



**UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
ENGENHARIA MECÂNICA**

EDIS DOS SANTOS FERREIRA JUNIOR; GUILHERME SANTANA DA ROCHA;
LEONARDO RIBEIRO DA SILVA SOUZA; LUCAS VINICIUS PEREIRA DO
NASCIMENTO; MAURÍCIO AUGUSTO MACHADO SERRA.

**ANÁLISE DE RUPTURA DE UM COMPONENTE DE FIXAÇÃO DO CHASSI DE
TRATOR**

SÃO PAULO - SP
2023

EDIS DOS SANTOS FERREIRA JUNIOR; GUILHERME SANTANA DA ROCHA;
LEONARDO RIBEIRO DA SILVA SOUZA; LUCAS VINICIUS PEREIRA DO
NASCIMENTO; MAURÍCIO AUGUSTO MACHADO SERRA.

**ANÁLISE DE RUPTURA DE UM COMPONENTE DE FIXAÇÃO DO CHASSI DE
TRATOR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito final para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica, no Curso
de Engenharia Mecânica da Universidade
São Judas Tadeu – Campus Mooca.

Orientador: Prof. Me. Igor C. Porto Martins.

SÃO PAULO - SP

2023

EDIS DOS SANTOS FERREIRA JUNIOR; GUILHERME SANTANA DA ROCHA;
LEONARDO RIBEIRO DA SILVA SOUZA; LUCAS VINICIUS PEREIRA DO
NASCIMENTO; MAURÍCIO AUGUSTO MACHADO SERRA.

ANÁLISE DE RUPTURA DE UM COMPONENTE DE FIXAÇÃO DO CHASSI DE TRATOR

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito final para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica, no Curso
de Engenharia Mecânica da Universidade
São Judas Tadeu – Campus Mooca.

Aprovado em: ___/___/_____

_____/_____/_____
Professor Me. Igor Colado Porto Martins

_____/_____/_____
Professor Dr. Iguatinã de Melo Costa

_____/_____/_____
Professora Dra. Daniela Passarelo Moura da Fonseca

_____/_____/_____
Professor Dr. Waldemar Alfredo Monteiro

A Deus, meus pais e amigos,

*Agradecemos a Deus pela força que me concedeu,
aos nossos pais pelo amor incondicional e aos
amigos pela constante motivação. Sem vocês, este
trabalho não seria possível.*

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos neste momento especial, àqueles que foram fundamentais em nossa jornada na elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Primeiramente, agradecemos a Deus por nos conceder saúde, força e sabedoria ao longo dessa caminhada acadêmica. Sua presença e orientação foram essenciais para superarmos os desafios e alcançarmos este importante marco em nossas vidas.

À nossa família, expressamos nossa profunda gratidão. Seu amor incondicional, encorajamento constante e apoio emocional foram pilares que nos sustentaram durante todas as etapas deste projeto. Vocês sempre estiveram ao nosso lado, nos incentivando a persistir e nunca desistir dos nossos sonhos.

Aos nossos amigos, somos imensamente gratos por terem compartilhado conosco momentos de descontração e alegria, aliviando as tensões e trazendo equilíbrio à nossa vida acadêmica. Seus conselhos e palavras de encorajamento foram valiosos, mantendo-nos motivados durante todo o percurso.

Por fim, agradecemos a todos os professores, orientadores e demais profissionais que contribuíram com seus conhecimentos e experiências ao longo deste trabalho. Suas orientações e feedbacks foram essenciais para nosso crescimento acadêmico e aprimoramento das nossas habilidades.

A todos que estiveram presentes, direta ou indiretamente, nesta jornada, nosso mais profundo agradecimento. Sem o apoio, a compreensão e a dedicação de cada um de vocês, não teríamos alcançado este momento de celebração e realização. Seu apoio foi fundamental para nosso sucesso.

*“Os únicos limites das nossas realizações de amanhã
são as nossas dúvidas e hesitações de hoje.”*

- Franklin Roosevelt

RESUMO

Os veículos automotores de grande porte têm um papel fundamental em diversos setores da economia, como mineração, agricultura, logística de grandes cargas, entre outros. Esses veículos são extremamente importantes, pois permitem que trabalhos que seriam impossíveis de serem executados apenas com a força humana sejam realizados de maneira eficiente e segura. Porém, garantir a segurança desses veículos é crucial, já que muitos deles são tripulados ou estão envolvidos em tarefas de alta importância. É por isso que o presente trabalho teve como objetivo identificar a causa da ruptura de um parafuso prisioneiro que faz a fixação entre a cabine e o chassi de um veículo automotor de grande porte. Para isso, foi realizada uma análise de falha abrangente, que incluiu a caracterização química das propriedades do material, revisão do dimensionamento por elementos finitos, análise de dureza e validação do processo de montagem. Com base nas informações coletadas e analisadas neste estudo, foi possível concluir que a dureza encontrada no ensaio excedeu significativamente o valor estabelecido pela norma e as condições especificadas de projeto, apresentando uma microestrutura martensítica. Além disso, os resultados indicaram que a tensão gerada a partir do torque aplicado também excedeu os limites estabelecidos, o que pode resultar em problemas estruturais e de desempenho a longo prazo.

Palavras-chave: veículos de grande porte, parafuso prisioneiro, análise de falha, propriedades do material, elementos finitos, confiabilidade, segurança, eficiência.

ABSTRACT

Large-scale motor vehicles play a crucial role in various sectors of the economy, such as mining, agriculture, and heavy logistics, among others. These vehicles are extremely important as they enable tasks that would be impossible to accomplish solely with human strength to be carried out efficiently and safely. However, ensuring the safety of these vehicles is crucial, especially since many of them are manned or involved in high-stakes tasks. That's why the present study aimed to identify the cause of the failure of a stud bolt that secures the cabin to the chassis of a large motor vehicle. To do so, a comprehensive failure analysis was conducted, which included chemical characterization of the material properties, finite element analysis review, hardness analysis, and validation of the assembly process. Based on the information collected and analyzed in this study, it was possible to conclude that the hardness observed in the test significantly exceeded the value established by the standard and the specified design conditions, exhibiting a martensitic microstructure. Additionally, the results indicated that the stress generated by the applied torque also exceeded the established limits, which can result in long-term structural and performance issues.

Keywords: Large-scale vehicles, stud bolt, failure analysis, material properties, finite elements, reliability, safety, efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Parafusos	16
Figura 2 - Parafuso Prisoneiro	17
Figura 3 - Diagrama tensão-deformação convencional e real para material dúctil	22
Figura 4 - Ruptura em um Material por Fadiga.....	25
Figura 5 - Parafuso M16.....	30
Figura 6 - Conjunto Fabricado do Parafuso Prisoneiro.....	31
Figura 7 - Imagem do Parafuso Prisoneiro	31
Figura 9 - Parafuso com Ruptura	32
Figura 8 - Parafuso com Ruptura	32
Figura 10 - Conjunto de Fixação da Cabine e Chassi ..	Erro! Indicador não definido.
Figura 11 - Parafuso em bancada para realização do corte.....	34
Figura 12 - Parafuso após o Corte	35
Figura 13 - Adição de baquelite na TERMOPRESS 2.....	35
Figura 14 - Modelamento 3D do Parafuso Prisoneiro.....	37
Figura 15 - Região de Fixação do Parafuso Prisoneiro	38
Figura 16 - Região da Aplicação da Força Axial	39
Figura 17 - Geração de Malha.....	39
Figura 18 - Simulação da Máxima Força Axial	43
Figura 19 - Resultado da Tensão Gerada na Rosca	44
Figura 20 - Análise Metalográfica com ampliação de 1000x	45
Figura 21 - Análise Metalográfica com ampliação de 500x	45
Figura 22 - Análise Metalográfica com ampliação de 200x	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

δ – Dilatação Linear

LL – Comprimento Final (m)

L_0 – Comprimento Inicial (m)

σ – Tensão (Mpa)

P – Carga de Prova

A_0 – Área Inicial

ϵ – Deformação

F – Força (N)

A – Área (mm²)

T – Torque (N.m)

$\tau_{m\acute{a}x}$ – Tensão Máxima de Cisalhamento

r – Raio da Secção Transversal (mm)

J – Momento Polar de Inércia (mm⁴)

k – Coeficiente de Atrito

F_i – Pré-Carga (N)

ϕ_n – Diâmetro Nominal (m)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivos Gerais.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Elementos de Fixação.....	16
3.1.1 Parafusos.....	16
3.1.2 Parafuso Prisioneiro.....	17
3.2 Aços	18
3.2.1 Aço Inoxidável	18
3.2.2 Aço 1045.....	19
3.3 Tratamentos Térmicos	19
3.3.1 Têmpera	20
3.3.2 Revenimento.....	20
3.4 Características Mecânicas dos Materiais.....	21
3.5 Resistência a Tração	22
3.6 Classe de Resistencia dos Parafusos.....	23
3.6.1 Ductilidade	23
3.6.2 Tenacidade	24
3.7 Falhas em Componentes Parafusados	24
3.7.1 Aspectos Relacionados à Resistência à Fadiga de Parafusos	26
3.8 Ensaio Mecânicos	27
3.8.1 Ensaio de Metalografia	27
3.8.2 Ensaio de Dureza	28

3.9	Análise por Elementos Finitos.....	29
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1	Materiais	30
4.2	Conjunto Fabricado.....	31
4.2.1	Falha no Conjunto.....	32
4.2.2	Condições do Projeto.....	32
4.3	Métodos	33
4.3.1	Corte	33
4.3.2	Embutimento.....	34
4.3.3	Análise de Metalografia	35
4.3.4	Análise de Dureza.....	36
4.3.5	Análise de Elementos Finitos.....	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1	Análise de Elementos Finitos	40
5.1.1	Torção no elemento devido ao torque	40
5.1.2	Tração gerada devido força de aperto	42
5.2	Análise de Metalografia.....	44
5.3	Análise de Dureza.....	46
5.4	Discussões.....	48
6.	CONCLUSÃO	50
7.	REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios do trabalho humano, a utilização da força física foi o meio mais comum de se realizar as tarefas. Com adento das revoluções ao longo do tempo, surgiram novas tecnologias e equipamentos que foram capazes de aumentar a eficiência e a produtividade das atividades econômicas. Entre esses equipamentos estão as máquinas de grande porte, que se tornaram essenciais em diversos setores da economia (PIZZIO, 2005).

A produção de máquinas desse porte apresenta uma série de desafios. A ocorrência de falhas, por exemplo, pode causar sérios prejuízos, tais como riscos à segurança dos trabalhadores, diminuição da confiabilidade operacional, impactos ambientais e elevação dos custos diretos e indiretos. As falhas podem ser causadas por diversos fatores, como falhas no projeto, materiais inadequados, erros de montagem e uso e manutenção incorretos (SAHADI, 2015).

A ruptura de um componente metálico é um problema comum na indústria, mas se torna mais crítico quando se trata de estruturas e componentes mecânicos que requerem alto desempenho. Com o avanço da tecnologia, as análises de falhas tornaram-se cada vez mais precisas e robustas, mas ainda há muito a ser desenvolvido. Estudos mostram que as falhas podem causar prejuízos anuais de até 119 bilhões de dólares, mas a utilização correta da tecnologia existente e mais pesquisas sobre os mecanismos das rupturas podem reduzir esse custo em até 63 bilhões (ANDERSON, 2017).

O presente trabalho teve como objetivo analisar um problema real da indústria que foi trazido através de reclamações de um cliente final sobre a falha que ocorre em um parafuso prisioneiro que é utilizado na fixação da cabine de um trator e identificar as possíveis causas de falhas desse parafuso. Para isso, foi realizado uma análise de falha baseada na caracterização do material, análise do dimensionamento através de elementos finitos, ensaio de metalografia, ensaio de dureza e revisão dos procedimentos de montagem. O estudo da falha teve como propósito identificar os pontos críticos do processo, aumentando a segurança do elemento e do conjunto,

trazendo mais confiabilidade e padronização ao processo produtivo (ORDÓÑEZ, 2004).

Além disso, foram realizados testes e ensaios para avaliar a resistência e durabilidade dos materiais e componentes utilizados no equipamento, bem como a eficácia dos procedimentos de montagem e manutenção. Toda essa análise pode ajudar a identificar não apenas as causas da falha, mas também a implementar medidas preventivas visando que problemas semelhantes não ocorram no futuro. (SAHADI, 2015).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Espera-se que esse estudo contribua para a compreensão das causas de falhas em um parafuso prisioneiro utilizado em um veículo automotor e para a implementação de medidas preventivas que melhorem a segurança e a eficiência dos equipamentos utilizados em atividades econômicas de grande porte, além de poder ser aplicado em outros contextos industriais para redução de prejuízos financeiros, impactos ambientais e riscos à segurança dos trabalhadores.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar as possíveis causas de falhas do parafuso prisioneiro, utilizado na fixação da cabine de um veículo automotor de grande porte;
- b) Conduzir uma análise de falha utilizando a análise de dimensionamento por meio de elementos finitos, ensaio metalográfico e ensaio de dureza
- c) Propor medidas preventivas que aumentem a segurança e a eficiência do equipamento, trazendo mais confiabilidade e padronização ao processo produtivo;
- d) Realizar uma revisão bibliográfica sobre os conceitos relacionados à análise de falhas e aos componentes mecânicos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Elementos de Fixação

Os elementos de fixação são componentes mecânicos utilizados para fixar duas ou mais peças de um conjunto, impedindo que essas peças se movam em relação umas às outras (BARROZO; GARCIA; WITZLER, 2010). Esses elementos são amplamente utilizados em diversas áreas da indústria, desde a fabricação de móveis até a produção de aeronaves. Nesta revisão bibliográfica, serão apresentados os principais tipos de elementos de fixação, suas características e aplicações.

3.1.1 Parafusos

Os parafusos são elementos de fixação compostos por um corpo roscado e uma cabeça que pode ter diferentes formatos, como sextavada, cilíndrica ou oval. Eles são utilizados em conjunto com uma porca para fixar duas peças juntas. Os parafusos são produzidos em diferentes materiais, como aço carbono, aço inoxidável e latão, e possuem diferentes tipos de rosca, conforme figura 1 (DAUDT, 2022).

Figura 1 - Tipos de Parafusos



Fonte: (“Categorias de Elementos de Fixação”, 2023)

3.1.2 Parafuso Prisioneiro

Conforme a figura 2, um parafuso prisioneiro é um tipo de fixador mecânico que consiste em um pino com uma rosca em uma extremidade e uma cabeça na outra (PISSAIA, 2014). Eles são frequentemente usados em aplicações onde é necessário fixar um objeto de forma segura em uma superfície, mas onde a remoção frequente não é necessária.

Os parafusos prisioneiros são comumente usados na indústria automotiva para prender componentes do motor ou do chassi em seus lugares. Eles também são usados em aplicações de construção, como fixação de chapas de metal em paredes ou telhados (ABREU, 2018).

Figura 2 - Parafuso Prisioneiro



Fonte: ("Categorias de Elementos de Fixação", 2023)

Os parafusos prisioneiros geralmente são instalados por meio de uma ferramenta especializada, como uma pistola de fixação, que coloca o pino na posição e rosqueia-o na superfície de fixação (ZANOTTO, 2015). Eles são geralmente feitos de materiais resistentes, como aço inoxidável, para garantir a durabilidade e a resistência à corrosão (PISSAIA, 2014).

3.2 Aços

Para definirmos o que é aço, precisamos compreender seu processo de fabricação, onde o material é concebido a partir do minério de ferro. O aço é um elemento composto por Ferro (Fe) e Carbono (C), embora estes sejam os elementos de liga centrais em razão dos processos de fabricação, sempre haverá a existência de elementos secundários como o Silício (Si), Manganês (Mn), Fósforo (P) e Enxofre (S), que na indústria são conhecidos como elementos residuais. O aço é uma liga de Ferro-Carbono, que contém em torno de 0,008% até 2,11% de carbono (ORDÓÑEZ, 2004). O aço é uma liga metálica e contém elementos químicos além do Ferro e Carbono, sendo assim a adição de elementos de liga acarretam mudanças químicas e estruturais que podem ter diversas aplicações (ELISEI, 2008).

Os aços se diferenciam de acordo com suas formas, tamanho, uniformidade dos grãos que compõem e composição química, e a partir destes aspectos avaliamos o material para a correspondente aplicação. Podemos encontrar diversos aços com diferentes classes de resistência mecânica, soldabilidade, ductilidade, resistência à corrosão entre outros aspectos, podem ser obtidos através da adição de elementos químicos, e estes parâmetros são de grande importância no momento da elaboração e aplicação (MARTINS, 2015).

3.2.1 Aço Inoxidável

O aço inoxidável é um tipo de liga de ferro com cromo e outros elementos, como níquel, molibdênio e titânio, que apresenta alta resistência à corrosão e oxidação (PEREIRA, 2015). Esse tipo de aço é muito utilizado em diversas indústrias, como a alimentícia, a farmacêutica, a de construção civil e a de equipamentos médicos, devido às suas propriedades mecânicas e químicas (MARTINS, 2015).

O aço inoxidável apresenta uma camada de óxido de cromo que protege a superfície do metal contra a corrosão e a oxidação, tornando-o resistente a ambientes agressivos, como os que contêm água salgada, ácidos e produtos químicos. Além

disso, o aço inoxidável é resistente à alta temperatura, à abrasão e à deformação plástica (RESENDE, 2016).

Existem vários tipos de aço inoxidável, cada um com composições químicas diferentes e propriedades específicas. Alguns exemplos são: austenítico, ferrítico, martensítico e duplex. A escolha do tipo de aço inoxidável depende das necessidades da aplicação e do ambiente em que ele será utilizado (PEREIRA, 2015).

3.2.2 Aço 1045

O aço 1045 é um tipo de aço carbono comum utilizado em diversas aplicações industriais devido à sua alta resistência, durabilidade e facilidade de usinagem. Ele é composto por aproximadamente 0,45% de carbono e pequenas quantidades de outros elementos, como manganês e silício.

Esse tipo de aço é amplamente utilizado na fabricação de peças mecânicas, como engrenagens, eixos, virabrequins e outras peças que exigem alta resistência e durabilidade (PEREIRA, 2015). Ele pode ser tratado termicamente para aumentar sua resistência e dureza, e sua resistência à tração pode variar de 570 MPa a 700 MPa, dependendo do processo de tratamento térmico utilizado (RESENDE, 2016).

O aço 1045 também é conhecido por sua facilidade de usinagem, o que significa que ele pode ser cortado, perfurado e moldado com facilidade, tornando-o uma escolha popular para a produção em massa de peças mecânicas (PEREIRA, 2015).

3.3 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos em aços têm como objetivo melhorar as propriedades mecânicas e microestruturais do material, conferindo-lhe maior resistência, tenacidade e dureza. Esses processos envolvem o aquecimento do aço a uma temperatura elevada e, em seguida, a seu resfriamento rápido ou lento, dependendo

do tipo de tratamento, para que ocorram mudanças na microestrutura do material (NUNES, 2020).

3.3.1 Têmpera

A têmpera é um processo termoquímico em que o aço é aquecido a uma temperatura acima de sua temperatura crítica, seguido de resfriamento rápido em um meio de resfriamento. O objetivo é aumentar a dureza e a resistência mecânica do material. O processo envolve a transformação da microestrutura do aço em austenita durante o aquecimento, seguida pela formação de martensita durante o resfriamento rápido. A dureza final do aço é influenciada pela taxa de resfriamento e pode ser controlada através do tratamento térmico de revenimento (NUNES, 2020).

3.3.2 Revenimento

O revenimento é um processo de tratamento térmico que consiste em aquecer o aço temperado a uma temperatura abaixo de sua temperatura crítica, e mantê-lo nessa temperatura por um período. O objetivo principal do revenimento é reduzir a dureza excessiva do aço temperado, aumentando a tenacidade e a ductilidade do material.

Durante o revenimento, a martensita é transformada em outras fases mais estáveis, como ferrita e perlita. Esse processo de transformação reduz a quantidade de carbono na matriz do aço, tornando-o menos duro e mais tenaz. O tempo e a temperatura de revenimento dependem do grau de dureza desejado e da composição química do aço (ISMAIL; AMINE; AHMED, 2019).

3.4 Características Mecânicas dos Materiais

As características mecânicas dos materiais são, em geral, determinadas por meio de ensaios que permitem a obtenção das curvas e dos diagramas de tensão e deformação. Para tanto, corpos de prova são submetidos a ensaios padronizados, cujos valores médios característicos são definidos e normatizados. Esses valores são amplamente utilizados na engenharia para diversos tipos de materiais, incluindo metais, cerâmicas, polímeros e materiais compostos (HIBBELER, 2019).

O alongamento do material pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$\delta = L - L_0$$

A variação do comprimento do corpo de prova pode ser determinada pela diferença entre o comprimento final e o comprimento inicial. Por sua vez, o diagrama de tensão e deformação pode ser calculado diretamente a partir da fórmula:

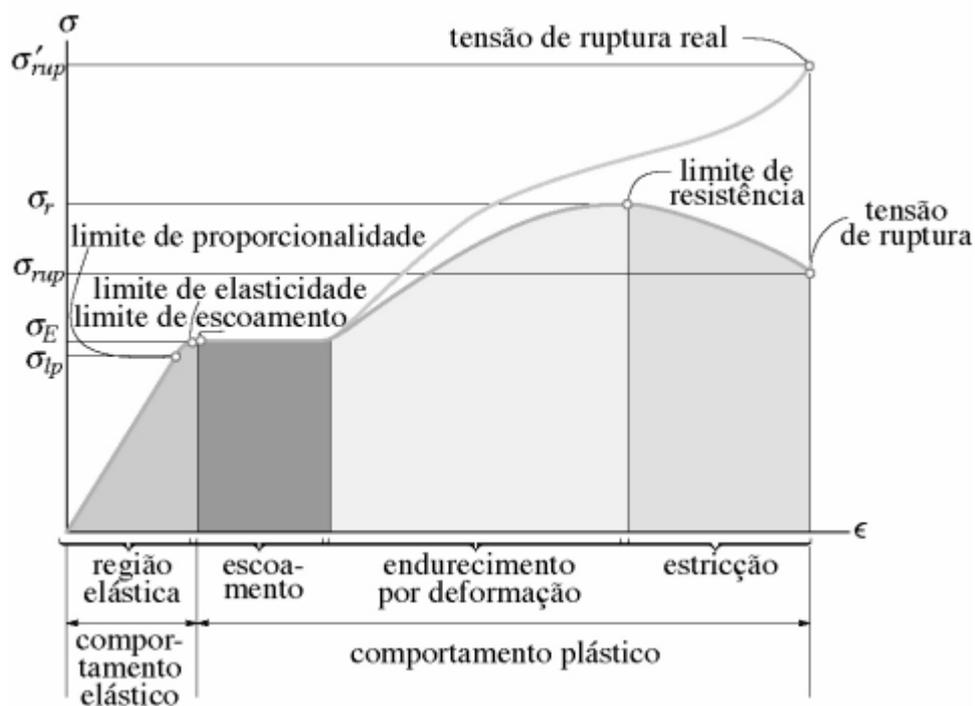
$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

A tensão nominal ou de engenharia, representada pela relação entre a carga de prova e a área inicial do corpo de prova, é denominada tensão. Com base nessa definição, é possível calcular a deformação utilizando a seguinte equação:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

A partir dos dados obtidos em ensaios padronizados conforme a figura 3, é possível gerar o gráfico de tensão-deformação convencional para a resistência à tração, independentemente da geometria do material em questão (HIBBELER, 2019).

Figura 3 - Diagrama tensão-deformação convencional e real para material dúctil (aço) (sem escala)



Fonte: HIBBELER, 2019

3.5 Resistência a Tração

O ensaio de tração consiste em aplicar uma força em um corpo sólido que tende a esticá-lo ou alongá-lo, resultando em deformação do material na direção do esforço (HIBBELER, 2019). Para realizar esse ensaio, utiliza-se um corpo de prova com formas e dimensões padronizadas, que é fixado em uma máquina de ensaio. A máquina aplica esforços crescentes na direção axial do corpo de prova, enquanto as deformações correspondentes são medidas. As cargas ou esforços são medidos na própria máquina de ensaio, até que o corpo de prova atinja a sua ruptura. O gráfico de tensão-deformação, apresentado na Figura 3, é construído com base nos resultados obtidos em um ensaio de tração realizado com um corpo de prova metálico. Durante o ensaio, as medidas da carga (ou tensão) e da deformação crescem de forma constante, até próximo do fim do ensaio (ORDÓÑEZ, 2004).

3.6 Classe de Resistência dos Parafusos

A classe de resistência dos parafusos é uma medida da força que um parafuso pode suportar antes de se romper ou se deformar permanentemente. É um importante indicador da capacidade de um parafuso em suportar cargas e forças, e é determinado pela norma ISO 898-1.

A classificação de resistência é baseada em um sistema numérico, onde os números mais altos indicam uma resistência maior. Por exemplo, um parafuso de classe 12.9 é mais resistente do que um parafuso de classe 8.8. A classe de resistência é determinada pela análise de propriedades mecânicas dos materiais que compõem o parafuso, tais como a resistência à tração, escoamento e ruptura.

Ao especificar a classe de resistência do parafuso para um projeto específico, é possível garantir que o parafuso selecionado tenha a força necessária para suportar a carga esperada. Por exemplo, em uma aplicação onde é necessário suportar cargas pesadas, um parafuso de classe de resistência mais alta pode ser necessário para garantir a segurança do conjunto (ZANOTTO, 2015).

3.6.1 Ductilidade

A ductilidade de um material está relacionada à sua capacidade de se deformar permanentemente (sem se romper) quando uma força é aplicada (ASKELAND; WRIGHT, 2015). Existem duas medidas comuns que expressam essa propriedade: o alongamento percentual e a redução percentual de área. O alongamento percentual é calculado pela medida da deformação plástica permanente após a ocorrência da fratura, que é obtido pela mensuração das distâncias entre as marcas de sensores no corpo de prova antes e após o ensaio. Já a redução percentual de área é calculada pela variação em porcentagem da área da seção transversal na região de fratura, antes e depois do ensaio (ORDÓÑEZ, 2004).

3.6.2 Tenacidade

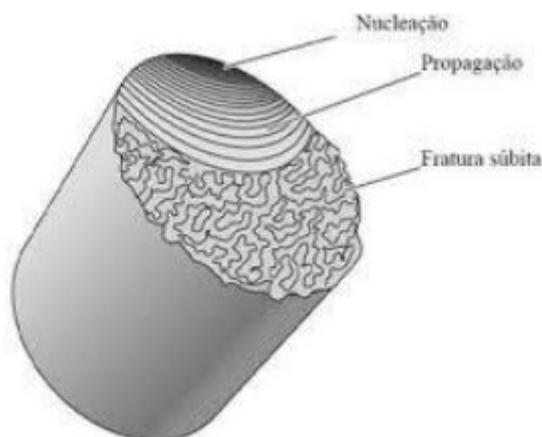
A tenacidade é uma propriedade do material que indica sua capacidade de absorver energia e deformação plástica antes da ocorrência de rompimento ou fratura (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). Em outras palavras, ela representa a resistência de um material à fratura quando trincas ou outros defeitos provenientes de tensões estão presentes. Esse aspecto é uma das principais considerações em materiais estruturais. A tenacidade é medida por meio do ensaio de impacto, que é realizado em condições de elevada taxa de deformação ou na presença de um ponto de concentração de tensões (ORDÓÑEZ, 2004).

3.7 Falhas em Componentes Parafusados

Falhas em componentes parafusados podem ser um problema significativo em diversos tipos de equipamentos e sistemas mecânicos, podendo levar a consequências graves como interrupções no processo produtivo, perda de produtividade, danos materiais e até mesmo acidentes graves (ASKELAND; WRIGHT, 2015).

Um dos tipos mais comuns de falhas em componentes parafusados é a falha por fadiga. Esse tipo de falha ocorre quando um componente é submetido a ciclos repetidos de tensão, e acaba sofrendo danos acumulados ao longo do tempo. A falha por fadiga pode ser identificada por meio de fraturas que apresentam um padrão característico, com aspecto granular e em forma de concha conforme figura 4 (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Figura 4 - Ruptura em um Material por Fadiga



Fonte: HIBBELER, 2019

Outro tipo de falha comum em componentes parafusados é a falha por sobrecarga. Esse tipo de falha ocorre quando um componente é submetido a uma carga maior do que aquela para a qual foi projetado. A falha por sobrecarga pode resultar em deformações plásticas, trincas e rupturas (JUVINALL; MARSHEK, 2016).

As falhas por corrosão também são uma preocupação em componentes parafusados. A corrosão pode enfraquecer os materiais, reduzindo sua resistência e tornando-os mais suscetíveis a falhas por fadiga ou sobrecarga. Além disso, a corrosão pode levar à formação de trincas e fissuras, que podem se propagar e levar à falha do componente (ASKELAND; WRIGHT, 2015).

A falta de lubrificação adequada também pode contribuir para falhas em componentes parafusados. A lubrificação é importante para reduzir o atrito entre as peças, o que pode levar a desgaste e deformações plásticas. A falta de lubrificação também pode contribuir para a formação de corrosão (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

É importante lembrar que os tipos de falhas em componentes parafusados são interligados, e um problema pode levar a outro. Por exemplo, a corrosão pode enfraquecer o material e torná-lo mais suscetível a falhas por fadiga ou sobrecarga. Além disso, é importante destacar que as falhas em componentes parafusados podem ser consequência de problemas no projeto, fabricação ou manutenção das peças (JUVINALL; MARSHEK, 2016).

3.7.1 Aspectos Relacionados à Resistência à Fadiga de Parafusos

Quando se trata da resistência à fadiga dos parafusos, é importante considerar o tipo de rosca utilizada, se grossa ou fina. A concentração de tensão na raiz do primeiro filete da rosca, quando em contato com a porca, é a principal causa da redução da resistência à fadiga dos parafusos. O passo da rosca afeta a resistência de duas maneiras: quanto menor o passo, maior é a tensão acumulada, o que reduz a resistência, mas menor será a sensibilidade ao entalhe e maior a seção transversal do parafuso, o que melhora a resistência (ELISEI, 2008). O efeito real do passo da rosca na resistência é uma interação entre esses dois mecanismos.

A geometria dos filetes da rosca e o grande acúmulo de tensão na raiz são os maiores problemas encontrados nas uniões parafusadas sujeitas a carregamentos cíclicos, que têm uma propensão ao afrouxamento ou soltura (DRAGONI, 1994). A soltura geralmente está relacionada a pré-cargas insuficientes do que a forças externas excessivas.

Estudos mostram que a distribuição de carga nas roscas é um fator importante na resistência à fadiga dos parafusos. O primeiro filete carregado entre o parafuso e a porca é mais suscetível a picos de tensão devido à sua formação incompleta, o que confere baixa rigidez e capacidade de carga em comparação com os demais filetes formados completamente (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). Além disso, as deformações elásticas que acontecem durante o primeiro aperto são transmitidas para o primeiro filete, aumentando a concentração de tensões (DRAGONI, 1994).

Para identificar as falhas em parafusos, é necessário realizar ensaios mecânicos que têm como objetivo avaliar as propriedades e o comportamento mecânico de materiais e estruturas sob diferentes condições de carga e deformação. Eles são utilizados em diversas áreas da engenharia e da ciência dos materiais, desde a fabricação de componentes industriais até a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais.

Os ensaios mecânicos permitem determinar propriedades como a resistência, a ductilidade, a tenacidade, a dureza, a rigidez e a fadiga dos materiais, que são fundamentais para o dimensionamento de estruturas e componentes mecânicos.

Esses ensaios podem ser realizados em diversos tipos de materiais, como metais, plásticos, cerâmicas, compósitos, entre outros. Entre os ensaios mecânicos mais comuns estão o ensaio de tração, o ensaio de metalografia, o ensaio de dureza, o ensaio de torção e o ensaio de impacto. Cada um desses ensaios tem uma metodologia específica para aplicação da carga e medida da deformação, permitindo assim obter informações precisas sobre o comportamento mecânico dos materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

3.8 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos têm como objetivo avaliar as propriedades e o comportamento mecânico de materiais e estruturas sob diferentes condições de carga e deformação. Eles são utilizados em diversas áreas da engenharia e da ciência dos materiais, desde a fabricação de componentes industriais até a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais (ELISEI, 2008).

Os ensaios mecânicos permitem determinar propriedades como a resistência, a ductilidade, a tenacidade, a dureza, a rigidez e a fadiga dos materiais, que são fundamentais para o dimensionamento de estruturas e componentes mecânicos. Esses ensaios podem ser realizados em diversos tipos de materiais, como metais, plásticos, cerâmicas, compósitos, entre outros (ORDÓÑEZ, 2004).

Entre os ensaios mecânicos mais comuns estão o ensaio de tração, o ensaio de compressão, o ensaio de flexão, o ensaio de torção e o ensaio de impacto. Cada um desses ensaios tem uma metodologia específica para aplicação da carga e medida da deformação, permitindo assim obter informações precisas sobre o comportamento mecânico dos materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

3.8.1 Ensaio de Metalografia

O ensaio de metalografia é uma técnica utilizada para a análise microestrutural de materiais metálicos, que consiste na preparação de uma amostra do material para a observação em microscópio óptico ou eletrônico. Através deste ensaio é possível

obter informações sobre a composição química, distribuição e tamanho de grãos, trincas, porosidade e outras características microestruturais do material em questão. Este tipo de ensaio é utilizado em diversas áreas, como a indústria automotiva, aeronáutica, naval, entre outras, para o controle de qualidade e o desenvolvimento de novos materiais (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

Outro uso do ensaio de metalografia é para a análise de falhas em componentes metálicos, uma vez que as características microestruturais podem revelar as causas das falhas, como a presença de trincas ou regiões com baixa resistência mecânica. Por isso, o ensaio de metalografia é uma ferramenta importante para a engenharia de materiais e outras áreas relacionadas, permitindo a compreensão da relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas dos materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

3.8.2 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza é uma técnica utilizada para medir a resistência de um material à deformação plástica por meio da aplicação de uma carga controlada em uma superfície específica da amostra. Existem diferentes métodos de ensaio de dureza, como Vickers, Brinell, Rockwell e Shore, que utilizam diferentes cargas e geometrias de penetrador, dependendo das características do material e das propriedades a serem medidas.

O ensaio de dureza é amplamente utilizado na indústria para o controle de qualidade de materiais, como aço, alumínio, cobre, plásticos e borrachas. Além disso, é uma ferramenta importante para a seleção de materiais adequados para diferentes aplicações, uma vez que a dureza está diretamente relacionada com a resistência à abrasão, desgaste e deformação (ORDÓÑEZ, 2004).

Este ensaio também é útil para a identificação de materiais desconhecidos, pois diferentes materiais possuem diferentes valores de dureza. Além disso, a análise da dureza de materiais pode fornecer informações sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas do material, permitindo a compreensão da relação entre a estrutura e as propriedades dos materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Em resumo, o ensaio de dureza é uma técnica importante para a avaliação das propriedades dos materiais, permitindo o controle de qualidade e a seleção adequada de materiais para diferentes aplicações. Além disso, a análise da dureza pode fornecer informações valiosas sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas dos materiais (JUVINALL; MARSHEK, 2016).

3.9 Análise por Elementos Finitos

A análise por elementos finitos é uma técnica de modelagem computacional amplamente utilizada na engenharia e ciência dos materiais para simular o comportamento de estruturas sob diferentes condições de carga. Essa técnica é baseada na divisão da estrutura em pequenos elementos e na descrição matemática do comportamento de cada elemento sob carga. As equações matemáticas são então resolvidas numericamente para obter o comportamento global da estrutura.

A utilização da análise por elementos finitos permite a obtenção de resultados precisos e detalhados em relação ao comportamento estrutural, permitindo o dimensionamento adequado e a previsão de falhas em sistemas mecânicos. É importante ressaltar que a análise por elementos finitos requer uma modelagem precisa da geometria e propriedades dos materiais, bem como a definição adequada das condições de contorno e de carga, para que os resultados obtidos sejam confiáveis.

Além disso, a análise por elementos finitos pode ser usada para simular uma ampla variedade de condições de carga, incluindo carga estática, dinâmica, térmica e sísmica. A técnica também permite a análise de materiais não-lineares, tais como materiais elastoplásticos e viscoelásticos (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2013).

Entre os softwares mais utilizados na análise por elementos finitos, podemos destacar o ANSYS, o ABAQUS e o SolidWorks. Esses softwares possuem interfaces amigáveis e permitem a modelagem de diferentes tipos de estruturas e materiais (BATHE, 2014).

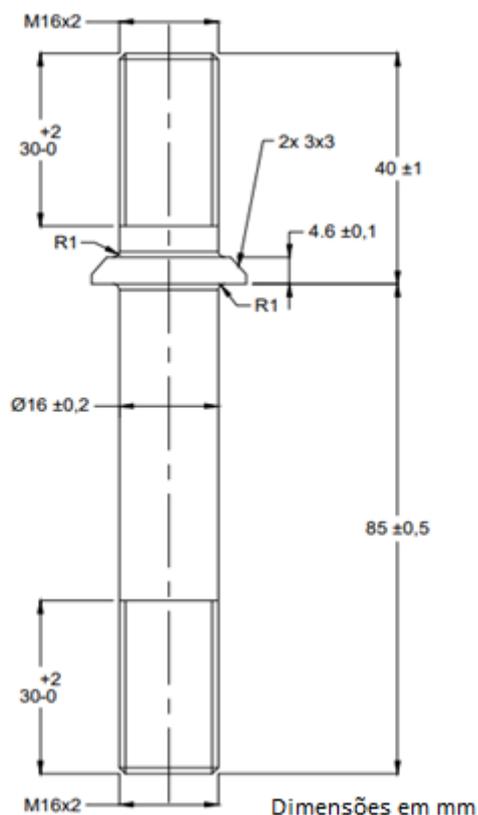
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Este estudo teve como objetivo investigar a causa da ruptura dos parafusos M16 fornecidos pela empresa HRS Tecnologia Industrial durante o processo de montagem. A empresa recebeu várias reclamações sobre a ruptura desses parafusos e eles foram devolvidos para análise. A amostra de análise incluiu o lote onde foram identificadas as falhas, bem como uma amostra pré-montagem para fins de comparação de dados.

Conforme figura 5, os parafusos M16 são fabricados em aço 1045, com dimensões de 16mm x 125mm, passo de 2mm e uma classe de resistência de 8.8. Possuem corpo com rosca parcial superior e inferior, medindo 30 mm. O suporte, por sua vez, consistia em uma chapa de Aço SAE 1045.

Figura 5 - Parafuso M16



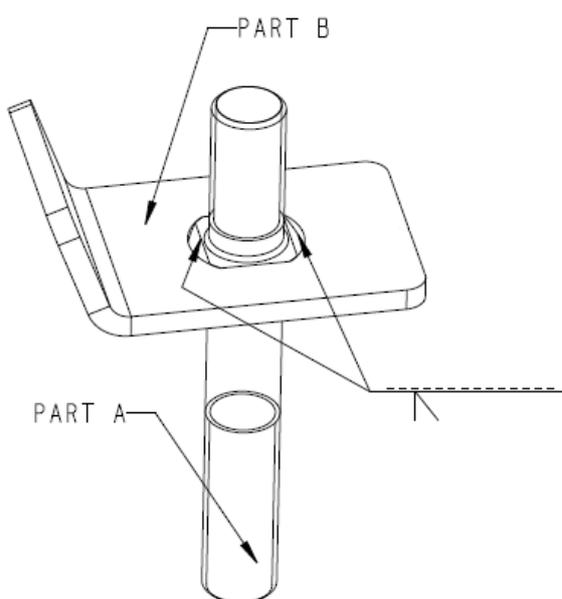
Fonte: Próprio Autor

Ambos os componentes foram submetidos a um processo de têmpera e revenimento realizado por uma empresa terceirizada, cujas informações sobre o tratamento e temperatura utilizados não estão disponíveis.

4.2 Conjunto Fabricado

Conforme mencionado na figura 6, este item consiste em duas partes distintas: "Parte A" é um parafuso prisioneiro M16x2 mm de material classe 8.8 ISO 898-1, enquanto "Parte B" é uma chapa dobrada feita de material ASTM A36, com espessura de 4.76mm. A função da Parte B é atuar como um dispositivo anti-rotação no conjunto final de montagem. A união entre as partes ocorre por soldagem, seguindo as especificações do projeto e de acordo com a norma ISO 2553 (soldagem e processos afins - representação simbólica em desenhos - juntas soldadas). A solda é realizada em chanfro meio V, em todo o contorno, com acabamento paralelo (usinado). Para o acabamento superficial do conjunto, é aplicado um tratamento de zinco trivalente, com uma camada de espessura variando entre 6 μm a 12 μm .

Figura 6 - Conjunto Fabricado do Parafuso Prisioneiro



Fonte: Próprio Autor

Figura 7 - Imagem do Parafuso Prisioneiro



Fonte: Próprio Autor

4.2.1 Falha no Conjunto

A ruptura ocorrida no parafuso prisioneiro M16x2mm, Classe 8.8, conforme padrão ISO 898-1, foi identificada por meio das figuras 8 e 9. É claramente visível a região da fratura, o que confirma a não conformidade com os aspectos metalúrgicos estabelecidos no projeto específico para esse parafuso.

Figura 9 - Parafuso com Ruptura



Fonte: Próprio Autor

Figura 8 - Parafuso com Ruptura



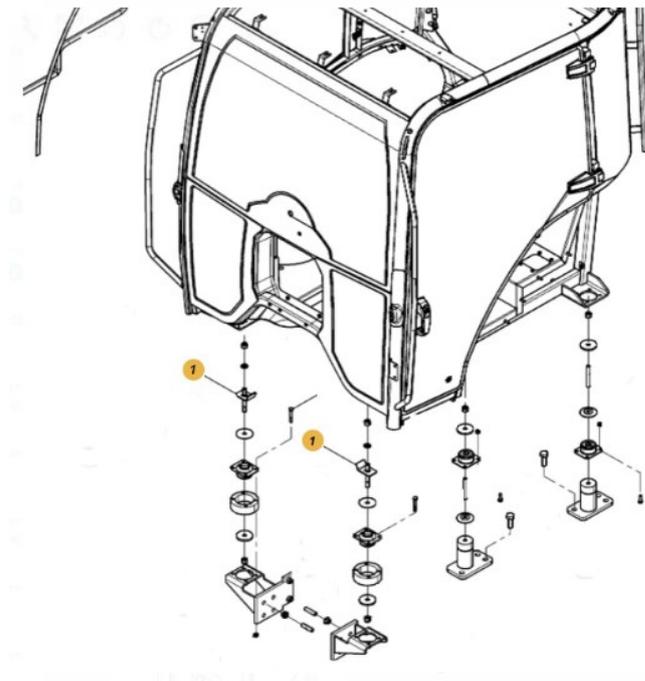
Fonte: Próprio Autor

4.2.2 Condições do Projeto

O parafuso prisioneiro desempenha a função de promover a fixação estrutural entre a cabine e o chassi do veículo. Nesse contexto, a extremidade superior do referido componente é responsável pela fixação da cabine, enquanto a extremidade inferior realiza a união com o chassi. O valor de torque empregado foi determinado de acordo com a norma em vigor durante a fase de concepção do projeto, sendo aplicado por meio de um torquímetro que exerce uma carga de 197 N.m sobre o parafuso prisioneiro.

A figura 10 ilustra a disposição do componente, bem como os elementos envolvidos na junção, sendo o parafuso prisoneiro destacado como o componente de número 1.

Figura 10 - Conjunto de Fixação da Cabine e Chassi



Fonte: Próprio Autor

4.3 Métodos

4.3.1 Corte

Para a análise da falha, realizou-se um corte transversal e longitudinal próximo ao ponto de falha utilizando uma serra de fita modelo MBSAW-1 da marca Struers com uma velocidade de 100 metros por minuto conforme ilustra a figura 11.

Figura 11 - Parafuso em bancada para realização do corte



Fonte: Próprio Autor

4.3.2 Embutimento

Em seguida, procedeu-se ao embutimento do corpo de prova na embutidora metalográfica TEMPOPRESS 2 conforme figura 13. Para isso, inseriu-se a amostra na embutidora e adicionou-se 15 gramas de baquelite Teclago. Uma força de 15 kN foi aplicada na embutidora e determinou-se um tempo de 10 minutos para o processo de aquecimento da baquelite.

Durante o processo, a força de 15 kN foi mantida para manter a compressão do material e formar o molde. Após os 10 minutos, a máquina realizou o resfriamento do material por meio da água. Posteriormente, o corpo de prova embutido no molde foi retirado para análise.

Figura 13 - Adição de baquelite na
TERMOPRESS 2



Fonte: Próprio Autor

Figura 12 - Parafuso após o Corte



Fonte: Próprio Autor

4.3.3 Análise de Metalografia

Após o embutimento e preparação da amostra, foi feito o lixamento da superfície para remover quaisquer marcas ou irregularidades na superfície. A amostra foi então polida com um disco de polimento com suspensão de diamante de 3 μm , seguido por um disco de polimento com suspensão de óxido de alumínio de 1 μm , para garantir uma superfície plana e uniforme. A amostra foi montada em um suporte de resina para facilitar o processo de polimento e para proteger a amostra contra danos durante a preparação.

Após a preparação da amostra, o próximo passo foi o ataque químico. A amostra foi imersa em uma solução de Nital a 2% por 60 segundos para revelar a microestrutura do material. A solução de Nital foi preparada dissolvendo-se 98ml de álcool etílico com 2ml de ácido nítrico concentrado (68-70%), após a mistura no béquer, foi feita a agitação até que o álcool estivesse completamente dissolvido no ácido.

Após o ataque químico, a amostra foi observada em um microscópio metalográfico Olympus PME3 de platina invertida equipado com um sistema de

câmera digital. A análise foi realizada em ampliações de 100X, 200X, 500X e 1000X. As imagens foram capturadas e analisadas para identificação de defeitos presentes na amostra.

4.3.4 Análise de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado utilizando um durômetro Buehler série 5100 para determinar a resistência do material à penetração de um corpo de prova padronizado, utilizando o método de ensaio Vickers. O objetivo deste ensaio foi avaliar a dureza do aço 1045 utilizado na fabricação do parafuso prisioneiro, a fim de verificar se ele apresenta a dureza adequada para suportar as cargas a que será submetido durante o uso.

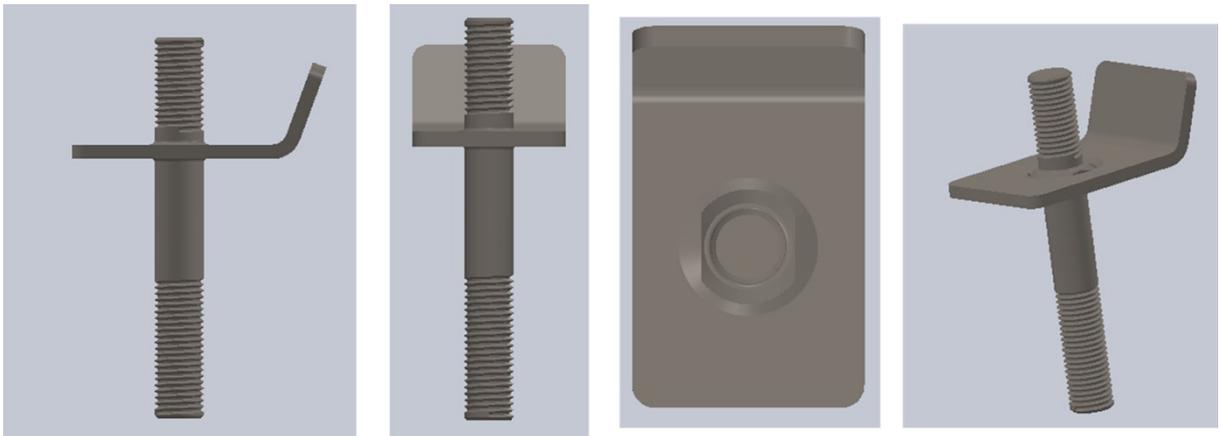
Foi realizada uma preparação prévia da superfície do parafuso prisioneiro, por meio de lixamento com lixas de granulometria crescente, seguida de polimento com pastas abrasivas. Foi selecionado o penetrador adequado para o material, com uma esfera de aço endurecido. O penetrador foi pressionado contra a superfície do parafuso prisioneiro com uma carga inicial de 500 gf (grama-força) durante 10 segundos.

A dureza Vickers foi calculada a partir da diferença entre a profundidade de penetração do penetrador com a carga total e a profundidade de penetração com a carga inicial.

4.3.5 Análise de Elementos Finitos

Foi realizada a modelagem geométrica do parafuso prisioneiro no SolidWorks, utilizando as dimensões e especificações do projeto conforme figura 14. O modelo foi criado em três dimensões, a partir de um desenho técnico detalhado, e incluiu as roscas e demais detalhes geométricos relevantes.

Figura 14 - Modelamento 3D do Parafuso Prisioneiro

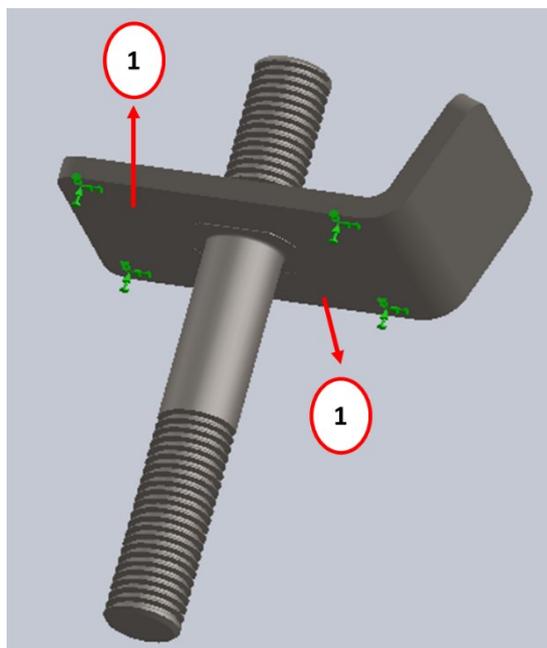


Fonte: Próprio Autor

A adição de restrições e de esforços externos constitui uma etapa posterior, que tem como finalidade atribuir a estrutura as forças atuantes, pontos de restrição e fixação do conjunto estudado. Foram definidas as condições de contorno e cargas a serem aplicadas no modelo, de acordo com os parâmetros reais de uso do parafuso e com base nas informações fornecidas pelo fabricante do material, além de incluir as fixações e suportes necessários para restringir os graus de liberdade do modelo. As condições de carga incluíram as cargas externas e internas aplicadas ao parafuso prisioneiro.

A chapa que constitui o conjunto, foi fixada no software, tendo em vista que ela executa uma função de apoio sob a carroceria do veículo, a figura 15 demonstra a fixação do elemento na região “1”.

Figura 15 - Região de Fixação do Parafuso Prisoneiro



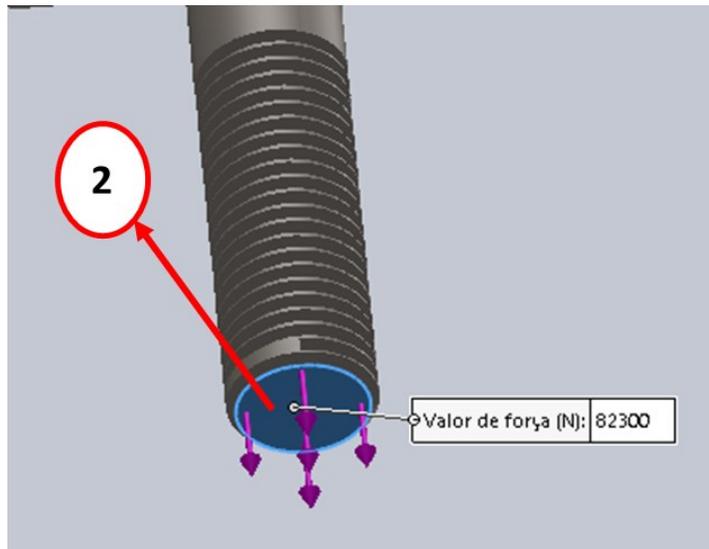
Fonte: Próprio Autor

O parafuso prisoneiro usado no projeto está submetido a variadas cargas, dentre elas estão tração, torque e força de aperto. Se faz necessária a definição e aplicação das solicitações uma vez que esses dados serviram de parâmetros para o ambiente de simulação.

Foram aplicadas as condições de contorno e cargas externas, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante e as condições reais de uso do parafuso. Foi simulada a carga de tração que o parafuso poderia ser submetido durante o uso, os resultados foram analisados com base na norma ISO 898-1, que determina os parâmetros padrão para parafusos a partir das características geométricas.

Adicionou-se ao parafuso uma força axial de 82,3 kN em sua extremidade representando um tracionamento perpendicular a secção transversal, simulando o cenário crítico, de maior carga, a figura 16 demonstra a carga imputada no elemento na região "2".

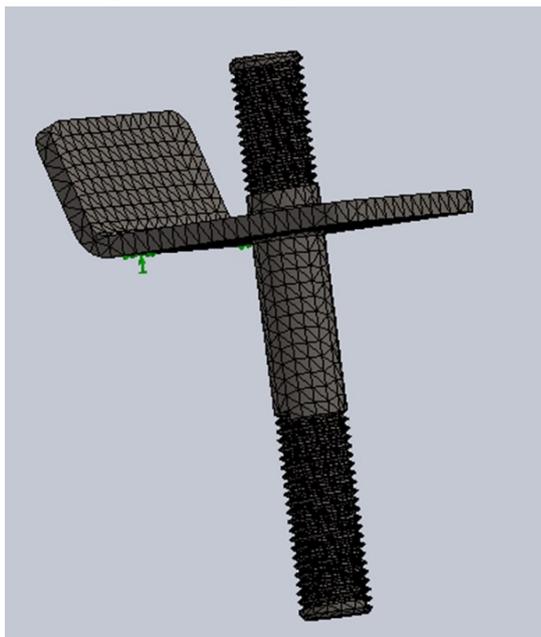
Figura 16 - Região da Aplicação da Força Axial



Fonte: Próprio Autor

Após a modelagem geométrica, foi gerada a malha de elementos finitos, que é uma subdivisão do modelo em pequenos elementos tridimensionais, cada um com propriedades mecânicas definidas. A figura 17 demonstra a malha gerada automaticamente pelo software de análise de elementos finitos, utilizando um algoritmo de geração de malhas tetraédricas.

Figura 17 - Geração de Malha



Fonte: Próprio Autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise de Elementos Finitos

Para a validação do dimensionamento do componente, foram realizados cálculos da torção do elemento devido ao torque, torque máximo e tração gerada devido ao torque. Os valores obtidos serviram de parâmetros para a simulação de elementos finitos bem como para determinação das solicitações que o parafuso pode sofrer no momento da instalação.

5.1.1 Torção no elemento devido ao torque

O torque é um momento que tende a torcer um elemento em torno do seu eixo longitudinal, considerando a condição de operação do parafuso-prisioneiro interpreta-se que a porção medial está fixa e em sua extremidade inferior é aplicado um torque a partir de uma porca (HIBBELER, 2019). Para o parafuso M16 classe 8.8 a maior área de tensão da tração do parafuso é de 157 mm² e a menor área de tensão da tração é de 144 mm² (BUDYNAS; NISBETT, 2016). O elemento está submetido a uma torção devido ao torque, por sua vez essa torção causa uma tensão de cisalhamento determinada pela seguinte equação:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{T \times r}{J}$$

Determinação do raio para a menor área:

$$A_{menor} = \pi \times r^2 \rightarrow r = \frac{\sqrt{A_{menor}}}{\pi}$$

$$r = \frac{\sqrt{144mm^2}}{\pi} = 6,77mm$$

Determinação do raio para a maior área:

$$A_{menor} = \pi \times r^2 \rightarrow r = \frac{\sqrt{A_{maior}}}{\pi}$$
$$r = \frac{\sqrt{157mm^2}}{\pi} = 7,07mm$$

Determinação do momento polar de inércia da área da secção transversal:

$$J = \frac{\pi}{2} \times (6,77^4) = 3.299,70 \text{ mm}^4$$

$$J = \frac{\pi}{2} \times (7,07^4) = 3.924,61 \text{ mm}^4$$

Tensão de cisalhamento máxima para a menor área:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{197.10^3 N.m \times 6,77mm}{3.299,70 \text{ mm}^4} = 404,18 \text{ MPa}$$

Tensão de cisalhamento máxima para a maior área:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{197.10^3 N.m \times 7,07mm}{3.924,62 \text{ mm}^4} = 354,88 \text{ MPa}$$

Determinação do torque máximo para a menor área:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{T \times r}{J} \rightarrow T_{m\acute{a}x} = \frac{J \times \tau_{m\acute{a}x}}{r}$$

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{3.299,70 \text{ mm}^4 \times 640 \text{ Mpa}}{6,77 \text{ mm}} = 312 \text{ N.m}$$

Determinação do torque máximo para a maior área:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{T \times r}{J} \rightarrow T_{m\acute{a}x} = \frac{J \times \tau_{m\acute{a}x}}{r}$$

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{3.924,62 \text{ mm}^4 \times 640 \text{ Mpa}}{7,07 \text{ mm}} = 355 \text{ N.m}$$

Para os valores de tensão de cisalhamento máxima devido ao toque foram obtidos os valores de 404,18 MPa para menor área e 354,88 MPa para a maior área de secção transversal do parafuso, ambos valores atendem a norma que determina a máxima tensão de escoamento de 640 MPa quanto a tensão máxima de escoamento de 725 MPa, fornecida pelo fabricante do material.

O torque definido na condição de projeto de 197 N.m é inferior ao torque máximo calculado de 312 N.m e 355 N.m, coeficiente de segurança de 1,80, dessa forma o valor adotado no projeto está dentro do permitido.

5.1.2 Tração gerada devido força de aperto

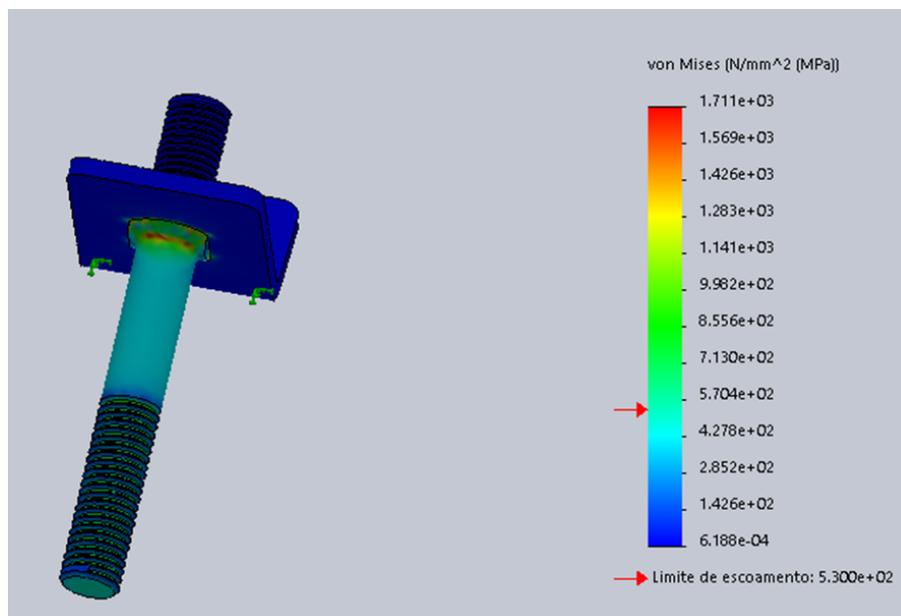
O termo pré-carga se refere ao carregamento em um parafuso após ser submetido a um torque, ou seja, a tração gerada devido a uma força de aperto (BUDYNAS; NISBETT, 2016). O parafuso estudado está submetido a uma força de pré-carga determinada pela seguinte equação:

$$T = k \times F_i \times \phi_n \rightarrow F_i = \frac{T}{k \times \phi_n}$$

$$F_i = \frac{197 \text{ N.m}}{0,15 \times (0,016 \text{ m})} = 82,1 \text{ kN}$$

A força de pré-carga constitui o valor máximo de força axial aplicado no elemento resultando em 82,1 kN, essa força foi aplicada dentro do ambiente de simulação resultando uma tensão no elemento de acordo com a figura 18.

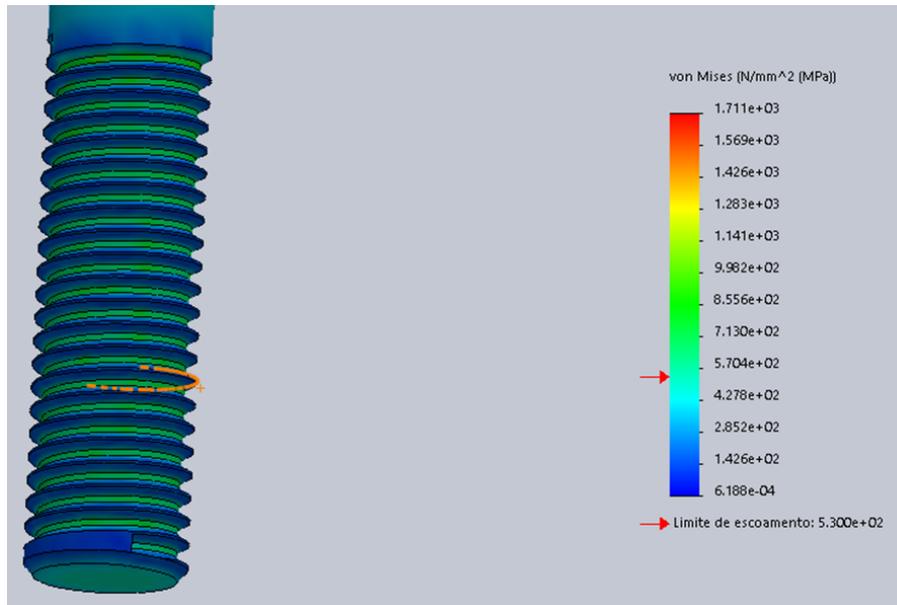
Figura 18 - Simulação da Máxima Força Axial



Fonte: Próprio Autor

Por meio da simulação, foi possível determinar os níveis de tensão na região da raiz e no vale da rosca. Observou-se que o maior valor de tensão está localizado na raiz da rosca, apresentando uma média de 855 Mpa conforme a figura 19. Esse valor excede a resistência à tração de 800 MPa especificada pela norma, bem como o limite de resistência de 835 MPa indicado pelo fabricante.

Figura 19 - Resultado da Tensão Gerada na Rosca

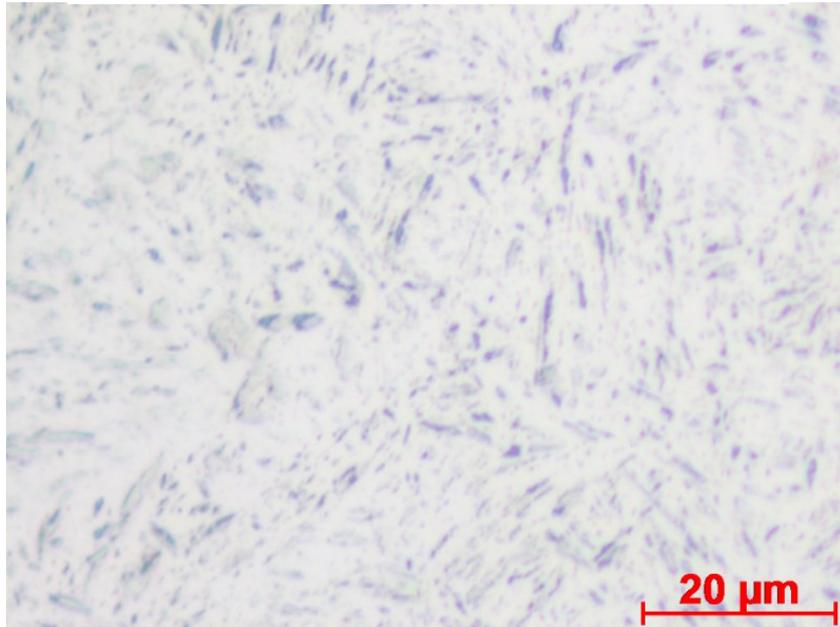


Fonte: Próprio Autor

5.2 Análise de Metalografia

Com base na análise metalográfica realizada na amostra, podemos concluir que o tratamento térmico aplicado ao material está inadequado ou inexistente. Isso é evidenciado pela microestrutura granular observada, composta por grãos martensíticos em formato de agulha com tamanhos variados nas ampliações de 100X, 200X, 500X e 1000X conforme figuras 20, 21 e 22.

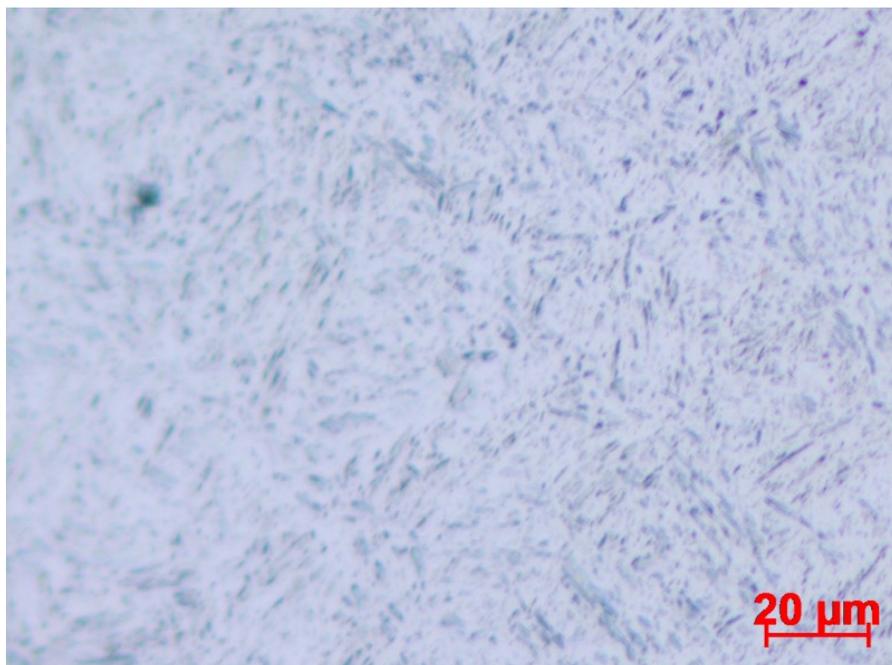
Figura 20 - Análise Metalográfica com ampliação de 1000x



Fonte: Próprio Autor

A presença de grãos martensíticos em formato de agulha indica que o material não passou por um processo de têmpera adequado. Na ausência de tratamento térmico adequado, os grãos do material não se transformam completamente em uma estrutura mais fina e homogênea, como a austenita ou a perlita.

Figura 21 - Análise Metalográfica com ampliação de 500x



Fonte: Próprio Autor

Além disso, a distribuição heterogênea dos grãos em toda a superfície da amostra sugere uma falta de controle na temperatura e tempo de tratamento térmico. Em um processo de tratamento térmico adequado, espera-se uma distribuição mais uniforme dos grãos na microestrutura.

A ausência de inclusões ou outras descontinuidades visíveis indica que a qualidade da matéria-prima utilizada é adequada, mas a falta de um tratamento térmico adequado comprometeu as propriedades estruturais do material.

Figura 22 - Análise Metalográfica com ampliação de 200x



Fonte: Próprio Autor

5.3 Análise de Dureza

Após a realização do ensaio de dureza no parafuso prisioneiro fabricado com aço 1045 temperado e revenido, os resultados obtidos em HV estão mencionados na tabela 1. Conforme a norma ISO 898-1, que estabelece os requisitos para parafusos de aço de classe de resistência 8.8, a dureza recomendada está entre 250 HV a 335 HV.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o parafuso prisioneiro apresenta dureza superior à recomendada pela norma, indicando uma fragilização no

elemento. A dureza excessiva pode resultar em uma maior suscetibilidade a trincas e rupturas, comprometendo a resistência e a integridade do parafuso prisioneiro em sua aplicação.

Tabela 1 - Análise de Dureza

AMOSTRAS	DUREZA (VICKERS)
1	487
2	465
3	469
4	454
5	454
MÉDIA	466

Fonte: Próprio Autor

Diante dos resultados do ensaio de dureza, fica evidente que o tratamento térmico aplicado ao parafuso prisioneiro não foi adequado para alcançar a dureza mínima recomendada. Essa inadequação pode ter ocorrido devido a variações nos parâmetros de temperatura e tempo durante o tratamento, resultando em uma microestrutura com uma alta concentração de fases endurecedoras. Como consequência, o parafuso prisioneiro apresenta uma dureza excessiva que está além dos limites estabelecidos pela norma.

Essa condição de dureza inadequada compromete a capacidade de absorção de cargas e a resistência à fadiga do parafuso prisioneiro, tornando-o mais propenso a falhas prematuras. Recomenda-se a revisão do processo de tratamento térmico e o ajuste dos parâmetros de têmpera e revenimento, a fim de alcançar a dureza adequada e garantir a conformidade com os requisitos de resistência especificados pela norma ISO 898-1.

5.4 Discussões

Para chegar a essas conclusões, foram utilizados procedimentos metodológicos específicos, como metalografia, ensaio de dureza e análise de elementos finitos. A metalografia permitiu a observação detalhada da estrutura do material, enquanto o ensaio de dureza quantificou a resistência do material à penetração. A análise de elementos finitos proporcionou uma compreensão mais precisa do comportamento estrutural e da distribuição de tensões no componente estudado.

Uma possível solução para resolver o problema da alta dureza do aço 1045 é realizar um tratamento térmico adequado, como a austenitização seguida de um resfriamento controlado. O tratamento térmico pode ser projetado para modificar a microestrutura e, conseqüentemente, a dureza do material. Através do controle preciso da temperatura e do tempo de tratamento, é possível obter uma estrutura mais adequada, como a microestrutura ferrítica ou perlítica. A escolha entre essas microestruturas dependerá das propriedades desejadas para o material.

Para obter uma microestrutura ferrítica, o aço 1045 deve ser aquecido acima da temperatura crítica (aproximadamente 830°C a 870°C) e, em seguida, resfriado lentamente. Isso permitirá que a austenita se transforme em ferrita à temperatura ambiente.

Por outro lado, para obter uma microestrutura perlítica, o aço 1045 também deve ser aquecido acima da temperatura crítica, seguido de um resfriamento rápido. Esse resfriamento rápido fará com que a austenita se transforme em perlita, que é uma mistura laminar de ferrita e cementita.

É importante ressaltar que a implementação dessa solução requer uma avaliação cuidadosa das propriedades e requisitos específicos do material em questão, bem como a definição precisa dos parâmetros de tratamento térmico. Portanto, é recomendado o envolvimento de especialistas em metalurgia e engenharia de materiais no processo de desenvolvimento e aplicação do tratamento térmico.

Além da solução mencionada, também é fundamental investigar outras possíveis abordagens para resolver o problema da alta dureza do material, como a

otimização dos processos de fabricação, seleção de ligas ou materiais alternativos com propriedades mais adequadas ou até mesmo a aplicação de tratamentos superficiais específicos.

A quantidade limitada de amostras utilizadas pode restringir a representatividade dos resultados e não abranger todas as possíveis variações do material em análise. Além disso, a falta de acompanhamento no processo de montagem e no tratamento térmico pode introduzir variabilidades e incertezas nos resultados. Portanto, recomenda-se que estudos futuros considerem uma amostragem mais ampla e contemplem o controle de todas as etapas do processo, desde a fabricação até a montagem.

No entanto, apesar das limitações, este estudo contribui significativamente para o avanço do conhecimento na área de análise de materiais. Os resultados obtidos fornecem novas informações e insights valiosos para pesquisadores e profissionais envolvidos nesse campo. Além disso, as descobertas deste estudo têm potenciais aplicações práticas, pois podem contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e inovadoras para problemas reais em diversas áreas de atuação, como a indústria automotiva, aeroespacial e de engenharia estrutural. A compreensão aprofundada dos fatores que influenciam a dureza e a resistência de materiais em determinadas condições de projeto é fundamental para garantir a segurança e a confiabilidade de componentes e estruturas.

6. CONCLUSÃO

Com base nas informações coletadas e analisadas neste estudo, conclui-se que a dureza medida no ensaio excedeu significativamente o valor estabelecido pela norma e as condições de projeto, com um valor de 466 Vickers em contraste com o intervalo recomendado de 250 - 335 Vickers. A análise metalográfica revelou a predominância da microestrutura martensítica, sugerindo uma possível influência na dureza observada.

Conforme resultados obtidos na simulação, pode-se concluir que a tensão gerada pelo torque aplicado excedeu o limite estabelecido pela norma ISO 898-1 e pelas circunstâncias de projeto, atingindo 855 MPa em tração. Essa tensão ultrapassou tanto o limite de resistência à tração de 800 MPa estipulado pela norma, quanto o limite de resistência de 835 MPa indicado pelo fabricante. Esses valores elevados de tensão podem acarretar problemas estruturais e de desempenho ao longo do tempo.

Diante desses resultados, recomenda-se a realização de um exame de difração de raios-X (DRX) para identificar a fase presente na microestrutura. Esse procedimento auxiliará na decisão do melhor tratamento térmico a ser aplicado durante o processo de fabricação dos parafusos de aço 1045. Um tratamento térmico adequado ajudará a melhorar a dureza e a resistência à tração dos parafusos, evitando problemas futuros e garantindo sua integridade estrutural e desempenho satisfatório.

7. REFERÊNCIAS

ABREU, S. P. S. DE. **Elementos de União: Uma Introdução a Parafusos de Fixação Aplicados na Mecânica**. Contagem: Faculdade Pitagoras, 10 dez. 2018.

ANDERSON, T. **Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications: Fundamentals and Applications, Fourth Edition**. 4º Edição ed. [s.l.] CRC Press, 2017. v. 4

ASKELAND, D.; WRIGHT, W. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. [s.l: s.n.]. v. 3º Edição

BARROZO, S.; GARCIA, R.; WITZLER, M. J. **Um Procedimento Numérico-Computacional Como Auxiliar Na Análise Das Propriedades E Nos Processos De Aperto De Elementos De Fixação**. São Paulo: I Congresso de Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade, 2010.

BATHE, K.-J. **Finite Element Procedures**. [s.l.] Klaus-Jürgen Bathe, 2014.

BUDYNAS, R.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. [s.l.] AMGH, 2016. v. 10º Edição

CALLISTER, W. J.; RETHWISCH, D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Abordagem Integrada**. 5º Edição ed. [s.l.] LTC, 2020.

Categorias de Elementos de Fixação. Disponível em: <<https://www.parafusofacil.com.br/downloads/>>. Acesso em: 31 mar. 2023.

DAUDT, L. **Principais Elementos de Fixação Usados na Indústria.** Disponível em: <<https://rufix.team/informativos/os-principais-elementos-de-fixacao-usados-na-industria-e-suas-aplicacoes/>>. Acesso em: 19 mar. 2023.

DRAGONI, E. Effect of Thread Pitch and Frictional Coefficient on the Stress Concentration in Metric Nut-Bolt Connections. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 116, n. 1, p. 21–27, 1 fev. 1994.

ELISEI, C. DE C. **Caracterização Mecânica E Microestrutural De Um Aço De Baixo Carbono.** Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2008.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais.** 10ª Edição ed. [s.l.] Pearson, 2019.

ISMAIL, A.; AMINE, K.; AHMED, S. Effect of Tempering Temperature on the Mechanical Properties and Microstructure of low alloy Steel DIN 41Cr4. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 13, n. 1, p. 9–14, maio 2019.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas.** 5ª Edição ed. [s.l.] LTC, 2016.

MARTINS, U. M. **Estudo do Comportamento Mecânico de Aços Trip Após Tratamento de Têmpera e Partição.** Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

NUNES, I. P. Influência de tratamentos térmicos de têmpera a partir de austenitização intercrítica no comportamento mecânico de um aço inoxidável bifásico do tipo UNS S41003. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 1 abr. 2020.

ORDÓÑEZ, R. E. C. Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004.

PEREIRA, R. M. Elaboração da Curva de Revenimento do Aço 1045 Modificado. Lorena: Universidade de São Paulo - USP, 2015.

PISSAIA, V. R. Revisão dos Itens de Segurança e das Especificações do Aperto em Juntas Parafusadas. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2014.

PIZZIO, É. Avaliação da Vida em Fadiga de Uniões Parafusadas. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

RESENDE, W. C. T. Estudo da Resistência à Corrosão por Pites dos Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 301 e AISI 304 Submetidos ao Processo de Soldagem TIG. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.

SAHADI, J. V. Estudo da Fratura Dúctil Através de Modelos Dependentes do Terceiro Invariante do Tensor Desviador. Brasília: Universidade de Brasília, 1 ago. 2015.

ZANOTTO, G. R. **Análise de Sistemas de Fixação de Poltronas em Minionibus.**
Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2015.

ZIENKIEWICZ, O.; TAYLOR, R. **The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals.** 7^o Edition ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2013.