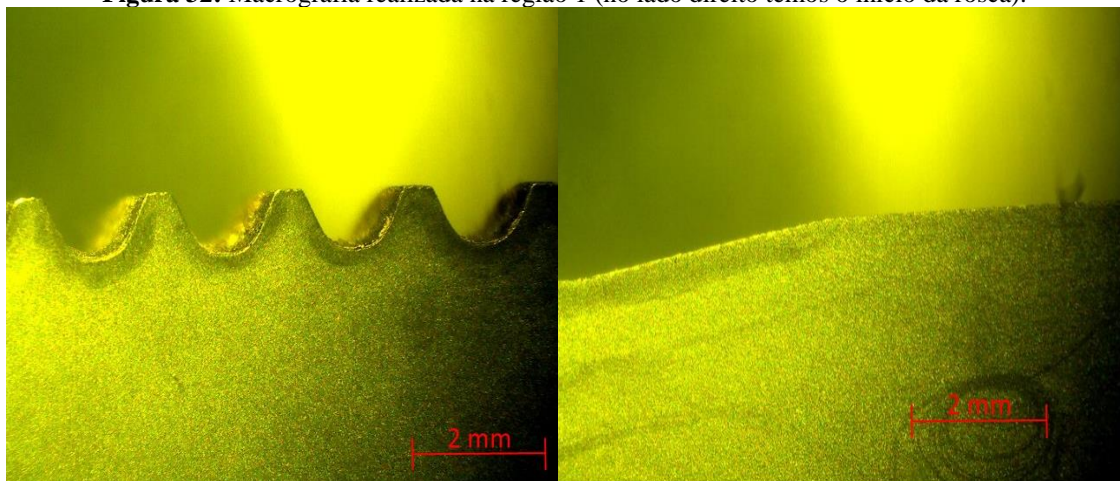


Fonte: Autor.

## 5.2 MACROGRAFIA POR ESTEREOSCÓPIO

Os exames macrográficos, mostram um contorno por toda a região da rosca. Também é possível notar que as raízes dos filetes estão com raios curvos, logo os parafusos têm suas rosca produzidas por um processo de conformação a frio ao invés de usinagem. A figura 32 mostra as macrografias realizadas na região 1 do parafuso novo.

**Figura 32:** Macrografia realizada na região 1 (no lado direito temos o início da rosca).



Fonte: Autor.

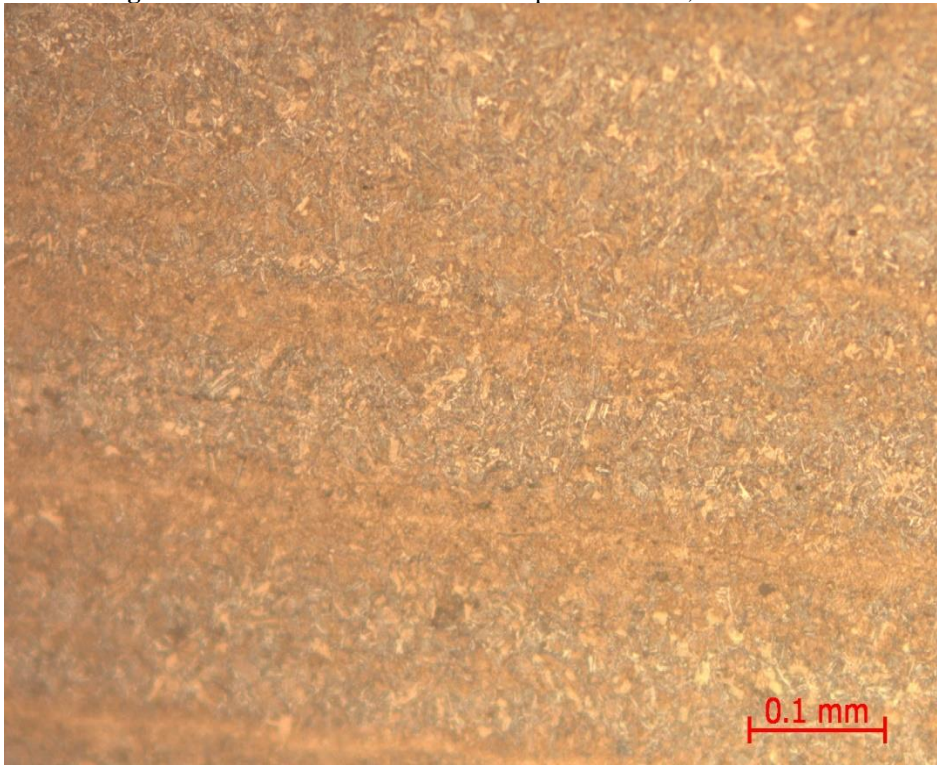
## 5.3 MICROGRAFIA ÓPTICA

A partir de comparações com a literatura e com base nos resultados de dureza obtidos, observou-se que os parafusos, apresentam a microestrutura martensita revenida, além de grãos



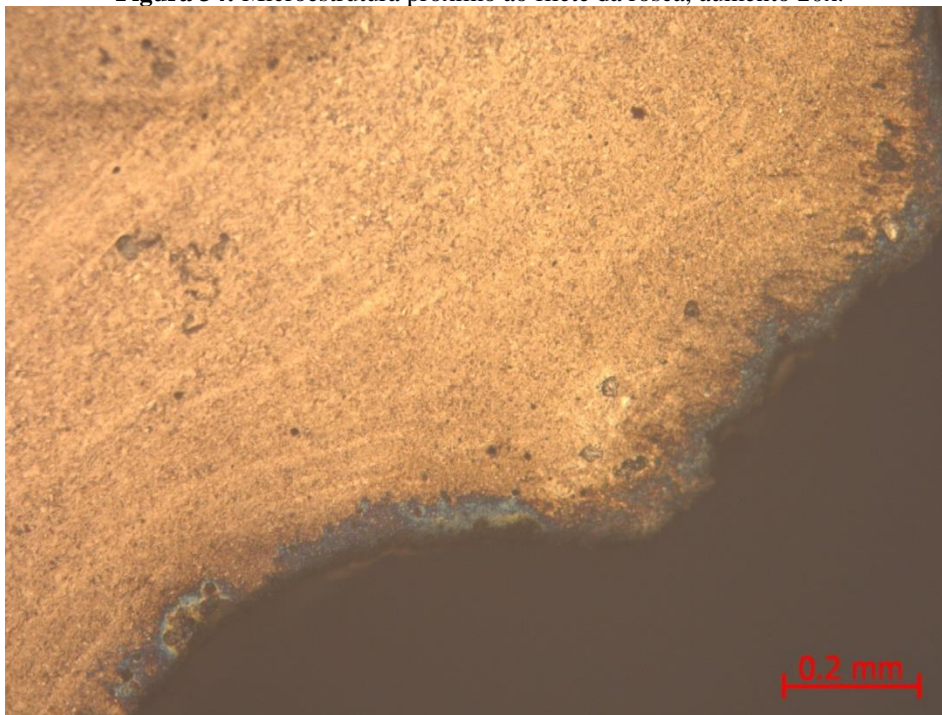
mais refinados próximos a região da rosca indicando que o parafuso foi fabricado por laminação a frio e posteriormente passou por tratamentos térmicos para alívio de tensões residuais, (figuras 33 e 34).

**Figura 33:** Microestrutura do centro do parafuso novo, aumento 10x.



**Fonte:** Autor.

**Figura 34:** Microestrutura próximo ao filete da rosca, aumento 20x.



**Fonte:** Autor.

A figura 34, além de evidenciar uma microestrutura mais refinada, mostra grãos contornando as raízes e cristas do filete ali estudado. Isso prova mais uma vez que a rosca do parafuso passou por um processo de conformação a frio. Esses resultados indicam que a rosca do parafuso (região a qual foi projetada para suportar a maior parte da carga) é mais resistente que a haste do mesmo. Logo, quando os parafusos estão sujeitos à esforços externos para os mesmos tendem a sofrer falhas na região da haste ou cabeça do parafuso.

#### 5.4 EXAME FRACTOGRÁFICO

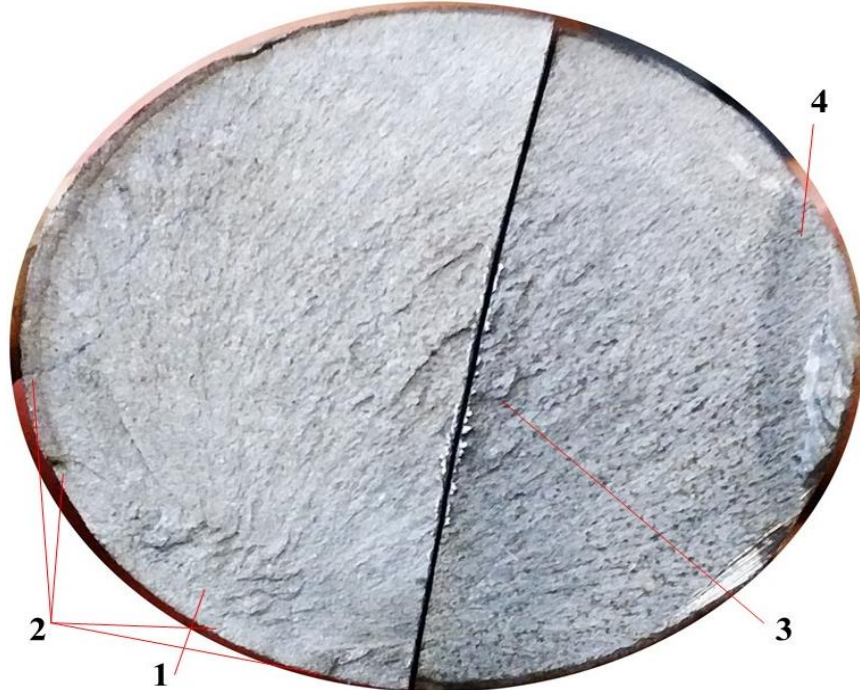
Macroscopicamente, o primeiro fator notório em ambas as superfícies das fraturas, são suas texturas rugosas de cor esbranquiçada, por toda a superfície fraturada, cor essa que, é característica de falhas de fadiga. As texturas rugosas são características de metais com maior ductilidade. Porém, a fratura do parafuso 1 apresenta um aspecto mais plano se em comparação a fratura do parafuso 2 que apresenta deformações plásticas mais evidentes. Esses detalhes induzem a dizer que esses fixadores têm resistência a tenacidade a fratura diferentes, pois Hertzberg (2013), afirma que, quando a fratura apresenta grandes deformações plásticas ou não planas, se diz que o material tem uma alta tenacidade, porém, para fraturas planas o material tem baixa tenacidade. Entretanto, por essas fraturas serem derivadas do mesmo tipo de material e as análises químicas e mecânicas reforçarem essa afirmativa, fica claro que, essa característica plana e não plana, dos parafusos 1 e 2 respectivamente, não indica tenacidade a fratura diferente, mas sim, que ambos estavam sujeitos a esforços externos cíclicos diferentes.

As figuras a seguir apresentam as duas fraturas, onde todas essas características mencionadas anteriormente são evidentes, além, de marcas de superfície, como, marcas de Chevron e região fibrosa de alta plasticidade presentes no centro da fratura. Essa região fibrosa central, é derivada de carga uniaxial de tração pois se formam devido à associação com partículas e/ou interfaces fraturadas e crescem em um plano normal ao eixo de tensões (PARKER, 1983). Como os fixadores rosqueados são projetados para suportar cargas uniaxiais de tração, essa região já era esperada, porém, para a fratura do parafuso 2 a mesma está mais perceptível, levando a entender que essa fratura sofreu um esforço de tração no início do processo, assim como a fratura 1, mas, bem mais acentuada.

Na figura 35, temos os pontos mais importantes referentes a superfície da fratura do parafuso 1. As marcas de Chevron indicam que o ponto 1 é a possível região, onde o processo de fratura iniciou. O ponto 2, mostra várias marcas de catraca, que por sua vez, são devido a esforços externos cíclicos de alta intensidade. Os pontos 3 e 4, mostram uma rugosidade mais

acentuada se comparada a rugosidade existente por toda a superfície da fratura e a ZTA, respectivamente.

**Figura 35:** Superfície da fratura do parafuso 1.



Fonte: Autor.

**Figura 36:** Superfície da fratura do parafuso 2.

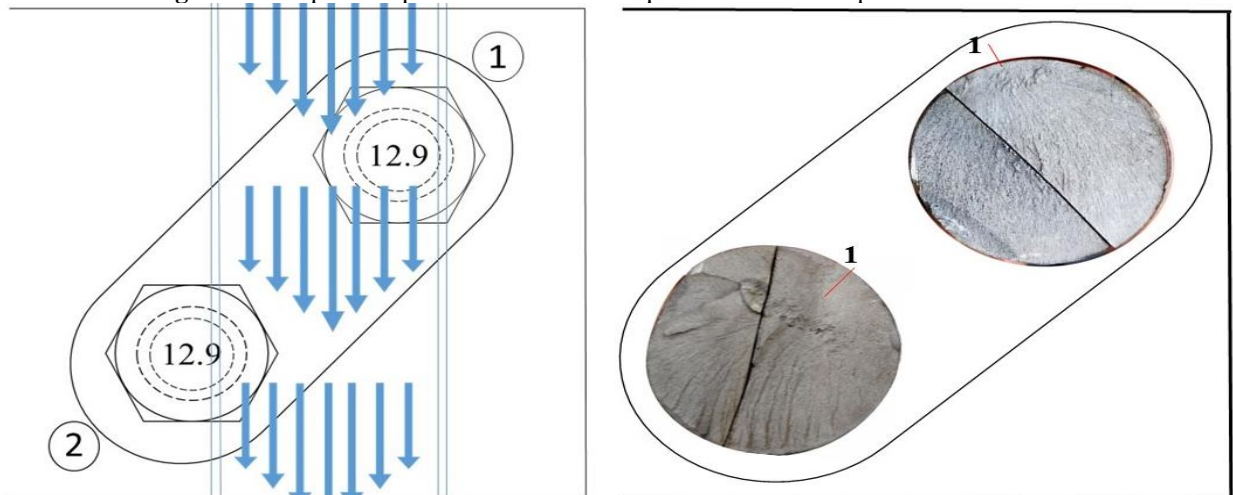


Fonte: Autor.

Na figura 36, temos os pontos mais importantes referentes a superfície da fratura do parafuso 2. No ponto 1, temos uma região mais plana se comparado as outras regiões da mesma fratura. Essa região pode facilmente representar a região da fratura de propagação lenta ou região de fadiga. Logo em seguida temos, o ponto 2, que representa a região fibrosa derivada de carga uniaxial (tração), o aspecto dessa região em comparação a região fibrosa encontrada na superfície do parafuso 1 é bem mais acentuado, sugerindo que o parafuso 2 sofreu um esforço externo de tração de maior intensidade. Como a região da fratura de propagação rápida (ponto 3), vem logo em seguida da região fibrosa, pode se dizer que essa intensidade da carga de tração foi suficientemente alta, para dar início ao colapso da fratura. No ponto 4 temos a zona termicamente afetada pelo calor do ponto de solda (ZTA).

Uma comparação mais ampla de ambas as fraturas e do modo como os parafusos estavam dispostos fixados nas sapatas do alimentador. Vários outros resultados podem ser obtidos. O fato do parafuso 1 apresentar uma superfície de fratura totalmente ou muito mais plana, quando comparado a superfície da fratura do parafuso 2, sugere dizer que, o parafuso 1 teve sua fratura sendo propagada de modo lento do início ao fim da falha e que quando o mesmo falhou totalmente o parafuso 2 não conseguiu suportar toda essa carga em excesso, levando este a também falhar totalmente, basta observar a região de fratura de propagação rápida. Isso pode ser deduzido ao fato que ambos os parafusos estavam na mesma sapata, além de sofrerem falhas devido a esforços externos cíclicos. Ao montar esquematicamente a forma como os parafusos estavam dispostos, os inícios das fraturas apontam para a mesma direção, pressupondo dizer que ambos falharam devido a mesma carga externa cíclica que estavam suportando em suas cabeças. Veja o esquema montado na figura 37.

**Figura 37:** Esquema representando o motivo que levou ambos os parafusos a falhar.

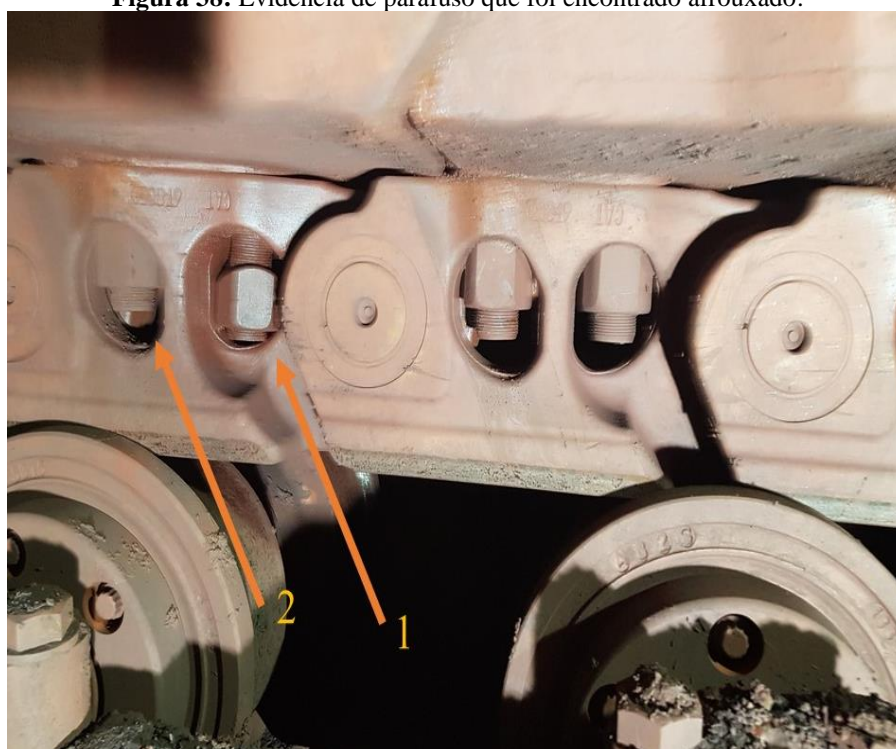


Fonte: Autor.

Como já é sabido, o parafuso 1 suportou a maior parte da carga e o parafuso 2 apresenta marcas de Chevron gradativas inclinadas, sugerindo dizer que o mesmo sofreu torção gradativamente, logo, para uma torção dessa magnitude, o esforço externo cíclico suportado em sua cabeça estava mais próximo das regiões de tensão de cisalhamento máximo do que seu próprio eixo. Por esse motivo a carga cíclica externa evidenciada na figura anterior pelas setas azuis, estão dispostas desta maneira. Partindo dessa teoria, e analisando o sentido da força para se apertar ou afrouxar esses parafusos. Essa carga externa cíclica, tenderia a rotacionar o parafuso 1 no sentido anti-horário (afrouxar) e o parafuso 2, a rotacionar no sentido horário (apertar). Isso explica o porquê somente um dos parafusos de uma mesma sapata foi encontrado folgado, (figura 38).

A figura 36, vem para provar que ambos os parafusos estavam sujeitos a uma carga externa cíclica e que o parafuso 1 estava suportando a maior parte desta carga. No ponto 1 é possível observar quase que por completo a cabeça de um outro parafuso “brilhando”, devido ao desgaste que está acontecendo em sua cabeça. No ponto 2, parte do parafuso 2 está visível. Estes estão dispostos na mesma posição ao qual o parafuso fraturados pertenciam na sapata. O ponto 3 mostra uma sapata “brilhando”, devido ao mesmo esforço.

**Figura 38:** Evidência de parafuso que foi encontrado afrouxado.



**Fonte:** Autor.

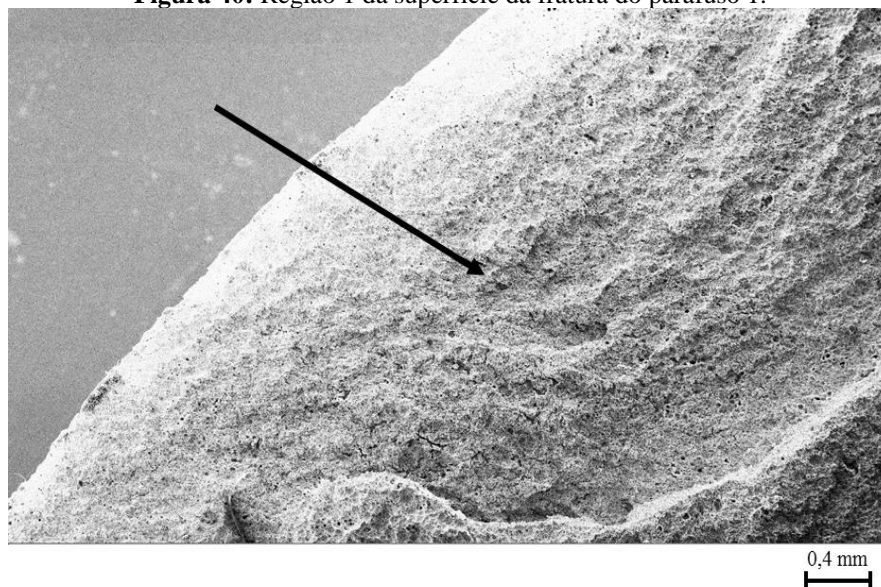
**Figura 39:** Desgastes encontrados nas sapatas e cabeça do parafuso.



Fonte: Autor.

Ao analisar microscopicamente a região do ponto 1 da superfície fraturada do parafuso 1, as marcas de praia ficam mais evidentes (figura 37). Essa dificuldade de observar essas marcas macroscopicamente pode estar ligada a dois fatores, o primeiro e que essas marcas são difíceis de serem observadas em ligas de aço, e o segundo fator é de que, as mesmas não são possíveis de serem observadas em níveis elevados ou baixos de variação da tenacidade a fratura ( $\Delta K$ ). E como não temos aparência áspera ou roscada de clivagem indicando  $\Delta K$  baixo, podemos afirmar que as fraturas apresentam elevada tenacidade a fratura.

**Figura 40:** Região 1 da superfície da fratura do parafuso 1.

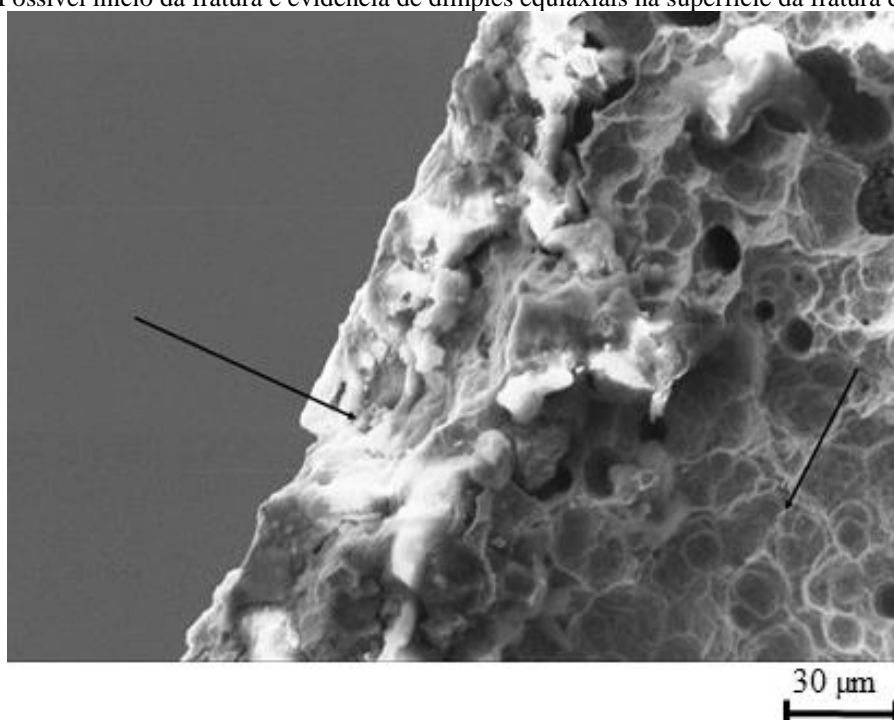


Fonte: Autor.

Vasculhando a região 1 na direção de encolhimento das marcas de praia (sentido oposto ao da seta), é possível chegar a uma região que pode ter sido o início da fratura (figura 41). Analisando essa região, fica perceptível algumas estrias de fadiga bem como dimples equiaxiais derivados de carga uniaxiais de tração. Como a maior parte da superfície da fratura está tomada por esses dimples equiaxiais, pode se dizer que, a carga externa cíclica que atuou na cabeça desse parafuso induzia cargas de tração suficientemente pequenas ao ponto do parafuso resistir ao desgaste e a fratura lentamente por um longo período até colapsar totalmente próximo a região mais externa do parafuso.

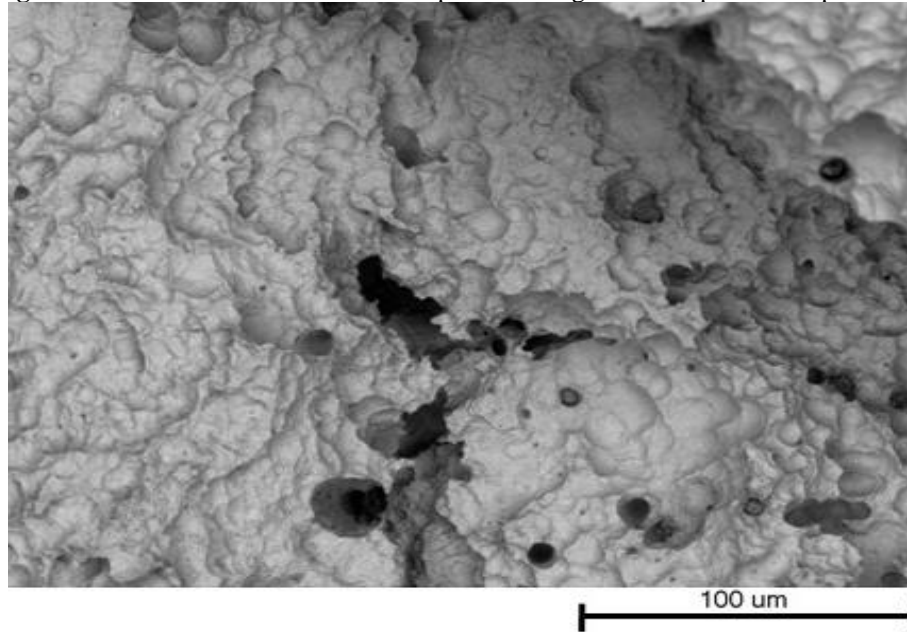
Ao analisar microscopicamente a região do ponto 2 da superfície fraturada do parafuso 2, é possível notar assim como na fratura do parafuso 1 os dimples equiaxiais por toda a superfície da fratura, entretanto estes apresentam uma maior profundidade. Esse fato, reforça a ideia de que o parafuso 2 sofreu um esforço uniaxial de tração de intensidade muito maior quando se comparado ao parafuso 1 (figura 42). Uma vez que o crescimento a coalescência destes vazios envolve um processo local de deformação plástica, é de se esperar que a energia total de fratura possa estar relacionada de alguma forma ao tamanho dessas cavidades. Na verdade, foi demonstrado em experiências de laboratório que a energia de fratura aumenta o crescimento em profundidade e largura das covinhas observadas (PARKER, 2007; BIRKLE, 1966.)

**Figura 41:** Possível início da fratura e evidência de dimples equiaxiais na superfície da fratura do parafuso 1.



Fonte: Autor.

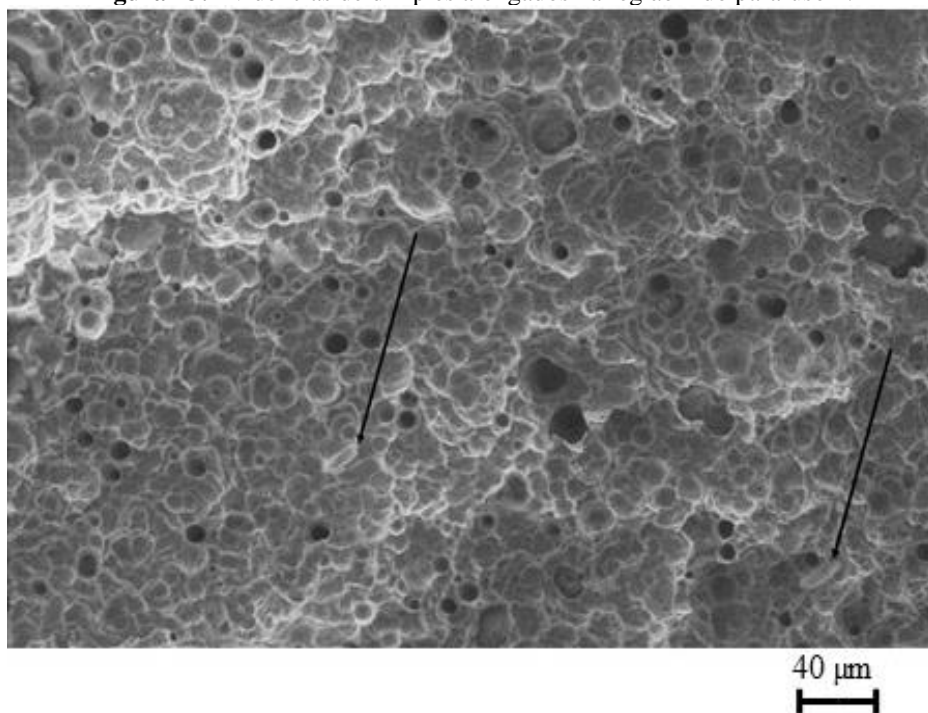
**Figura 42:** Coalescência de Microvazios por toda a região 2 da superfície do parafuso 2.



Fonte: Autor.

Como o parafuso 2 sofreu torção até o ponto onde o parafuso 1 falhou catastróficamente e deduzindo que essa torção aumentou gradativamente tendendo a causar um pouco de cisalhamento, é de se esperar que alguns dimples alongados apareçam na superfície da fratura do parafuso 2 de maneira mínima pontual, (figura 43).

**Figura 43:** Evidências de dimples alongados na região 1 do parafuso 2.



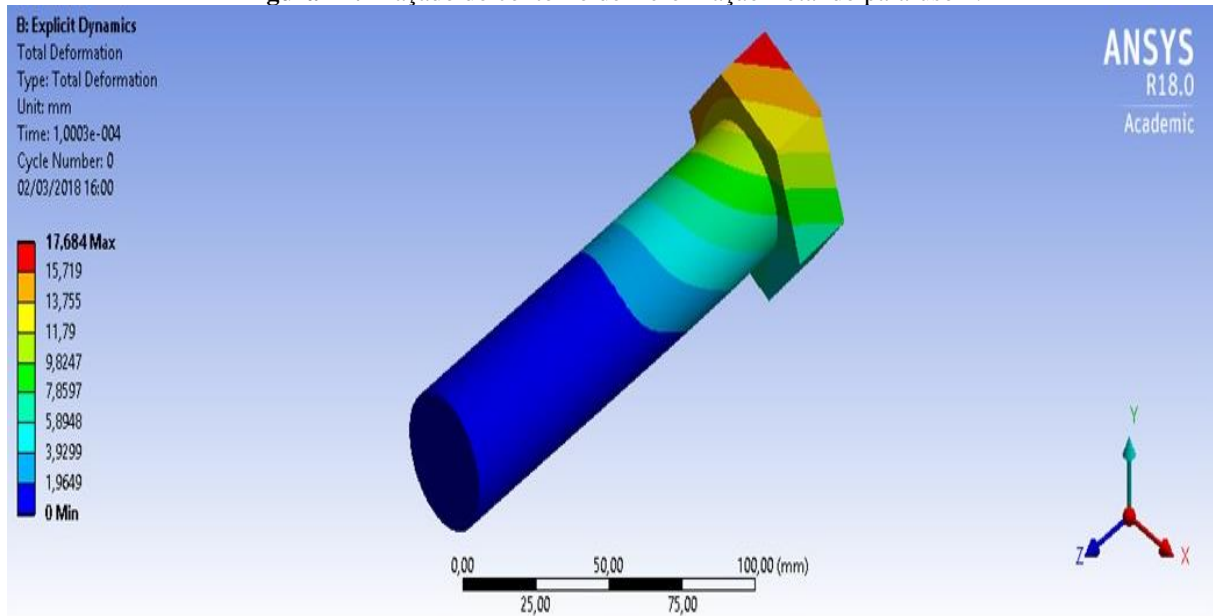
Fonte: Autor.



## 5.5 ANÁLISE ESTRUTURAL COMPUTACIONAL

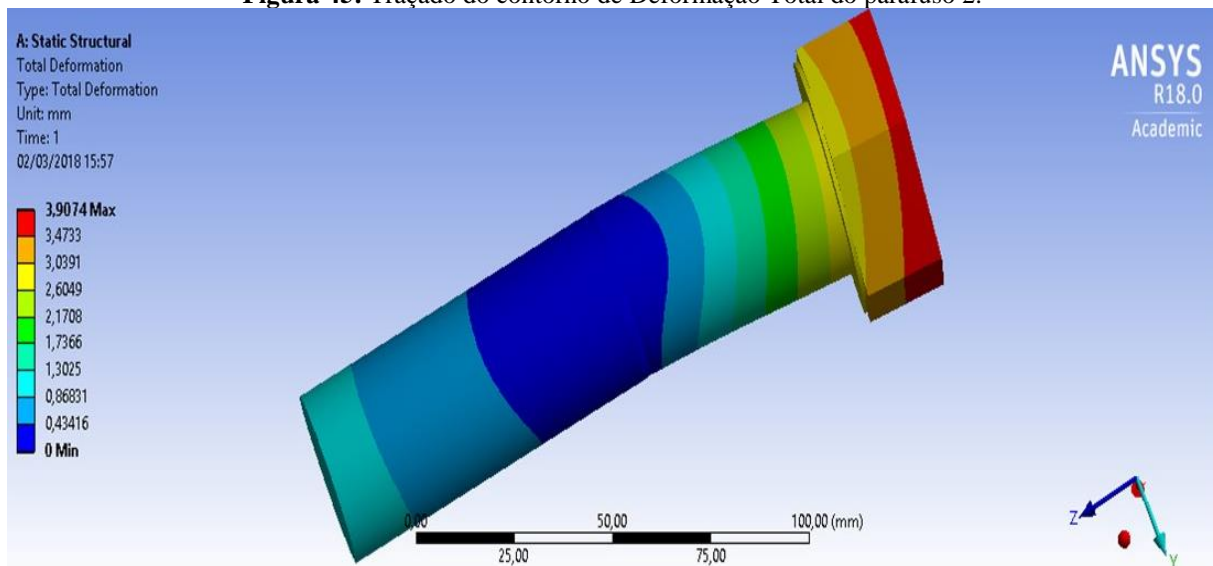
As figuras a seguir mostram as deformações que o parafuso 1 (folgado) e 2 (apertado) sofreram respectivamente.

**Figura 44:** Traçado do contorno de Deformação Total do parafuso 1.



Fonte: Autor.

**Figura 45:** Traçado do contorno de Deformação Total do parafuso 2.



Fonte: Autor.

Os resultados reforçam a ideia de que quando os parafusos estão sujeitos a essa suposta carga externa cíclica em suas cabeças, deformações significativas surgem na região da cabeça e haste dos mesmos, pois, em ambas as situações temos a região da rosca apresentando

deformação zero. Observa-se que a maior deformação está na região da cabeça dos parafusos, além de que quando comparados, o parafuso 2 apresenta uma deformação de baixa intensidade, enquanto que no parafuso 1 essa deformação é de alta intensidade. A análise também indica que quanto maior a folga entre o parafuso e a porca, maior será a deformação da região afetada pela carga cíclica. Levando em consideração que essa deformação é suficientemente alta para que haja perda de massa, os parafusos tenderiam a apresentar um desgaste excessivo em suas cabeças, desgaste esse que é detectado na inspeção visual. Como a suposta força esta sendo aplicada diretamente na cabeça dos parafusos, o momento nesta região é zero, porém, a intensidade desse momento cresce a medida em que a distância aumenta entre a cabeça e a haste do parafuso, levando a região da haste a ter uma alta probabilidade de apresentar a verdadeira falha. Essa situação pode existir tanto para um parafuso apertado como para um parafuso folgado, pois, mesmo o segundo parafuso apresentando baixa deformação, e por se tratar de parafusos que estavam na mesma sapata dividindo cargas da mesma intensidade, ao parafuso 1 falhar o segundo falhará catastróficamente.

## **6 CONCLUSÃO**

Os resultados da modelagem matemática, bem como as inspeções visuais, macrografia e micrografia, demonstram claramente que a região da haste dos parafusos é mais susceptível a falhas quando os mesmos estão sujeitos a esforços externos para os quais não foram projetados. Os resultados demonstram que esses esforços atuam de maneira intensa e cíclica ao ponto de realizar um grande desgaste nas cabeças dos parafusos e sapatas. As análises de dureza e química provam que ambos os fixadores estão em conformidade. Então, a fratura ocorrida nos mesmos, é devido a uma carga externa de origem desconhecida, o que se comprova pelas marcas de praia e estrias de fadiga. Com esses resultados faz-se necessário, realizar uma inspeção completa por todo o alimentador de sapatas a fim de diagnosticar se o causador/gerador dessas cargas cíclicas é devido a falhas no projeto, erros de montagem ou instalação e ainda erros de operação ou manutenção inadequada, para que em seguida sejam aplicadas as devidas correções.

## 7 REFERÊNCIAS

- ASTM F568M, 2003. **Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Externally Threaded Metric Fasteners 1**, ASTM International.
- BEACHEM, C. D. **Electron fractographic studies of mechanical fracture processes in metals**. *Journal of Basic Engineering*, v. 87, p. 299-306, 1965.
- BIRKLE, A. J.; WEI, R. P.; PELLISSIER, G. E. **Analysis of Plane-Strain Fracture in a Series of 0.45 C-Ni-Cr-Mo Steels with Different Sulfur Contents**. *ASM Trans Quart*, v. 59, n. 4, p. 981-990, 1966. *apud* HERTZBERG, R. W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 5 ed. New York: John Wiley & Sons. 2013.
- BROOKS, C. R.; CHOUDHURY, A. **Failure analysis of engineering materials**. New York: McGraw-Hill, p.602, 2002.
- BUDINAS, Richard G.; KEITH, Nisbett J. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8 ed. Porto Alegre – AMGH, 2011.
- COSTA, A.R.O. **Análise de falha dos parafusos de fixação da base do cavalete de sustentação do mastro de um caminhão perfuratriz**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais, 2013.
- DE CARVALHO, M. C.; DE DEUS, E. P. Fracture analysis of a flow control device used in the petrochemical industry. **Engineering Failure Analysis**, v. 10, n. 4, p. 423-429, 2003.
- DIETER, George E. Fadiga dos Metais. **Metalurgia Mecânica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, p. 344, 1981.
- ESTUDO DE MERCADO. Manutenção: Vida Útil Plena e Produtiva. **Revista M&T**, ed. 186. p. 85-88. 2014.
- FORSYTH, P. J. E. Some results of the examination of aluminum alloy specimen fracture surfaces. **Metal**, v. 63, p. 117-124, 1961. *apud* HERTZBERG, R. W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 5 ed. New York: John Wiley & Sons. 2013.
- GORDO, Nívia; FERREIRA, Joel. **Elementos de máquinas 1**. Telecurso 2000 profissionalizante. Módulos Especiais Mecânica. São Paulo: Escola SENAI —Hessel Horácio Cherkassky. Departamento Regional de São Paulo, 2000.
- HANDBOOK, Metals. vol. 12: **Fractography**. ASM International Metals Park, Ohio, USA, 1987.
- HARTMAN, H. L., & MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. John Wiley & Sons. p.9 – 25,2002.
- HERTZBERG, R. Fatigue fracture surface appearance. In: **Fatigue Crack Propagation**. ASTM International, 1967.
- HERTZBERG, R. W.; MILLS, W. J. Character of fatigue fracture surface micromorphology in the ultra-low growth rate regime. In: **Fractography—microscopic cracking processes**. ASTM International, 1976.
- HERTZBERG, R. W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 5 ed. New York: John Wiley & Sons. 2013

- IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Indústria da Mineração. Ano VI.** 2011.
- IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **A Indústria da Mineração: Para o desenvolvimento do Brasil e a promoção da qualidade de vida do brasileiro.** Brasília, DF, 2014.
- ISO, PNEN. 898-1: 2013. **Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel–Part**, v. 1.
- JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. **Projeto de Componentes de Máquinas.** 4th ed. Rio de Janeiro - LTC, 2013.
- LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. **Introdução ao tratamento de minérios.** Ed. 5°. CETEM/MCT, 2010.
- MADIGAN, R. **Of Minerals and Man.** Parkville: Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 1981.
- MCMILLAN, J. C.; HERTZBERG, R. W. Application of electron fractography to fatigue studies. In: **Electron Fractography.** ASTM International, 1968.
- MECÂNICA: Noções Básicas de Elementos de Máquinas. Espírito Santo: SENAI. 1996.
- MILAN, M. T. et al. Failure analysis of a SAE 4340 steel locking bolt. **Engineering Failure Analysis**, v. 11, n. 6, p. 915-924, 2004.
- MOLAEI Sh. et al. A failure analysis study on the fractured connecting bolts of a filter press. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 4, p. 26-38, 2015.
- MONTEIRO, F.L. **Failures analysis of flow forming machine spindle.** 2004. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.
- NATIONAL MINING ASSOCIATION et al. **The future begins with mining.** Washington DC, 1998.
- PARKER, A. P., **The Mechanics of Fracture and Fatigue**, Spon, London, 1983. *apud* STROHAECKER, Telmo Roberto. **Mecânica da fratura.** Laboratório de Metalurgia Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. p. 99, 2007.
- PASSOJA, D. E.; HILL, D. C. **On the distribution of energy in the ductile fracture of high strength steels.** Metallurgical Transactions, v. 5, n. 8, p. 1851-1854, 1974. *apud* HERTZBERG, R. W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials.** 5 ed. New York: John Wiley & Sons. 2013.
- PEGDEN, C. Dennis; SADOWSKI, Randall P.; SHANNON, Robert E. **Introduction to simulation using SIMAN.** McGraw-Hill, Inc., 1995. *apud* DREVNA, Michael J.; KASALES, Cynthia J. **Introduction to ARENA.** In: Proceedings of the 26th conference on Winter simulation. Society for Computer Simulation International, p. 43 – 436, 1994.
- PHILLIPS, V. Kerlins, and B. V. Whiteson, **Electron Fractography Handbook**, Air Force Materials Laboratory Technical Report ML-TDR-64-416, 1965. *apud* HERTZBERG, R. W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials.** 5 ed. New York: John Wiley & Sons. 2013.

PINHEIRO, JC de F.; DA DIPLAM-DNPM, DIRETOR. **A importância econômica da mineração no Brasil**. Apresentação Rede Nacional de Informações sobre o Investimento-Renai, 2011.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Processos de usinagem**. Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

SIEMENS. Ingenuity for life. **Siemens PLM Software**. Disponível em: < <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/> >. Acesso em: 25 fev. 2018.

TGEND. **Inspeções Técnicas**. Disponível em: < <http://www.tgend.com.br/> >. Acesso em: 25 fev. 2018.