



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

FÁBIO ALVES RABELO JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA DE PARAFUSOS DA  
CLASSE 10.9, UTILIZADOS NA FIXAÇÃO DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DE  
VEÍCULOS CAT793D, APLICANDO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE  
CEMENTAÇÃO.**

**BELÉM – PA**

**2022**

FÁBIO ALVES RABELO JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA DE PARAFUSOS DA  
CLASSE 10.9, UTILIZADOS NA FIXAÇÃO DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DE  
VEÍCULOS CAT793D, APLICANDO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE  
CEMENTAÇÃO.**

Qualificação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de tecnologia da Universidade Federal do Pará – UFPA - Campus Belém. Como requisito para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientador: José Maria do Vale Quaresma  
Coorientador: José Carlos de Araújo Cardoso Filho

**BELÉM – PA**

**2022**

FÁBIO ALVES RABELO JÚNIOR

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

R114c Rabelo Júnior, Fábio Alves.  
Caracterização mecânica e metalúrgica de parafusos da classe 10.9, utilizados na fixação da suspensão dianteira de veículos CAT793D, aplicando tratamento termoquímico de cementação / Fábio Alves Rabelo Júnior. — 2022.  
66 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Industrial, Belém, 2022.

1. Caracterização. 2. Mecânica. 3. Metalúrgica. 4.  
Parafuso. I. Título.

CDD 620.1

---

FÁBIO ALVES RABELO JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA DE PARAFUSOS DA CLASSE 10.9, UTILIZADOS NA FIXAÇÃO DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DE VEÍCULOS CAT793D, APLICANDO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de tecnologia da Universidade Federal do Pará – UFPA - Campus Belém. Como requisito para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientador: José Maria do Vale Quaresma

Coorientador: José Carlos de Araújo Cardoso Filho

Data da Defesa: 31/08/2022

Conceito: \_\_\_\_\_

---

Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma - UFPA  
Presidente da Banca

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo Cardoso Filho - UFPA  
Membro Interno

---

Prof. Dr. Hilton Túlio Costi - Museu Paraense Emilio Goeldi  
Membro Externo

---

Prof. Dr. Daniel Monteiro Rosa - UNB  
Membro Externo

## AGRADECIMENTOS

- Primeiramente a Deus, por ter me dado forças e iluminando meu caminho para que pudesse concluir mais uma etapa da vida.
- Aos meus amados pais, Fábio Rabelo e Célia Rabelo, por todo amor, dedicação e momentos que estiveram ao meu lado me apoiando e fazendo acreditar que nada é impossível.
- As minhas queridas irmãs, Ana Paula Rabelo, Ana Cláudia Rabelo e Ana Lúcia Rabelo, pelo carinho e atenção que sempre tiveram comigo me dando muitas alegrias nos momentos difíceis.
- A minha grandiosa esposa, Lucielen Rabelo, e ao meu herdeiro, Davi Luís Rabelo, que fizeram parte de toda essa conquista. Sem a empatia de vocês tudo seria mais difícil.
- Ao meu orientador Prof. Dr. José Quaresma pela paciência, dedicação e ensinamentos disponibilizados nas aulas, e ao meu caro amigo e Engenheiro Edgar Cardoso pelas parcerias na execução do projeto.
- Cada um de forma especial contribuiu para a conclusão desta dissertação e conseqüentemente para minha formação profissional.

*Atenciosamente*

*Fábio Alves Rabelo Júnior.*

## RESUMO

Quando um componente estrutural de um equipamento de grande porte vem a falhar, consequências de quebras catastróficas podem ocorrer, gerando prejuízos econômicos altamente mensuráveis, pois a falha leva a interrupção de uma linha inteira de produção e prejudica o fluxo de trabalho, o que pode resultar em atrasos e aumento dos custos de manutenção, seja preventiva ou corretiva. Além disso tem-se as condições de riscos severos impactando em perdas de vidas, em casos de acidentes catastróficos, onde são amplamente divulgados pela mídia e influenciando fortemente na conduta da estrutura de uma organização. O objetivo deste trabalho é realizar a caracterização mecânica e metalúrgica de parafusos da classe 10.9, aplicando Tratamento Termoquímico de Cementação, avaliando a influência deste na resistência mecânica. Estes componentes estruturais fazem parte do sistema de suspensão dianteira dos Caminhões “Fora-de-Estrada” Caterpillar modelo 793D que realizam o transporte de cargas pesadas de minério de ferro no complexo Ferro-Carajás, no estado do Pará. Foram realizados Tratamentos Termoquímicos e Ensaio Mecânicos de Dureza e de Tensão de Tração. As análises Fractográficas e Microestruturais foram feitas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, além de Microscopia Óptica.

**Palavras-chaves:** Mineração, Fratura, Caracterização

## ABSTRACT

When a structural component of a large piece of equipment fails, catastrophic consequences can occur, generating highly measurable economic losses, because a failure leads to an interruption of an entire production line and damage to the workflow, which can cause delays and increased maintenance costs, whether preventive or corrective. In addition, serious risk conditions affect the loss of life in cases of catastrophic accidents, where they are widely reported by the media and strongly influence an organization's conduct. The objective of this work is to carry out the mechanical and metallurgical characterization of screws of class 10.9, applying the Thermochemical Treatment of Cementation, evaluating the influence of this mechanical resistance. These components include the Caterpillar model 793D “Off-Highway” truck suspension system that carries heavy iron ore loads in the Ferro-Carajás complex, in the state of Pará. Thermo-chemical treatments and mechanical tests were carried out and Tensile Stress. Fractographic and Microstructural analyzes were performed using Scanning Electron Microscopy - SEM, in addition to Optical Microscopy.

**Keywords:** Mining, Fracture, Characterization

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caminhão Fora-de-Estrada Caterpillar CAT793D. ....	14
Figura 2 - Quebra catastrófica com Caminhão Fora-de-Estrada CAT793D, em serviço. ....	16
Figura 3 - Fixação de uma Suspensão Dianteira de Caminhão Fora-de-Estrada CAT793D....	17
Figura 4 - Fixação de uma Suspensão Dianteira de Caminhão Fora-de-Estrada CAT793D, no Chassi .....	17
Figura 5 - Vistas do Chassi onde é fixado a Suspensão Dianteira CAT793D (Cor Azul). ....	18
Figura 6 - Localização dos Parafusos de Fixação da Suspensão Dianteira CAT793D. ....	19
Figura 7 - Vista de acesso a Suspensão Dianteira CAT793D.....	19
Figura 8 - Vista da Suspensão Dianteira CAT793D entre o Chassi e o Pneu. ....	20
Figura 9 - Porca e Parafuso.....	20
Figura 10 - Representação das forças que atuam sobre uma junta aparafusada .....	22
Figura 11 - Superfície de Fratura por Fadiga.....	25
Figura 12 - Correlação profundidade da camada cementada com a temperatura e o tempo de tratamento. ....	28
Figura 13 - Tipos de fratura: (a) fratura dúctil; (b) fratura frágil.....	31
Figura 14 - Fluxograma esquemático do desenvolvimento desta Dissertação .....	33
Figura 15 – (a) Parafusos fraturados e; (b) parafusos novos. ....	34
Figura 16 - Espectômetro de Emissão Óptica.....	34
Figura 17 - (a) Microscópio ótico e (b) Microscopio eletrônico de varredura (MEV).....	35
Figura 18 - Posição de extração de corpo de prova de tração segundo a norma; b) Parafusos usados. ....	35
Figura 19 – (a) Caixa de aço inoxidável; (b) Corpos de prova e carvão ativado na caixa de aço inoxidável. ....	36
Figura 20 - (a) Corpos de prova como recebido; (b) Corpos de prova cementados.....	37
Figura 21 - Ilustração da retirada da amostra através de corte a quente .....	38
Figura 22 - Durômetro Rockwell RBS-M. ....	39
Figura 23 - Máquina universal de ensaio – EMIC.....	40

Figura 24 - Região contendo presença de Marcas de Praia. ....	42
Figura 25 - Região contendo presença de Marcas de Catraca .....	43
Figura 26 -Região mais rugosa.....	43
Figura 27 - Microfractografia da seção transversal com a presença da fratura do tipo “Taça e Cone” a) CP1; b) CP2; c) CP3.....	47
Figura 28 - Microcavidades de CP1. ....	48
Figura 29 - Microcavidades de CP2. ....	49
Figura 30 - Microcavidades de CP3. ....	50
Figura 31 - (a) Material cementado – 2h (100x); (b) Material cementado – 2h (200x). ....	54
Figura 32 - (a) Material cementado – 5h (100x); (b) Material cementado – 2h (200x). ....	54
Figura 33 - Correlação da dureza dos parafusos com e sem tratamento termoquímico. ....	55
Figura 34 - Correlação da tensão máxima dos parafusos com e sem tratamento termoquímico. ....	56
Figura 35 - Correlação do alongamento dos parafusos com e sem tratamento termoquímico. ....	57
Figura 36 - Correlação da dureza dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar.....	58
Figura 37 - Variação Percentual da dureza dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar .....	59
Figura 38 - Correlação da tensão máxima dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar. ....	60
Figura 39 - Variação percentual da tensão máxima dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar .....	61
Figura 40 - Correlação do alongamento dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar. ....	62
Figura 41- Variação percentual do alongamento dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do parafuso. ....	41
Tabela 2 - Dureza dos parafusos fraturados em serviço. ....	45
Tabela 3 - Tensão máxima dos parafusos fraturados em serviço. ....	45
Tabela 4 - Alongamento dos parafusos fraturados em serviço. ....	46
Tabela 5 - Parâmetros da empresa para parafusos classe 10.9. ....	51
Tabela 6 - Dureza dos parafusos novos. ....	51
Tabela 7 - Tensão máxima dos parafusos novos. ....	52
Tabela 8 - Alongamento dos parafusos novos. ....	52
Tabela 9 - Verificação dos dados dos parafusos novos. ....	53
Tabela 10 - Dados dos parafusos analisados. ....	57

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES

*ABNT* – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

*ASTM* – American Society for Testing and Materials;

*CP1* – Corpo de prova 1;

*CP2* – Corpo de prova 2;

*CP3* – Corpo de prova 3;

*CP1\_N* – Corpo de prova novo 1;

*CP2\_N* – Corpo de prova novo 2;

*CP3\_N* – Corpo de prova novo 3;

*D<sub>0</sub>* - Constante característica do sistema de difusão ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

*HRC* – Hardness Rockwell C;

*ISO* – International Organization for Standardization ;

*MEV* – Microscópio Eletrônico de Varredura;

*Q<sub>d</sub>* - Energia de Ativação para a difusão ( $\text{J/mol}$  ou  $\text{cal/mol}$ );

*R* - Constante universal dos gases ( $8,31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ );

*T* - Temperatura absoluta (K).

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1. ASPECTOS GERAIS .....	13
1.2. OBJETIVOS .....	14
1.2.1. Objetivo específico .....	14
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1. SUSPENSÃO MECÂNICA .....	16
2.2. PARAFUSOS .....	20
2.3. JUNTAS APARAFUSADAS .....	21
2.4. AÇOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PARAFUSOS .....	22
2.5. FADIGA DOS METAIS .....	23
2.5.1. Mecanismos de falha por fadiga .....	24
2.6. ENDURECIMENTO SUPERFICIAL .....	25
2.7. TRATAMENTO TERMOQUÍMICO .....	25
2.7.1. Difusão .....	26
2.7.2. Cementação .....	27
2.8. ENSAIOS MECÂNICOS .....	28
2.8.1. Ensaio de Tração .....	28
2.8.2. Dureza .....	29
2.9. FRATURA .....	30
2.9.1. Fratura dúctil .....	31
2.9.2. Fratura frágil .....	32
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
3.1. AQUISIÇÃO DOS PARAFUSOS .....	33
3.2. ANÁLISE QUÍMICA .....	34
3.3. ANÁLISE DAS FRATURAS .....	34
3.4. USINAGEM DOS PARAFUSOS .....	35
3.5. CEMENTAÇÃO .....	36
3.6. METALOGRAFIA .....	37
3.7. DUREZA .....	38
3.8. TRAÇÃO .....	39
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>

4.1.	ANÁLISE QUÍMICA.....	41
4.2.	ANÁLISE DA TOPOGRAFIA DAS FALHAS.....	41
4.2.1.	Macroestrutura da peça fraturada.....	41
4.3.	ANÁLISE MECÂNICA E FRACTOGRÁFICA .....	44
4.3.1.	Dureza .....	44
4.3.2.	Tensão Máxima.....	45
4.3.3.	Alongamento.....	46
4.3.4.	Fratura .....	46
4.4.	COMPARAÇÃO DOS PARAFUSOS NOVOS COM OS PARÂMETROS CATERPILLAR .....	50
4.4.1.	Dureza .....	51
4.4.2.	Tensão Máxima.....	51
4.4.3.	Alongamento.....	52
4.5.	CARACTERIZAÇÃO DOS PARAFUSOS CEMENTADOS.....	53
4.5.1.	Camada cementada .....	53
4.5.2.	Dureza .....	54
4.5.3.	Tensão máxima .....	55
4.5.4.	Alongamento.....	56
4.6.	COMPARAÇÃO DOS PARAFUSOS .....	57
4.6.1.	Comparação das durezas .....	58
4.6.2.	Comparação das tensões máximas.....	59
4.6.3.	Comparação do alongamento.....	61
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. ASPECTOS GERAIS

De acordo com Leal (2018), a mineração constitui uma atividade dispendiosa, além de envolver alto potencial de riscos, mas, se conduzida de maneira adequada, sua indústria pode gerar ganhos consideráveis. Estima-se que o setor de transporte, na mineração, pode contribuir em até 40% dos custos totais da produção, dependendo do método de lavra adotado. Sendo assim, a implantação de uma melhoria neste âmbito implica em significativo impacto no custo final de produção, bem como nos lucros rendidos.

Em minas de grandes extensões, a adoção de caminhões fora-de-estrada é usual devido à facilidade de realocação ante as diversas frentes de lavra em avanço, sendo ideal para terrenos adversos - como no caso da mineração - onde seria inviável a utilização de caminhões caçambas convencionais. Além disso, grandes projetos operam caminhões com capacidade de até 400 toneladas, otimizando o custo unitário de transporte do material (LEAL, 2018).

E como exemplo, é no sudeste paraense, no Projeto Ferro-Carajás, onde a realidade das minas a céu aberto é comum o tráfego de caminhão fora-de-estrada Caterpillar, modelo 793D, onde é um equipamento extremamente robusto, que impressiona por suas grandezas. O Caminhão mede 12,86 metros de comprimento por 7,60 metros de largura, com 6,49 metros de altura, tem um peso bruto de 166.866 quilos, com pneus de 3,00 metros de diâmetro e com a inacreditável capacidade de transportar e bascular 240 toneladas de minério de ferro por ciclo de viagem. Possui seis marchas à frente e uma a ré, podendo alcançar até 54 km/h na sexta velocidade.

Sendo que no Projeto Ferro-Carajás a Mineradora VALE S.A. possui uma frota de 50 Caminhões Fora-de-Estrada CAT793D, fabricados entre os anos de 2006 a 2010, já com horas trabalhadas entre 34 e 71 mil quilômetros de máquina em operação.

Figura 1 - Caminhão Fora-de-Estrada Caterpillar CAT793D.



Fonte: Adaptado de [www.sis.cat.com/sisweb](http://www.sis.cat.com/sisweb), 2019.

## 1.2. OBJETIVOS

Realizar a caracterização mecânica e metalúrgica de parafusos da classe 10.9, utilizados na fixação da suspensão dianteira de veículos CAT793D e aplicar tratamentos termoquímicos de cementação com a finalidade de aumentar a resistência mecânica dos materiais.

### 1.2.1. Objetivo específico

- Avaliar a topografia das falhas de parafusos fraturados em serviço.
- Avaliar mecanicamente e fractograficamente os parafusos fraturados em serviço.
- Comparar os parâmetros mecânicos de parafusos novos como recebidos com os parâmetros estipulados pela empresa Caterpillar.
- Submeter parafusos novos ao processo de cementação na temperatura de 900°C por 2 e 5 horas para caracterizar sua:
  - A espessura da camada cementada
  - Dureza
  - Resistência a Tração

- Alongamento
- Comparar parafusos fraturados em serviço, parafusos novos como recebidos e parafusos novos cementados em relação as seguintes propriedades:
  - Dureza
  - Resistência a Tração
  - Alongamento

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. SUSPENSÃO MECÂNICA

De acordo com Piazza (2018), a suspensão é o sistema intermediário entre os pneus e o chassi, é um sistema complexo que possui diversas funções e requisitos.

Segundo Nunney (2007), as principais funções das suspensões são: isolar os ocupantes das imperfeições do solo de forma a prover conforto durante a rodagem do veículo, e uma outra função e não menos importante é prover a estabilidade do veículo em todas as condições de uso, como curvas, frenagens, acelerações. Estas duas funções tendem a ser conflitantes entre si, é necessário que o projeto tenha um compromisso de forma que atenda estas duas áreas.

Segundo Rill, Salg e Wilks (1992), os sistemas de suspensão do eixo dianteiro foram introduzidos em tratores com o objetivo de mitigar as consequências negativas das instabilidades e da vibração gerada em serviço. Há casos em que a quebra do sistema de suspensão causa falha catastrófica, conforme a Figura 2, onde tem-se o veículo em situação de risco.

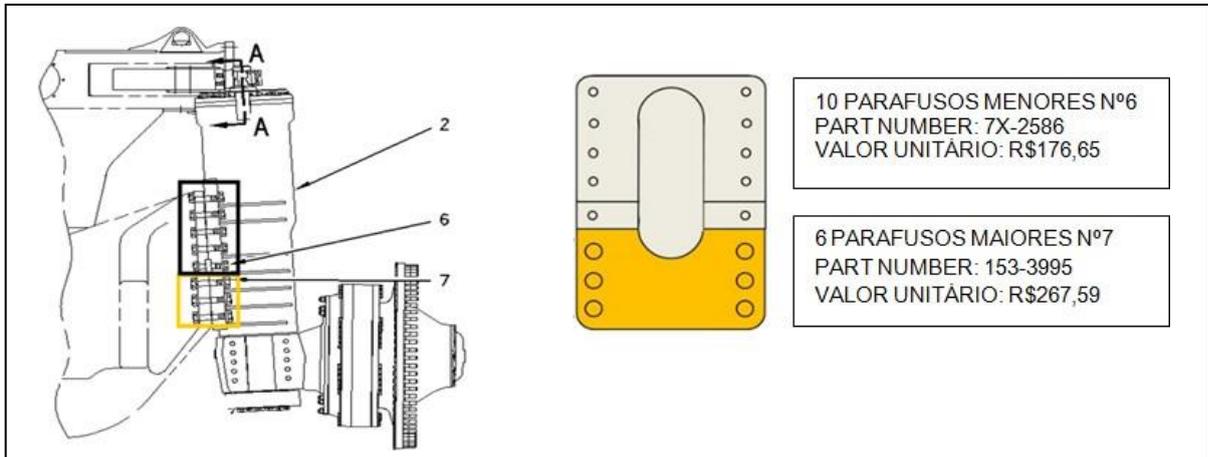
Figura 2 - Quebra catastrófica com Caminhão Fora-de-Estrada CAT793D, em serviço.



Fonte: Aatoria Própria, 2017.

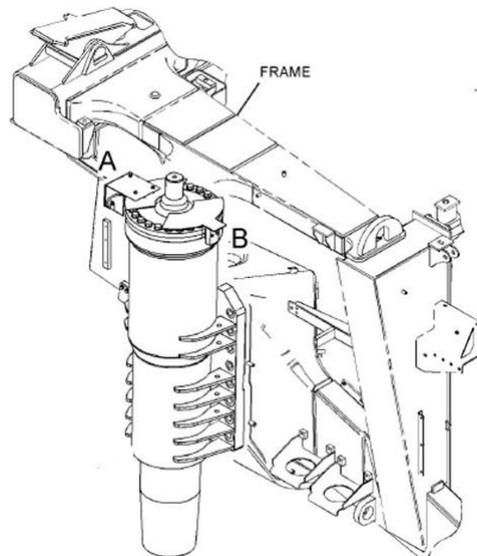
O Sistema de Suspensão Dianteira do Caminhão Fora-de-Estrada CAT793D é fixado no Chassi do mesmo por 16 parafusos, sendo três pares de parafusos maiores e cinco pares menores, conforme as Figuras 3, 4 e 5.

Figura 3 - Fixação de uma Suspensão Dianteira de Caminhão Fora-de-Estrada CAT793D.



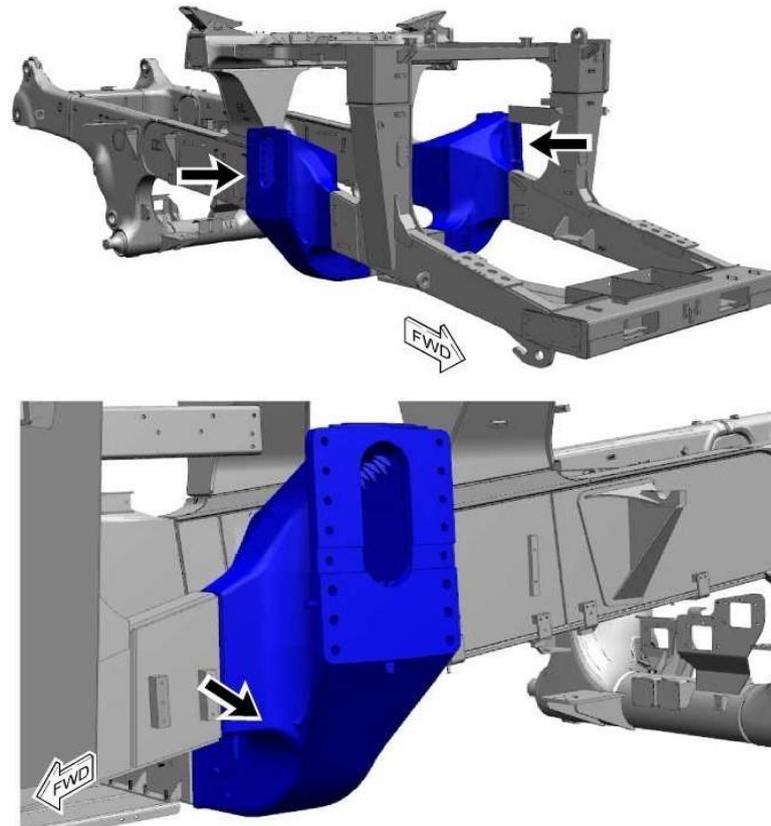
Fonte: Adaptado de [www.sis.cat.com/sisweb](http://www.sis.cat.com/sisweb), 2019.

Figura 4 - Fixação de uma Suspensão Dianteira de Caminhão Fora-de-Estrada CAT793D, no Chassi.



Fonte: Adaptado de [www.sis.cat.com/sisweb](http://www.sis.cat.com/sisweb), 2019.

Figura 5 - Vistas do Chassi onde é fixado a Suspensão Dianteira CAT793D (Cor Azul).



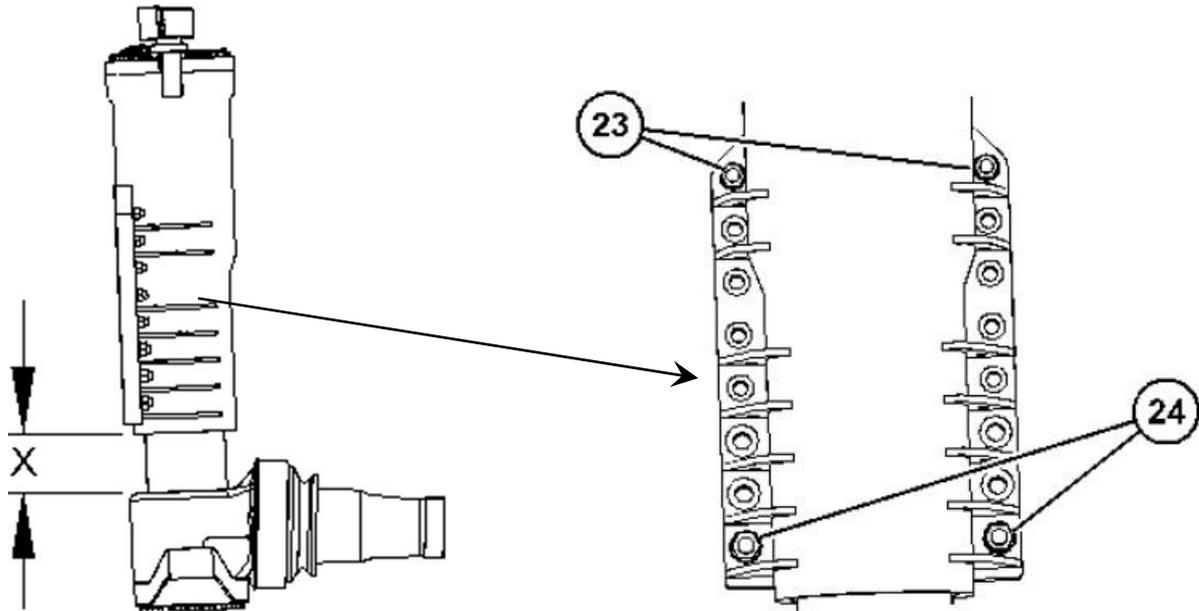
Fonte: Adaptado de [www.sis.cat.com/sisweb](http://www.sis.cat.com/sisweb), 2019

Cada roda dianteira é suportada por um cilindro de suspensão. O cilindro de suspensão é um cilindro hidráulico do tipo óleo pneumático. Os cilindros de suspensão dianteiros são os pinos mestres da articulação da direção. Os cilindros de suspensão dianteiros também proporcionam uma ação de absorção de impactos entre as rodas dianteiras e o chassi da máquina.

Os componentes principais do cilindro de suspensão dianteiro são um cilindro e uma haste. O cilindro está fixo ao chassi da máquina. A haste está livre para se mover dentro do cilindro conforme as rodas se movem para cima e para baixo. As hastes se movem com as rodas.

Cada Suspensão Dianteira é fixada no Chassi por 16 parafusos, sendo os três de baixo para cima maiores (24) e os cinco de cima menores (23), conforme Figura 6.

Figura 6 - Localização dos Parafusos de Fixação da Suspensão Dianteira CAT793D.



Fonte: Adaptado de [www.sis.cat.com/sisweb](http://www.sis.cat.com/sisweb), 2019

As Figuras 7 e 8 mostram as suspensões dos caminhos na realidade.

Figura 7 - Vista de acesso a Suspensão Dianteira CAT793D.



Fonte: Autoria Própria, 2019

Figura 8 - Vista da Suspensão Dianteira CAT793D entre o Chassi e o Pneu.

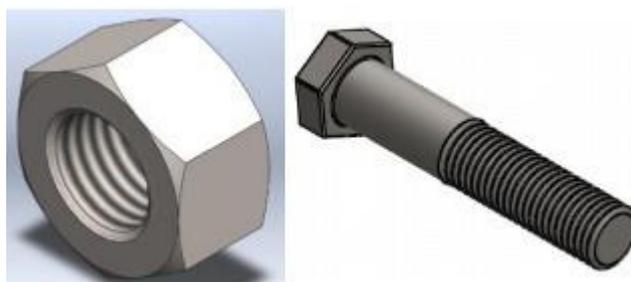


Fonte: Autoria Própria, 2019.

## 2.2. PARAFUSOS

Segundo Rodrigues (2015), os parafusos são componentes mecânicos que tem por finalidade realizar fixação entre peças, geralmente formando conjuntos com porcas e arruelas, ou transmitindo potência através do movimento. Fabricados em sua maioria de aço, também podem ser de uma grande variedade de materiais metálicos e não metálicos. Os parafusos se diferenciam pela forma da rosca, cabeça, haste e tipo de acionamento.

Figura 9 - Porca e Parafuso.



Fonte: Rodrigues (2015).

Dentre os elementos de fixação, pode-se dizer que os parafusos são os mais utilizados. São elementos de corpo cilíndrico e comprimento de corpo variável, onde, sobre este corpo, há filetes de roscas. Estas roscas podem ser de diferentes especificações e trabalham em conjunto com porcas, com as mesmas características de roscas (ANTONELLO e FRANCESCHI, 2014).

Parafusos e porcas para aplicação em estruturais ou cargas pesadas devem ser escolhidos, especificamente em uma junta parafusada à tração, os parafusos devem apertar um membro contra o outro com força para prevenir a separação ou vazamento. Coincidentemente, a tração no parafuso deve ser grande o suficiente para prevenir auto afrouxamento quando exposto a vibração, choque, ou ciclos térmicos. A alta tensão no parafuso pode torná-lo menos susceptível a fadiga (mas algumas vezes mais susceptível a trincamento por tensão) (BICKFORD,1995).

Há dois fatos importantes que se deve ter em mente quando se lida com juntas aparafusadas. Primeiro, os parafusos é um mecanismo para criar e manter a força entre os membros da junta. O segundo refere-se ao comportamento e a vida da junta aparafusada dependem muitíssimo da magnitude e estabilidade da força de aperto, ou pretensão (BICKFORD,1995).

As normas SAE (Society of Automotive Engineers), ASTM (American Society for Testing and Materials) e ISO são exemplos que auxiliam na escolha das propriedades ideias de parafusos para cada aplicação. Visto que, estas organizações definem graus ou classes para parafusos que especificam material, tratamento térmico e uma resistência mínima de prova para o mesmo. A resistência de prova é a tensão sob a qual o parafuso começa a apresentar deformação permanente, e é próxima, porém inferior a tensão de escoamento do material. O grau ou classe de cada parafuso são indicados por marcas ou ausência das mesmas na sua cabeça. (NORTON, 2006).

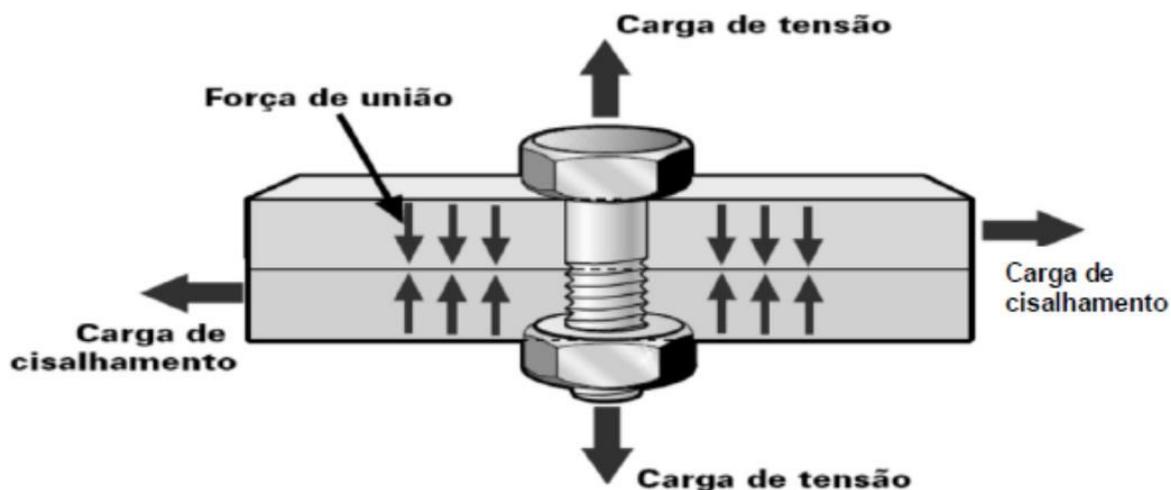
Segundo a norma ISO, os parafusos 4.8, 5.8 e 6.8 não sofrem tratamento térmico. Já os parafusos 8.8, 10.9 e 12.9 precisam de tratamento térmico (têmpera e revenimento). Esta classificação pode ser explicada da seguinte forma, se um parafuso for da classe 10.9, significa que a sua resistência a tração máxima é de 1000 MPa, já que os primeiros dígitos devem ser multiplicados por 100 para indicar sua resistência a tração. E o limite de escoamento é de 900 MPa, sendo o último dígito indicador de 90% do valor de resistência a tração (GARCIA, 2008).

### 2.3. JUNTAS APARAFUSADAS

Juntas aparafusadas são muito aplicadas em junções mecânicas com o objetivo de unir e/ou fixar peças, e é uma solução de projeto responsável por quase todos os sistemas que requerem uma posterior desmontagem. Uma junta é constituída de três elementos: o parafuso com rosca externa; a contra peça que é quem sofrerá toda resultante da força aplicada no

momento do aperto e que não pode sofrer nenhuma deformação plástica; e pôr fim a porca com rosca interna. A Figura 10 exemplifica os tipos de solicitações a que estão sujeitas as juntas aparafusadas (BARBOSA ET AL., 2014).

Figura 10 - Representação das forças que atuam sobre uma junta aparafusada.



Fonte: Barbosa et al., 2014.

Em uma junta aparafusada à tração, os parafusos devem apertar uma peça contra o outro com força para prevenir a separação ou vazamento. Coincidentemente, a tração no parafuso deve ser grande o suficiente para prevenir auto afrouxamento quando exposto a vibração, choque, ou ciclos térmicos. Alta tensão no parafuso pode torná-lo menos susceptível a fadiga, mas algumas vezes mais susceptível a trincamento por tensão (BICKFORD, 1995).

As juntas aparafusadas sujeitas a carregamentos dinâmicos possuem uma tendência ao afrouxamento. Geralmente o problema está mais ligado a pré cargas insuficientes que cargas excessivas. A questão de pré cargas inadequadas é associada ao método de aperto usado, somado as condições de atrito (NORTON, 2006).

#### 2.4. AÇOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PARAFUSOS

Os aços estruturais são normalmente fornecidos para atender a requisitos mecânicos (com alguns limites de composição química especificados com vistas à soldabilidade, por exemplo), aços para construção mecânica são usualmente fornecidos para atender faixas de composição química, uma vez que, normalmente, são tratados termicamente para obter

propriedades finais após o processamento pelo comprador. A principal característica visada, ao se definir a composição química, é a temperabilidade (SILVA, 2006).

A presença de pequenos teores de boro em solução (3 a 5 ppm) em aços com 0,20 a 0,40 % C permite obter uma temperabilidade média que fornece os valores necessários de dureza e resistência após têmpera, principalmente em parafusos de pequenas seções. O boro está presente nos aços como elemento intersticial e possui baixa solubilidade na ferrita (<0,003%). Apesar dos teores de boro presentes nos aços variar de 5 a 30 ppm, teores em solução na faixa de 3 a 5 ppm, para aços carbono, aumenta substancialmente a sua temperabilidade quando submetidos à têmpera convencional. (SUSKI, 2007).

A temperabilidade dos aços aumenta devido à presença de boro em solução, porém o excesso de boro forma borocarbonetos, eliminando o efeito do boro na temperabilidade. No entanto, percebe-se que há uma divergência entre os teores ótimos de boro bastante grande entre os autores, pois as variações e comentários são inúmeros, principalmente devido às possíveis formações de nitretos e borocarbonetos, as quais reduzem a quantidade de boro em solução sólida (RODRIGUES, 2015).

A norma ASTM A-490 (2011) aborda parafuso de aço liga, temperado e revenido para uso estrutural com resistência a tração de 150 a 173 ksi, com padrão de rosca em polegadas com dimensão de 0,5 a 1,5 polegadas. A norma ASTM A-490M (2011) aborda parafuso de aço de alta resistência, classes 10.9 para juntas estruturais com padrão métrico, com limite de resistência de 1040 a 1210 MPa e com dimensão de M-12 a M-36. Esta norma cobre dois tipos de ligas de aço temperados e revenidos, de parafusos sextavados estruturais pesados com resistência a tração de 1040 a 1210 MPa.

## 2.5. FADIGA DOS METAIS

A ASTM (American Society for Testing and Materials) define fadiga como sendo um processo de mudança estrutural progressivo, localizada e permanente, que ocorre em um material sujeito a condições que produzem tensões e deformações flutuantes em um ou mais pontos e que pode culminar em trincas ou fratura completa depois de um número suficiente de flutuações ou ciclos (ASTM E1823-13).

Usualmente as trincas iniciam na superfície dos componentes, pois além das tensões serem mais elevadas na superfície dos componentes, as discordâncias têm mais mobilidade do que no interior do componente e também a superfície sofre a agressão do meio (PIAZZA, 2018).

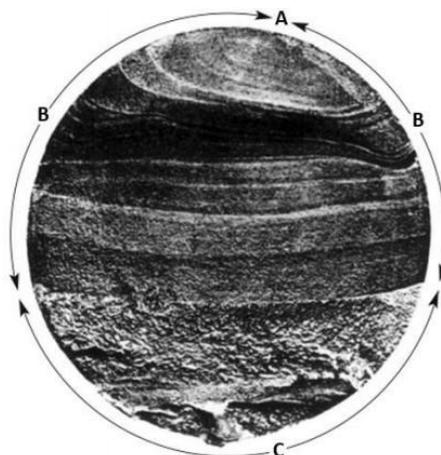
### 2.5.1. Mecanismos de falha por fadiga

O mecanismo de falha por fadiga consiste em três estágios, sendo eles: nucleação de trincas, propagação de trincas e fratura catastrófica final. A nucleação é o estágio I, no qual uma trinca se desenvolve devido à deformações plásticas localizadas, que se tornam pontos concentradores de tensão. Uma vez que a trinca surge, ela tende a se propagar, o que consiste no estágio II. A falha do componente ocorre quando a trinca atinge o tamanho crítico e a propagação é instável, denominado estágio III (ZERBST et al., 2018).

A trinca por fadiga após nucleada se propaga em dois estágios: estágio I pelo modo de cisalhamento, geralmente a  $45^\circ$  em relação ao eixo de carregamento; estágio II pelo modo normal. Durante o estágio I, depois de cruzar o primeiro contorno de grão a trinca pode se propagar através de vários grãos em forma de ‘zigue-zague’, devido as deformações plásticas na ponta da trinca. Com o aumento do tamanho da trinca bandas de deslizamento adicionais surgem e a trinca se propaga alternando em duas faixas de deslizamento diferentes. A posição e o comprimento das bandas de deslizamento são inicialmente determinados pela microestrutura. Devido à propagação em diferentes sistemas de deslizamento, a trinca muda sua direção: paralela à tensão de cisalhamento para perpendicular à carga aplicada (estágio II). No estágio II o comportamento da trinca tende a não ser influenciado pela microestrutura (KÜNKLER et al., 2008) (GODEFROID et al., 2018).

Segundo Piazza (2018), as falhas por fadiga podem ser identificadas analisando-se a região da fratura. A Figura 11 mostra um componente em que ocorreu a falha ocasionada pela fadiga. O início da trinca está indicado pela letra “A”, a região “B” é onde ocorre o crescimento da trinca, é caracterizada por estrias na superfície, que são conhecidas como “marcas de praia” e a região indicada pela letra “C” é quando ocorreu a fratura frágil.

Figura 11 - Superfície de Fratura por Fadiga.



Fonte: Adaptado de Haibach (2006).

## 2.6. ENDURECIMENTO SUPERFICIAL

Conforme mostrado anteriormente, usualmente as trincas de fadiga iniciam-se na superfície do material. Neste caso buscar tratamentos que melhorem a resistência à fadiga na superfície do material é desejável. O endurecimento superficial de aços é, geralmente, acompanhado por um aumento no limite de resistência à fadiga resultante de um aumento da dureza e às tensões residuais de compressão geradas na superfície.

Este efeito tem sido observado nos processos de cementação, nitretação e têmpera por indução. Além disso, o endurecimento superficial aumenta a sensibilidade ao entalhe e deve ser utilizado com cuidado. Se a interface entre o núcleo e a camada estiver próxima à superfície ou alguma região de concentração de tensão, há aumento da susceptibilidade à nucleação de trincas (MADAYAG, 1969).

## 2.7. TRATAMENTO TERMOQUÍMICO

Os tratamentos termoquímicos têm como objetivo a introdução, através da difusão, de elementos de liga na superfície da amostra a ser tratada, fazendo com que sua dureza superficial seja alterada pela modificação parcial da sua composição química (CHIAVERINI, 2002).

Para que os processos difusionais, responsáveis pela efetivação do tratamento, sejam ativados, o meio no qual a amostra está submetida deve apresentar uma elevada temperatura, entre 500°C e 1000°C, para que aumente a solubilidade de carbono na célula, e uma alta concentração do elemento que se deseja introduzir na superfície da amostra (SILVA e MEI,

2010).

Os tratamentos podem ser utilizados para adquirir propriedades como resistência a fadiga, à corrosão e à oxidação em altas temperaturas, entretanto o principal objetivo está no aumento da dureza da superfície do material. Esta propriedade, em conjunto com a ductilidade do núcleo do material, proporcionará uma excelente performance em aplicações que exigem elevada tenacidade combinada com alta resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 2002).

### 2.7.1. Difusão

Difusão pode ser definida como a alteração da composição química resultante do movimento dos átomos, induzidos por agitação térmica, podendo ocorrer transporte de massa de uma região de maior concentração para uma de menor concentração (CALLISTER, 2013).

Os métodos de endurecimento superficial por difusão incluem várias espécies em difusão (carbono, nitrogênio, boro, entre outros) e do método de processo usado para o manuseio e transporte das espécies difusivas para a superfície da peça (FOREMAN, 1991).

O processo de cementação é controlado pela difusão do carbono através da superfície do material, sendo este muito influenciado pela temperatura, potencial de carbono do meio cementante e o tempo de processo (BAUMGARTEN, 2003). A importância do conhecimento da influência destas variáveis é poder encontrar qual condição é suficiente para obter as propriedades mecânicas desejadas com um menor custo.

A temperatura tem uma influência das mais significativas sobre os coeficientes e as taxas de difusão. A relação da dependência dos coeficientes de difusão em relação a temperatura é dada pela equação seguinte:

$$D = D_0 e^{\left(\frac{-Q_d}{RT}\right)}$$

Em que:

$D_0$  = Constante característica do sistema de difusão ( $m^2 /s$ );

$Q_d$  = Energia de Ativação para a difusão (J/mol ou cal/mol);

$R$  = Constante universal dos gases (8,31 J/(mol.K));

$T$  = Temperatura absoluta (K).

### 2.7.2. Cementação

A cementação é certamente o método mais antigo para endurecimento superficial de aços. Dados históricos revelam que tem sido usado desde a época do Império Romano. Basicamente o processo consiste em aumentar o teor de carbono em uma fina camada na superfície da peça e posterior tratamento de têmpera e revenido. Assim, se o aço é de baixo carbono, apenas a camada superficial é endurecida e o interior mantém as características de ductilidade e tenacidade. Isso proporciona uma combinação das propriedades desejáveis de resistência ao desgaste e estabilidade estrutural (CELESTINO, FELIPE, MACHADO, 2007).

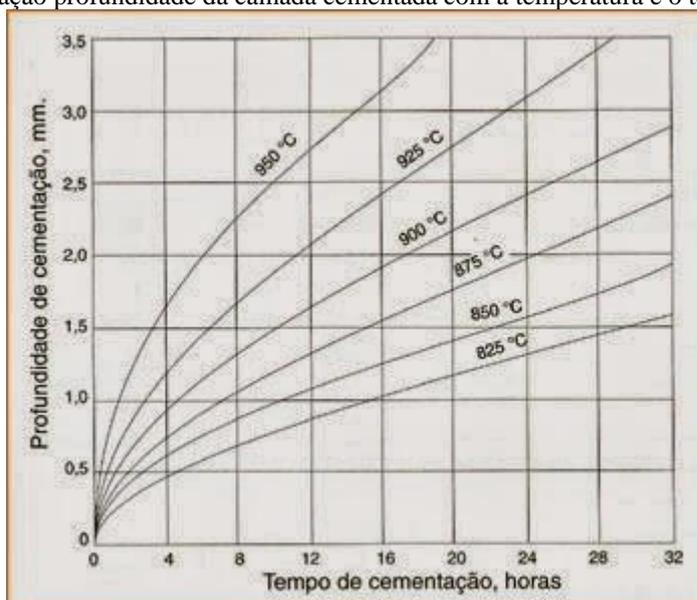
A cementação sólida ou em caixa é realizada inserindo a peça dentro da caixa feita em aço, e dentro desta caixa é colocado um pó cementante rico em carbono, geralmente compostos de carvão e ativadores que podem ser carbonatos alcalinos.

Esta caixa é colocada dentro do forno com temperatura em torno de 900 °C; a essa temperatura o oxigênio presente no ar se combina com o carbono do carvão mineral produzindo dióxido de carbono ( $C + O_2 \rightarrow CO_2$ ). O dióxido de carbono se une com o carbono do carvão, gerando monóxido de carbono ( $CO_2 + C \rightarrow 2CO$ ), entretanto, o mesmo irá se adaptar com o ferro do aço, gerando mais  $CO_2$  ( $3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$ ). A essa temperatura, o carbono no meio cementante passa por difusão para a superfície da peça. A peça deve ser temperada para que não ocorra o amolecimento da sua superfície (SILVA e MEI, 2010).

A cementação é um processo termoquímico no qual ocorre o acréscimo de carbono a aços com baixo teor de carbono, causando a elevação aproximada de 1%, a uma profundidade estipulada.

A profundidade de penetração do carbono depende da temperatura e do tempo (Figura 13), sendo rápida a princípio, decrescendo após um tempo, o que pode ser visto na Figura 12. Essas curvas permitem verificar também que as temperaturas mais elevadas favorecem a penetração de carbono. Essas profundidades, são geralmente entre 0,25 a 2,5 mm e as peças mecânicas que são fortemente solicitadas têm uma profundidade de cementação maior.

Figura 12 - Correlação profundidade da camada cementada com a temperatura e o tempo de tratamento.



Fonte: CHIAVERINI (2002).

## 2.8. ENSAIOS MECÂNICOS

### 2.8.1. Ensaio de Tração

As propriedades mecânicas dos materiais são muito importantes pois definem quantitativamente o desempenho de determinado componente quando solicitado. O ensaio mais adequado para obter essas propriedades é o de tração, por ser um ensaio relativamente simples e de realização rápida além de fornecer informações importantes e primordiais para o projeto (RODRIGUES, 1990).

Através de um ensaio de tração conseguimos obter informações sobre a rigidez, a resistência mecânica, a ductilidade, a tenacidade e a resiliência, através do estudo da curva (tensão - deformação) do ensaio (MOIA, 2001).

Esse tipo de ensaio utiliza corpos de prova preparados segundo as normas técnicas convencionais (no Brasil, a norma utilizada para materiais metálicos é a NBR-6152, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT) e consiste na aplicação gradativa de carga de tração uniaxial às extremidades do corpo. O levantamento da curva de tensão de tração pela deformação sofrida, pelo corpo constitui o resultado do teste de tração (Garcia et al., 2000).

Em relação aos parafusos, segundo a norma ASTM F606 (2011), os principais procedimentos de ensaios de tração de corpo de prova usinado são:

Quando parafusos ou estojos não podem ser testados de corpo inteiro, testes conduzidos usando corpos de prova usinados de parafusos podem ser usados. Parafusos ou estojos de diâmetro 9/16 e menor podem ser usinados concêntricos com o eixo do parafuso. O corpo de prova deve ser torneado com seção tão grande quanto possível e ter um comprimento de garra de quatro vezes o diâmetro do corpo de prova (ASTM F606, 2011).

Parafusos de seção transversal pequena que não permita ter diâmetro de 0,500” polegadas, e 2” polegadas de comprimento de medição no corpo de prova deve ter uma usinagem de seção tão grande quanto possível e concêntrica com eixo do parafuso. O comprimento medido deve ser quatro vezes o diâmetro do corpo de prova (ASTM F606, 2011).

### **2.8.2. Dureza**

O ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça, pela aplicação de pressão, com uma ponta de penetração. A medida da dureza do material é dada em função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio de dureza realizado. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, tratamentos superficiais, vidros e laminados devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência à deformação permanente das peças produzidas. É utilizado como um ensaio para o controle das especificações da entrada de matéria prima e durante as etapas de fabricação de componentes (Garcia et al., 2000).

A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, assim como da resistência mecânica. Nos sólidos moleculares, como os plásticos, as forças atuantes entre as moléculas (forças de Van der Waals) são baixas, e eles são relativamente macios. Os sólidos metálicos e iônicos, devido à natureza mais intensa das forças de ligação, são mais duros, enquanto os sólidos de ligação covalente são os materiais conhecidos de maior dureza. A dureza dos metais pode também ser aumentada por tratamentos especiais, como adição de soluto, trabalho a frio, endurecimento por precipitação ou tratamentos térmicos específicos. Há uma ligação bastante próxima entre o limite de escoamento dos metais e a sua dureza (Garcia et al., 2000).

Os diversos ensaios de dureza existentes possibilitam uma excelente cobertura de todas as gamas usuais de durezas e dimensões encontradas nos aços. Além disso, o ensaio de dureza corretamente escolhido e interpretado é uma excelente ferramenta para o controle indireto das

propriedades mecânicas, a baixíssimo custo, comparado com as demais opções existentes (Silva e Mei,2006).

Existem ensaios de dureza estáticos e dinâmicos. Dentre os ensaios estáticos, estão os ensaios de Rockwell e Brinell, que são testes empregados para aços na maioria dos casos. Mais especificamente, os ensaios de Rockwell é bastante emprego, pois é um ensaio de maior simplicidade, rapidez, ampla faixa de medidas e obtêm-se uma medida direta. Os Principais ensaios de dureza, são:

- Dureza Brinell (HB)
- Dureza Rockwell (HR)
- Dureza Vickers (HV)
- Microdureza KNOOP (HK)

Para parafusos de cabeça quadrada ou hexagonal, testes devem ser conduzidos na parte plana, topo da cabeça, terminação do parafuso, ou local arbitrário (ASTM F606, 2011).

A escala de dureza Rockwell pode ser usada para todos os diâmetros dos produtos, contudo, a dureza Brinell é limitada a produtos acima de 1 1/2 in de diâmetro (ASTM F606, 2011).

Um mínimo de três leituras deve ser realizado em cada amostra de parafuso acabado. Para testes de dureza arbitrários, a norma define que a medição deve ser conduzida no raio médio da seção transversal da rosca tomada a uma distância de aproximadamente um diâmetro da extremidade. Quatro leituras devem ser efetuadas a aproximadamente 90° uma da outra, no mesmo plano, se o produto permitir (Rodrigues, 2015).

## 2.9. FRATURA

Segundo Bresciani. et.al, (1991), a fratura de um corpo sólido consiste na separação desse corpo em duas ou mais partes sob a ação de esforços mecânicos.

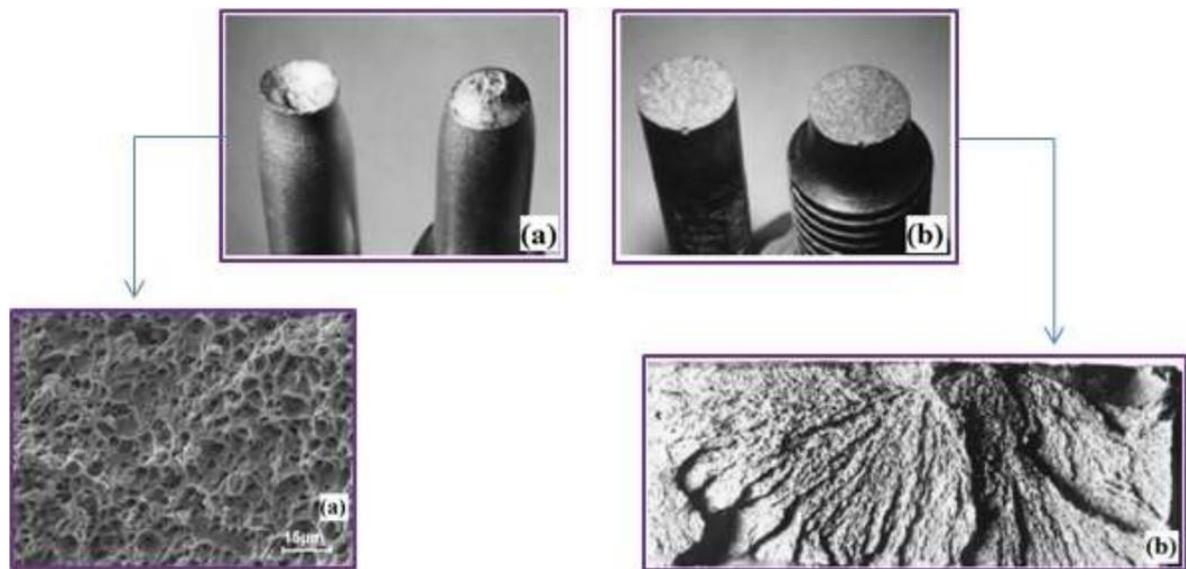
Em geral, o problema da fratura está ligado às tensões e deformações aplicadas sobre o material quando as mesmas excedem a capacidade de carga que o elemento suporta (CETLIN,1997). O processo de ocorrência da fratura pode ser considerado como uma sequência dos seguintes eventos:

- Nucleação de microtrincas;

- Propagação da microtrinca até o contorno do grão;
- Ultrapassagem do contorno de grão pela trinca, produzindo fratura generalizada.

Os metais apresentam muitos tipos de fraturas, dependendo do material, temperatura e força aplicada. Porém, há duas categorias principais que englobam a maior parte das fraturas metálicas: a frágil e a dúctil, mostradas na Figura 13.

Figura 13 - Tipos de fratura: (a) fratura dúctil; (b) fratura frágil.



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2002 e JORGE, 2013.

### 2.9.1. Fratura dúctil

De acordo com Callister (2007), neste tipo de fratura a seção resistente se reduz, por deformação plástica, a um ponto ou linha na forma de um gume de faca. Não se trata, portanto, de um caso de fratura propriamente dita, mas de deformação plástica contínua até a fratura do material.

O principal motivo para a ocorrência deste tipo de fratura é a aplicação de uma sobrecarga, provocando uma falha devido à coalescência de microcavidades (ASM Handbook Fractography, 1987). Falhas em serviço de componentes metálicos raramente ocorrem por este processo. Entretanto, as grandes deformações a que são submetidos metais e ligas durante os processos de conformação, tais como laminação, extrusão, trefilação, estampagem e outros, podem provocar este tipo de fratura (CETLIN, 1997 apud TERTULIANO, 2013).

O formato das cavidades é dependente do tipo de carregamento aplicado. No ensaio de

tração, por exemplo, que consiste na aplicação de cargas uniaxiais, as microcavidades geradas são essencialmente equiaxiais, delimitadas por bordas. Dependendo da ductilidade do material, as microcavidades equiaxiais podem ser cônicas, com maior profundidade, ou rasas (ASM Handbook Fractography, 1987).

Em cristais que falham com uma formação topográfica de taça e cone, a trinca se propaga através dos grãos cristalinos, fratura denominada por transgranular (SOUZA, 2000).

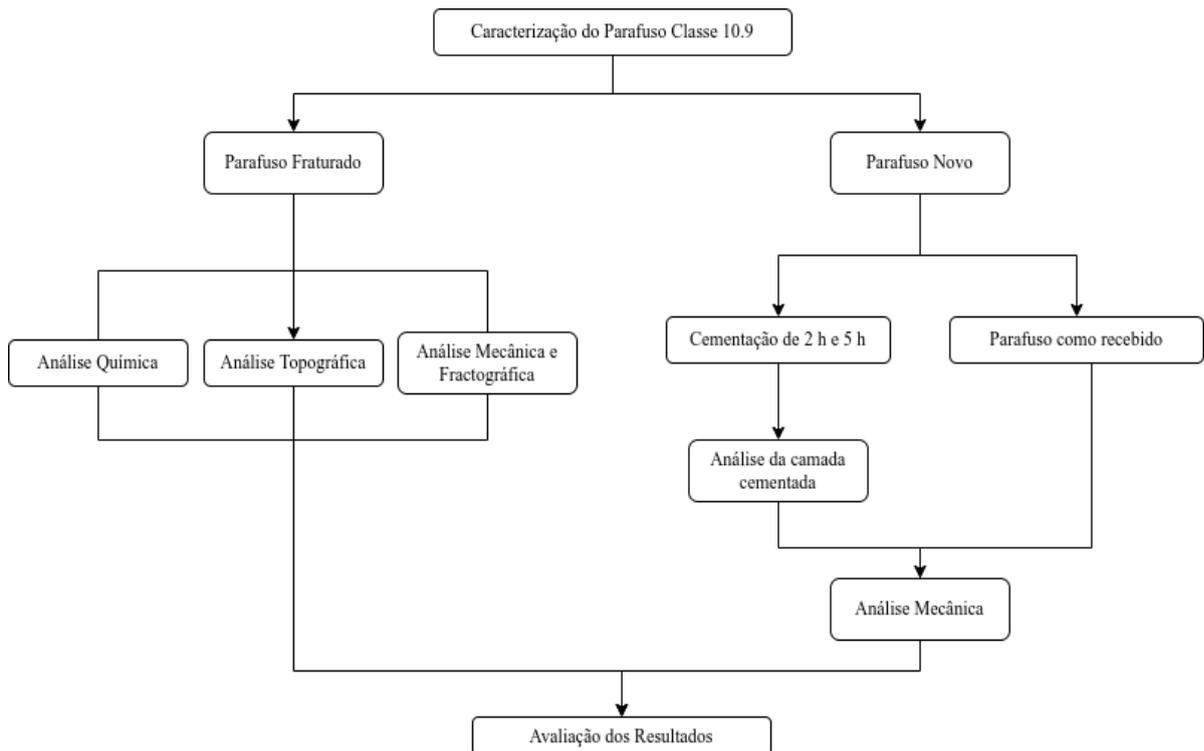
### **2.9.2. Fratura frágil**

Na fratura frágil, a trinca se propaga estavelmente, isto é, sob cargas constante ou decrescente, a uma velocidade que se aproxima da velocidade da propagação do som no material, por toda a seção resistente (CETLIN, 1997). A fratura se dá sem deformação plástica macroscópica, o que confere uma fratura com aspecto macroscópico plano.

### 3. METODOLOGIA

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados diversos materiais e métodos de ensaio, os quais são descritos nesta seção. O fluxograma da Figura 14, melhor representa as etapas desenvolvidas.

Figura 14 - Fluxograma esquemático do desenvolvimento desta Dissertação.

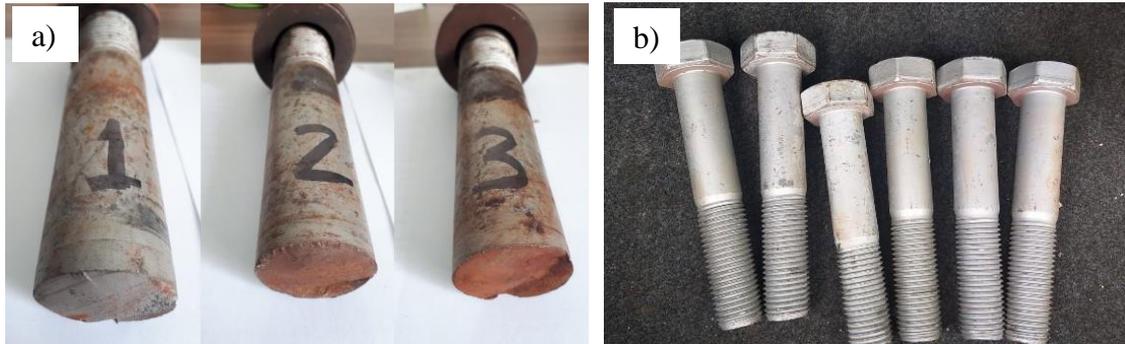


Fonte: Autor, 2022.

#### 3.1. AQUISIÇÃO DOS PARAFUSOS

Os parafusos utilizados neste trabalho foram adquiridos por meio de duas formas, para os parafusos fraturados, Figura 15(a), a aquisição ocorreu por meio da retirada do mesmo da situação de serviço que estava, ou seja, foram retirados diretamente da suspensão dianteira caminhões que estavam inoperantes. Os parafusos novos vistos na Figura 15(b) que foram utilizados nos ensaios desta pesquisa tem como origem o almoxarifado da empresa Vale.

Figura 15 – (a) Parafusos fraturados e; (b) parafusos novos.



Fonte: Autor, 2022.

### 3.2. ANÁLISE QUÍMICA

A composição química do parafuso foi determinada utilizando espectrometria óptica com auxílio do espectrômetro de emissão óptica (Figura 16) da marca Bruker, Modelo Q4 Tasman. Em que os resultados são obtidos a partir da média de no mínimo três leituras da composição química da amostra.

Figura 16 - Espectrômetro de Emissão Óptica.



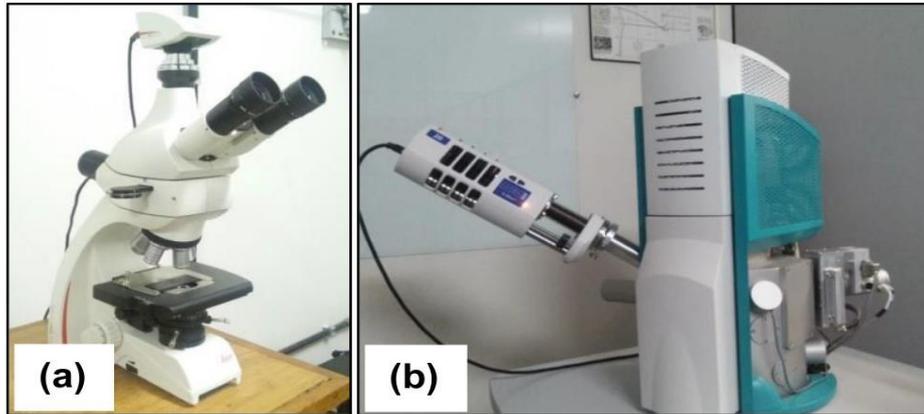
Fonte: Autor, 2022.

### 3.3. ANÁLISE DAS FRATURAS

As imagens das topografias e da cementada foram obtidas por microscopia ótica, utilizando o microscópio da marca LEICA modelo DM750-MC120HD, como mostrado na Figura 17(a), e as imagens fractográficas foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microscópio da marca TESCAN modelo VEGA 3 SBU com um sistema de micro

análise EDS da marca OXFORD modelo AZTec Energy X-Act, resolução 129eV acoplado, como mostrado na Figura 17(b).

Figura 17 - (a) Microscópio ótico e (b) Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

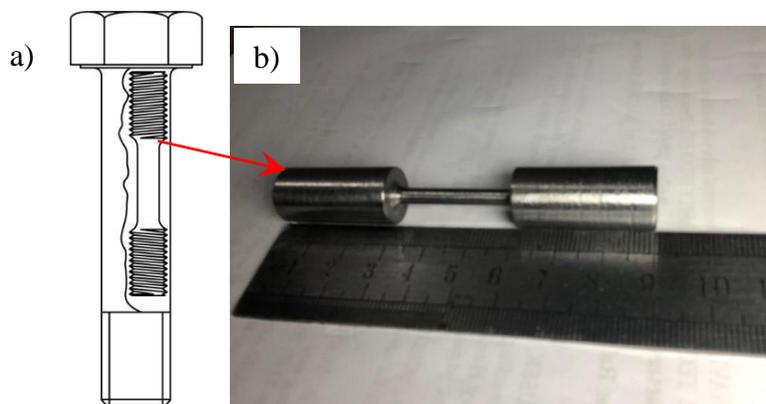


Fonte: Autor, 2022.

### 3.4. USINAGEM DOS PARAFUSOS

Quando parafusos não podem ser testados de corpo inteiro, testes conduzidos usando corpos de prova usinados de parafusos podem ser usados. Segundo a norma ASTM F606M parafusos e pinos de 13/8 pol. ou M33 e maiores podem ter suas hastes usinadas para testar o corpo de prova com o eixo do corpo de prova localizado no meio caminho entre o centro e a superfície externa do parafuso como mostrado na Figura 18(a), e um corpos de prova usinado na Fig. 18(b).

Figura 18 - Posição de extração de corpo de prova de tração segundo a norma; b) Parafusos usinados.



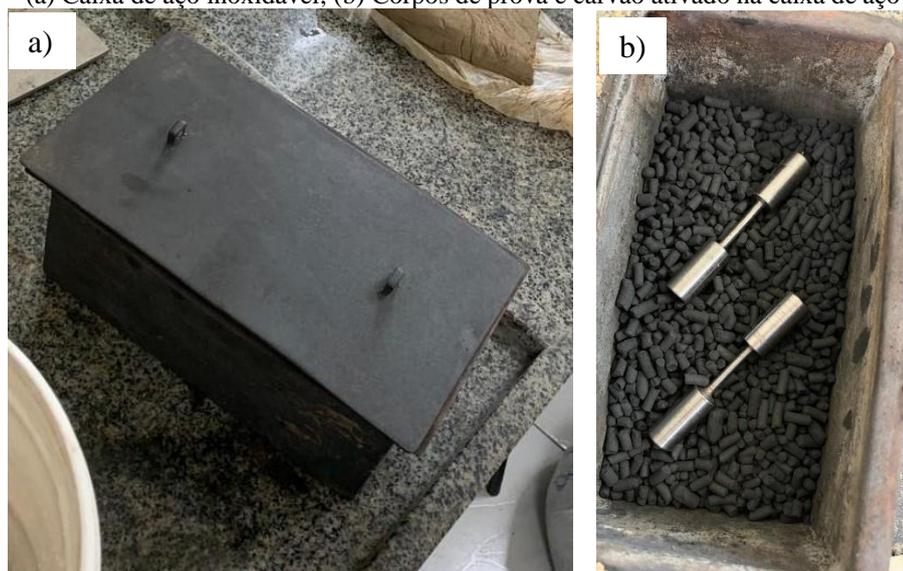
Fonte: Autor, 2022.

### 3.5. CEMENTAÇÃO

A cementação ocorreu nos parafusos novos, no qual consistiu em aquecer a liga em um forno Mufla Microprocessado - Q318M da QUIMIS à temperatura de 950 °C, que está inserida em um ambiente rico em carbono, o que permite anexar carbono na superfície do metal por difusão, criando um gradiente de concentração de carbono entre a superfície e o interior o metal.

Para realização da cementação, primeiro separou-se 400g de carvão ativado em grãos, um material rico em carbono. Depois colocou-se o carvão dentro de um recipiente de aço inoxidável, Figura 19(a), e então 2 corpos de prova, Figura 19(b), usinados a partir do mesmo material foram inseridos dentro do carvão. Neste processo os corpos de prova foram cobertos por uma camada de, pelo menos, 5 cm do carvão ativado. Com os corpos de prova imersos no carvão, o recipiente de aço inoxidável foi vedado.

Figura 19 – (a) Caixa de aço inoxidável; (b) Corpos de prova e carvão ativado na caixa de aço inoxidável.



Fonte: Autor, 2022.

Um forno foi pré-aquecido a uma temperatura de 950°C e o recipiente de aço inoxidável vedado foi colocado dentro do mesmo por um período de 2 horas. Durante este processo o carbono liberado a partir da queima do carvão ativado se introduz na superfície do aço pelo mecanismo de difusão atômica.

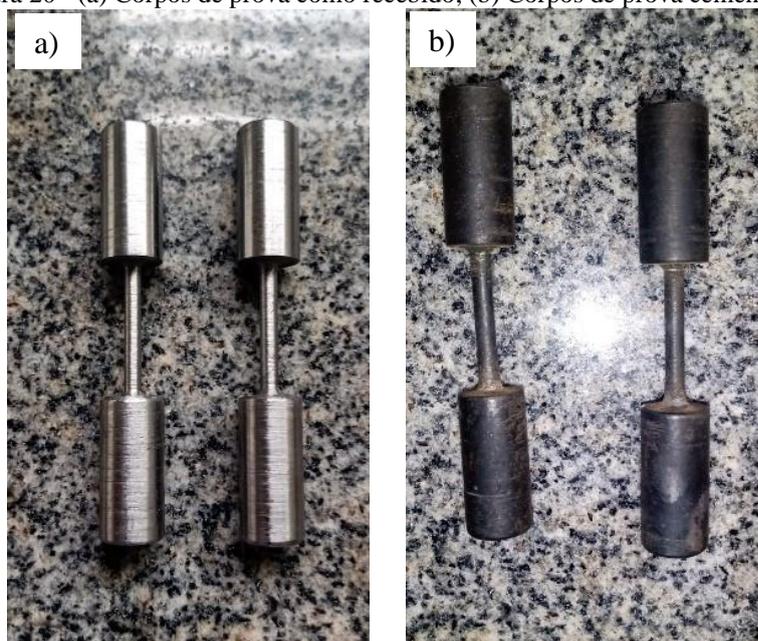
Após o período de 2 horas, os corpos de prova são retirados rapidamente do forno e transferidos para um recipiente com água a temperatura ambiente, onde serão bruscamente resfriados. Este processo é chamado de têmpera e é realizado com o intuito de obter o maior teor de carbono na superfície exterior, tornando a camada externa dura através da transformação

da austenita em martensita, enquanto que o núcleo permanece macio e resistente como uma microestrutura ferrítica e/ou perlita.

O tempo limite para que a camada martensítica permanecesse existente antes que o corpo resfriasse trocando calor com o ambiente foi estipulado em 5 segundos para o material em questão. Então dentro deste período, os corpos foram retirados do recipiente de aço inoxidável e imersos em água, para que a cementação ocorresse como desejado

O mesmo processo foi igualmente repetido com outros 2 corpos de prova do mesmo material que os corpos cementados à 950°C por 2 horas. Desta vez os corpos foram submetidos a temperatura de 950°C por um período de 5 horas. Os corpos foram ainda submetidos a um processo de revenimento, onde os mesmos são colocados no forno a temperatura de 250°C por 1 hora e depois resfriados à temperatura ambiente, a fim de diminuir as concentrações de tensão oriundas da cementação. Na Figura 20 mostra corpos de prova como recebido e depois do tratamento.

Figura 20 - (a) Corpos de prova como recebido; (b) Corpos de prova cementados.



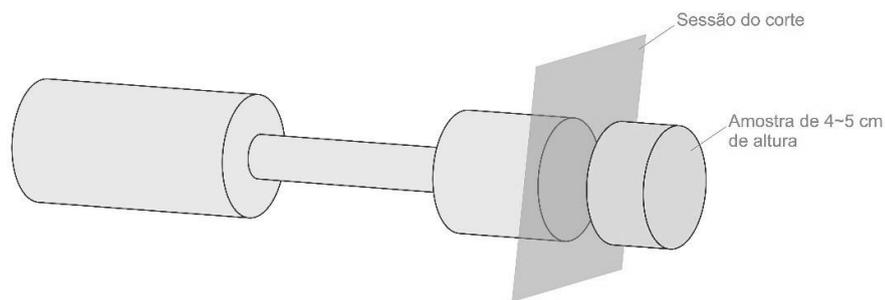
Fonte: Autor, 2022.

### 3.6. METALOGRAFIA

A análise metalográfica ocorreu da seguinte forma, os corpos de prova sem tratamento e com tratamento de cementação de 2 e 5 horas foram cortados a frio na máquina policorte, de cada corpo de prova (Figura 21) foi removida uma amostra da parte cilíndrica de 3 cm de altura da seção de maior diâmetro. Após o corte, as amostras foram seladas em moldes de baquelite,

utilizando a prensa de embutimento após as amostras serem embutidas, cada amostra passou pelo processo de lixamento em “lixas ferro” abrasivas de SiC com granulometria de 100 a 1200, e água como fluido refrigerante. Após estarem devidamente lixadas, as amostras foram polidas, submetendo-as a um ataque químico com Nital para estarem apropriadas para realização da análise seguintes.

Figura 21 - Ilustração da retirada da amostra através de corte a quente.



Fonte: Autor, 2022.

### 3.7. DUREZA

A norma ASTM F606 foi utilizada para guiar a realização do ensaio de dureza. Foi utilizado o durômetro Rockwell RBS-M da marca Pantec, conforme Figura 22. O método de ensaio adotado foi o método Rockwell C, visto que segundo a norma F606 a escala de dureza Rockwell pode ser usada para todos os diâmetros dos produtos, com um penetrador cônico de diamante com 120° de conicidade e carga de 250 kgf. Foram realizadas 6 medições de dureza para cada amostra.

Figura 22 - Durômetro Rockwell RBS-M.



Fonte: microprecis-euros.

### 3.8. TRAÇÃO

O ensaio de tração nos corpos de prova por meio de uma máquina universal de ensaio EMIC/2002, mostrada na Figura 23, acoplada a um microcomputador com sistema de aquisição de dados que facilita a coleta das informações. Os testes de tração aplicados aos corpos de prova foram confeccionados nas dimensões especificadas pelo padrão normativo presente na os ASTM F 606M e a metodologia foi feita segundo a norma ASTM E8M. O Alongamento é retirado pela própria máquina.

Figura 23 - Máquina universal de ensaio – EMIC.



Fonte: solucoesindustriais.com.br.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados obtidos pela análise química do parafuso estão na Tabela 1, a porcentagem de carbono mostra que a liga do componente se encontra na faixa dos aços hipoeutetoides (ferrita + perlita), também nota-se a presença em maior porcentagem de Mn e Cr, o que para fins de aplicação mecânica do parafuso é conveniente, visto que segundo Chiaverini (2002) o manganês influencia a ferrita a endurecer acentuadamente a liga, porém reduz um tanto a plasticidade, o cromo afeta a ferrita de forma a endurecer ligeiramente e aumenta a resistência à corrosão.

Tabela 1 - Composição química do parafuso.

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)</b>										
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>Cr</b>	<b>Mg</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>B</b>
0,336	0,120	0,978	0,010	0,451	0,140	0,090	0,170	0,050	0,0052	0,003

Fonte: Autor, 2022.

### 4.2. ANÁLISE DA TOPOGRAFIA DAS FALHAS

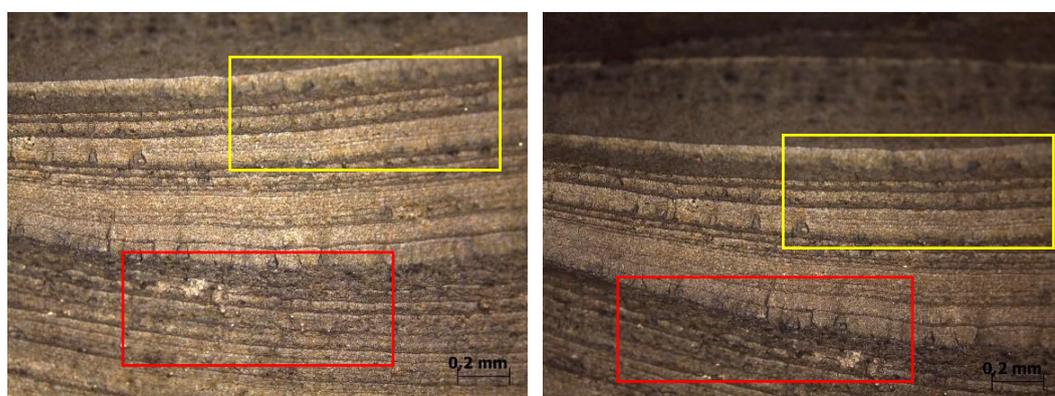
A fratura do parafuso indica fortes pontos de ocorrência de falha por fadiga, visto que os parafusos estão rotineiramente sujeitos a cargas variadas durante o transporte de minério, essas variações de cargas são promovidas pelo terreno com relevo de difícil locomoção e a variação da quantidade de minério, que exige bastante do sistema de suspensão do equipamento.

#### 4.2.1. Macroestrutura da peça fraturada

A macroestrutura da fratura possui as zonas clássicas apontadas na literatura, tem-se o início da trinca e posteriormente é possível notar a presença de marcas de praia, conforme mostra a Figura 24, as beach marks (“marcas de praia”) indicam o crescimento da trinca, quando ocorrem alterações na amplitude e frequência de carregamento, e a variação na coloração significa que a evolução da fratura na propagação estável, ocorre em etapas (SCHIJVE, 2009), essa etapa é característica do estágio II de propagação de trincas que é influenciado pela tensão normal.

A maior característica da presença das marcas de praia são as formações de estrias. É possível notar que a distância entre as estrias possui variações, consistindo em uma região com estrias com espaçamento curto (evidenciada no retângulo vermelho) e por seguinte, as estrias mais afastadas (evidenciada no retângulo amarelo), esse fato pode ter relação com a velocidade de propagação da trinca, como relata Wulpi (1993) em que a distância de duas estrias está relacionada com a velocidade de propagação da trinca, e esta distância varia com a história de carregamento.

Figura 24 - Região contendo presença de Marcas de Praia.

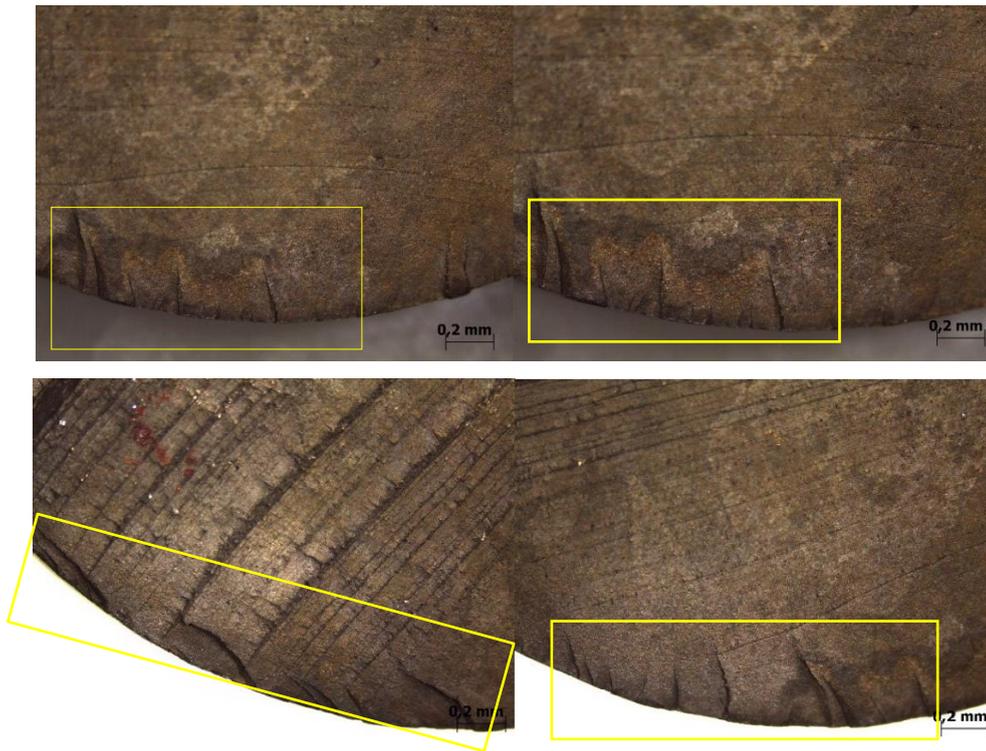


Fonte: Autor, 2019.

Na Figura 25, tem-se a presença de ratched marks (“marcas de catraca”), que estão evidenciadas no retângulo amarelo, que segundo Castro (2017), são um indicativo de alta concentração de tensões no local. As marcas de catraca também são um indicativo da influência de um momento fletor e evidencia que a fratura ocorreu em múltiplas origens (LIU, 2005).

O que é condizente com a situação de trabalho do parafuso, que ao fixar a suspensão no chassi fica sujeito tensões normal devido à momento fletor, gerados pelas oscilações da suspensão, e este momento gera a máxima tensão cisalhante. A trinca tende a se propagar no plano de máxima tensão cisalhante geralmente a 45° em relação ao eixo de carregamento, que é evidenciado no estágio I (NORTON, 2004) (GODEFROID et al., 2018).

Figura 25 - Região contendo presença de Marcas de Catraca.



Fonte: Autor, 2019.

Na Figura 26 observa-se uma região mais rugosa e áspera, indicativo da ruptura catastrófica da região, devido não haver seção transversal suficiente para resistir ao esforço. Como diz Sá (2017) à região áspera, semelhante a uma fratura frágil, corresponde à porção do material que rompeu catastróficamente quando a trinca atingiu seu tamanho limite.

Figura 26 -Região mais rugosa.



Fonte: Autor, 2019.

### 4.3. ANÁLISE MECÂNICA E FRACTOGRÁFICA

Os parafusos fraturados foram submetidos ao ensaio de dureza, tração e as imagens das fraturas ocasionadas pelo ensaio de tração foram retidas via MEV. Os dados utilizados para fazer as comparações foram da norma ASTM A490M, visto que a mesma possui uma margem menor, em certos parâmetros se comparados aos dados do manual da Caterpillar, que foi julgado mais coerente numa situação de fratura.

#### 4.3.1. Dureza

Os dados de dureza estão expostos na Tabela 2, no qual se tem a dureza de três corpos de prova. Os resultados mostram que as amostras de parafusos tem dureza uniforme sem muitas variações em torno da média, fato comprovado pela faixa curta do desvio padrão que possui o 0,52 HRC para mais ou para menos. Isso pode ser um indicativo de que as mudanças superficiais nas peças se deram de forma conjunta, assim todos os parafusos se desgastaram de maneira semelhante e suas falhas tendem a ocorrer pelo mesmo processo de fadiga.

A norma ASTM A490M mostra que a faixa utilizada de 33 a 39 HRC, todos os valores de dureza das amostras estão dentro dessa faixa assim como a média e a faixa delimitada pelo desvio. Isso aponta que os parafusos estavam ainda em condições de trabalho pela norma, dessa forma a falha deve ter se dado de forma pontual dentro da superfície do parafuso.

Como diz Zerbst et al (2018) no qual uma trinca se desenvolve devido à deformações plásticas localizadas, que se tornam pontos concentradores de tensão. Evidenciando o que foi dito por Castro (2017) em relação as “marcas de catraca” e a possível concentração de tensão no parafuso.

Tabela 2 - Dureza dos parafusos fraturados em serviço.

<b>PARAFUSOS FRATURADOS EM SERVIÇO</b>	<b>DUREZA (HRC)</b>
CP1	34,44
CP2	33,75
CP3	34,78
<b>MÉDIA</b>	<b>34,32</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>0,52</b>

Fonte: Autor, 2022.

### 4.3.2. Tensão Máxima

As amostras foram submetidas ao ensaio de tração, a Tabela 3 mostra os resultados de tração máxima que cada corpo de prova apresentou. As tensões máximas se encontram dentro de uma faixa próxima visto que o desvio é 27,57 MPa o que comparado a média é um valor pequeno. Assim como as durezas as tensões mostraram-se uniformes, de forma análoga pode-se argumentar que todos os parafusos da amostragem se desgastaram de maneira semelhante e suas resistências a tração mantiveram-se próximas ao decorrer na vida de serviço do componente.

A norma ASTM A490M informa uma faixa de tensão que os parafusos da classe 10.9 devem está contidos, os valores mostrados são de tensão mínima de 1040 MPa e tensão máxima de 1210 MPa, pode-se notar que todos os valores de tensão estão mais próximos do valor máximo. Dessa forma os parafusos mantiveram em seu tempo de serviço os parâmetros de tensão máxima ditos em norma.

Tabela 3 - Tensão máxima dos parafusos fraturados em serviço.

<b>PARAFUSOS FRATURADOS EM SERVIÇO</b>	<b>TENSÃO MÁXIMA (MPa)</b>
CP1	1157,00
CP2	1126,00
CP3	1181,00
<b>MÉDIA</b>	<b>1154,67</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>27,57</b>

Fonte: Autor, 2022.

### 4.3.3. Alongamento

O alongamento dos parafusos foi retirado do ensaio de tração, a Tabela 4 organiza os dados de alongamento dos três corpos de prova, nota-se que os valores estão próximos visto que o desvio padrão apresenta valor de 0,56% para mais ou para menos. Dessa forma, essa propriedade assim como as anteriores apresenta valores uniformes em relação a sua média.

Outro fator a ser exposto é que o valor mínimo de alongamento de 14% dito pela norma ASTM A490M, é notório que todos os corpos de prova apresentaram valores maiores que o parâmetro dito em norma.

Tabela 4 - Alongamento dos parafusos fraturados em serviço.

<b>PARAFUSOS FRATURADOS EM SERVIÇO</b>	<b>TENSÃO MÁXIMA (MPa)</b>
CP1	19,08
CP2	18,51
CP3	17,96
<b>MÉDIA</b>	<b>18,52</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>0,56</b>

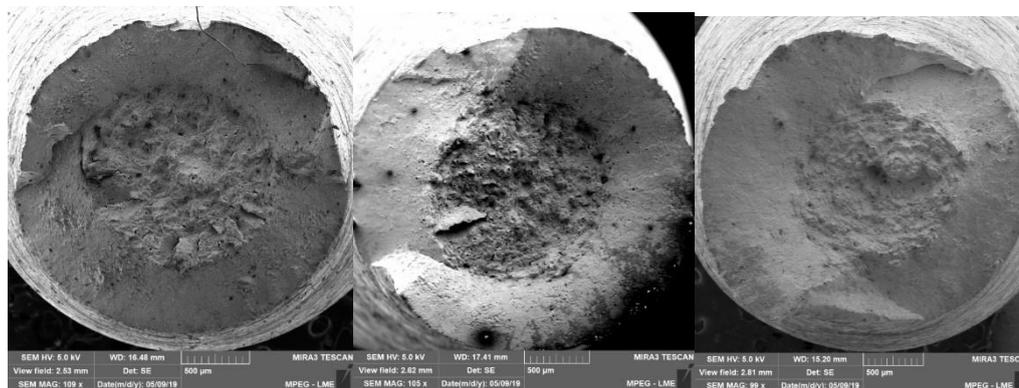
Fonte: Autor, 2022.

### 4.3.4. Fratura

A superfície da fratura gerada nos ensaios de tração, obtida por Microscopia eletrônica de varredura – MEV, apresentou característica de fratura do tipo “taça e cone” (Figura 27), típica de materiais dúcteis, com a fratura iniciada próxima ao centro da seção da amostra e espalhando-se para fora, conforme descrito no ASM Metal Handbook (1992). Em cristais que falham com uma formação topográfica de taça e cone, a trinca se propaga através dos grãos cristalinos, fratura denominada por transgranular (SOUZA, 2000).

Tais estruturas formam-se quando uma tensão elevada causa uma fratura localizada nos contornos de grão ou nas interfaces entre o metal e pequenas inclusões. Quanto mais a tensão local aumenta, mais as microcavidades crescem e coalescem formando cavidades maiores (ASKELAND, PHULÉ, 2008 (b)).

Figura 27 - Microfractografia da seção transversal com a presença da fratura do tipo “Taça e Cone” a) CP1; b) CP2; c) CP3.

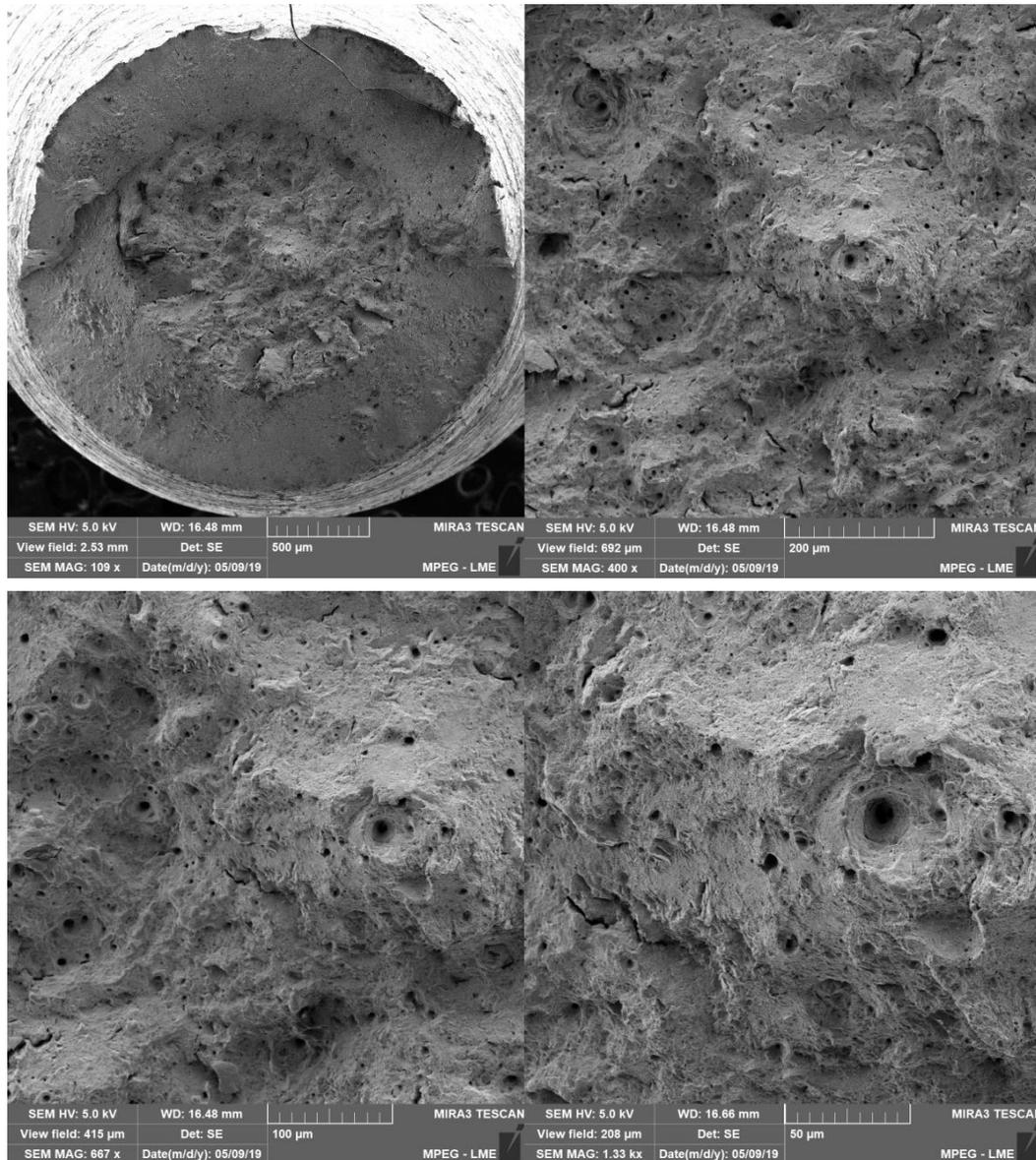


Fonte: Autor, 2022.

No ensaio de tração, as microcavidades geradas são essencialmente equiaxiais, delimitadas por bordas. Dependendo da ductilidade do material, as microcavidades equiaxiais podem ser cônicas, com maior profundidade, ou rasas (ASM HANDBOOK FRACTOGRAPHY, 1987).

A Figura 28 apresenta as imagens da fratura do corpo de prova 1, com aumento de 109x, 400x, 667x e 1330x. É possível notar que na região central dos corpos de prova são visíveis diversas microcavidades (*dimples*) e extensa deformação plástica, evidenciando o tipo de fratura como sendo dúctil.

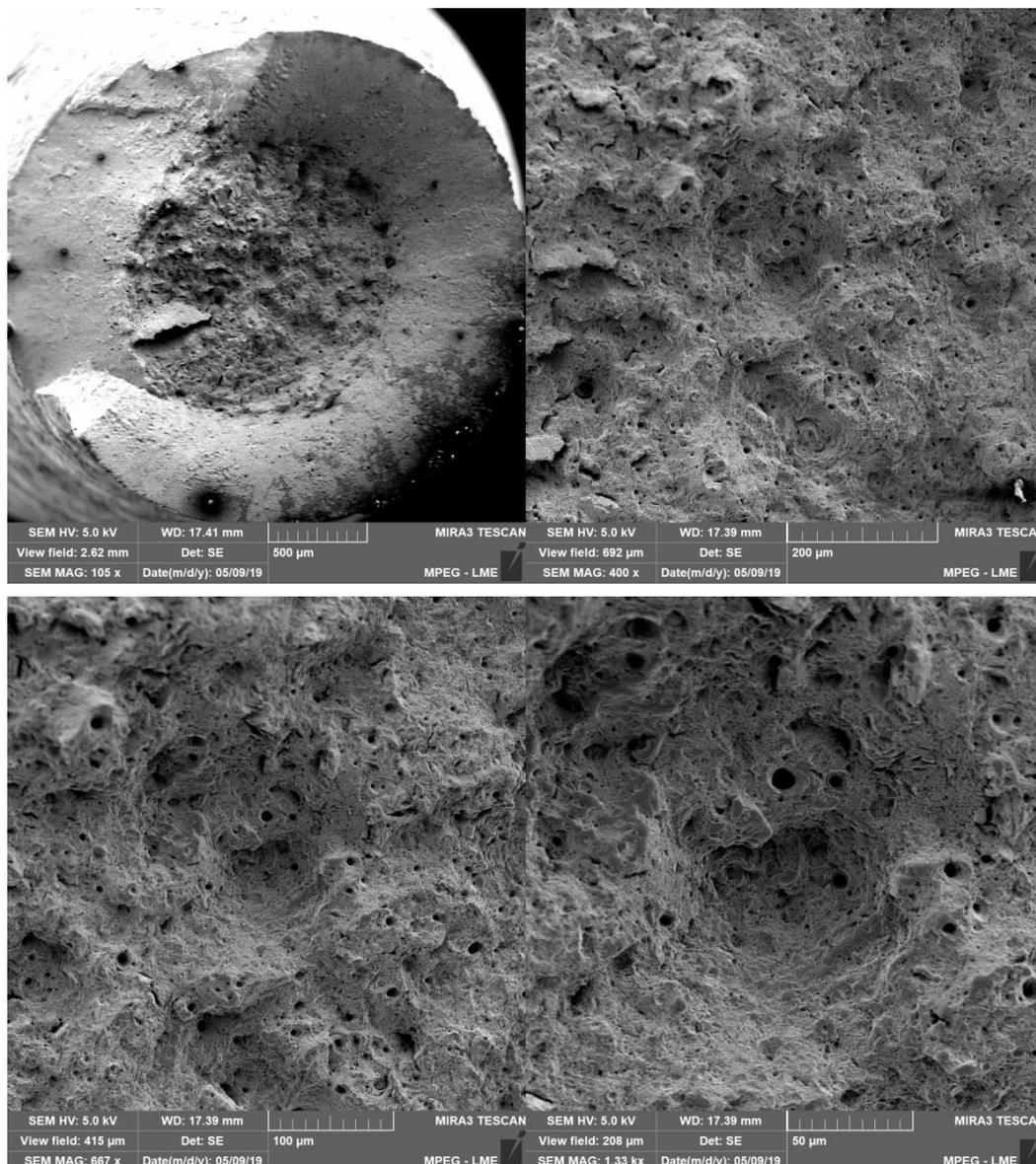
Figura 28 - Microcavidades de CP1.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 29 apresenta as imagens da fratura do corpo de prova 2, com aumento de 109x, 400x, 667x e 1330x. Nota-se que a fratura é do tipo dúctil, além disso as zonas de microcavidades estão visualmente menores que do as do corpo de prova 1 (Figura JJ), esse fato se dá pelo fato já exposto por Askeland, Phulé (2008 (b)) pois quanto mais a tensão local aumenta, mais as microcavidades crescem e coalescem formando cavidades maiores, e como a CP2 teve a menor tensão máxima é coerente as dimples serem menores.

Figura 29 - Microcavidades de CP2.

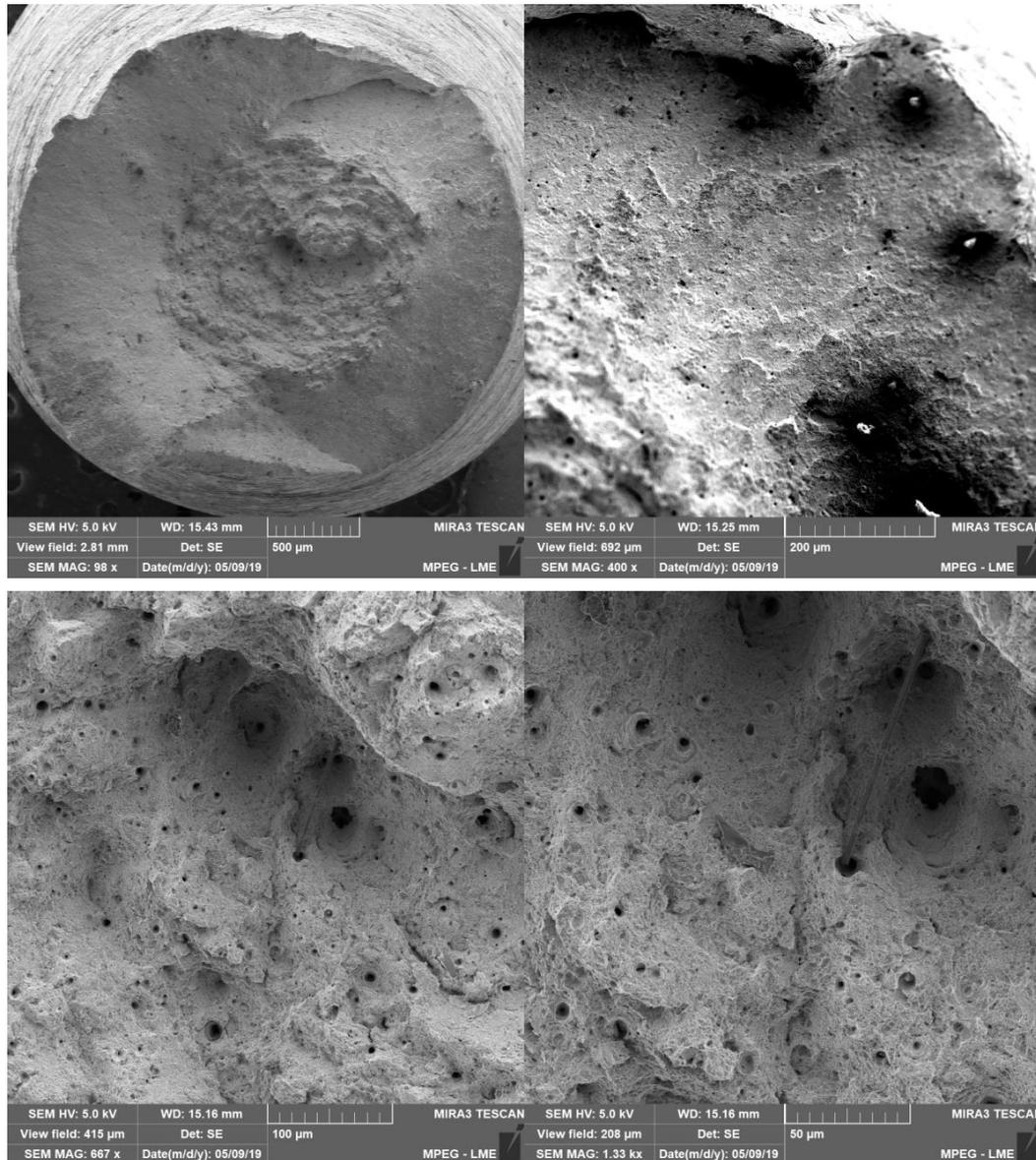


Fonte: Autor, 2022.

A Figura 30 apresenta as imagens da fratura do corpo de prova 3, com aumento de 109x, 400x, 667x e 1330x. A microcavidades de CP3 mostram-se maiores se comparadas a CP1 e CP2, isso se dá pelo fato já exposto por Askeland, Phulé (2008 (b)) e como a CP3 possui a maior tensão máxima é provável que isso tenha influenciado na fratura.

Além disso, as fraturas apresentam uma região mais rasa se comparadas as Figuras 28 e 29 o que corrobora com que foi dito por ASM Handbook Fractography (1987), já que o valor de alongamento de CP3 foi o menor isso concorda com o fato de sua ductilidade inferior gerar dimples rasos.

Figura 29 - Microcavidades de CP2.



Fonte: Autor, 2022.

#### 4.4. COMPARAÇÃO DOS PARAFUSOS NOVOS COM OS PARÂMETROS CATERPILLAR

Os parafusos novos da classe 10.9 foram avaliados em relação os parâmetros estipulados pela empresa Caterpillar, a Tabela 5 mostra os dados que serão utilizados na comparação, os valores foram retirados da tabela que consta no manual da empresa do ano de 2019. As propriedades relacionadas nesta sessão foram a dureza, a tensão máxima e o alongamento dos parafusos como recebidos, visando estabelecer que os parâmetros estejam condizentes com os valores necessários em serviço que a empresa informa.

Tabela 5 - Parâmetros da empresa para parafusos classe 10.9.

<b>CLASSE DO PARAFUSO</b>	<b>LIMITE MÍNIMO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPA)</b>	<b>ALONGAMENTO MÍNIMO (%)</b>	<b>DUREZA (HRC)</b>
10.9	1040	9	32-39

Fonte: Manual Caterpillar (adaptado), 2022.

#### 4.4.1. Dureza

Os dados de dureza estão expostos na Tabela 6, no qual tem-se a dureza de três corpos de prova novos. A variação relativa da dureza foi em relação a média da faixa estipulada pela empresa, logo o valor é de 35,5. Os valores se mostram todos acima do valor mínimo de dureza, as durezas mostraram-se uniformes, o desvio padrão que possui o 0,52 HRC o que resulta numa faixa curta em relação a média.

A variação relativa em relação ao parâmetro médio da empresa aponta que as durezas estão bem próximas a média da faixa estipulada. Assim todos os valores de durezas das amostras testadas estão enquadrados dentro da classe 10.9 informada pela empresa com margem centralizada entre os valores máximo e mínimo.

Tabela 6 - Dureza dos parafusos novos.

<b>PARAFUFUSOS NOVOS</b>	<b>DUREZA (HRC)</b>	<b>VARIAÇÃO RELATIVA EM RELAÇÃO AO PARÂMETRO (%)</b>
CP1_N	34,44	2,98
CP2_N	33,75	2,03
CP3_N	34,78	4,93
<b>MÉDIA</b>	34,32	-----
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,52	-----

Fonte: Autor, 2022.

#### 4.4.2. Tensão Máxima

A Tabela 7 mostra os resultados de tração máxima que cada corpo de prova apresentou. Todos os valores de tensão estão acima do valor mínimo, logo os parafusos estão certificados para atuarem em juntas estruturais no que tange a tensão máxima que o material aguenta. Nota-se que os dados estão uniformes, visto o baixo desvio de 20,50 MPa para cima ou para baixo

da média logo a amostra tem boa repetibilidade, característica desejada dado que vários parafusos atuam no mesmo serviço ao fixar o chassi.

A variação relativa em relação ao parâmetro de 1040 MPa, mostra que os valores estão numa margem de 10% (em relação ao parâmetro) acima da medida de tensão estipulado pela empresa, fato interessante visando evitar o superdimensionamento.

Tabela 7 - Tensão máxima dos parafusos novos.

<b>PARAFUFUSOS NOVOS</b>	<b>TENSÃO MÁXIMA (MPa)</b>	<b>VARIAÇÃO RELATIVA EM RELAÇÃO AO PARÂMETRO (%)</b>
CP1_N	1136,00	9,23
CP2_N	1157,00	11,25
CP3_N	1116,00	7,31
<b>MÉDIA</b>	1136,33	-----
<b>DESVIO PADRÃO</b>	20,50	-----

Fonte: Autor, 2022.

#### 4.4.3. Alongamento

A Tabela 8 mostra os resultados de alongamento que cada corpo de prova apresentou. Todos os parafusos apresentaram medidas acima dos parâmetros de 9% de alongamento. Os dados de alongamento mostram-se muito uniformes, visto que o desvio padrão é de 0,33 %. Além disso, a variação percentual em relação ao parâmetro mostrou que os valores estão quase o dobro do valor necessário.

Tabela 8 - Alongamento dos parafusos novos.

<b>PARAFUFUSOS NOVOS</b>	<b>ALONGAMENTO (%)</b>	<b>VARIAÇÃO RELATIVA EM RELAÇÃO AO PARÂMETRO (%)</b>
CP1_N	18,70	107,78
CP2_N	18,99	98,17
CP3_N	18,33	98,23
<b>MÉDIA</b>	18,67	-----
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,33	-----

Fonte: Autor, 2022.

Correlacionando os dados, é possível montar a Tabela 9 de aferição quanto aos valores mensurados que obtiveram medidas satisfatórias ou não em relação aos parâmetros da empresa.

Como é possível observar na Tabela 9, todos os parâmetros foram alcançados dentro dos parafusos testados, o que pode corroborar com a ideia de que as falhas serem causadas por algum fator de serviço.

Tabela 9 - Verificação dos dados dos parafusos novos.

PARÂMETRO	PARÂMETRO FOI ALCANÇADO?	
	SIM	NÃO
Dureza	X	
Tensão máxima	X	
Alongamento	X	

Fonte: Autor, 2022.

#### 4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS PARAFUSOS CEMENTADOS

A partir da produção dos parafusos cementados é possível caracterizar os mesmos, por meio da análise da camada cementada, a dureza, tensão máxima e alongamento do parafuso. Foram utilizados dois corpos de prova para cada tempo de cementação, no qual cada par passou pelo tratamento a 950°C por 2h e 5 h respectivamente.

##### 4.5.1. Camada cementada

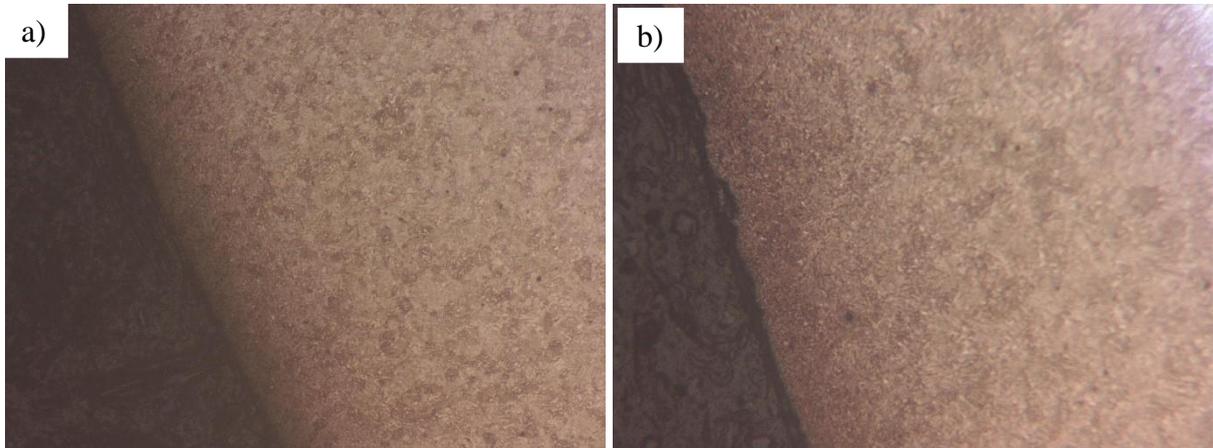
Após a realização do tratamento termoquímico, foi possível analisar a camada cementada que se originaram, as Figuras 31 e 32 mostram as imagens com ampliação de 100x e 200x para todos os tempos de tratamento, a análise metalográfica apontou sucesso na realização da cementação com objetivo de alcançar considerável aumento na dureza do aço a partir de uma espessa camada externa de carbono.

Conforme mostrado nas Figuras 31 a) e b), o material cementado de 2 horas apresenta próximo à sua superfície, a martensita, mais para o centro, nas regiões mais claras é possível identificar ferrita e perlita. Nas Figuras 32 a) e b) o material cementado de 5 horas apresentou grande quantidade de martensita em sua região superficial, mais próximo ao centro a fase martensita vai diminuindo, aparecendo as fases ferrita e perlita.

Utilizando uma régua micrométrica, mediu-se a camada cementada dos corpos de prova que estiveram por 2 horas no forno em 0,4 mm. Já os corpos de prova que estiveram por 5 horas no forno apresentaram uma camada de carbono em torno de 0,5 mm. Esse fato está de acordo

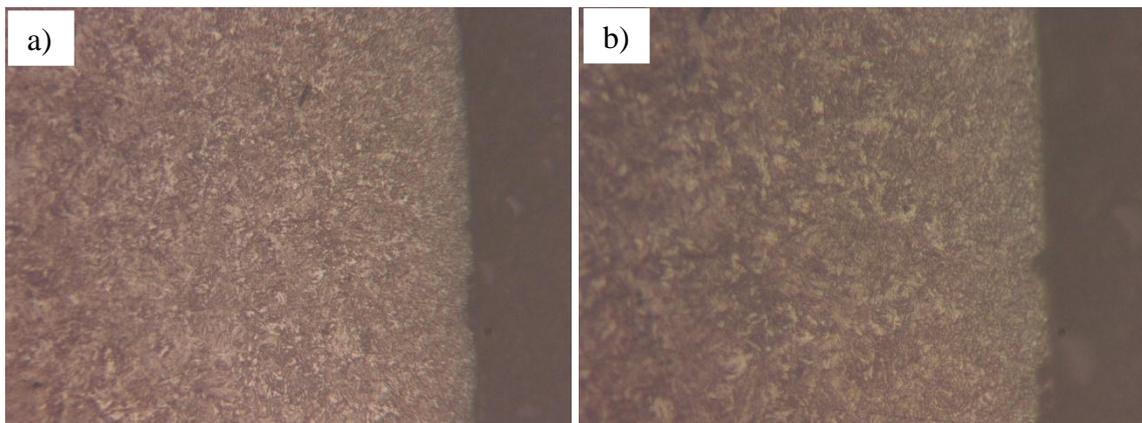
com a literatura que aponta que quanto maior o tempo do tratamento a espessura da camada cementada aumenta.

Figura 31 - (a) Material cementado – 2h (100x); (b) Material cementado – 2h (200x).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 32 - (a) Material cementado – 5h (100x); (b) Material cementado – 2h (200x).



Fonte: Autor, 2022.

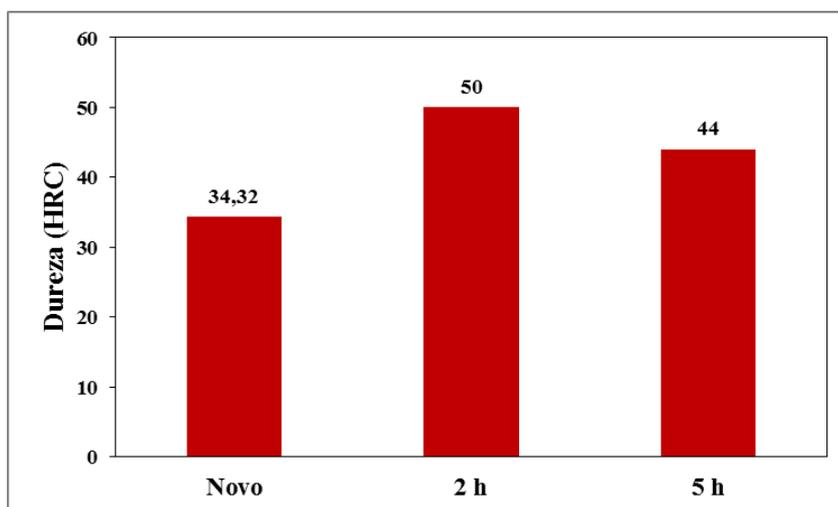
#### 4.5.2. Dureza

Os corpos cementados em forno à temperatura de 950°C por 2 horas apresentaram dureza média de 50 HCR, apresentando valores de dureza entre 47 e 52 HCR. Os corpos cementados em forno à temperatura de 950°C por 5 horas apresentaram dureza média de 44 HCR, apresentando valores de 40 HCR a 46 HCR.

Para os corpos cementados por 2 horas no forno, a camada cementada elevou a dureza do material em até 45,69% em relação a dureza média dos parafusos novos que não possuem tratamento. Já nos corpos cementados por 5 horas no forno, a camada cementada apresentou

um crescimento na dureza de 28,21%. A Figura 33, mostra a relação entre as durezas médias dos corpos de prova com tratamento termoquímico.

Figura 33 - Correlação da dureza dos parafusos com e sem tratamento termoquímico.



Fonte: Autor, 2022.

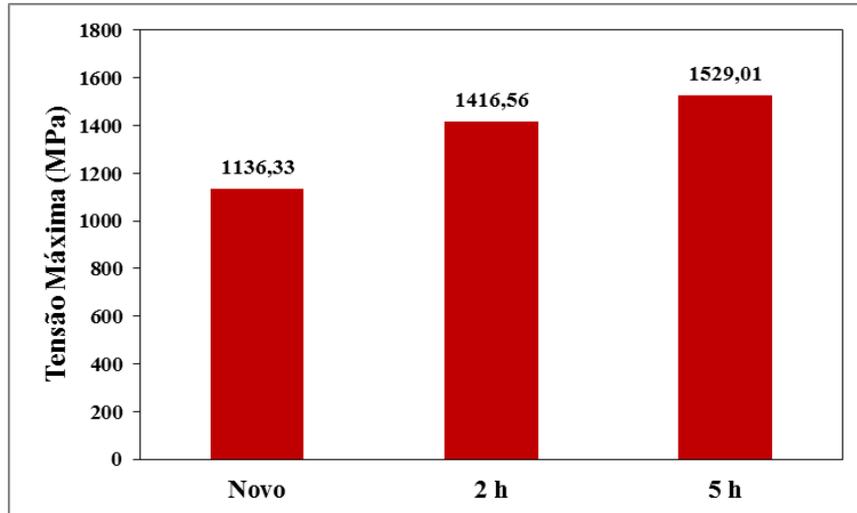
O corpo cementado por 2 horas apresentou a dureza mais elevada (50 HRC), já o corpo de prova cementado por 5 horas apresentou uma dureza menor que o corpo cementado por menos tempo. Este fato se dá devido que para tempos elevados em que a liga metálica fica exposta à altas temperaturas, o material desfaz a configuração molecular obtida através da cementação por duas horas e começa a retornar para a configuração molecular pré cementação. Portanto quando o tempo de cementação passa do intervalo de 2 a 3 horas, a dureza após o tratamento irá gradualmente regredir.

#### 4.5.3. Tensão máxima

A tensão máxima média suportada pelo corpo de prova com cementação de 2 horas, apresenta um valor de 1416,56 MPa. Já para o corpo de prova com cementação de 5 horas, apresenta uma medida de tensão máxima suportada pelo 1529,01 MPa. Pode-se ver a comparação com a tensão máxima média do corpo de prova sem cementação na Figura 34, em que é possível notar os valores de tensão máxima suportada por cada corpo melhoram para cementações realizadas com maior quantidade de tempo do material inserido no forno de 950 °C e realizado o processo de revenimento após o resfriamento abrupto do corpo em água, por visualmente percebe-se haver maior quantidade de martensita na amostra de 5 h isso pode ter

influenciado nos valores maiores de tensão.

Figura 34 - Correlação da tensão máxima dos parafusos com e sem tratamento termoquímico.



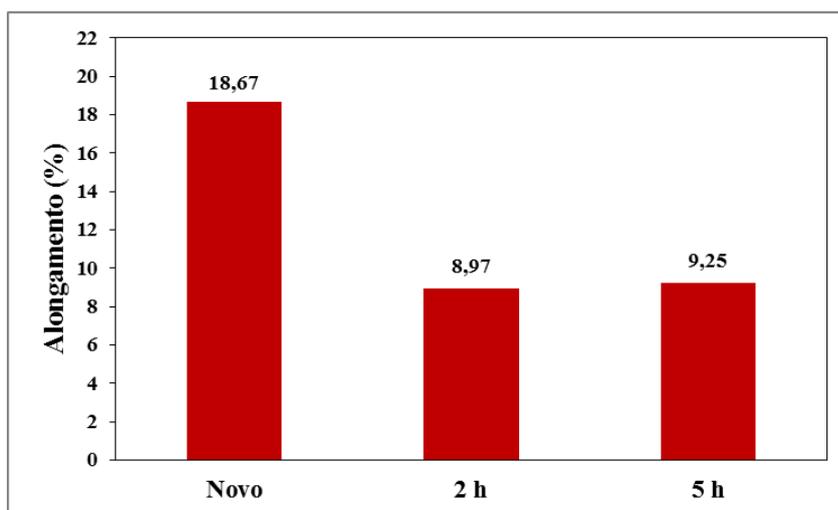
Fonte: Autor, 2022.

#### 4.5.4. Alongamento

O alongamento identificado no corpo de prova sem cementação, que apresenta um percentual de 18,67% quando comparado com o comprimento inicial da sessão do corpo. Já para o corpo de prova de 2 h, o alongamento apresenta um percentual de 8,97% quando comparado com o comprimento inicial da sessão do corpo. O alongamento identificado no corpo de prova com cementação de 5 horas, que apresenta um percentual de 9,25%.

No gráfico da Figura 35, tem-se a relação entre os valores de alongamento dos parafusos com e sem tratamento. O corpo de prova cementado por 5 horas apresenta um alongamento levemente mais elevado que o corpo cementado por 2 horas. Isso aponta o fato de que a cementação diminui o regime plástico do material, entretanto cementações com menos tempo tendem a apresentar um regime plástico maior.

Figura 35 - Correlação do alongamento dos parafusos com e sem tratamento termoquímico.



Fonte: Autor, 2022.

#### 4.6. COMPARAÇÃO DOS PARAFUSOS

Por meio dos dados coletados dos parafusos fraturados, os novos e os com tratamento térmico é possível fazer comparações entre suas propriedades mecânicas e analisa-las em comparação aos parâmetros norma ASTM A490M e também aos parâmetros estabelecidos no manual Caterpillar.

A Tabela 10 mostra os dados obtidos para cada um dos tipos de parafusos utilizados nos estudos deste trabalho, para fins de comparação optou-se por usar os valores médios de cada parâmetro, visto que a quantidade de corpos de prova foi diferente, sendo 3 para os parafusos fraturados e novos e 2 para os cementados.

Tabela 10 - Dados dos parafusos analisados.

TIPOS DE PARAFUSO / PARÂMETROS	PARAFUSOS FRATURADOS	PARAFUSOS NOVOS	PARAFUSOS CEMENTADOS (2 h)	PARAFUSOS CEMENTADOS (5 h)	ASTM A 490M	MANUAL CATERPILLAR
Dureza (HRC)	34,32	34,32	50	44	33-39	32-39
Tração Máxima (MPa)	1154,67	1136,33	1416,56	1529,01	1040 -1210	1040
Alongamento (%)	18,52	18,67	8,97	9,25	14	9

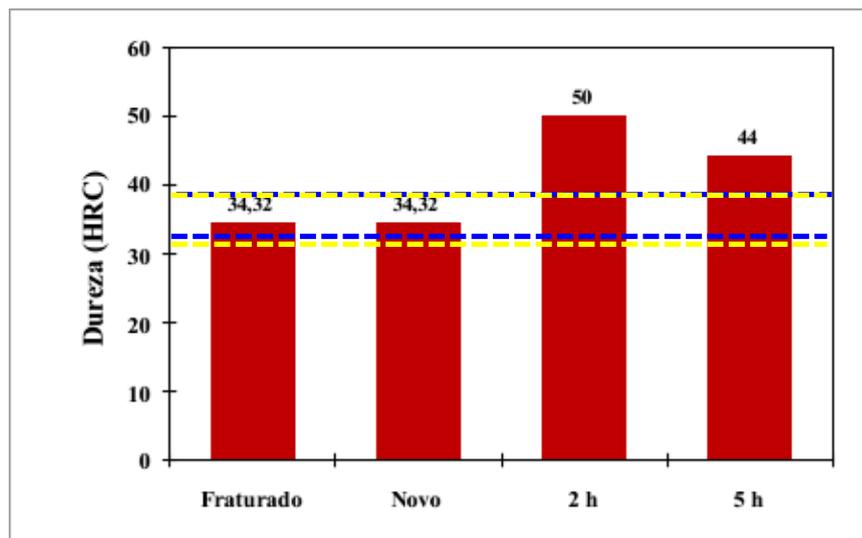
Fonte: Autor, 2022.

#### 4.6.1. Comparação das durezas

A dureza dos parafusos consta na Tabela 10, pode-se notar aumento considerável entre os dados dos parafusos sem tratamento para com os com tratamento, e os valores entre os parafusos fraturados e novos deram iguais, ressaltando a ideia de que a falha começou por um processo local que não reflete a totalidade da superfície do parafuso.

Comparando os valores com os parâmetros da norma (linha azul) e do manual (linha amarela) tem-se a relação expressa na Figura 36. Nota-se que as durezas sem tratamento térmico estão acima da faixa estipulada pela ASTM e pela Caterpillar, as peças cementadas ultrapassaram esses valores com certa folga, o que era esperado visto que esse tratamento termoquímico resulta em melhoras na dureza.

Figura 36 - Correlação da dureza dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar.



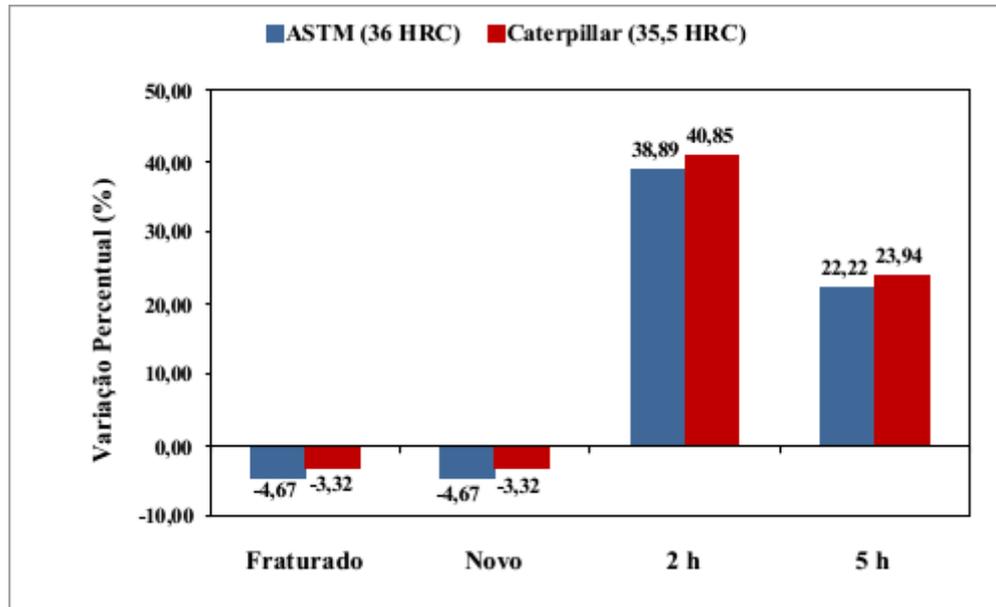
Fonte: Autor, 2022.

Utilizando os valores mínimos das faixas estipuladas pela ASTM, de 33 HRC e Caterpillar, de 32 HRC, é possível fazer a análise de variação percentual (Figura 37) da propriedade estudada. Observa-se que para os parafusos sem tratamento térmico tem uma variação percentual de 4% e 7,45% acima do mínimo estabelecido para o parâmetro ASTM e Caterpillar respectivamente.

Os parafusos tratados termicamente tiveram variação em relação aos parâmetros mínimos estabelecidos de 51,52% e 56,25%, ASTM e Caterpillar respectivamente., para o corpo de prova com 2 h de tratamento. A variação para o corpo de prova de 5 h foi de 22,22% e 23,94%. Notam-se as variações para o tempo de 2 h de tratamento mostrou-se um ganho maior

como valores com mais da metade acima do patamar mínimo estabelecido pela ASTM e Caterpillar. Os ganhos menores para o tempo de 5 h têm influência do retorno a configuração molecular pré cementação.

Figura 37 - Variação Percentual da dureza dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar.

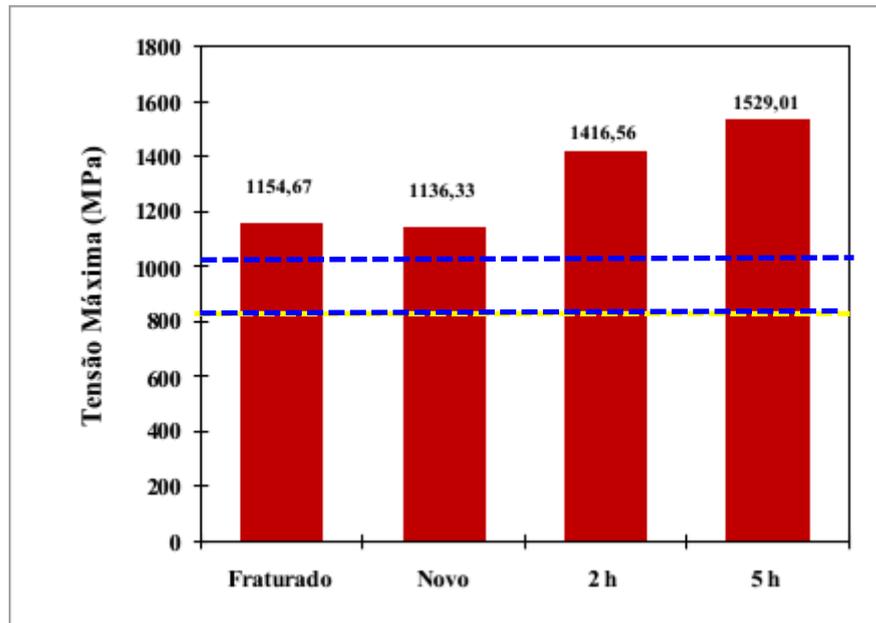


Fonte: Autor, 2022.

#### 4.6.2. Comparação das tensões máximas

Os dados da Tabela 10 mostram que os valores de tensão para os parafusos sem tratamento térmico se encontram próximos, com diferença de 18,34 MPa. Esses dados quando comparados com os valores dos parafusos com tratamento termoquímico se mostram inferiores, visto que os parafusos tratados obtiveram tensões máximas superiores até mesmo a faixa máxima estipulada pela norma ASTM, o que demonstra que a camada cementada formada auxiliou de maneira positiva na resistência a tração do parafuso, a Figura 38 mostra a correlação dos dados de tensão máxima, com os parâmetros Caterpillar em amarelo e ASTM em azul.

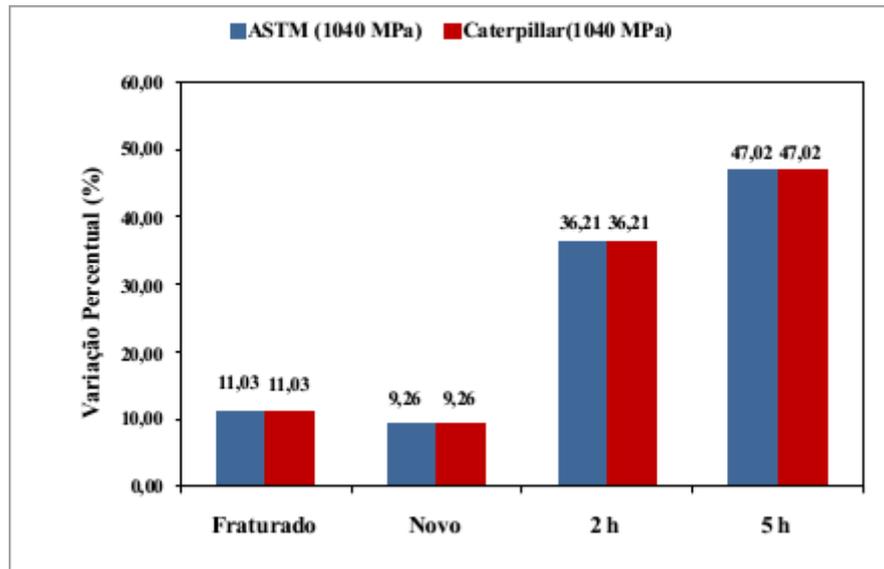
Figura 38 - Correlação da tensão máxima dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar.



Fonte: Autor, 2022.

Utilizando os valores mínimos das faixas estipuladas pode-se plotar o gráfico (Figura 39) da variação percentual dos dados de tensão. Nota-se que as variações para todos os parafusos fora iguais, isso dá, pois ambos os parâmetros são iguais, os parafusos sem tratamento térmico obtiveram variações na faixa de 10%, já os parafusos com tratamento obtiveram valores de 36,21 % para 2 h e 47,02% para 5 h, o que demonstra que o aumento do tempo de cementação influenciou de forma positiva a resistência a tração, o que é coerente com o fenômeno do retorno da configuração molecular ferrita + perlita, que é mais dúctil que a fase martensita.

Figura 39 - Variação percentual da tensão máxima dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar.

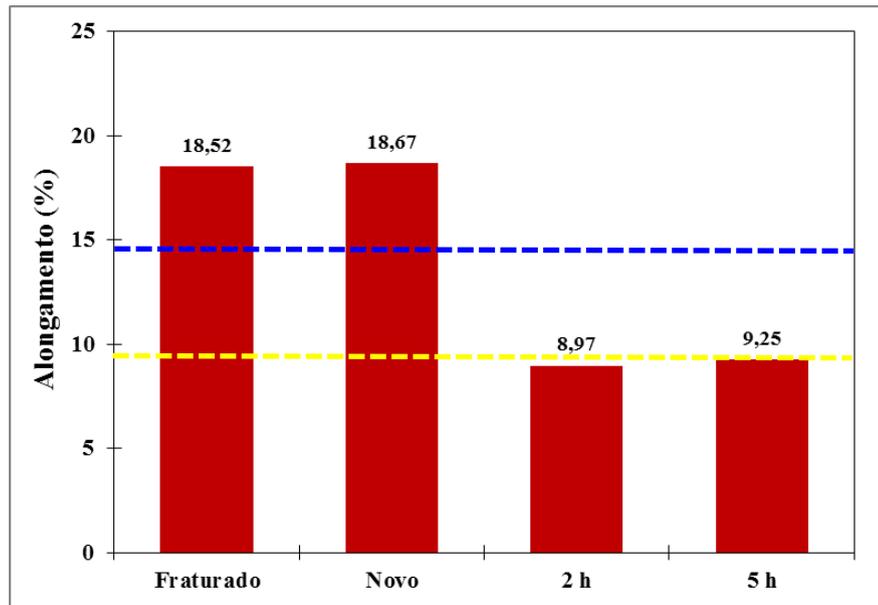


Fonte: Autor, 2022.

#### 4.6.3. Comparação do alongamento

O alongamento na Tabela 10 mostra que os parafusos sem tratamento térmico possuem alongamento superior aos tratados termo quimicamente, sendo que tanto os parafusos fraturados como os novos obtiveram valores de alongamento acima do patamar estabelecido pela norma e pela empresa, já os tratados apresentaram valores próximos ao patamar da empresa, porém em relação a norma estão abaixo do estipulado. Dessa forma, o tratamento de cementação resultou numa diminuição da ductilidade dos parafusos, a fase martensita pode ter acarretado nesse aumento de rigidez. A Figura 40 apresenta os dados de forma gráfica.

Figura 40 - Correlação do alongamento dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar.

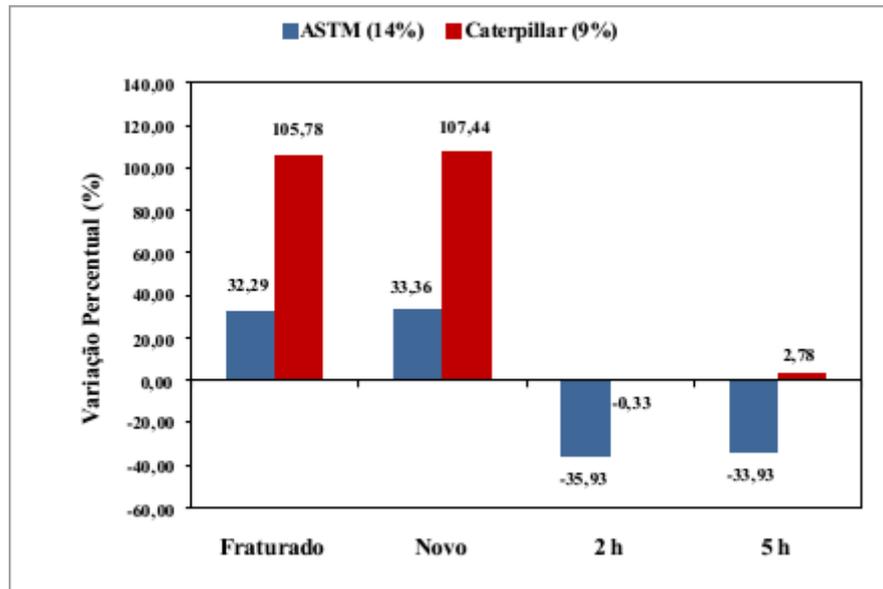


Fonte: Autor, 2022.

A Figura 41 mostra a variação percentual do alongamento, é possível notar que os parafusos não tratados em relação ao manual Caterpillar possuem valores de alongamento o dobro do estipulado, em relação norma apresentam a variação na faixa de 33 %. Os parafusos tratados apresentaram em sua grande maioria valores negativos de variação percentual, com exceção do caso do corpo de prova com 5 h de tratamento que apresentou valor um pouco acima do valor estipulado pela empresa.

Nota-se também que o corpo de prova apresentou valores melhores em relação ao alongamento, isso se dá dado a ideia que o aumento do tempo de cementação causou o retorno da estrutura pré cementação, o que de fato se mostra ser mais dúctil. O tratamento não se mostrou satisfatório quanto ao alongamento, sendo os valores muito próximos ao estipulado pela empresa e inferiores ao estipulado pela ASTM.

Figura 41- Variação percentual do alongamento dos parafusos com os parâmetros ASTM e Caterpillar.



Fonte: Autor, 2022.

## 5. CONCLUSÃO

Diante da metodologia desenvolvida no presente estudo para observação da caracterização mecânica, elétrica e estrutural das ligas sem tratamento térmico, conclui - se:

### **Avaliar a topografia das falhas de parafusos fraturados em serviço.**

A topografia das falhas mostrou zonas clássicas, as “marcas de praia” que apontam para o crescimento da trinca, as “marcas de catraca” trazem um indicativo de alta concentração de tensão e a região áspera que corresponde a porção do material que sofreu rompimento catastrófico.

### **Avaliar mecanicamente e fractograficamente os parafusos fraturados em serviço.**

A dureza dos parafusos fraturados encontrava dentro da faixa estabelecida pela norma ASTM A490M, o que aponta para uma falha pontua dentro da superfície do parafuso, a tensão máxima mostrou-se uniforme em todos os corpos de prova e indica que provavelmente os parafusos mantiveram a resistência a tração próximas ao decorrer da vida de serviço, o alongamento mostrou-se uniforme e acima do patamar estabelecido em norma.

A fratura analisada mostrou a característica “taça e cone”, que está presente em muitos materiais dúcteis, formados em tensões elevadas. Nos corpos de provas houve na região central a presença de diversas microcavidades ressaltando o aspecto dúctil da fratura. Notou-se a influência na tensão máxima nas microcavidades sendo a relação direta proporcional entre as mesmas, assim como o alongamento grandes produz dimples mais rasas.

### **Comparar os parâmetros mecânicos de parafusos novos como recebidos com os parâmetros estipulados pela empresa Caterpillar.**

Os parafusos novos quanto a propriedade de dureza que apresentam valores dentro dos parâmetros estabelecidos pela Caterpillar de forma a estarem centralizados dentro da faixa estabelecida. A tensão máxima também se apresenta dentro da faixa estipulada pela empresa, tendo os valores numa faixa de 10% acima do parâmetro mínimo, ressaltando o senso de evitar

o superdimensionamento, no alongamento a variação percentual em relação ao parâmetro mostrou que os valores estão quase o dobro do valor necessário.

A análise de todos os parâmetros mostra que os parafusos novos alcançaram os valores estabelecidos, assim pensasse que a falha pode ter sido causada por algum fator de serviço fora as propriedades do material.

### **Submeter parafusos novos ao processo de cementação na temperatura de 900°C por 2 e 5 horas para caracteriza-los.**

A camada cementada dos parafusos tratados mostrou espessuras diferentes para o aumento do tempo de tratamento, com espessura de 0,4 mm para duas horas e 0,5 mm para 5 h, com variações em suas composições sendo encontrado no corpo com 2 h de tratamento martensita na superfície, ferrita e perlita próximo ao centro, para 5 h houve a presença de martensita de forma decrescente da superfície ao centro da peça.

A dureza dos corpos cementados mostrou-se maior para o corpo de prova com 2 h de tratamento, isso se deu pelo fenômeno de que o material desfaz a configuração molecular obtida através da cementação por duas horas e começa a retornar para a configuração molecular pré cementação.

A tensão máxima mostrou resultados melhores pra o aumento de tempo no tratamento sendo o tempo de 2 h com 1416,56 MPa e 5 h com 1529,01 MPa, isso pode ter ocorrido pois pela maior quantidade de martensita na peça. O alongamento para os parafusos cementados apresentaram pouca variação entre os tempos, mas apresentaram resultado inferior ao parafuso novo, com isso a cementação diminui o regime plástico do material.

### **Comparar parafusos fraturados em serviço, parafusos novos como recebidos e parafusos novos cementados.**

As durezas sem tratamento térmico estão acima da faixa estipulada pela ASTM e pela Caterpillar, as peças cementadas ultrapassaram esses valores com certa folga. A tensão máxima para os parafusos tratados mostrou-se superiores aos parafusos fraturados e novos, tendo valores, para 5 h, próximos de 50% a mais que o parâmetro mínimo de tensão tanto para norma quanto para a empresa. O alongamento mostrou-se menos efetivo quando os corpos de prova foram cementados, sendo que para a norma ASTM os valores ficaram com uma variação

percentual negativa de 34%, assim o tratamento não se mostrou satisfatório quanto ao alongamento

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio da análise dos resultados do trabalho desenvolvido, são sugeridas linhas de pesquisa para a realização de trabalhos futuros:

- Fazer as análises com outro tipo de tratamento termoquímico, como a boretação.
- Analisar os parafusos quanto ao torque aplicado nos parafusos.
- Estudar as características tribológicas do parafusos com e sem tratamento termoquímico.
- Aplicar as análises, ensaios e cálculos adimensionais utilizando parafusos que estão em serviço na suspensão traseira.
- Análise dos custos associados a quebra dos parafusos e consequente parada dos caminhões fora de estrada.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM INTERNATIONAL), **ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams**, 1 ed., Materials Park, ASM International, 1992, 1741p.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM International) **ASM Handbook Volume 12: fractography**, v. 517, p. 654, 1987.

ANTONELLO, Miguel Guilherme; FRANCESCHI, Alessandro de. **Elementos de Máquinas**. Maria/RS: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria: Rede e-Tec Brasil, 2014.

ASKERLAND, D; PHULÉ, P(b). **Ciência e Engenharia de Materiais**, Cap. 7, São Paulo, Cengage Learning, 2008.

ASTM A-490. **Standard Specification for Structural Bolts, Alloy Steel, Heat**. ASTM; 2011.

ASTM A-490M. **Standard Specification for High-Strength Steel Bolts, Classes 10.9 and 10.9.3, for Structural Steel Joints (Metric)**. ASTM; 2011.

ASTM E8M. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. ASTM; 2010.

ASTM F-606M. **Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets**. ASTM; 2011.

ASTM E1823 – 13. **Standard terminology relating to fatigue and fracture testing**. 2013.

BARBOSA, Theylor Moreira et al. **Dimensionamento de Juntas Aparafusadas e Aplicação de Torque em Peças Automotivas**. Resende: Associação Educacional Dom Bosco, 2014.

BAUMGARTEN, Júlio Frederico. **Cementação sólida empregando granulado elaborado a partir de carvão vegetal reciclado e ativador de CaCO<sub>3</sub> ecologicamente correto**. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Pós- graduação em Engenharia de Materiais e Processos Avançados, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.

BICKFORD, J.H.: **An introduction to the design and behavior of bolted joints**. 3ed. New York : CRC. 1995. Blutcher Ltda. 1982.

BRESCIANI, E. F; ZAVAGLIA, C. A. C; BUTTON, E. G; NERY, F. A. C. **Conformação plástica dos metais**; 4 Ed. UNICAMP, p. 17, São Paulo, 1991.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CALLISTER Jr., W.D. **Fundamentals of materials science and engineering**. 7. ed. New York: John Wiley, 2007.

CELESTINO, P.A.P., FELIPE, R.C.T.S., MACHADO, T.G. **Análise comparativa entre o tratamento térmico (têmpera) e o tratamento termoquímico(cementação) realizado em aço 1040**. Holos, Ano 23. v.3. 2007.

CETLIN, P. R. **Tipos de Fratura: análise de fratura**. ABM, 1997.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.

FOREMAN, R. W. Pack Carburizing. **ASM Handbook Vol. 4 - Heat Treating**, 1991. p 325-328.

GARCIA, A., SPIM, J. A., SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2000.

GARCIA, R. **Conceitos gerais sobre torque e processos de torque**. Revista do Parafuso, 2008.

GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L. C. MORAIS, W. A. **Análise de falhas**. ABM. 2018.

HAIBACH, E. **Fatigue strength**. 2006.

JORGE, I.C.S. **Estudo da coalescência de microcavidades na liga Al-0,05% Cu-[0,24-0,28]% Fe-0,7% Si modificada com os teores [0,05 e 0,15]% Ti para fins de transmissão [Tx] e distribuição [Dx] de energia elétrica**. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

KÜNKLER, B.; DÜBER, O.; KÖSTER, P.; KRUPP, U.; FRITZEN, C.-P.; CHRIST, H.-J. **Modelling of short crack propagation – Transition from stage I to stage II**. Engineering Fracture Mechanics, v. 75, p. 715-725, 2008.

LEAL, Vítor Justus; DE RESENDE ANDRADE, Paulo César. **Modelagem dos dados de falha de um caminhão fora de estrada**. ForScience, v. 6, n. 3, 2018.

LIU A. F. **Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction**. ASM International, 2005.

MADAYAG, A. F. **Metal fatigue: Theory and design**. New York: John Wiley & Sons, 1969. Cap. 3: The influence of processing and metallurgical factors on fatigue, pp.66-105.

MOIA, D.G. **Parte I: Previsão da Vida em Fadiga de Materiais Metálicos - Parte I: Estudo preliminar da vida em fadiga do aço ABNT1016 recozido**. Relatório Final do projeto de iniciação científica. 2001.

MICROPRECS-EUROS. Disponível em: <<https://microprecs-euros.lojaintegrada.com.br/durometro-marca-pantec-rbs-m-digital-rambold-profundidade>>. Acesso em: 22 de mar. 2021.

NORTON, ROBERTO L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. Tradução João Batista de Aguiar. 2 ed. Porto Alegre : Bookman, 2006.

NUNNEY, Malcolm James. **Light and heavy vehicle technology**. Routledge, 2007.

PIAZZA, G.R. **Avaliação de componente de suspensão veicular sob fadiga com carregamento de amplitude variável**. Dissertação (Mestrado). 201 fls. 2018. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

RILL, G.; SALG, D.; WILKS, E. Improvement of dynamic wheel loads and ride quality of heavy agricultural tractors by suspending front axles. In: **Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles**. National Highway Traffic Safety Administration, 1992. p. 116-121.

RODRIGUES, C.R. **Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafusos da classe 10.9 para emprego estrutural**. Dissertação (Mestrado). Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro, 2015.

RODRIGUES, R. S. **Teste de Materiais**. Mogi das Cruzes – SP 1990 1.ed. cap.1,2,3.

SÁ, M. V. C.. **Estudo sobre o comportamento em fadiga da liga de alumínio 7050-T7451 na presença de entalhe e carregamento axial-torcional**. 2017.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. 2 Ed. Netherlands: Editora Springer. 2009.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. Disponível em: <<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/emic-equipamentos-e-sistemas-de-ensaios-ltda/produtos/maquinas-ferramenta/maquina-universal-de-ensaio/>>. Acesso em: 30 de abr. 2021.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos dos materiais metálicos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

SILVA, A. L. C. E; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 2010.

SUSKI, C.A. **Estudo da Influência na Adição de Boro nos Aços de Baixo Carbono**. O parafuso. 2007.

TERTULIANO, A. J. O. **Análise da influência de dois teores de níquel sobre as propriedades térmicas, mecânicas, elétricas e estruturais da liga Al-0,05%Cu [0,24-0,28]%Fe-0,7%Si destinada à produção de cabos para Tx e Dx de energia elétrica**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

WULPI, D.J. **Understanding how components fail**. Materials Park: ASM International, 1993.

ZERBST, U.; MADIA, M.; VORMWALD, M.; BEIER, H. T. **Fatigue strength and fracture mechanics – A general perspective**. Engineering Fracture Mechanics, v. 198, p. 2–23, 2018.