

**BRUNO MIKIO FUJIWARA MARQUES**

**Análise do coeficiente de torque e do pré-carregamento resultante em juntas  
aparafusadas de compósito polimérico reforçado com fibra de carbono**

**Bruno Mikio Fujiwara Marques**

**Análise do coeficiente de torque e do pré-carregamento resultante em juntas  
aparafusadas de compósito polimérico reforçado com fibra de carbono**

Tese de Doutorado apresentado ao Conselho de Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá - SP  
2022

M357a Marques, Bruno Mikio Fujiwara  
Análise do coeficiente de torque e do pré-carregamento resultante em juntas aparafusadas de compósito polimérico reforçado com fibra de carbono / Bruno Mikio Fujiwara Marques – Guaratinguetá, 2022  
125 f. : il.  
Bibliografia: f. 101-107

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Materiais compostos. 2. Juntas (Engenharia). 3. Torque. 4. Análise de elementos finitos. I. Título

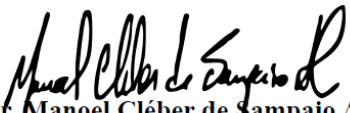
CDU 620.1(043)

BRUNO MIKIO FUJIWARA MARQUES

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



**PROF. DR. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA**

Orientador / UNESP/FEG

participou por videoconferência



**PROF. DR. EDSON COCCHIERI BOTELHO**

UNESP/FEG

participou por videoconferência



**PROF. DR. LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN**

UNESP/FEG

participou por videoconferência



**PROFa. DRa. MIRABEL CERQUEIRA REZENDE**

Unifesp

participou por videoconferência



**PROF. DR. ANTONIO CARLOS ANCELOTTI JUNIOR**

Unifei

participou por videoconferência

Março de 2022

## **DADOS CURRICULARES**

### **BRUNO MIKIO FUJIWARA MARQUES**

<b>NASCIMENTO</b>	25.09.1984 – Jacareí / SP
<b>FILIAÇÃO</b>	Heraldo Rodrigues Marques Luiza Toshiko Fujiwara Marques
<b>2002/2006</b>	Graduação em Engenharia Mecânica UNESP – Campus Guaratinguetá
<b>2010/2012</b>	Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Mestrado UNESP – Campus Guaratinguetá

dedico este trabalho  
de modo especial, à minha família

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela sua misericórdia e graças concedidas.

À minha esposa *Thaís* pelo suporte emocional e técnico, participando de atividades importantes deste trabalho e minhas filhas *Cecília e Camila*, que estiveram sempre ao meu lado em todos os momentos. Amo vocês!

ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva* pela sua orientação, dedicação e apoio para que este estudo pudesse ser realizado;

aos meus pais *Heraldo e Luiza*, que acompanharam toda a trajetória desta fase e sempre estiveram presentes, ajudando nas dificuldades e comemorando as conquistas;

à *Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mirabel Cerqueira Rezende*, pela ajuda incondicional na obtenção dos materiais e disponibilidade no suporte técnico;

ao *Prof. Dr. Geraldo Mauricio Cândido*, pelo ensinamento e contribuição nas análises fractográficas;

ao técnico *Walter Tupinambá* pelo apoio na execução do ensaio realizado na UNESP – Guaratinguetá;

à empresa *Alltec Materiais Compostos*, pela doação dos materiais e disponibilização de todos os recursos para a produção dos corpos de prova;

à empresa *Tecplas*, pela realização dos ensaios não-destrutivos por ultrassom.

“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa. Por isso aprendemos sempre.”

Paulo Reglus Neves Freire

## RESUMO

Para juntas aparafusadas de alta responsabilidade, a aplicação de uma força inicial de tração no parafuso, denominada pré-carregamento, é essencial devido à compressão aplicada às partes unidas, aumentando o atrito entre elas e melhorando a resistência mecânica da junta tanto submetida à carga externa de tração quanto à de cisalhamento. Além disso, sabe-se que o torque necessário para produzir um determinado pré-carregamento é função da geometria da rosca e dos coeficientes de atrito dos materiais envolvidos. Essas variáveis combinadas na equação de obtenção do torque denominam-se coeficiente de torque e o seu valor influencia diretamente o pré-carregamento. No entanto, para juntas de materiais compósitos, os valores do coeficiente de torque são considerados em poucos estudos e de maneira aproximada e superficial, sendo comum utilizar os resultados obtidos para juntas de materiais metálicos como referência, acarretando em componentes de materiais compósitos com baixa eficiência e dimensionados incorretamente. Dessa forma, este trabalho apresenta um estudo sobre juntas aparafusadas de materiais compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de carbono, a fim de analisar e definir os coeficientes de torque aplicáveis a esses materiais, como também avaliar os efeitos de diferentes valores de torque sobre o laminado, demonstrando a relação entre a carga de prova do parafuso e o pré-carregamento. As análises contemplaram a utilização do método analítico geral e de Motosh, do método dos elementos finitos com modelos tridimensionais e equacionamentos não-lineares, contemplando contatos e aplicação do critério de falha de Hashin. Também foram realizados ensaios experimentais de aplicação de torque, de resistência da junta em tração e análise fractográfica. Os resultados dos ensaios de aplicação de torque demonstraram que o coeficiente de torque aplicável para a junta de material compósito é aproximadamente 50% maior do que o aplicado para juntas metálicas, independentemente do valor de torque utilizado. Assim, os pré-carregamentos obtidos experimentalmente apresentaram valores até 39,4% menores do que os calculados utilizando o coeficiente de torque recomendado para juntas metálicas. Outra contribuição deste trabalho foi a recomendação na utilização de pré-carregamentos entre 68% e 100% da carga de prova do parafuso. No entanto, os resultados dos ensaios de resistência da junta em tração indicaram que não houve aumento da carga de falha por tração utilizando um pré-carregamento de 100% da carga de prova do parafuso, quando comparado com corpos de prova submetidos a pré-carregamento com relação de 80,2%, não apresentando vantagem deste último para condições de carregamentos estáticos. Além disso, a análise fractográfica revelou que os diferentes pré-carregamentos aplicados não influenciaram nos modos de falha observados na superfície de fratura dos corpos de prova.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compósito. Juntas aparafusadas. Elementos finitos. Torque. Pré-carregamento. Fibra de carbono. Epóxi. Coeficiente de torque.

## ABSTRACT

Considering high responsibility bolted joints, the application of initial tension force entitled preload is essential due the compression effect over the joint components, increasing the friction forces between them and improving the joint mechanical strength even when it is submitted to an external tensile load than a shear load. Moreover, the torque to generate the preload is dependent on the thread geometry and the coefficient of friction between the involved materials. These variables in the equation to obtain the torque is entitled coefficient of torque and its value directly influences the preload. However, for composite material joints, the coefficients of torque are considered approximately and superficially in few studies, using the values for metallic material joints as a reference, resulting in low efficient components of composite material and incorrectly dimensioned. Thus, this work presents a study of bolted joints in carbon fiber reinforced epoxy to analyze and determine the applicable coefficients of torque for this type of material, and the effect of different torque values over the laminate indicating the relation between the bolt proof load and the preload. The analysis regarded the application of the general and Motosh analytical methods, finite element method with tridimensional models and non-linear equations, contact between the components and the use of Hashin failure criterion. It was also performed torque application tests, tension tests and fractography analysis. The torque application tests results showed the coefficient of torque for composite material joints is approximately 50% higher than the applied coefficient in metallic joints, independently of the torque value. Thus, the experimental preloads values were 39,4% lower than the ones obtained analytically using the coefficient used for metallic joints. Another contribution of this study was the recommendation to apply preloads between 68% to 100% of the bolt proof load. However, the tensile tests results demonstrated that the tensile failure load did not increase due a preload corresponding a 100% of bolt proof load in comparison with specimens submitted to 80,2% of proof load, not presenting an advantage for static load conditions. Furthermore, the fractographic analysis showed that the different preloads do not present an influence in the observed failure modes on the fracture surfaces of the specimens.

**KEYWORDS:** Composite. Bolted joint. Torque. Preload. Finite element. Carbon fiber. Epoxy. Coefficient of torque.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma das principais etapas do trabalho. ....	22
Figura 2 – Principais estilos de tecido. ....	24
Figura 3 – Carregamento no parafuso em uma junta submetida a uma força axial. ....	26
Figura 4 – Modos de falha em juntas aparafusadas. ....	27
Figura 5 – Representação do pré-carregamento sobre a junta. ....	29
Figura 6 – Configuração do corpo de prova para o ensaio de resistência da junta em tração. .	39
Figura 7 – Parafuso NAS6204-4 .....	40
Figura 8 – Porca NASM21042 .....	41
Figura 9 – Arruela NAS1149 .....	42
Figura 10 – Laminação manual. ....	43
Figura 11 – Representação dos materiais utilizados para a instalação da bolsa de vácuo. ....	43
Figura 12 – Ferramental e os laminados sob compactação prévia. ....	44
Figura 13 – Ciclo de cura utilizado no processamento dos laminados. ....	44
Figura 14 – Posicionamento do <i>tab</i> sobre o laminado. ....	45
Figura 15 – Processo de colagem do <i>tab</i> sobre o laminado. ....	45
Figura 16 – Equipamento de corte dos corpos de prova. ....	46
Figura 17 – Corpo de prova. ....	47
Figura 18 – Equipamento Olympus Omniscan SX. ....	48
Figura 19 – Chave de aperto instrumentada .....	50
Figura 20 – Esquema de instalação da arruela célula de carga. ....	51
Figura 21 – Sistema de aquisição de dados .....	52
Figura 22 – Desenho de conjunto do corpo de prova. ....	53
Figura 23 – Máquina de ensaios universais. ....	54
Figura 24 – Modelo geométrico das placas. ....	56
Figura 25 – Inserção das propriedades mecânicas do material das placas. ....	57
Figura 26 – Propriedades do elemento laminado sólido. ....	57
Figura 27 – Editor de configuração de camadas. ....	58
Figura 28 – Qualidade do elemento. ....	59
Figura 29 – Malha de elementos finitos das placas .....	59
Figura 30 – Modelos geométricos do parafuso, porca e arruela. ....	60
Figura 31 – Inserção das propriedades mecânicas do material das arruelas. ....	61
Figura 32 – Inserção das propriedades mecânicas do material das porcas e dos parafusos. ....	61

Figura 33 – Representação do elemento tetraédrico com 10 nós. ....	62
Figura 34 – Malha de elementos finitos dos parafusos, porcas e arruelas.....	63
Figura 35 – Definição das restrições na extremidade fixa do corpo de prova.....	63
Figura 36 – Definição das restrições na extremidade móvel do corpo de prova.....	64
Figura 37 –Restrições e carregamento no corpo de prova.....	64
Figura 38 –Regiões de aplicação do pré-carregamento.....	65
Figura 39 – Regiões de contato .....	66
Figura 40 –Parâmetro de contato – Exemplo do contato entre arruelas e placas .....	67
Figura 41 –Arruela célula de carga - instalação .....	71
Figura 42 – Deformação plástica dos filetes de rosca – Configuração 3 .....	75
Figura 43 – Pré-carregamentos referentes aos torques médios experimentais e coeficiente de torque igual a 0,2 .....	77
Figura 44 – Mapa de tensões nos laminados – LC1, LC2 e LC3 [MPa].....	79
Figura 45 – Mapa de tensões nos parafusos – LC1, LC2 e LC3 [MPa].....	80
Figura 46 – Tensão normal – Laminados [MPa]. ....	81
Figura 47 – Elementos nas regiões de falha do laminado. ....	82
Figura 48 – Mapa de tensões nos parafusos – LC4, LC5 e LC6 [MPa].....	83
Figura 49 – Representação da mudança de forma do corpo de prova. ....	84
Figura 50 – Representação da aplicação do torque para as configurações 1 e 2.....	85
Figura 51 – Representação da aplicação do torque para a configuração 3.....	86
Figura 52 – Corpo de prova durante o ensaio de resistência da junta em tração.....	87
Figura 53 – Corpo de prova após o ensaio de resistência da junta em tração – modo de falha por tração. ....	88
Figura 54 – Corpo de prova após o ensaio de resistência da junta em tração – modo de falha por esmagamento.....	88
Figura 55 – Regiões das análises fractográficas. ....	89
Figura 56 – Análise por MEV da superfície de fratura por tração – Configuração 1.....	91
Figura 57 – Análise por MEV da superfície de fratura por tração – Configuração 2.....	92
Figura 58 – Análise por MEV da superfície de fratura por tração – Configuração 3.....	93
Figura 59 – Análise por MEV da superfície do furo – Configuração 1.....	94
Figura 60 – Análise por MEV da superfície do furo – Configuração 2.....	95
Figura 61 – Análise por MEV da superfície do furo – Configuração 3.....	96
Figura 62 – Curvas carregamento-deslocamento obtidas nos ensaios de resistência da junta em tração. ....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do material SE 84LV RC416T (GURIT LTD, 2017). ....	38
Tabela 2 – Dimensões dos corpos de prova em [mm]. .....	39
Tabela 3 – Dimensões do parafuso em [mm]. .....	40
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do material do parafuso e da porca.....	40
Tabela 5 – Dimensões da porca em [mm]. .....	41
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do material da arruela. ....	41
Tabela 7 – Dimensões da arruela em [mm]. .....	42
Tabela 8 – Parâmetros dos métodos analíticos .....	49
Tabela 9 – Configurações do ensaio de aplicação de torque .....	51
Tabela 10 – Configurações do ensaio de tração.....	53
Tabela 11 – Resistência de prova, carga de prova e carga de escoamento do parafuso .....	69
Tabela 12 – Pré-carregamentos.....	69
Tabela 13 – Torques obtidos analiticamente.....	70
Tabela 14 – Resultados da verificação da calibração .....	71
Tabela 15 – Resultados do ensaio de torque – Configuração 1 .....	72
Tabela 16 – Torques calculados analiticamente versus torque médio experimental – configuração 1 .....	73
Tabela 17 – Resultados do ensaio de torque – Configuração 2.....	73
Tabela 18 – Resultados do ensaio de torque – Configuração 3.....	74
Tabela 19 – Torques calculados analiticamente versus torque médio experimental – configuração 2 .....	75
Tabela 20 – Torques calculados analiticamente versus torque médio experimental – configuração 3 .....	75
Tabela 21 – Casos de carregamentos.....	78
Tabela 22 – Critério de von Mises -Tensões.....	79
Tabela 23 – Forças de tração para falha.....	82
Tabela 24 – Critério de von Mises -Tensões.....	82
Tabela 25 – Valores médios das forças máximas e os respectivos deslocamentos.....	97

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AIA	Aerospace Industries Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASM	American Society for Metals
CDP	Corpo de prova
CPRF	Compósitos poliméricos reforçados com fibra
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
MMPDS	Metallic Materials Properties Development and Standardization
NAS	National Aerospace Standard

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Metade do ângulo da rosca
$\beta$	Ângulo de hélice
$\sigma$	Tensão normal
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\mu$	Coeficiente de atrito entre os filetes
$\mu_b$	Coeficiente de atrito entre as superfícies da porca ou arruelas e o componente unido
$d$	Diâmetro nominal da rosca / diâmetro do furo
$d_m$	Diâmetro médio da rosca
$e$	Distância de borda
$E_1$	Módulo Longitudinal
$E_2$	Módulo Transversal
$F$	Força normal
$G_{ij}$	Módulo de Cisalhamento
$F_i$	Pré-carregamento
$K$	Coeficiente de torque
$\tau_{s12}$	Resistência ao Cisalhamento no Plano
$\tau_{s13}$	Resistência ao Cisalhamento Interlaminar
$T$	Torque de aperto
$w$	Largura da junta
$\sigma_{1c}$	Resistência à Compressão Longitudinal
$\sigma_{1t}$	Resistência à Tração Longitudinal
$\sigma_{2c}$	Resistência à Compressão Transversal
$\sigma_{2t}$	Resistência à Tração Transversal

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS E ESTADO DA ARTE .....	17
1.2	MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO .....	20
1.3	OBJETIVOS .....	20
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	20
1.4	ESTRUTURA DA TESE.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	23
2.1	MATERIAL COMPÓSITO.....	23
2.2	JUNTAS APARAFUSADAS.....	25
<b>2.2.1</b>	<b>Coefficiente de torque e pré-carregamento</b> .....	28
2.3	CRITÉRIOS DE FALHAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS.....	31
<b>2.3.1</b>	<b>Critério da máxima tensão</b> .....	33
<b>2.3.2</b>	<b>Critério de Tsai-Wu</b> .....	34
<b>2.3.3</b>	<b>Critério de Tsai-Hill</b> .....	34
<b>2.3.4</b>	<b>Critério de Hashin</b> .....	35
<b>2.3.5</b>	<b>Critério de Hoffman</b> .....	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	38
3.1	CORPO DE PROVA E MATERIAL .....	38
3.2	PROCESSAMENTO DO CORPO DE PROVA .....	42
3.3	ANÁLISE POR ULTRASSOM .....	47
3.4	MÉTODO ANALÍTICO.....	48
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS .....	49
<b>3.5.1</b>	<b>Ensaio para análise de torque e pré-carregamento</b> .....	49
<b>3.5.2</b>	<b>Ensaio de resistência da junta em tração</b> .....	52
3.6	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	54
<b>3.6.1</b>	<b>Modelagem das placas</b> .....	55
3.6.1.1	Malha.....	58
<b>3.6.2</b>	<b>Modelagem dos parafusos, porcas e arruelas</b> .....	60
3.6.2.1	Malha.....	62
<b>3.6.3</b>	<b>Condições de contorno</b> .....	63
<b>3.6.4</b>	<b>Contato</b> .....	65
3.7	ANÁLISE FRACTOGRÁFICA .....	68

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	69
4.1	MÉTODO ANALÍTICO.....	69
4.2	ENSAIO PARA ANÁLISE DE TORQUE E PRÉ-CARREGAMENTO .....	70
4.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	78
4.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA JUNTA EM TRAÇÃO .....	84
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	98
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	99
5.2	PRODUÇÕES CIENTÍFICAS GERADAS .....	99
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	101
	<b>APÊNDICE A – Análises estatísticas</b> .....	108
	<b>ANEXO A – Relatórios dos ensaios por ultrassom realizados nos laminados</b> ..	113
	<b>ANEXO B – Relatórios dos ensaios por ultrassom após ensaio para análise de torque e pré-carregamento</b> .....	124

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E ESTADO DA ARTE

Na indústria aeronáutica, juntas aparafusadas são largamente utilizadas e, normalmente, os parafusos são submetidos a cargas de tração e cisalhamento após uma força inicial de tração, denominada pré-carregamento, ter sido aplicada (LIU *et al.*, 2018). Essa força inicial é gerada devido ao torque de aperto submetido ao parafuso ou à porca e, seu objetivo é melhorar a resistência à carga de tração externa e aumentar o atrito entre as partes unidas devido à compressão aplicada, o qual influencia na resistência à carga de cisalhamento. Hizam *et al.* (2018) apresentaram um estudo em juntas aparafusadas em compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro, submetidas a um torque de 25 N.m, que indicou um aumento de mais de 50% da eficiência da junta quando comparada àquelas não torquedadas. Além disso, o pré-carregamento também proporciona um aumento na resistência à fadiga da junta, uma vez que tensões compressivas são geradas nas partes unidas e a amplitude do carregamento cíclico no parafuso diminui (WELCH, 2019). No entanto, um pré-carregamento excessivo pode gerar deformações plásticas ou até mesmo a falha do parafuso; por outro lado, um pré-carregamento insuficiente pode gerar uma força de união não adequada (YU *et al.*, 2018) (YU *et al.*, 2015).

A medição do pré-carregamento é uma atividade relativamente complexa e de difícil execução durante o processo de montagem de uma junta. A prática comumente aplicada é a utilização do torquímetro para controlar o torque aplicado no parafuso ou porca (OBERG *et al.*, 2020). Aproximadamente 90% do torque de aperto é direcionado a reagir aos atritos entre os componentes da junta (NASSAR *et al.*, 2006 *apud* HWANG, 2013) sendo, portanto, apenas uma pequena parte convertida em forças de fixação. Assim, a relação entre o torque aplicado e o pré-carregamento é de extrema importância para a confiabilidade e o dimensionamento de uma junta aparafusada, principalmente para aquelas de alta responsabilidade estrutural.

A relação teórica entre torque e pré-carregamento pode ser representada pela equação (1) (TOBALINA-BALDEON *et al.*, 2021) (YU *et al.*, 2018) (BUDYNAS; NISBETT, 2016):

$$T = K.F_i.d \quad (1)$$

onde  $T$  é o torque aplicado,  $K$  é o coeficiente de torque,  $F_i$  é o pré-carregamento e  $d$  é o diâmetro nominal da rosca.

O coeficiente de torque é função da geometria da rosca e dos coeficientes de atrito dos materiais envolvidos. Budynas e Nisbett (2016) consideram a relação entre o efeito do atrito

entre os filetes de rosca e o efeito do atrito entre a cabeça do parafuso ou porca e as arruelas conforme a equação (2):

$$K = \left[ \left( \frac{d_m}{2 \cdot d} \right) \cdot \left( \frac{\tan \beta + \mu \cdot \sec \alpha}{1 - \mu \cdot \tan \beta \cdot \sec \alpha} \right) + 0,625 \cdot \mu_b \right] \quad (2)$$

onde  $d_m$  é o diâmetro médio da rosca,  $d$  é o diâmetro nominal da rosca,  $\beta$  é o ângulo de hélice,  $\alpha$  é a metade do ângulo da rosca,  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre os filetes,  $\mu_b$  é o coeficiente de atrito entre as superfícies da porca ou arruelas e o componente unido.

Segundo Yu e Zhou (2015), os valores de  $K$  variam entre 0,09 a 0,62 para juntas metálicas. Além disso, a dispersão dos valores desse coeficiente é bastante alta, devido às variáveis que o influencia, diminuindo a confiabilidade da obtenção do valor do pré-carregamento. Croccolo, De Agostinis e Vincenzi (2011) realizaram um estudo de tal forma a relacionar o coeficiente de atrito com o torque de aperto, permitindo uma análise sobre o coeficiente de torque. Os autores analisaram que o coeficiente de torque apresenta uma influência bastante significativa devido ao coeficiente de atrito, sendo que com o mesmo valor de torque, o pré-carregamento pode variar até 320%. Para Yu, Yang e Zhou (2018), o valor do coeficiente de torque recomendado para parafusos de aço, independente do material dos componentes unidos, é 0,2. No entanto, ressaltam que é necessário obter um coeficiente de torque mais exato para juntas que apresentam maior criticidade. No trabalho de Gomes *et al.* (2019), uma junta aparafusada com duas placas de aço unidas por parafusos e porcas também fabricadas em aço foi analisada sobre a influência de pré-carregamentos. Neste caso, ensaios foram realizados para determinar o valor do coeficiente de torque e foi obtido o valor de 0,2. Hwang (2013) realizou análises experimentais em juntas aparafusadas metálicas e obteve um valor de coeficiente de torque médio de 0,267. Isso acarretou uma diminuição de até 25% do pré-carregamento, quando comparado com o dimensionamento de junta utilizando o coeficiente de 0,2.

No estudo realizado por Yoon *et al.* (2020), juntas aparafusadas com laminados de compósito carbono/epóxi foram analisadas para se obter o comportamento ao esmagamento utilizando ensaios experimentais e simulação numérica. Um dos fatores considerados foi a variação do torque de aperto dos parafusos e, para definir o pré-carregamento, os autores utilizaram o valor de  $K$  igual a 0,2. Esse valor foi definido com referência a Budynas e Nisbett (2016), que o consideram aplicável para juntas aparafusadas comuns, além dos coeficientes de atrito entre as partes unidas e os elementos fixadores e, entre as roscas do parafuso e porca sejam iguais a 0,15. Contudo, os coeficientes de atrito envolvendo materiais compósitos

apresentam variações expressivas dependendo de fatores como tipo de reforço, de matriz e direção das fibras (SCHÖN, 2004). Outros estudos realizados considerando juntas aparafusadas de material compósito, como os de Qin, Zhao e Zhang (2013) e Chen, Lee e Yeh (1995), utilizaram 0,2 como o valor do coeficiente de torque para se obter o pré-carregamento e aplicá-lo no modelo da simulação numérica. Dessa maneira, é muito superficial e impreciso quando se trata de juntas críticas e de responsabilidade, principalmente envolvendo materiais compósitos, onde há poucos estudos demonstrando a aplicabilidade desse valor e os efeitos que podem acarretar durante o dimensionamento de uma junta. Assim, devido à utilização de valores aproximados do coeficiente de torque nas indústrias que desenvolvem e analisam juntas aparafusadas, os seus dimensionamentos são afetados tanto do ponto de vista econômico, onde podem estar superdimensionados, como de segurança, quando estão submetidos a condições não contempladas pelos coeficientes utilizados de forma indiscriminada. Seguindo a consideração anterior, a utilização de aproximações do coeficiente de torque pode acarretar danos superficiais e internos nos laminados de material compósito. Para juntas metálicas, segundo Oberg *et al.* (2020) e Budynas e Nisbett (2016), o máximo valor de pré-carregamento indicado é de 75 a 90% do valor da carga de resistência ao escoamento ou carga de prova do parafuso, o qual contribui de maneira significativa na resistência à fadiga e na resistência estática da junta. No entanto, para juntas de materiais compósitos, essa relação não se aplica amplamente, sendo que há ocorrência de danos nos laminados como discutido por Kumar, Shankar e Shankar (2017). A maioria dos estudos são realizados em torno do máximo valor de torque que não acarrete danos ao laminado (TOBALINA-BALDEON *et al.*, 2021) (CHOI *et al.*, 2018), sem correlação do pré-carregamento com a carga de resistência ao escoamento ou carga de prova do parafuso, que permite um melhor dimensionamento dos componentes em juntas aparafusadas.

Considerando o exposto, a justificativa do presente projeto é, com base em dois métodos analíticos, no método dos elementos finitos e em metodologias experimentais, definir os valores de  $K$  especificamente para determinadas configurações de juntas aparafusadas de materiais compósitos comerciais de aplicação estrutural, possibilitando que o dimensionamento de juntas aparafusadas atenda às reais condições de contorno, apresente confiabilidade e alcance alta eficiência. Além disso, determinar uma relação da carga de prova do parafuso e o pré-carregamento que seja aplicável para juntas de materiais compósitos comerciais de aplicação aeronáutica, sem a ocorrência de danos nos laminados e máxima contribuição do torque para as juntas.

## 1.2 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO

Para juntas de materiais compósitos, os valores do coeficiente de torque foram considerados em poucos estudos de maneira aproximada e superficial, utilizando os resultados de juntas de materiais metálicos como referência. Assim, devido à utilização de valores aproximados do coeficiente de torque nas indústrias que desenvolvem e analisam juntas aparafusadas, os seus dimensionamentos são afetados tanto do ponto de vista econômico, onde podem estar superdimensionados, como de segurança, quando estão submetidos a condições não contempladas pelos coeficientes utilizados de forma indiscriminada. Portanto, há a necessidade de se utilizar coeficiente representativo para cada tipo de junta, de tal modo a obter o pré-carregamento que contribui para o seu dimensionamento. Outro fator de interesse é a existência de uma relação entre carga de prova do parafuso e pré-carregamento somente para juntas metálicas. Neste contexto, este trabalho contribui com o estudo e a definição de valores dos coeficientes de torques específicos a juntas aparafusadas de materiais compósitos comerciais, utilizando duas metodologias analíticas e os resultados de ensaios experimentais. Além disso, busca-se definir relações entre a carga de prova do parafuso e o pré-carregamento aplicáveis para materiais compósitos sem produção de danos no laminado, de modo a permitir que o projeto de juntas apresente uma maior eficiência com embasamento técnico-científico.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é definir os coeficientes de torque em juntas envolvendo materiais compósitos comerciais de matriz epóxi reforçada com fibra de carbono utilizando métodos analíticos convencionais e ensaios de aplicação de torque. Além disso, determinar uma relação entre o pré-carregamento e a carga de prova do parafuso analisando os efeitos do torque sobre o laminado, utilizando o método dos elementos finitos e ensaios de resistência da junta em tração.

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são atingidos:

- a) Obter o coeficiente de torque utilizando o método analítico geral, o método analítico de Motosh e os ensaios de aplicação de torque, considerando as variáveis referentes à geometria da rosca e os coeficientes de atrito dos materiais envolvidos.
- b) Determinar a relação percentual da carga de prova do parafuso e o pré-carregamento aplicável ao material compósito do estudo, realizando ensaios de aplicação de torques, ensaios de resistência da junta em tração e simulação numérica pelo método dos elementos finitos.
- c) Obter as respostas de tensão e deformação dos corpos de prova submetidos aos pré-carregamentos e forças de tração utilizando o método dos elementos finitos e o critério de falha de Hashin.
- d) Determinar as forças máximas de tração e a relação com os pré-carregamentos aplicados com os resultados dos ensaios de resistência da junta em tração.
- e) Caracterizar a falha realizando análises fractográficas nas superfícies de fratura dos corpos de prova do ensaio de resistência da junta em tração.

#### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

No Capítulo 1 está apresentada uma breve análise do contexto que o estudo está inserido, o estado da arte, a relevância científica da pesquisa e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 contempla a revisão da literatura relevante para a realização da pesquisa.

O material e a metodologia utilizada estão apresentados no Capítulo 3.

No Capítulo 4, todos os resultados e as discussões sobre eles estão detalhados.

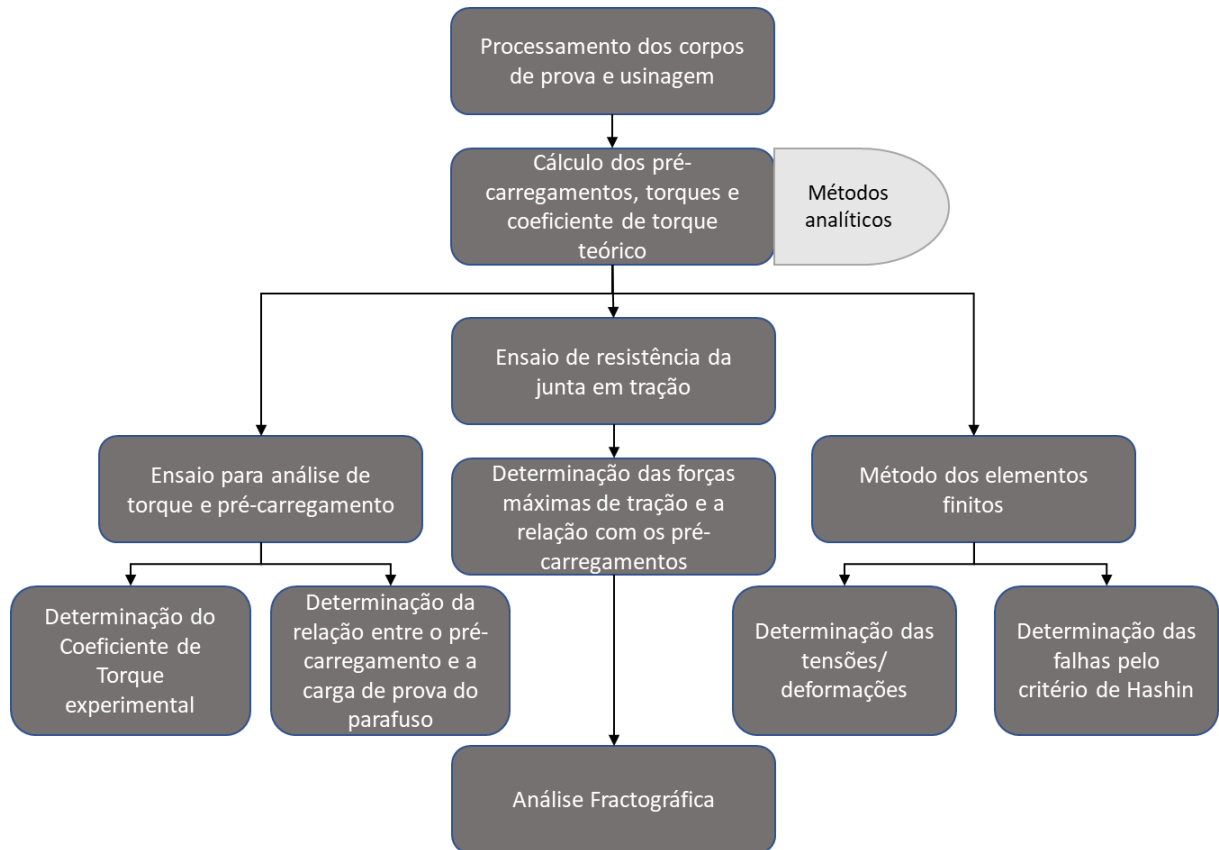
O Capítulo 5 apresenta a conclusão do estudo e as considerações finais.

Há ainda os Anexos A e B, que apresentam os relatórios referentes aos ensaios não destrutivos por ultrassom, e o Apêndice A, que contempla as análises estatísticas realizadas.

Finalmente, têm-se todas as referências bibliográficas citadas e consultadas segundo a norma ABNT NBR 6023, de novembro de 2018.

Na Figura 1, o fluxograma apresenta as principais etapas deste trabalho.

Figura 1 – Fluxograma das principais etapas do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

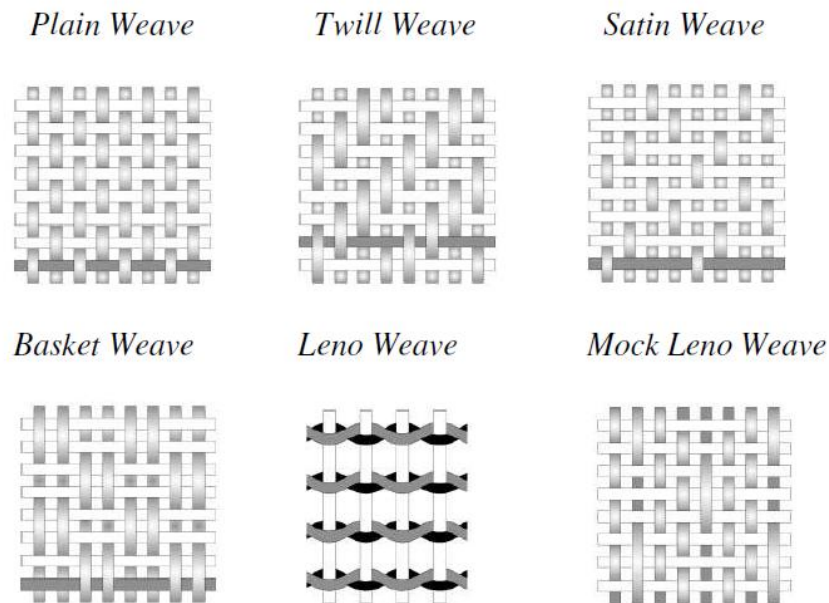
### 2.1 MATERIAL COMPÓSITO

Materiais compósitos produziram uma revolução tecnológica na engenharia devido aos ganhos nas propriedades físicas e mecânicas, apresentando uma opção interessante aos tradicionais materiais, como os metais e cerâmicas (NIKBAKT *et al.*, 2018). Referente às propriedades mecânicas, observa-se que os materiais compósitos possuem grandes vantagens sobre os metálicos, podendo destacar a alta rigidez e resistência (ZHOU *et al.*, 2021) combinada com a baixa massa específica, que acarreta em componentes dimensionados com alta eficiência estrutural. Outra vantagem no uso desses materiais é que eles permitem o controle da resistência mecânica ou outros parâmetros estruturais de interesse em direções específicas. Assim, é possível obter componentes estruturais mais leves, os quais cumprem com critérios de resistência específicos e restrições impostas pelo projeto (SOUSA *et al.*, 2018).

Com relação aos compósitos poliméricos estruturais, eles são constituídos por uma matriz polimérica reforçada por fibras, que apresentam alta resistência e rigidez, e podem ser apresentadas em diferentes arranjos (COSTA, 2006) como fitas unidirecionais, tecidos e multiaxial (MARQUES, 2010). As fibras são envolvidas e suportadas pela matriz que as previnem da exposição às condições ambientais destrutivas, como umidade. Já as matrizes, por sua vez, atuam como meio de transferência dessa carga, sendo as principais responsáveis pela ductilidade e tenacidade do conjunto (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011) (BATISTA, 2012).

Segundo Zhou *et al.* (2020), os tecidos são uma das configurações mais importantes na aplicação dos compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono, apresentando vantagens em comparação aos outros tipos de arranjos nas propriedades mecânicas no plano, excelente maleabilidade e capacidade de processamento e boa resistência ao impacto. Os estilos mais comuns de tecido estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Principais estilos de tecido.



Fonte: Costa (2006).

Além disso, as melhores propriedades como as resistências à tração e impacto, rigidez (AKLILU *et al.*, 2019), resistência ao desgaste, resistência à corrosão e vida em fadiga (SABA; JAWAID, 2018) permitem a aplicação em diferentes áreas, resultando em projetos eficientes.

A fibra de carbono, mais que qualquer outro reforço fibroso, vem sendo muito empregada para o desenvolvimento de compósitos poliméricos como materiais de engenharia estruturalmente avançados. Propriedades como elevada rigidez, excelente estabilidade térmica em elevadas temperaturas, baixa massa específica e baixo coeficiente de expansão térmica ao longo da direção das fibras faz com que ela se destaque dentre as demais utilizadas atualmente (BATISTA, 2012) (BURAKOWSKI, 2001).

O processo de fabricação dos compósitos apresenta particularidades como sequência de empilhamento, número e espessura das camadas, orientação das camadas, fração volumétrica das fibras, os quais influenciam o comportamento estrutural do componente. Esses parâmetros essenciais podem agir como variáveis de projeto em problemas de otimização (NIKBAKT *et al.*, 2018).

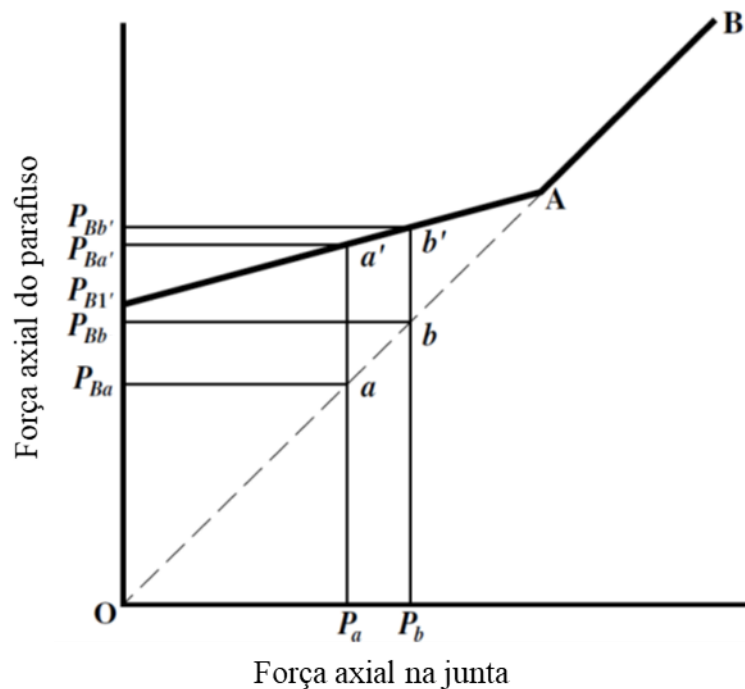
Na busca desta eficiência, as juntas aparafusadas estão inseridas neste contexto, utilizando os materiais compósitos, principalmente pela capacidade em suportar altos níveis de carregamentos, facilidade na manutenção e substituição (ZHAO *et al.*, 2016).

No entanto, devido à complexidade inerente das peças que utilizam material compósito, a interação entre os componentes conectados e a concentração de tensão em torno dos furos, faz com que as juntas aparafusadas em material compósito apresentem respostas mecânicas extremamente complicadas (ZHAO *et al.*, 2016). Além disso, segundo Nali e Carrera (2012), é um fato consolidado para que o uso dos laminados em materiais compósitos continue avançando tecnologicamente, um melhor entendimento dos seus mecanismos de falha deve ser realizado.

## 2.2 JUNTAS APARAFUSADAS

Juntas aparafusadas são largamente utilizadas devido à facilidade de montagem e desmontagem e essa característica faz com que seu emprego traga benefícios durante a manutenção e reparos de componentes (CROCCOLO *et al.*, 2011). Com a aplicação de esforços externos nas juntas, os parafusos são normalmente submetidos aos carregamentos de tração, de cisalhamento e há a presença de momento fletor no parafuso, devido ao efeito de contato com a superfície do furo. Além disso, uma força inicial de tração, denominada pré-carregamento, é aplicada e seu objetivo é melhorar a resistência à carga de tração externa e aumentar o atrito entre as partes unidas devido à compressão aplicada, o qual influencia a resistência à carga de cisalhamento. O pré-carregamento é gerado devido ao torque de aperto submetido ao parafuso ou à porca e sua aplicação também proporciona um aumento na resistência à fadiga da junta (GIANNOPOULOS *et al.*, 2017) (ESMAEILI *et al.*, 2014). Segundo Oberg *et al.* (2020), a relação entre a vida em fadiga e o pré-carregamento do parafuso é ilustrada na Figura 3. Uma junta aparafusada carregada axialmente sem a presença do pré-carregamento é representada pela linha OAB, i.e., a força no parafuso varia linearmente com a força externa aplicada à junta. Quando a força da junta varia entre  $P_a$  e  $P_b$ , a força axial do parafuso varia entre  $P_{Ba}$  e  $P_{Bb}$ . No entanto, se o pré-carregamento  $P_{B1}$  for considerado, a junta é comprimida e a força axial do parafuso muda mais lentamente. Isso ocorre devido à uma parte do carregamento ser absorvido durante a redução da compressão presente na junta. Assim, a força axial do parafuso varia entre  $P_{Ba'}$  e  $P_{Bb'}$ , enquanto a força externa aplicada à junta mantém a variação entre  $P_a$  e  $P_b$ . Essa condição resulta em uma considerável redução na amplitude do carregamento cíclico e, portanto, aumenta a vida em fadiga do parafuso. Do ponto de vista dos componentes unidos, a resistência à fadiga também é melhorada devido à presença das forças de compressão resultantes do pré-carregamento.

Figura 3 – Carregamento no parafuso em uma junta submetida a uma força axial.



Fonte: Adaptado de Oberg *et al.* (2020).

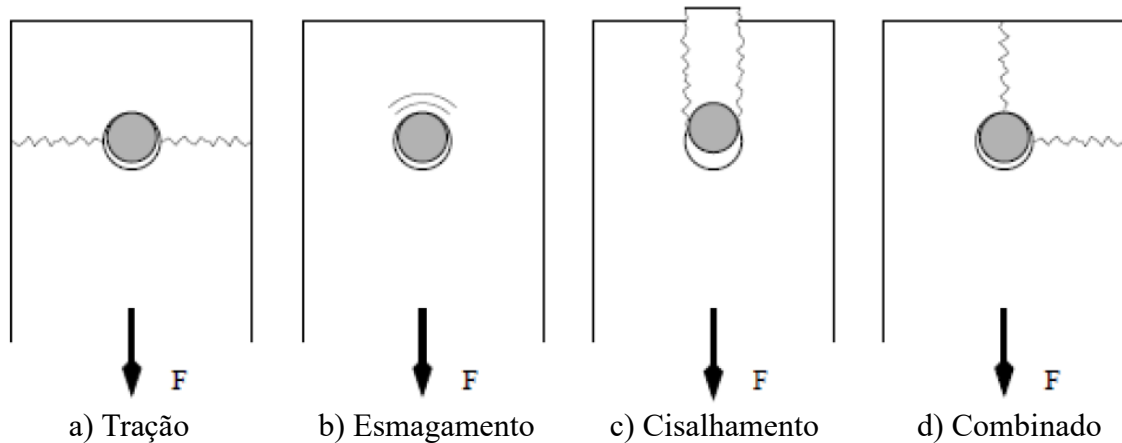
Para aplicações de alta responsabilidade, as juntas aparafusadas em estruturas de material compósito devem ser cuidadosamente projetadas. A concentração de tensão ao redor do furo e a baixa resistência mecânica dos materiais compósitos, submetidos a carregamentos fora do plano, tornam o desenvolvimento e o processo de fabricação das juntas mais críticas do que aqueles presentes em componentes metálicos. A segurança estrutural deve ser garantida, e portanto, o estudo de juntas aparafusadas em componentes em material compósito tem recebido considerável atenção no meio científico e tecnológico (OLMEDO; SANTIUSTE, 2012).

Assim, quanto menor a quantidade de juntas em estruturas, mais rígido e leve o projeto se apresenta, maior é a vida útil da estrutura e menos problemas são encontrados em serviço (GIANNOPOULOS *et al.*, 2017).

Uma vez que os materiais compósitos possuem modos de falha complexos, juntas aparafusadas presentes em estruturas fabricadas com este tipo de material demandam técnicas de análises muito mais rigorosas do que as juntas metálicas. Além disso, a natureza mais frágil do compósito necessita de estudos mais detalhados, a fim de quantificar os níveis dos diversos picos de tensão que ocorrem, principalmente, devido à presença de concentradores de tensão. Desta forma, o desenvolvimento de juntas em compósito é mais sensível às características como distância de borda e diâmetro de furo (SOUZA, 2015).

Existem basicamente quatro tipos diferentes de modos de falha para juntas em material compósito: tração, cisalhamento, combinado e esmagamento (CHOI *et al.*, 2018) e variações destes modos podem se apresentar. Na Figura 4, estão representados estes tipos de falha.

Figura 4 – Modos de falha em juntas aparafusadas.



Fonte: Adaptado de Souza (2015).

A falha por tração ocorre principalmente devido à concentração de tensão em torno do furo (CHOI *et al.*, 2018). Ela é influenciada por valores baixos da razão entre a largura da junta pelo diâmetro do furo ( $w/d$ ) (YOON *et al.*, 2020) (ZHANG *et al.*, 2015), o que, conseqüentemente, determina a seção líquida submetida ao carregamento. O modo de falha combinado ocorre quando a distância de borda do pino é muito pequena, isto é, a razão entre a distância de borda do furo e o seu diâmetro ( $e/d$ ) é o principal fator para a sua ocorrência. Segundo Souza (2015), este modo pode ser desencadeado a partir de uma falha de tração, assim como a falha por cisalhamento. Comumente, um alto valor da razão  $w/d$  para juntas em material compósito é definido para excluir uma possível falha por tração e, um alto valor da razão  $e/d$  para evitar falhas de cisalhamento e combinadas. No entanto, valores altos destas razões reduzem os potenciais dos materiais compósitos em elementos estruturais, além de dificultar a diferenciação entre os modos repentinos e catastróficos daqueles graduais (ZHANG *et al.*, 2015).

Os modos de falha por tração, cisalhamento e combinado apresentam um comportamento repentino e catastrófico à junta, sendo, portanto, indesejáveis. Já a falha por esmagamento é gradual e propaga-se lentamente nas juntas em material compósito (PENG *et al.*, 2021). Segundo Olmedo e Santiuste (2012), a resistência ao esmagamento da junta depende de diferentes parâmetros, como configuração da junta, torque de aperto, material do laminado e do parafuso, configuração do laminado e temperatura. Ao contrário da falha por tração, os modos

por cisalhamento e esmagamento estão relacionados com as falhas das fibras e matrizes, devido aos carregamentos de cisalhamento e compressão (CHOI *et al.*, 2018).

Desse modo, busca-se projetos que apresentem parâmetros que evitem falha catastrófica e tendam a falhar lenta e progressivamente, sendo analisados fatores geométricos, propriedades do material, coeficiente de atrito entre os componentes da junta, formato do parafuso, folgas e torque de aperto (OLMEDO; SANTIUSTE, 2012).

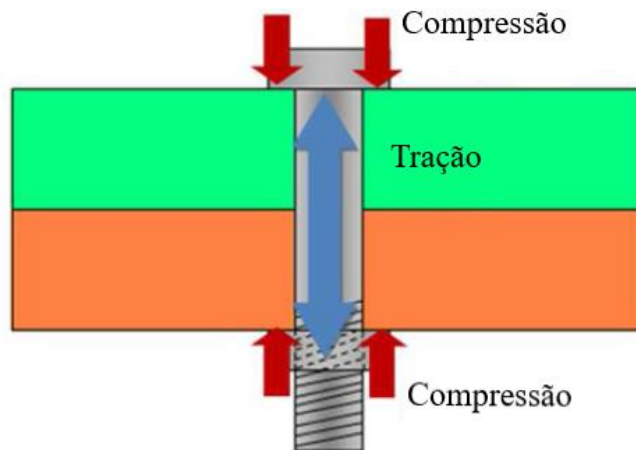
### **2.2.1 Coeficiente de torque e pré-carregamento**

A aplicação do torque de aperto em parafusos apresenta benefícios à junta e diversos estudos os demonstraram tanto para condições de carregamento estático como para carregamentos cíclicos. O valor do torque de instalação do parafuso depende das condições das superfícies de contato, tipo de rosca e propriedades dos materiais. Em excesso, pode ocasionar danos à junta e ao parafuso. Por outro lado, uma junta com um torque de aperto inadequado, não apresenta uma força de união para manter a sua integridade (YU *et al.*, 2018) (HWANG, 2013).

O efeito do torque, segundo Giannopoulos *et al.* (2017), aumenta significativamente a resistência ao esmagamento, permitindo que juntas nesta condição apresentem falhas normalmente além da região da arruela. Diferentemente das falhas em juntas aparafusadas que não são submetidas ao torque de aperto, onde o esmagamento se apresenta em torno da área de contato entre parafuso e furo.

Além disso, a aplicação do torque durante a instalação do parafuso produz o pré-carregamento, que é uma força axial de tração ao longo do corpo do parafuso. Devido ao contato da cabeça do parafuso e da porca sobre a junta, forças de reação compressivas apresentam-se para a manutenção do equilíbrio estático do conjunto. Na Figura 5 está apresentada uma representação desse comportamento.

Figura 5 – Representação do pré-carregamento sobre a junta.



Fonte: Adaptado de Hwang (2013).

A medição do pré-carregamento durante o processo de montagem da junta é difícil e, portanto, a prática comum é utilizar um torquímetro para regular o torque de aperto. Assim, determinar a relação entre o torque de aperto e o pré-carregamento é extremamente significativo para a manutenção da confiabilidade de juntas aparafusadas (YU *et al.*, 2015). De forma geral, para parafusos e porcas que apresentam rosca rolada sem lubrificação (HWANG, 2013), a relação teórica entre torque e pré-carregamento pode ser representada pela equação (1) (BUDYNAS; NISBETT, 2016) (YU *et al.*, 2018).

O coeficiente de torque é função da geometria da rosca e dos coeficientes de atrito dos materiais envolvidos. Budynas e Nisbett (2016) consideram o efeito do atrito entre os filetes de rosca e o efeito do atrito entre a cabeça do parafuso ou porca e as arruelas representada pela equação (2).

Segundo Yu e Zhou (2015), os valores de K variam entre 0,09 a 0,62 para juntas metálicas. Além disso, a dispersão dos valores desse coeficiente é bastante alta devido às variáveis que o influencia, diminuindo a confiabilidade da obtenção do valor do pré-carregamento. Croccolo, De Agostinis e Vincenzi (2011) realizaram um estudo de tal forma a relacionar o coeficiente de atrito com o torque de aperto, permitindo uma análise sobre o coeficiente de torque. Analisaram que o coeficiente de torque apresenta uma influência bastante significativa devido ao coeficiente de atrito, sendo que com o mesmo valor de torque, os valores permaneceram entre 0,12 e 0,50. Conseqüentemente, o pré-carregamento pode variar até 320%. Para Yu, Yang e Zhou (2018), o valor do coeficiente de torque recomendado para parafusos de aço, independente do material dos componentes unidos, é 0,2. No entanto, ressaltam que é necessário obter um coeficiente de torque mais exato para juntas que apresentam maior criticidade.

No trabalho de Gomes *et al.* (2019), uma junta aparafusada com duas placas de aço unidas por parafusos e porcas também fabricadas em aço, foi analisada sobre a influência de pré-carregamentos. Neste caso, ensaios foram realizados para determinar o valor do coeficiente de torque e foi obtido o valor de 0,2. Hwang (2013) realizou análises experimentais em juntas aparafusadas metálicas e obteve um valor de coeficiente de torque médio de 0,267, acarretando em uma diminuição de até 25% do pré-carregamento, quando comparado com o dimensionamento de junta utilizando o coeficiente de 0,2.

No estudo realizado por Yoon *et al.* (2020), juntas aparafusadas com laminados de compósito carbono/epóxi foram analisadas para se obter o comportamento ao esmagamento utilizando ensaios experimentais e simulação numérica. Um dos fatores considerados foi a variação do torque de aperto dos parafusos e, para definir o pré-carregamento, os autores utilizaram o valor de  $K$  igual a 0,2, apresentado por Budynas e Nisbett (2016). Esses autores consideram o valor aplicável para juntas aparafusadas comuns, e definem que os coeficientes de atrito entre as partes unidas e os elementos fixadores e, entre as roscas do parafuso e porca sejam iguais. Contudo, os coeficientes de atrito envolvendo materiais compósitos apresentam variações expressivas, dependendo de fatores como tipo de reforço, de matriz e direção das fibras (SCHÖN, 2004).

Outros estudos realizados considerando juntas aparafusadas de material compósito, como os de Qin, Zhao e Zhang (2013) e Chen, Lee e Yeh (1995), utilizaram 0,2 como o valor do coeficiente de torque para se obter o pré-carregamento e aplicá-lo no modelo da simulação numérica. No entanto, é muito superficial e impreciso quando se trata de juntas críticas e de responsabilidade, principalmente envolvendo materiais compósitos, onde há poucos estudos demonstrando a aplicabilidade desse valor e os efeitos que pode acarretar durante o dimensionamento de uma junta.

Assim, devido à utilização de valores aproximados do coeficiente de torque nas indústrias que desenvolvem e analisam juntas aparafusadas, os seus dimensionamentos são afetados tanto do ponto de vista econômico, onde podem estar superdimensionados, como de segurança, quando estão submetidos a condições não contempladas pelos coeficientes utilizados de forma indiscriminada. Seguindo a consideração anterior, a utilização de aproximações do coeficiente de torque pode acarretar danos superficiais e internos nos laminados de material compósito.

Um estudo realizado por Motosh (YU *et al.*, 2015) (GANESHMURTHY; NASSAR, 2014) (HWANG, 2013) definiu uma relação entre o torque e o pré-carregamento não influenciada pelo ângulo de hélice dos filetes da rosca e aplicada principalmente em juntas de alta responsabilidade. Essa relação é apresentada na equação (3).

$$T_m = \left( \frac{p}{2\pi} + \frac{\mu \cdot r_t}{\cos \alpha} + \mu_b \cdot r_b \right) \cdot F_i \quad (3)$$

Onde  $T_m$  é o torque,  $F_i$  é o pré-carregamento,  $p$  é o passo da rosca,  $\alpha$  é a metade do ângulo da rosca,  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre os filetes,  $r_t$  é o raio de contato efetivo das roscas,  $\mu_b$  é o coeficiente de atrito entre as superfícies da porca ou arruelas e o componente unido, e  $r_b$  é o raio de contato efetivo das superfícies da porca e o laminado.

Para juntas metálicas, segundo Budynas e Nisbett (2016) e Oberg *et al.* (2020), o máximo valor de pré-carregamento indicado é de 75% a 90% do valor da carga de resistência ao escoamento do material ou carga de prova do parafuso, o qual contribuirá de maneira significativa na resistência à fadiga e resistência estática da junta. Ainda considerando uniões de componentes metálicos, os valores de torque, tipicamente, são definidos para produzir pré-carregamentos com valores iguais a 75% da carga de prova, como apresentado por Hwang (2013) e ASM International Handbook Committee (2009).

Oberg *et al.* (2020) ainda definem que a carga de prova equivale a 85% da carga de resistência ao escoamento do material aproximadamente. No entanto, para juntas de materiais compósitos, essa relação não se aplica amplamente, sendo que há ocorrência de danos na matriz da primeira camada do laminado como discutido por Kumar, Shankar e Shankar (2017). Esse dano ocorreu em uma área abaixo da arruela e devido à utilização de um torque de aperto no valor de 20 N.m. Além disso, Khashaba *et al.* (2006) realizaram um estudo o qual demonstrou que o diâmetro externo da arruela pode influenciar a resistência do laminado a danos devido ao pré-carregamento. Arruelas de 14, 18, 22 e 27 mm de diâmetro externo foram utilizadas em diferentes corpos de prova. Devido à menor área de contato da arruela de 14 mm, houve um aumento da pressão sobre o laminado, o que ocasionou microtrincas ao redor da borda do furo. Essas trincas contribuíram para uma falha prematura da junta.

### 2.3 CRITÉRIOS DE FALHAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

O comportamento dos materiais compósitos submetidos a uma condição de carregamento e como ocorre a falha ou não devido a isso, é uma informação a qual não pode ser ignorada quando esses materiais são aplicados em estruturas de alta responsabilidade. Como apresentado por Li e Sitnikova (2018), a existência de vários critérios de falhas refletem essa importância,

principalmente devido à presença de vários modos e mecanismos de fratura em materiais compósitos.

A previsão do início dos mecanismos de falha da camada em compósitos poliméricos reforçados com fibras unidirecionais tem sido tema de investigações detalhadas nos últimos vinte anos (CATALANOTTI *et al.*, 2013). A necessidade de entender as condições de falha para os materiais compósitos, despertou uma quantidade considerável de pesquisas teóricas e experimentais em critérios de falhas para essa classe de material estimuladas também pela ampla utilização de compósitos avançados (GU; CHEN, 2017).

Diversos critérios de falha são baseados no critério de escoamento de von Mises ou Hill, os quais são aplicáveis a materiais dúcteis. No entanto, as pesquisas permitiram o desenvolvimento de novos critérios e, de acordo com Gu e Chen (2017b), podem ser classificados como sendo macroscópicos ou microscópicos.

Os critérios de falha macroscópicos são mais populares na engenharia devido à facilidade de utilização e, como definido por Gu e Chen (2017b), são classificados em três grupos. O primeiro grupo contempla os critérios de máxima tensão e máxima deformação. Esses critérios de falha determinam o carregamento e o modo de falha comparando as tensões e deformações com as respectivas resistências. No entanto, eles segregam os efeitos devido aos componentes de tensão e deformação, isto é, não há interação.

Considerando o segundo grupo, pode-se citar os critérios de Tsai-Hill e Tsai-Wu (WANG *et al.*, 2018), os quais incluem interação total de tensões. Tsai e Wu desenvolveram um dos primeiros critérios de falha que contemplava a resistência para materiais anisotrópicos, sem considerar independentemente todos os diferentes modos de falha. O carregamento de falha é determinado utilizando equações envolvendo todos os componentes de tensão ou deformação (GU; CHEN, 2017b). Contudo, esses critérios consideram essencialmente os mecanismos de fratura de camadas unidirecionais todas juntas, desconsiderando o comportamento delas separadamente, impedindo determinar diretamente o modo de falha inicial, o que é necessário para a análise de falhas progressivas de estruturas em compósitos. Os critérios relacionados ao primeiro e segundo grupos também são aplicáveis a compósitos bidirecionais segundo Klasztorny, Nycz e Labuda (2018).

O último grupo leva em consideração os modelos fenomenológicos, os quais contemplam os aspectos físicos da fratura, incluindo o critério de falha de Hashin (MONTAGNE *et al.*, 2020). Os critérios de falha que separam os modos de falha da fibra e da matriz, predizem com mais fidelidade a resistência de cada camada e do laminado (GU; CHEN, 2017b). O critério de Hashin é baseado na teoria de falha de Mohr e diferencia-se dos demais principalmente porque

considera que a falha é exclusivamente causada pela tensão atuando no plano de fratura do material (LI *et al.*, 2018). Hashin propôs um conjunto de critérios de falha para definir as falhas de compósitos unidirecionais baseados em cada modo de falha. Ele desenvolveu dois mecanismos de falha, no qual um é baseado na falha da fibra e o outro é baseado na falha da matriz. Esses critérios de falha são expressos em termos de polinômios quadráticos de tensão e, a escolha deste tipo de equação não é relacionada em razões físicas, mas em considerações de ajuste de curva (ROSALES-IRIARTE *et al.*, 2012). Para compósitos bidirecionais (tecido), o critério de Hashin foi modificado para contemplar as particularidades deste tipo de material como apresentado por Klasztorny, Nycz e Labuda (2018) e Gillespie *et al.* (2005). Além disso, esse critério considera tensões fora do plano e pode ser aplicado em juntas aparafusadas para prever falhas por esmagamento (ZHANG *et al.*, 2015) (OLMEDO; SANTIUSTE, 2012) e por tração ao redor do furo, apresentando bons resultados (YOON *et al.*, 2020) (ROSALES-IRIARTE *et al.*, 2012).

A falha de materiais compósitos é complexa devido à interação de mecanismos independentes (HASSAN *et al.*, 1996). A diversidade dos critérios de falha e as regras de degradação do material têm sido utilizados na literatura para estabelecer modelos de danos progressivos para várias estruturas de compósito (ZHAO *et al.*, 2016).

A disponibilidade de critérios de falha demanda um discernimento razoável de cada critério para obter uma resposta consistente e tomar decisões assertivas.

Nas seções 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 e 2.3.5, estão apresentadas as equações referentes aos critérios comumente utilizados (ANISH *et al.*, 2019).

### 2.3.1 Critério da máxima tensão

O critério da máxima tensão é definitivamente um dos mais populares em aplicação. Pode ser apresentado como (LI; SITNIKOVA, 2018)

$$\sigma_i \leq \sigma_{it} \quad \text{se } \sigma_i \geq 0 \quad \text{ou} \quad |\sigma_i| \leq \sigma_{ic} \quad \text{se } \sigma_i < 0 \quad (i = 1, 2 \text{ e } 3) \quad (4)$$

$$|\tau_j| \leq \tau_{sj} \quad (j = 23, 13 \text{ e } 12) \quad (5)$$

onde  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{23}, \tau_{13}, \tau_{12}$  definem o estado de tensão nos eixos principais do material,  $\sigma_{1t}$  e  $\sigma_{1c}$  são, respectivamente, as resistências à tração e à compressão na direção da fibra,  $\sigma_{2t} = \sigma_{3t}$  e  $\sigma_{2c} = \sigma_{3c}$  as resistências à tração e à compressão transversais a fibra, e  $\tau_{s23}$  e  $\tau_{s13} = \tau_{s12}$  as resistências ao cisalhamento transversal e longitudinal, respectivamente. O índice de falha (FI) pode ser obtido como (NALI; CARRERA, 2012):

$$FI = MAX \left[ \frac{\sigma_i}{\sigma_{it}}, \frac{\sigma_i}{\sigma_{ic}}, \frac{\tau_j}{\tau_{sj}} \right] \quad (6)$$

### 2.3.2 Critério de Tsai-Wu

O critério de Tsai-Wu é um dos mais populares com a interação total entre os componentes de tensão. Para materiais transversalmente isotrópicos, o critério pode ser expresso como (LI; SITNIKOVA, 2018)

$$F = F_{11} \sigma_1^2 + F_{22}(\sigma_2^2 + \sigma_3^2) + (2F_{22} - F_{44})\sigma_2\sigma_3 + 2F_{12}\sigma_1(\sigma_2 + \sigma_3) + F_1 \sigma_1 \quad (7)$$

$$+ F_2 \sigma_2 + F_2 \sigma_3 + F_{44} \tau_{23}^2 + F_{66} \tau_{13}^2 + F_{66} \tau_{12}^2$$

O critério de Tsai-Wu foi desenvolvido sob a consideração de um envelope de falha fechado no espaço de tensão. No entanto, em uma simplificação relacionada ao estado de tensão biaxial presente no plano transversal às fibras, o critério de falha se reduz a

$$F_{22}\sigma_2^2 + F_{22}\sigma_3^2 + (2F_{22} - F_{44})\sigma_2\sigma_3 + F_2 \sigma_2 + F_2 \sigma_3 = 1 \quad (8)$$

Portanto, o índice de falha é o termo à esquerda da equação (8).

### 2.3.3 Critério de Tsai-Hill

O critério de Tsai-Hill foi desenvolvido com referência à energia distorcional e, portanto, é um critério interativo que considera o efeito da tensão de cisalhamento no plano. A condição para falha é apresentada pelas seguintes equações (NALI; CARRERA, 2012):

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1t}}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_{1t}^2} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2t}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{s12}}\right)^2 \geq 1 \text{ se } \sigma_i \geq 0 \text{ (} i = 1 \text{ e } 2\text{)} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1c}}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_{1t}^2} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2c}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{s12}}\right)^2 \geq 1 \text{ se } \sigma_i \leq 0 \text{ (} i = 1 \text{ e } 2\text{)} \quad (10)$$

Portanto, o índice de falha é o termo a esquerda das equações (9) e (10).

### 2.3.4 Critério de Hashin

A teoria de Hashin é reconhecida pela sua simplicidade no conceito e tem sido incorporada em vários algoritmos comerciais de análise por elementos finitos. O resultado final do critério de Hashin é composto por quatro modos de falha separados (GU; CHEN, 2017):

Tração na fibra,  $\sigma_1 > 0$

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1t}}\right)^2 + \frac{(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2)}{\tau_{s12}^2} = 1 \quad (11)$$

Compressão na fibra,  $\sigma_1 < 0$

$$-\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1c}}\right) = 1 \quad (12)$$

Tração na matriz,  $\sigma_2 + \sigma_3 > 0$

$$\frac{(\sigma_2 + \sigma_3)^2}{\sigma_{2t}^2} + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3)}{\tau_{s23}^2} + \frac{(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2)}{\tau_{s12}^2} = 1 \quad (13)$$

Compressão na matriz  $\sigma_2 + \sigma_3 < 0$

$$\frac{1}{\sigma_{2c}} \left[ \left( \frac{\sigma_{2c}}{2\tau_{s23}} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_2 + \sigma_3) + \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)^2}{\sigma_{2t}^2} + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3)}{\tau_{s23}^2} + \frac{(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2)}{\tau_{s12}^2} = 1 \quad (14)$$

Portanto, o índice de falha é o termo à esquerda das equações (11) a (14).

### 2.3.5 Critério de Hoffman

O critério de Hoffman é utilizado para calcular o carregamento de falha da primeira camada e a técnica de perturbação de primeira ordem é adotada para definir as estatísticas de falha de segunda ordem. Assume-se que o laminado apresenta falha quando qualquer camada falha. O polinômio quadrático do critério na forma de tensor pode ser expresso como (ONKAR *et al.*, 2007):

$$f(\sigma) = F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (15)$$

onde  $F_i$  e  $F_{ij}$  são funções da resistência do material e os valores de  $\sigma_i$  são as tensões nas direções do material.

$$F_1 = \left( \frac{1}{\sigma_{1t}} - \frac{1}{\sigma_{1c}} \right) \quad (16)$$

$$F_2 = \left( \frac{1}{\sigma_{2t}} - \frac{1}{\sigma_{2c}} \right) \quad (17)$$

$$F_3 = \left( \frac{1}{\sigma_{3t}} - \frac{1}{\sigma_{3c}} \right) \quad (18)$$

$$F_{11} = \left( \frac{1}{\sigma_{1t}\sigma_{1c}} \right) \quad (19)$$

$$F_{22} = \left( \frac{1}{\sigma_{2t}\sigma_{2c}} \right) \quad (20)$$

$$F_{33} = \left( \frac{1}{\sigma_{3t}\sigma_{3c}} \right) \quad (21)$$

$$F_{44} = \left( \frac{1}{\tau_{s12}^2} \right) \quad (22)$$

$$F_{55} = \left( \frac{1}{\tau_{s13}^2} \right) \quad (23)$$

$$F_{66} = \left( \frac{1}{\tau_{s23}^2} \right) \quad (24)$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\sigma_{1t}\sigma_{1c}} + \frac{1}{\sigma_{2t}\sigma_{2c}} - \frac{1}{\sigma_{3t}\sigma_{3c}} \right] \quad (25)$$

$$F_{13} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\sigma_{1t}\sigma_{1c}} - \frac{1}{\sigma_{2t}\sigma_{2c}} + \frac{1}{\sigma_{3t}\sigma_{3c}} \right] \quad (26)$$

$$F_{23} = -\frac{1}{2} \left[ -\frac{1}{\sigma_{1t}\sigma_{1c}} + \frac{1}{\sigma_{2t}\sigma_{2c}} + \frac{1}{\sigma_{3t}\sigma_{3c}} \right] \quad (27)$$

Portanto, a falha do laminado ocorre quando o índice de falha  $f(\sigma)$  de qualquer camada é igual ou maior que o valor um.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CORPO DE PROVA E MATERIAL

A junta aparafusada, objeto de estudo, foi representada por corpo de prova em uma configuração sobreposta de cisalhamento simples, utilizando dois parafusos de cabeça protuberante. Foi fabricado em material compósito de matriz epóxi com reforço de fibra de carbono pré impregnada utilizando tecido bidirecional estilo *2x2 twill weave*. Esse material é produzido pela empresa Gurit, conforme especificação SE 84LV RC416T (GURIT LTD, 2017), com 12000 filamentos por cabo e fração volumétrica das fibras entre 50% e 59%. As principais aplicações são em componentes estruturais submetidos a elevados valores de carregamento e estruturas sanduíches. As propriedades mecânicas mais relevantes estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do material SE 84LV RC416T.

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>RC416T</b>
Módulo Longitudinal, $E_1$ [GPa]	59,1
Módulo Transversal, $E_2$ [GPa]	58,9
Módulo Transversal, $E_3$ [GPa]	3,9
Módulo de Cisalhamento, $G_{12}$ [GPa]	4,2
Módulo de Cisalhamento, $G_{13}$ [GPa]	4,2
Módulo de Cisalhamento, $G_{23}$ [GPa]	22,7
Resistência à Tração Longitudinal, $\sigma_{1t}$ [MPa]	1006
Resistência à Tração Transversal, $\sigma_{2t}$ [MPa]	858
Resistência à Compressão Longitudinal, $\sigma_{1c}$ [MPa]	649
Resistência à Compressão Transversal, $\sigma_{2c}$ [MPa]	659
Resistência ao Cisalhamento no Plano, $\tau_{s12}$ [MPa]	68,1
Resistência ao Cisalhamento Interlaminar, $\tau_{s13}$ [MPa]	55,8
Resistência à Tração da resina curada [MPa]	82

Fonte: Gurit LTD (2017), Bond; Hjelmgren (2018).

A configuração do laminado foi de seis camadas com orientação  $[(0^\circ;90^\circ)/(\pm 45^\circ)/(0^\circ;90^\circ)/(\pm 45^\circ)/(0^\circ;90^\circ)/(\pm 45^\circ)]$ , comumente utilizado em regiões de juntas aparafusadas para apresentar uma maior resistência aos modos de falhas típicos, como por

esmagamento e por cisalhamento (MONTAGNE *et al.*, 2020). Cada camada possui uma espessura de 0,43 mm e, portanto, o laminado apresentou uma espessura aproximada de 2,58 mm.

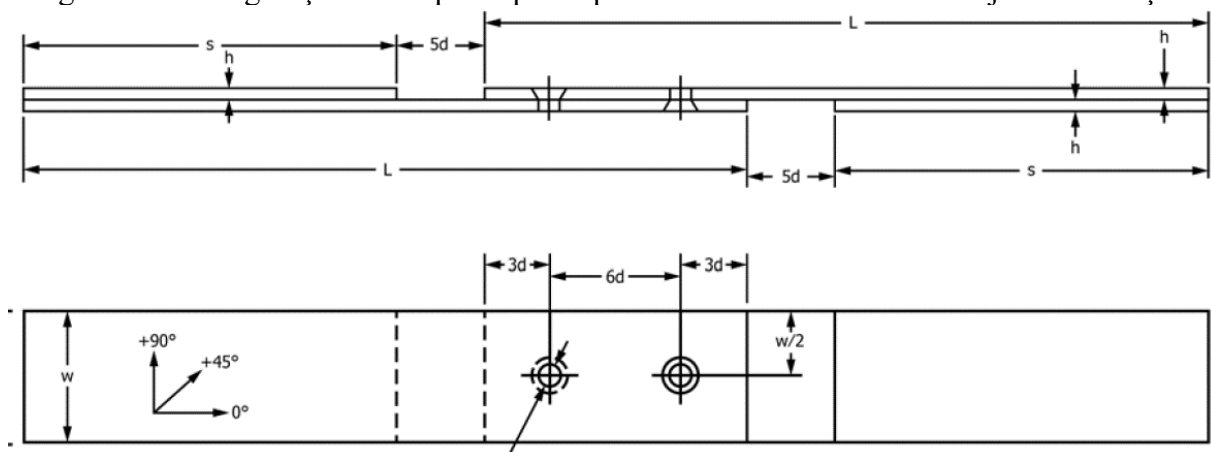
Cada corpo de prova foi composto por dois laminados e, a configuração e as suas dimensões seguiram as recomendações da norma ASTM D5961 (ASTM, 2003) para avaliar a resistência da junta em tração. As superfícies dos laminados que estão em contato apresentam a camada com orientação ( $0^\circ; 90^\circ$ ). Além disso, em cada extremidade do laminado, foi colado um *tab* que foi processado utilizando o mesmo material, e a mesma quantidade e orientação das camadas do corpo de prova, para minimizar a presença do efeito de flexão fora do plano durante o ensaio de resistência da junta e gerar pouca influência nos resultados. As dimensões do corpo-de-prova estão apresentadas na Tabela 2 e o desenho do corpo de prova está ilustrado na Figura 6, onde  $d$  é o diâmetro do furo,  $h$  é a espessura do laminado,  $L$  é o comprimento de cada laminado e  $s$  é o comprimento do *tab*.

Tabela 2 – Dimensões dos corpos de prova em [mm].

Diâmetro do furo [d]	Comprimento [L]	Largura [w]	Comprimento do <i>tab</i> [s]
6,35 <sup>+0,03</sup> <sub>-0,00</sub>	210	36	108

Fonte: ASTM (2003).

Figura 6 – Configuração do corpo de prova para o ensaio de resistência da junta em tração.



Fonte: Adaptado de ASTM (2003).

Os parafusos utilizados estavam conforme a norma NAS6204-4 e as porcas conforme a norma NASM21042-4. As principais dimensões do parafuso e o desenho estão apresentados na Tabela 3 e na Figura 7, respectivamente. Conforme a norma NAS6204, o material do parafuso é um aço baixa liga com limite de resistência à tração de 1103,20 MPa (160 ksi) e limite de

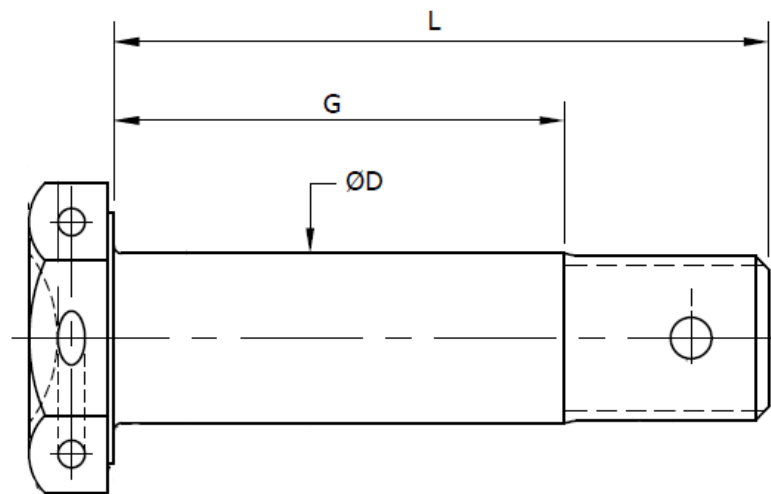
resistência ao cisalhamento de 661,92 MPa (95 ksi). As principais propriedades mecânicas deste material estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 3 – Dimensões do parafuso em [mm].

Diâmetro [D]	Comprimento [L]	Comprimento [G]
6,35 <sup>-0,013</sup> <sub>-0,038</sub>	15,75 <sup>±0,38</sup>	6,35 <sup>±0,25</sup>

Fonte: AIA - Aerospace Industries Association of America Inc. (2013a).

Figura 7 – Parafuso NAS6204-4



Fonte: Adaptado de AIA - Aerospace Industries Association of America Inc. (2013).

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do material do parafuso e da porca.

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
Módulo de Elasticidade, E [MPa]	199948
Módulo de Cisalhamento, G [MPa]	75842,3
Resistência à Tração [MPa]	1103,20
Resistência ao escoamento [MPa]	979,09
Resistência à Compressão [MPa]	1061,83
Resistência ao Cisalhamento [MPa]	661,92
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,32

Fonte: FAA (2008).

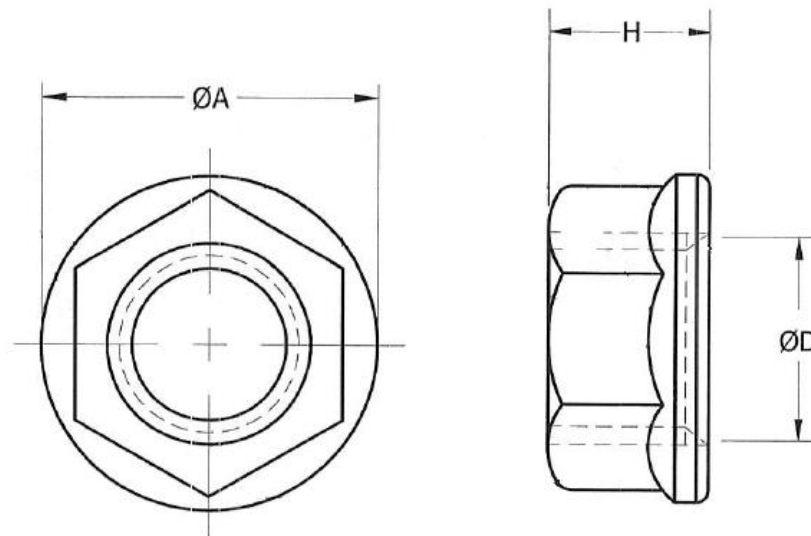
A porca possui o mesmo material do parafuso NAS6204 e a norma NASM21042 apresenta a carga de falha por tração de 27579 N. As principais dimensões da porca e o desenho estão apresentados na Tabela 5 e na Figura 8, respectivamente.

Tabela 5 – Dimensões da porca em [mm].

Diâmetro interno [D]	Diâmetro externo [A]	Altura [H]
6,35 <sup>+0,76</sup> <sub>-0</sub>	10,67	5,08 <sup>+0,48</sup> <sub>+0,10</sub>

Fonte: AIA - Aerospace Industries Association of America Inc. (2013b).

Figura 8 – Porca NASM21042



Fonte: Adaptado de AIA - Aerospace Industries Association of America Inc. (2013b).

Além disso, utilizou-se arruelas entre a cabeça do parafuso e a estrutura, e porca e a estrutura. Essas arruelas estavam conforme a norma NAS1149F0416P com 0,406 mm de espessura, fabricadas de aço carbono (Tabela 6) e recobertas de cádmio. Na Figura 9 está apresentado o desenho da arruela e na Tabela 7 estão descritas as principais dimensões.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do material da arruela.

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
Módulo de Elasticidade, E [MPa]	199948
Módulo de Cisalhamento, G [MPa]	75842,3
Resistência à Tração [MPa]	248,2
Resistência à Compressão [MPa]	248,2
Resistência ao Cisalhamento [MPa]	241,3
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,32

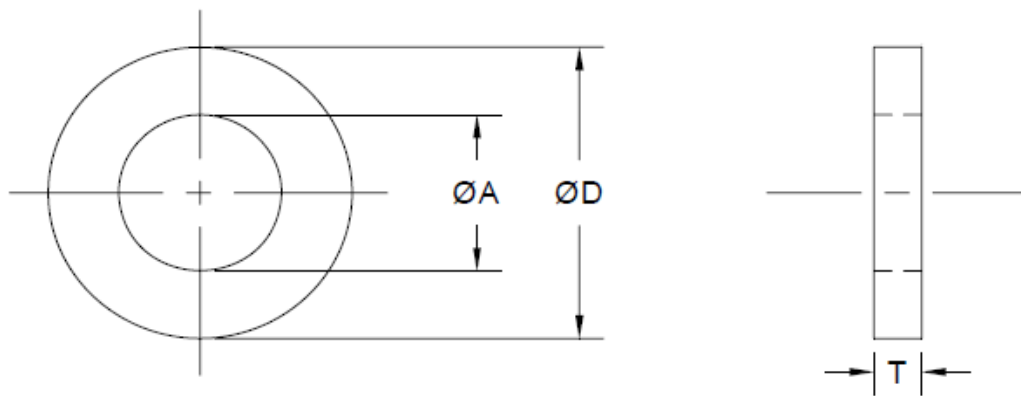
Fonte: FAA (2008).

Tabela 7 – Dimensões da arruela em [mm].

Diâmetro interno [A]	Diâmetro externo [D]	Espessura [T]
6,73 $\pm 0,25$	12,70 $\begin{matrix} +0,51 \\ -0,13 \end{matrix}$	0,406 $\pm 0,051$

Fonte: AIA - Aerospace Industries Association of America Inc. (2008).

Figura 9 – Arruela NAS1149



Fonte: Adaptado de AIA - Aerospace Industries Association of America Inc. (2008).

### 3.2 PROCESSAMENTO DO CORPO DE PROVA

O processamento dos laminados dos corpos de prova foi realizado na empresa AllTec Materiais Compostos, em uma sala com controle de temperatura, umidade e partículas. Um rolo do material SE 84LV RC416T (GURIT LTD, 2017) foi utilizado e cortes de 622 mm x 230 mm e 514 mm x 230 mm foram executados na máquina de corte Lectra Vector 2500, de tal forma a obter uma utilização otimizada. Além disso, cortes de 640 mm x 700 mm foram utilizados para fabricar a placa referente aos *tabs*. Após isso, os laminados foram processados manualmente empilhando as 6 camadas conforme configuração descrita na seção 3.1, sobre um ferramental plano, como apresentado na Figura 10.

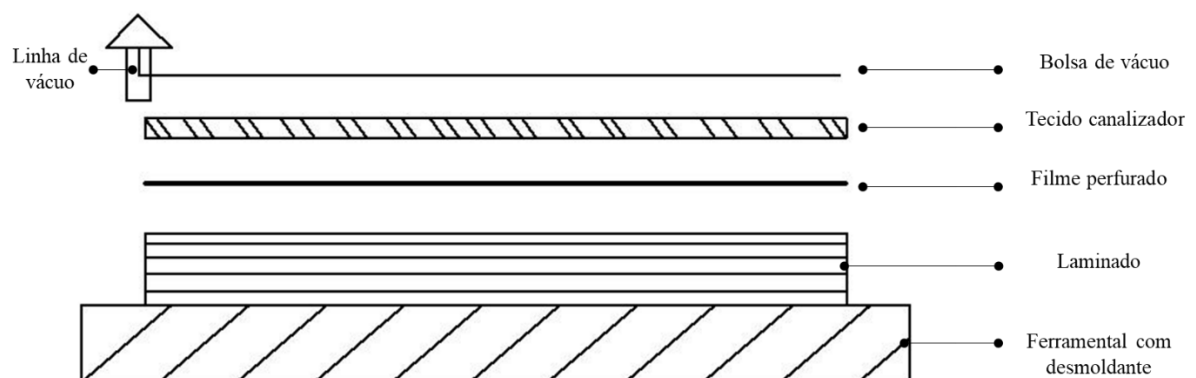
Figura 10 – Laminação manual.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A sequência dos materiais utilizados para a instalação da bolsa de vácuo está representada na Figura 11. Na Figura 12, é possível observar a instalação da bolsa de vácuo sobre o ferramental e a aplicação da compactação prévia (78 kPa). Após esta etapa, os laminados foram submetidos ao processo de cura da resina utilizando autoclave e respeitando o ciclo definido pelo fabricante do material, apresentado na Figura 13.

Figura 11 – Representação dos materiais utilizados para a instalação da bolsa de vácuo.



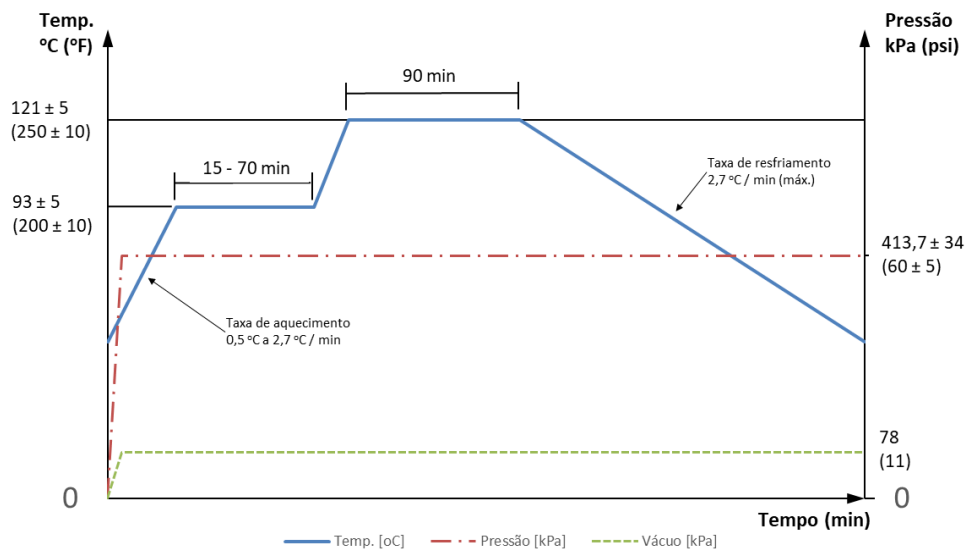
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Ferramental e os laminados sob compactação prévia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Ciclo de cura utilizado no processamento dos laminados.

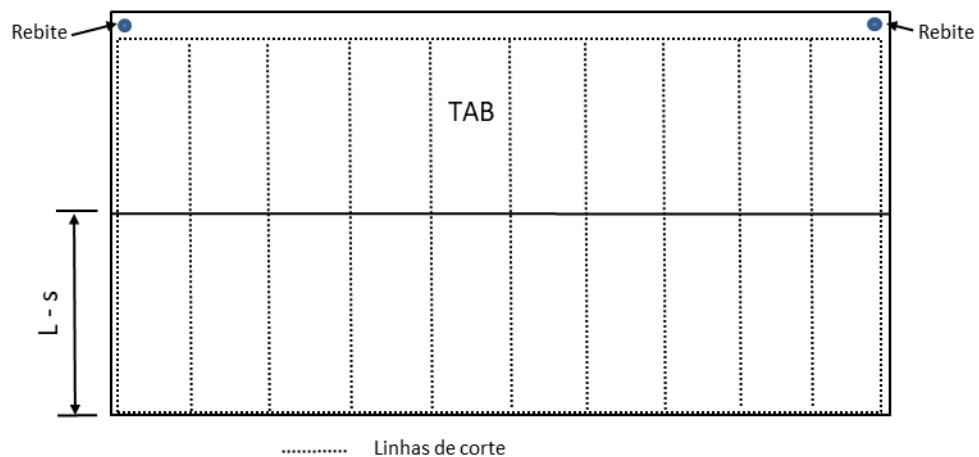


Fonte: Gurit LTD (2017).

Após a cura dos laminados, foi realizado ensaio não destrutivo por ultrassom conforme descrito na seção 3.3. Em seguida, os *tabs* foram colados nas placas utilizando um filme adesivo estrutural fabricado pela 3M, código AF163-2K.045WT (SCOTCH-WELD 3M, 2009). O ciclo

de cura do adesivo foi o mesmo utilizado para os laminados, que cumpre os requisitos especificados pela fabricante 3M e otimiza o processo produtivo da empresa Alltec. Para garantir o posicionamento correto dos *tabs* no laminado durante a cura do adesivo, dois rebites sólidos foram utilizados para fixá-los no laminado. Na Figura 14 está apresentado um esquema do posicionamento do *tab* sobre o laminado e a previsão do corte para a obtenção dos corpos de prova. Os rebites foram instalados em uma região que foi removida durante o processo de corte. O laminado durante o processo de colagem está apresentado na Figura 15.

Figura 14 – Posicionamento do *tab* sobre o laminado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

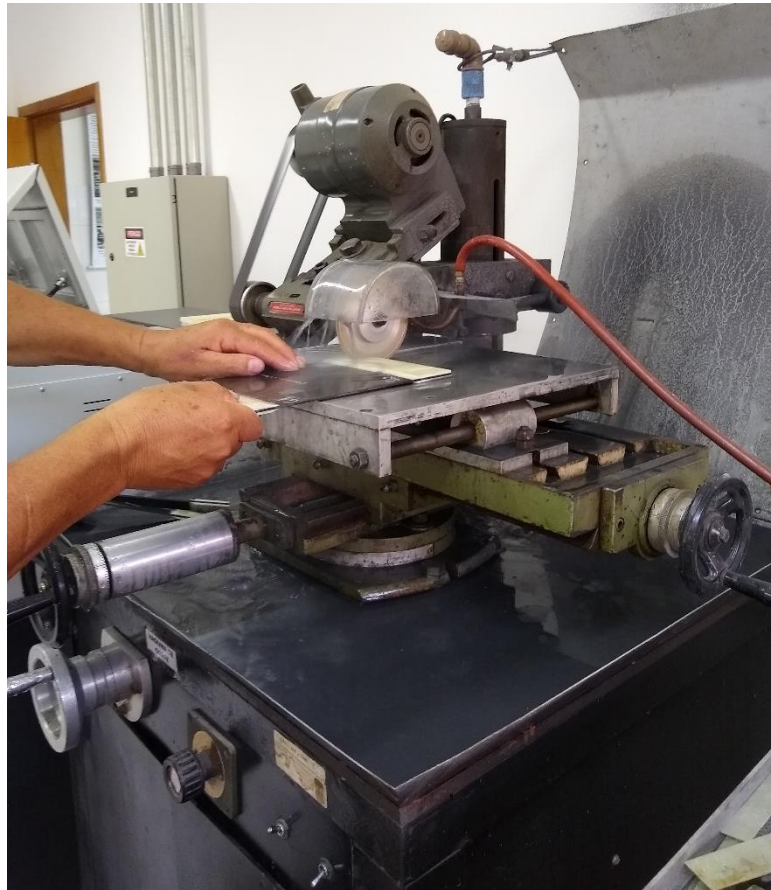
Figura 15 – Processo de colagem do *tab* sobre o laminado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para se obter os corpos de prova, um processo de corte foi realizado para cumprir com as dimensões especificadas na Tabela 2, na Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço (AMR/IAE). Foi utilizada uma serra circular acoplada a uma mesa de fixação com movimentação em dois eixos e resolução de 0,1 mm. O equipamento está apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Equipamento de corte dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa maneira, 40 corpos de prova foram obtidos e submetidos ao processo de furação, apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de furação foi realizado na empresa AllTec Materiais Compostos. Para garantir o correto posicionamento das duas partes dos corpos de prova, levando-se em consideração a distância entre furos, a distância de borda dos furos e o alinhamento entre o furo de um laminado ao outro, um gabarito foi desenvolvido. Desta forma, as furações em ambos os laminados eram realizadas em um único passo utilizando uma furadeira vertical e uma broca fabricada de carbeto de tungstênio, sem revestimento, duas arestas de corte e com diâmetro de 6,4 mm.

### 3.3 ANÁLISE POR ULTRASSOM

Os laminados processados para a obtenção dos corpos de prova foram submetidos ao ensaio não destrutivo por ultrassom, na empresa AllTec Materiais Compostos, com o objetivo de avaliar a integridade do componente e possíveis defeitos por fabricação, como vazios, porosidades, excesso de resina, inclusões e delaminações. A inspeção ocorreu segundo a técnica pulso eco, tipo A scan, utilizando o equipamento Olympus Omniscan SX com transdutor V201 – 5 MHz, apresentado na Figura 18. O tamanho mínimo dos defeitos detectáveis era de 12 mm, referente a soma das dimensões da largura e comprimento da discrepância.

Figura 18 – Equipamento Olympus Omniscan SX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A inspeção dos laminados não indicou nenhum defeito ou descontinuidade conforme relatório apresentado no ANEXO A.

### 3.4 MÉTODO ANALÍTICO

Como mencionado na seção 1.3, o pré-carregamento nos parafusos das juntas foi analisado e obtido por métodos analíticos convencionais e por ensaios de aplicação de torque. Primeiramente, o método analítico aplicável a parafusos e porcas em geral (BUDYNAS; NISBETT, 2016) (YU *et al.*, 2018) (HWANG, 2013) (CROCCOLO *et al.*, 2011) (OLMEDO; SANTIUSTE, 2012) (YU; ZHOU, 2015) foi utilizado e considera o efeito do atrito entre os filetes de rosca e o efeito do atrito entre a cabeça do parafuso ou porca ou as arruelas e o componente unido. Assim, a equação (28), resultado das equações (1) e (2), apresenta a relação do torque e do pré-carregamento.

$$T = \left[ \left( \frac{d_m}{2 \cdot d} \right) \cdot \left( \frac{\tan \beta + \mu \cdot \sec \alpha}{1 - \mu \cdot \tan \beta \cdot \sec \alpha} \right) + 0,625 \cdot \mu_b \right] \cdot F_i \cdot d \quad (28)$$

Além disso, foi utilizada a equação (3) desenvolvida por Motosh (YU *et al.*, 2015), a qual desconsidera o efeito do ângulo de hélice. Os parâmetros utilizados nas equações (3) e (28) estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros dos métodos analíticos

Parâmetros	
p	1,102 mm
d <sub>m</sub>	5,685 mm
β	3,532°
α	30,000°
μ	0,120
μ <sub>b</sub>	0,124

Fonte: SAE International (2004), Oberg *et al.* (2020).

### 3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

#### 3.5.1 Ensaio para análise de torque e pré-carregamento

Para determinar a relação da carga de prova e da carga de resistência ao escoamento do material do parafuso com o pré-carregamento, a qual não provocasse danos no laminado, três configurações de corpos de prova foram propostas, variando o valor do torque aplicado. Os torques foram definidos utilizando os métodos analíticos propostos, baseados na capacidade e resolução dos torquímetros utilizados nos ensaios de resistência da junta em tração e na produção de pré-carregamentos próximos ao intervalo de 75% a 90% da carga de prova do parafuso ou carga de resistência ao escoamento do material do parafuso, conforme Oberg *et al.* (2020) e Norton (2013). A primeira configuração apresentou uma montagem dos parafusos e porcas com a aplicação de um pré-carregamento de 68% do valor da carga de prova do parafuso ou 57,8% carga de resistência ao escoamento do material. A segunda configuração contemplou um pré-carregamento de 80,2% da carga de prova do parafuso ou 68,2% carga de resistência ao escoamento do material e a terceira configuração 96,2% da carga de prova do parafuso ou 81,8% carga de resistência ao escoamento do material. A carga de prova do parafuso foi obtida utilizando a equação (29) (OBERG *et al.*, 2020).

$$F_p = A_t \cdot S_p \quad (29)$$

Onde  $F_p$  é a carga de prova,  $A_t$  é a área em tração e  $S_p$  é a resistência de prova do parafuso. A área de tração para parafusos que possuem rosca de acordo com o padrão de perfil UNJ (SAE

INTERNATIONAL, 2004), segundo Oberg *et al.* (2020), pode ser calculada utilizando a equação (30).

$$A_t = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \quad (30)$$

Onde  $d_p$  é o diâmetro primitivo.

Além disso, Oberg *et al.* (2020) define que a resistência de prova equivale a 85% da resistência ao escoamento do material do parafuso aproximadamente. Assim, a resistência de prova pode ser determinada pela equação (31).

$$S_p = 0,85 \cdot S_{esc} \quad (31)$$

Onde  $S_{esc}$  é a resistência ao escoamento do material do parafuso.

Quinze corpos de prova (CDP) foram submetidos ao ensaio, em que o torque foi aplicado à porca, utilizando uma chave de aperto instrumentada com quatro extensômetros unidirecionais. Os extensômetros são do modelo KFG – 3 – 120 – C1 – 11 do fabricante KYOWA, instalados de tal maneira a possuir uma saída para um canal do sistema de aquisição, configurada para ponte completa (ENCARNAÇÃO, 2019). A Figura 19 apresenta a chave de aperto instrumentada.

Figura 19 – Chave de aperto instrumentada



Fonte: Encarnação (2019).

Os ensaios foram realizados no Departamento de Mecânica da UNESP, câmpus de Guaratinguetá. A aplicação do torque ocorreu pela porca para evitar danos na superfície interna

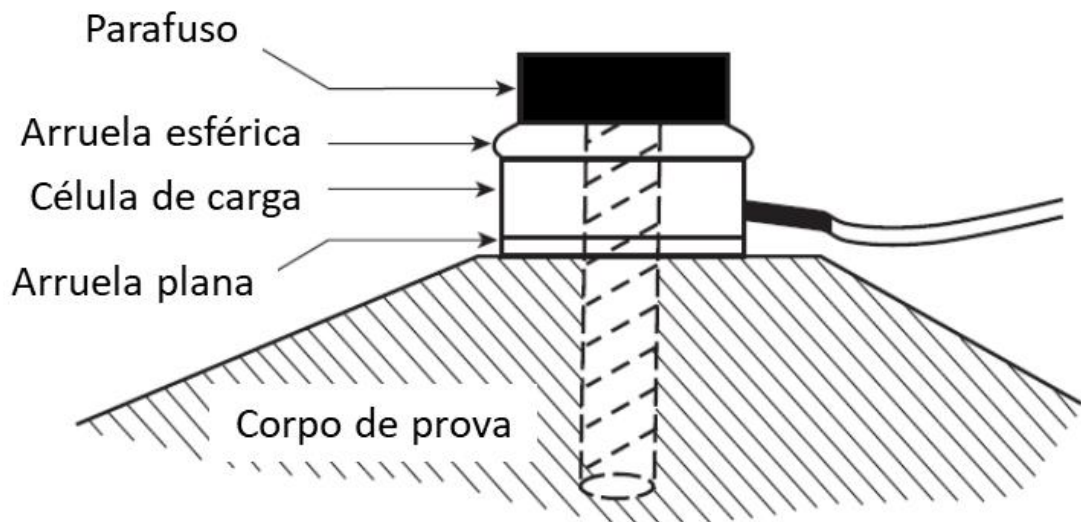
do furo. Na Tabela 9 estão apresentadas as quantidades de corpos de prova analisados para cada configuração, respeitando a recomendada pela norma ASTM D5961 (ASTM, 2003), que é de no mínimo 5 unidades.

	Pré-carregamento	Quantidade de CDP
Configuração 1	68,0%	5
Configuração 2	80,2%	5
Configuração 3	96,2%	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova foram instrumentados, conforme está apresentado na Figura 20, utilizando uma arruela célula de carga Omega LCMWD-20KN, com capacidade de 20 kN, localizada entre a cabeça do parafuso NAS6204-4 e a arruela plana NAS1149F0416P com o objetivo de medir o pré-carregamento no parafuso. Com os valores do pré-carregamento, é possível obter os valores dos coeficientes de torque utilizando a equação (1).

Figura 20 – Esquema de instalação da arruela célula de carga.



Fonte: Adaptado de Omega Engineering, [s.d.].

Os sinais gerados tanto pela arruela célula de carga, quanto pela chave de aperto foram transmitidos para um módulo de aquisição de dados, modelo Quantum MX1615, marca HBM. O processamento e análise dos resultados foram realizados com o auxílio do *software* CATMAN AP,

versão V3.3.58. Na Figura 21 está apresentado o sistema de aquisição de dados da arruela célula de carga e da chave de aperto instrumentada.

Figura 21 – Sistema de aquisição de dados



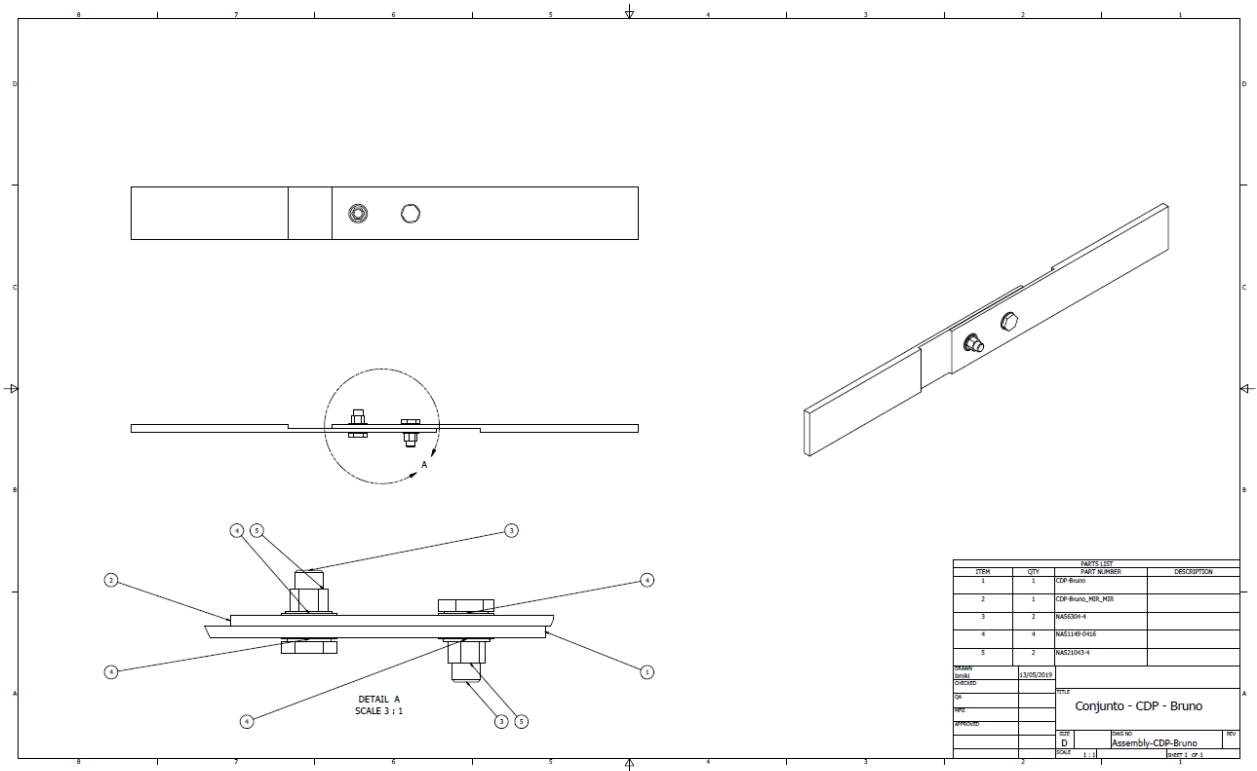
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a realização do ensaio de aplicação de torque, os corpos de prova de cada configuração foram submetidos ao ensaio de ultrassom a fim de verificar a presença de danos, devido ao pré-carregamento aplicado.

### 3.5.2 Ensaio de resistência da junta em tração

Ensaio de resistência da junta em tração foram realizados, conforme a norma ASTM D5961 (ASTM, 2003), em vinte e quatro corpos de prova, de acordo com a Tabela 10, divididos nas três configurações apresentadas na seção 3.5.1. Assim, a quantidade de corpos de provas ensaiados foi maior do que a recomendada pela norma ASTM D5961 (ASTM, 2003), que é de no mínimo 5 unidades, para considerar qualquer erro durante a execução do ensaio. Na Figura 22 está apresentado o desenho de conjunto do corpo de prova utilizado neste ensaio e as dimensões estão definidas na Tabela 2.

Figura 22 – Desenho de conjunto do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que os parafusos fossem submetidos ao pré-carregamento, os torques foram aplicados utilizando dois tipos de torquímetros, dependendo dos valores. Estes foram definidos conforme o método analítico que apresentou o menor erro relativo em relação aos valores obtidos durante o ensaio para análise de torque. Um dos torquímetros disponíveis foi o de estalo, da fabricante Gedore, modelo Torcofix K, que possui escala de 2 até 25 N.m, com resolução de 0,1 N.m. A exatidão é de  $\pm 3\%$  do valor obtido em qualquer ponto da escala. O outro torquímetro foi o de estalo, da fabricante Gedore, modelo Flex O-Click linha L. O funcionamento é baseado no comportamento de flexão da haste com escala de 30 até 160 N.m, com resolução de 10 N.m. A exatidão é de  $\pm 6\%$  do valor obtido em qualquer ponto da escala.

Tabela 10 – Configurações do ensaio de resistência da junta em tração

	Pré-carregamento	Quantidade de CDP
Configuração 1	68,0%	8
Configuração 2	80,2%	8
Configuração 3	96,2%	8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios foram conduzidos para determinar a resistência à tração de cada corpo de prova e a influência do pré-carregamento nesta propriedade mecânica. Assim, eles foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos da fabricante MTS, equipada com uma célula de carga de 50 kN, conforme apresentada na Figura 23, no Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Unifesp, em São José dos Campos. Durante a execução dos ensaios, houve um controle de deslocamento do atuador da máquina com uma taxa de 2 mm/min até a ocorrência da falha durante o ensaio.

Figura 23 – Máquina de ensaios universais.



Fonte: MTS Systems Corporation (2018).

### 3.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos foi utilizado para analisar o comportamento e as respostas de tensões e deformações dos corpos de prova e do parafuso, sob a aplicação de forças de tração e sob a aplicação de pré-carregamento de 68%, 80,2% e 90% da carga de prova do parafuso devido ao torque. Além disso, a análise permitiu a definição dos valores das forças de tração que acarretaram a falha do laminado segundo o critério de Hashin.

Modelos tridimensionais do parafuso, porca, arruela e laminados foram gerados utilizando elementos sólidos, dados de propriedades mecânicas dos materiais e geometrias, conforme normas específicas dos componentes, descritas na seção 0. A malha de elementos finitos foi refinada em torno dos furos e nas regiões de contato entre arruelas e laminados, principalmente pela presença de concentrações de tensões.

Análises referentes aos contatos entre as partes foram consideradas juntamente com os seus respectivos coeficientes de atrito, utilizando um código de análise baseado no *software* Femap, versão 11.4.1, o qual utiliza algoritmos NASTRAN. Os coeficientes de atrito utilizados são 0,3 entre as placas (QIN *et al.*, 2013), 0,1 entre parafuso e furos das placas (LU *et al.*, 2018) e 0,124 entre arruelas e placas (HERRINGTON; SABBAGHIAN, 1991). Para o contato, definiu-se corpos deformáveis relativos aos laminados, às arruelas, às porcas e aos parafusos, sendo que as arruelas estavam solidárias às porcas e aos parafusos e, as porcas estavam solidárias aos parafusos. A modelagem tridimensional permite uma maior interação entre os elementos e seus respectivos nós, quando comparado a modelos bidimensionais.

A formulação utilizada pelo software permitiu a escolha dos contatos entre os corpos com grandes escorregamentos (*Contact*) ou pequenos escorregamentos (*Glued*), sendo que, nesse último, os corpos não estão habilitados a penetrar-se, separar-se ou apresentar escorregamento relativo entre eles. O tipo de contato definido entre os laminados com os parafusos e porcas foi o de grandes escorregamentos, o qual permite separação, escorregamento relativo, mas não há penetração entre as malhas de elementos finitos. Já as interfaces entre parafuso e porca com as arruelas foram feitas através da formulação de pequenos escorregamentos, para representar o comportamento no qual não há movimento relativo entre as partes após o contato.

Além disso, o pré-carregamento foi aplicado utilizando a ferramenta específica do *software* sobre os elementos selecionados que representam o parafuso. O critério de falha utilizado foi de acordo com Hashin, pois permitiu determinar o modo de falha final segregando os da fibra e da matriz, além de apresentar resultados aceitáveis na previsão de falhas em juntas aparafusadas (MANDAL; CHAKRABARTI, 2018) (CHENG *et al.*, 2017) (ZHAO *et al.*, 2016).

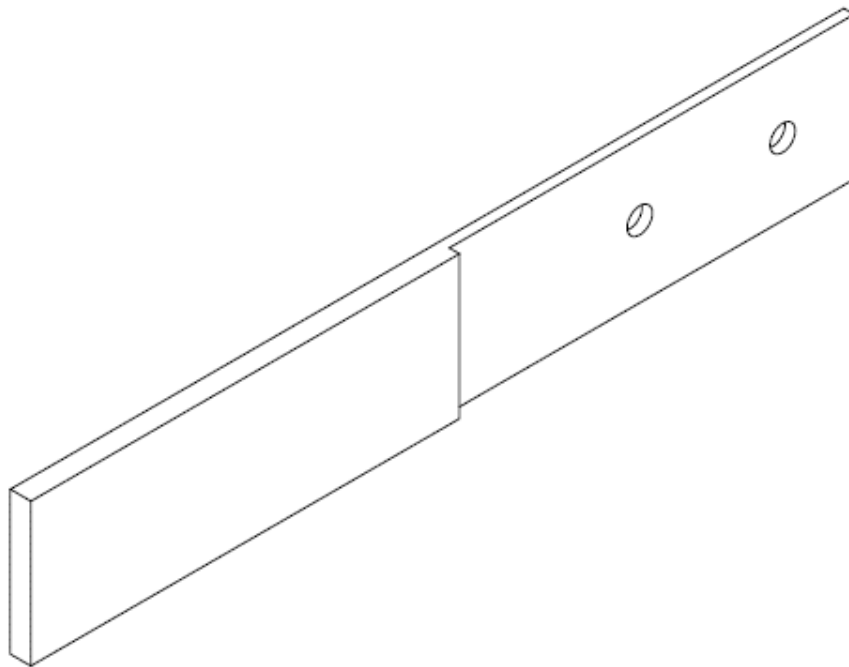
### 3.6.1 Modelagem das placas

A simulação numérica depende de modelos geométricos que representem os corpos submetidos aos carregamentos e condições de contorno. Assim, modelos de sólidos geométricos foram desenvolvidos para representar as placas da junta aparafusada em escala 1:1, utilizando

o *software* comercial Autodesk Inventor Professional 2019 devido a sua interface gráfica amigável e os recursos disponíveis.

As dimensões estão de acordo com o descrito na Tabela 2 e na Figura 24 está apresentado o modelo geométrico das placas.

Figura 24 – Modelo geométrico das placas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os modelos geométricos foram importados pelo *software* Femap, versão 11.4.1, e utilizados como referência para criação dos elementos, nós e aplicação das condições de contorno. O material das placas foi definido como sendo ortotrópico, escolhendo a opção *3D Orthotropic*, devido à disponibilidade da inserção das propriedades mecânicas e requerido para a criação do tipo do elemento escolhido. As propriedades mecânicas, definidas na Tabela 1, foram inseridas no software e estão apresentadas na Figura 25.

Figura 25 – Inserção das propriedades mecânicas do material das placas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

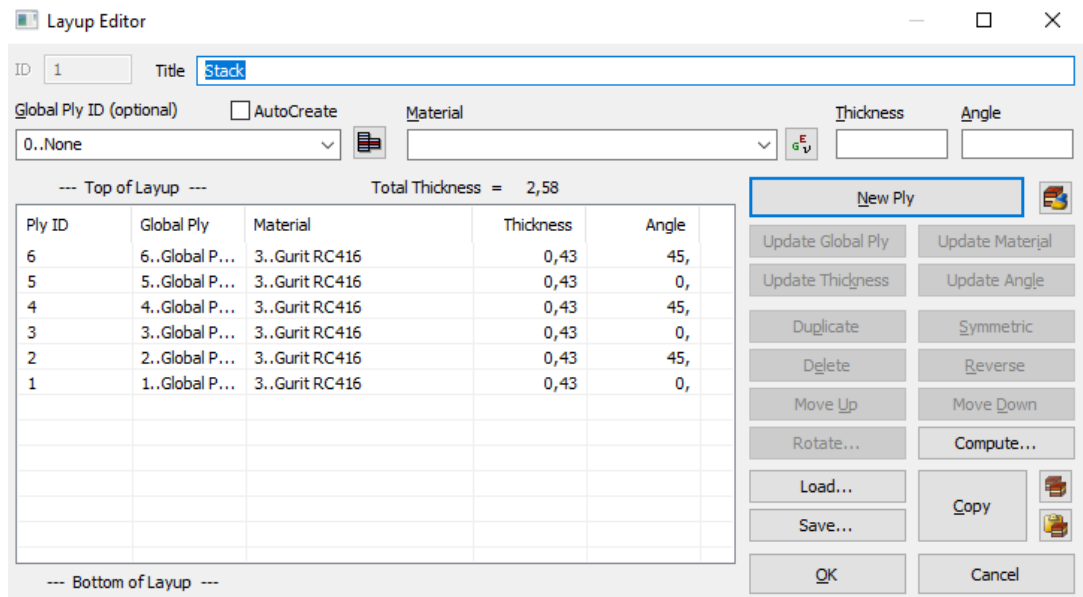
Além disso, as propriedades do elemento finito foram determinadas especificamente para o tipo de elemento laminado sólido (*Solid Laminate Element*) (Figura 26). Essas propriedades contemplam o sistema de coordenadas do material, a direção das camadas do laminado e as tensões admissíveis da resina.

Figura 26 – Propriedades do elemento laminado sólido.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O editor de configuração de camadas permite que seja definida a direção, o material e a espessura de cada camada do laminado, como apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Editor de configuração de camadas



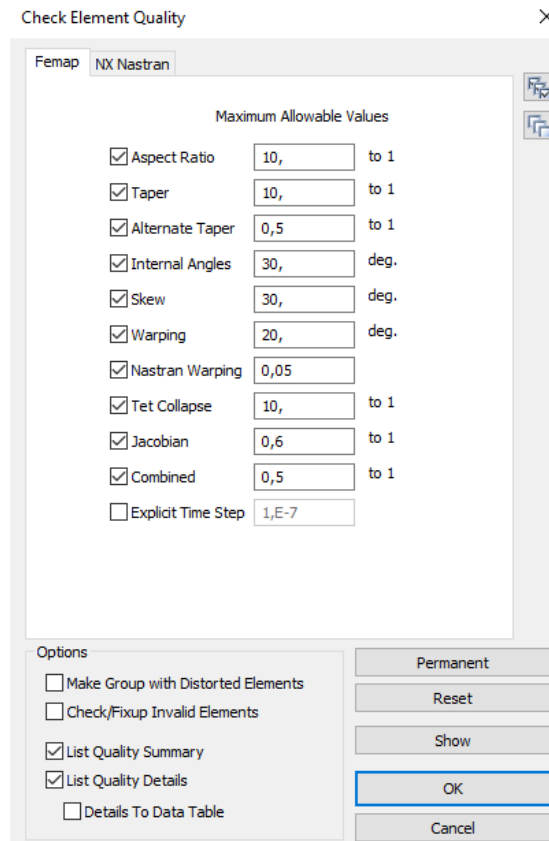
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6.1.1 Malha

O tipo de elemento laminado sólido (*Solid Laminate Element*) escolhido para representar as placas, é similar a um elemento sólido tridimensional, com a exceção de que este elemento é composto por uma ou mais camadas e deve ser aplicado apenas uma unidade ao longo da espessura.

O formato escolhido foi o hexaedro com oito nós (*eight-noded brick*), que permitiu a criação de uma malha uniforme com o cumprimento dos critérios de qualidade do elemento referentes a, principalmente, relação de aspecto (*aspect ratio*), afunilamento (*taper*) e Jacobiano (*Jacobian*) (Figura 28). Além disso, houve um controle na quantidade de elementos e nós, pois, devido ao *software* utilizado possuir uma licença educacional, há um limite de 32000 nós.

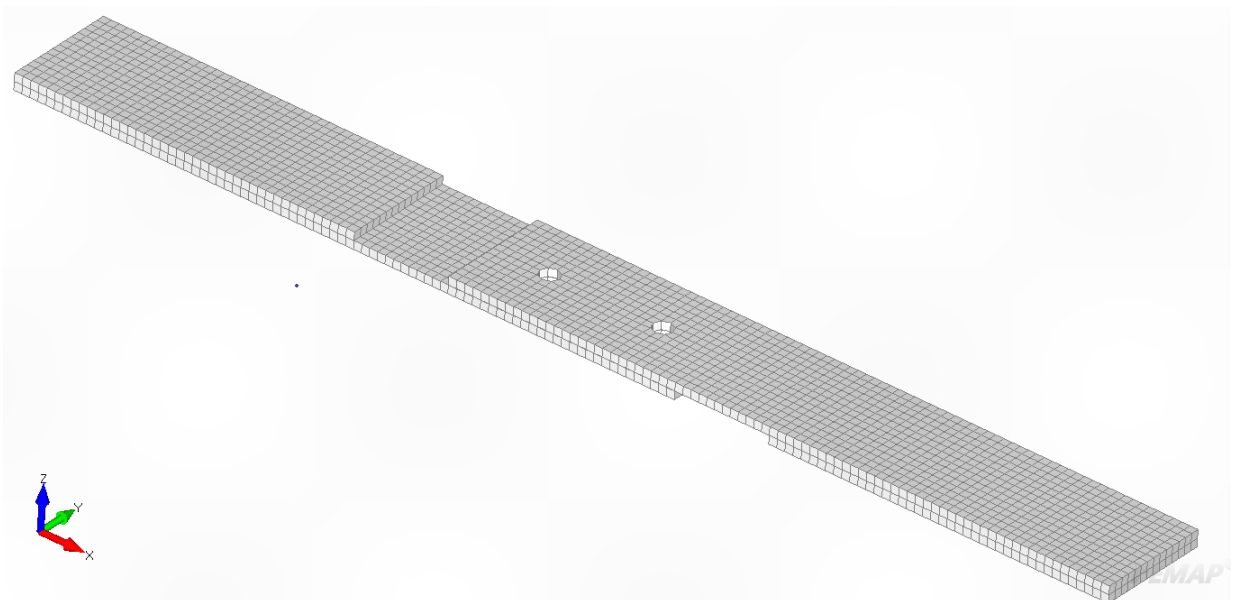
Figura 28 – Qualidade do elemento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, a malha referente às placas apresentou 3456 elementos e 6262 nós (Figura 29).

Figura 29 – Malha de elementos finitos das placas



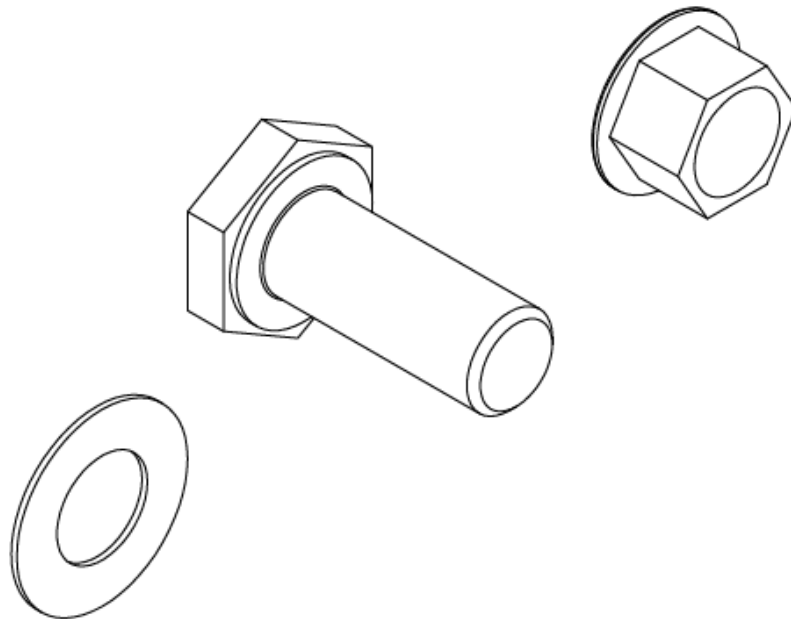
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6.2 Modelagem dos parafusos, porcas e arruelas

Análogo ao que foi realizado para as placas, a modelagem dos parafusos, porcas e arruelas iniciou-se com a criação de sólidos geométricos em escala 1:1, utilizando o *software* comercial Autodesk Inventor Professional 2019.

As dimensões estão conforme apresentadas nas Tabela 3, Tabela 5 e Tabela 7 e o modelo está apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Modelos geométricos do parafuso, porca e arruela.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, esses modelos geométricos foram importados pelo *software* Femap e dois materiais isotrópicos foram definidos, como apresentados pelas Figura 31 e Figura 32. As propriedades mecânicas do aço carbono, referente a arruela, e do aço baixa liga, para a porca e o parafuso, estão apresentadas nas Tabela 4 e Tabela 6.

Figura 31 – Inserção das propriedades mecânicas do material das arruelas.

The screenshot shows the 'Define Material - ISOTROPIC' dialog box. The title is 'Carbon Steel'. The ID is 1. The color is 55. The layer is 1. The dialog is divided into several tabs: General, Function References, Nonlinear, Ply/Bond Failure, Creep, Electrical/Optical, and Phase. The 'General' tab is active. It contains the following fields:

Property	Value
Young's Modulus, E	199948,
Shear Modulus, G	75842,3
Poisson's Ratio, nu	0,32
Expansion Coeff, a	0,
Conductivity, k	0,
Specific Heat, Cp	0,
Heat Generation Factor	0,
Limit Stress - Tension	248,2
Limit Stress - Compression	248,2
Limit Stress - Shear	241,3
Mass Density	0,
Damping, 2C/Co	0,
Reference Temp	0,

Buttons at the bottom: fxy, Load..., Save..., Copy..., OK, Cancel.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Inserção das propriedades mecânicas do material das porcas e dos parafusos.

The screenshot shows the 'Define Material - ISOTROPIC' dialog box. The title is 'Steel 4340 160ksi'. The ID is 2. The color is 55. The layer is 1. The dialog is divided into several tabs: General, Function References, Nonlinear, Ply/Bond Failure, Creep, Electrical/Optical, and Phase. The 'General' tab is active. It contains the following fields:

Property	Value
Young's Modulus, E	199948,
Shear Modulus, G	75842,3
Poisson's Ratio, nu	0,32
Expansion Coeff, a	0,
Conductivity, k	0,
Specific Heat, Cp	0,
Heat Generation Factor	0,
Limit Stress - Tension	979,05
Limit Stress - Compression	1061,8
Limit Stress - Shear	661,9
Mass Density	0,
Damping, 2C/Co	0,
Reference Temp	0,

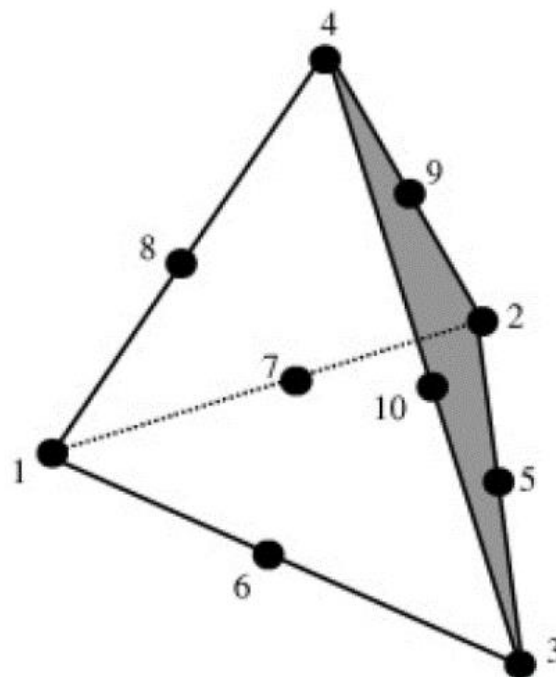
Buttons at the bottom: fxy, Load..., Save..., Copy..., OK, Cancel.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6.2.1 Malha

Para realizar a discretização do modelo, o elemento escolhido foi o sólido com formato tetraédrico e apresentando 10 nós (*ten-noded tetrahedron*), devido à complexidade da geometria dos corpos. Esse elemento apresenta um modelo de interpolação quadrática envolvendo os 10 nós localizados nos vértices e no ponto médio das arestas. Uma representação do elemento está mostrada na Figura 33.

Figura 33 – Representação do elemento tetraédrico com 10 nós.

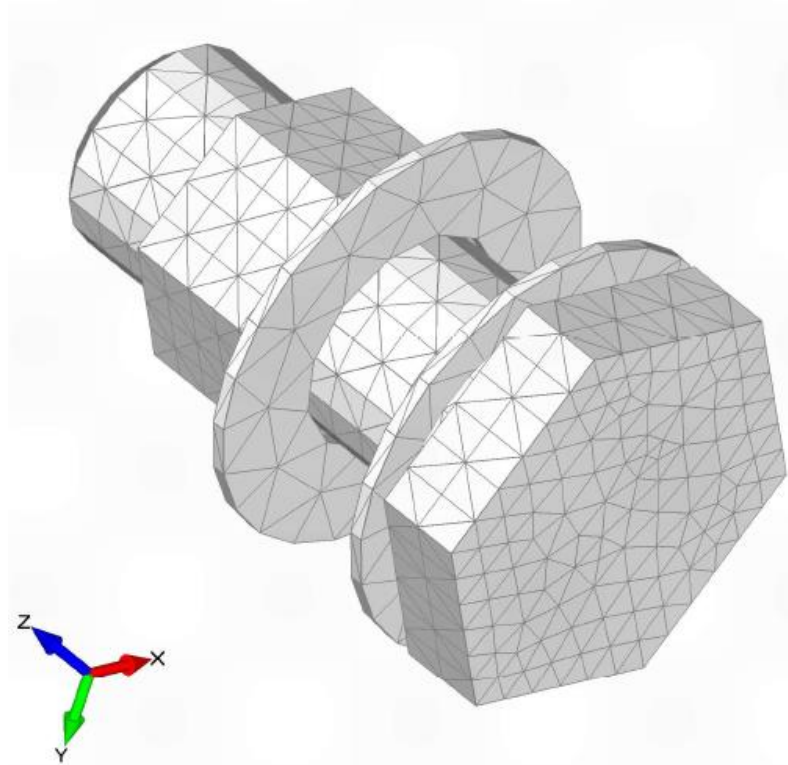


Fonte: Adaptado de Liu e Quek (2014).

Durante o procedimento de discretização, as regiões de descontinuidade geométrica foram submetidas a um refinamento com elementos menores para que os concentradores de tensão fossem representados e os resultados apresentassem menores erros, quando comparados ao corpo real.

Desta maneira, a malha (Figura 34) apresentou 13112 elementos e 22840 nós.

Figura 34 – Malha de elementos finitos dos parafusos, porcas e arruelas

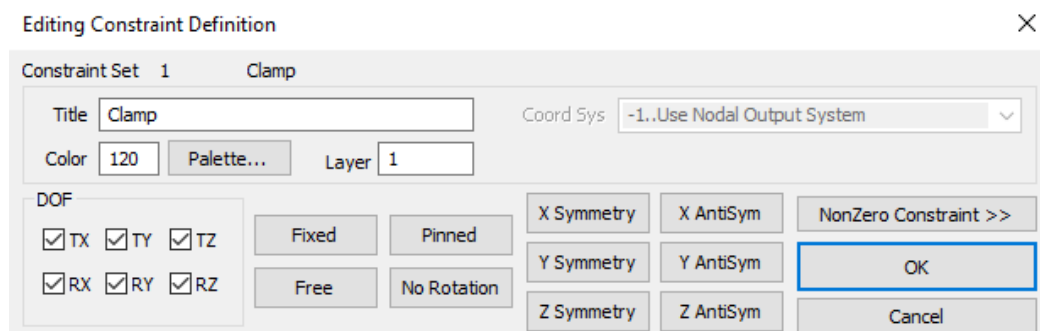


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6.3 Condições de contorno

Para que esse modelo fosse representativo do ensaio de resistência da junta em tração, em uma das extremidades do corpo de prova foram definidas restrições nas três direções para translação e rotação (Figura 35). Essas restrições simulam a garra da máquina de ensaio, que permanece fixa durante o procedimento.

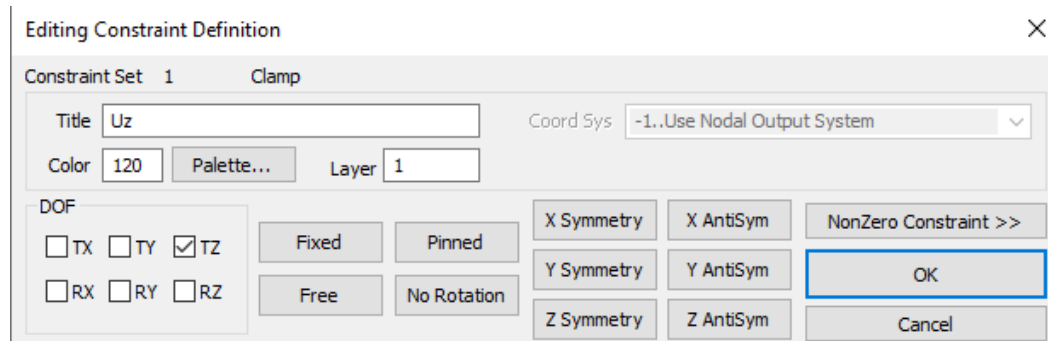
Figura 35 – Definição das restrições na extremidade fixa do corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na outra extremidade, foi aplicada a restrição de translação na direção do eixo  $z$  para simular a garra móvel da máquina de ensaio e permitir o deslocamento devido ao carregamento externo aplicado.

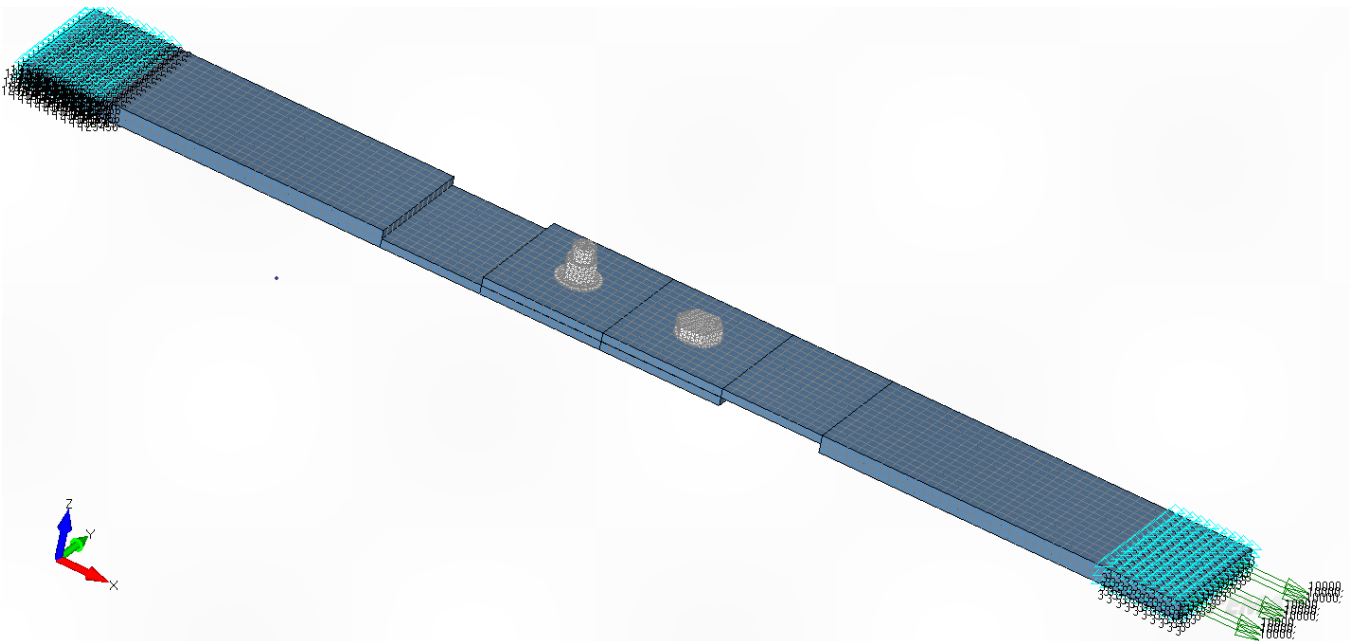
Figura 36 – Definição das restrições na extremidade móvel do corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

O carregamento, força na direção do eixo  $x$ , foi distribuído sobre a superfície da seção transversal da extremidade móvel do corpo de prova. Na Figura 37, está demonstrada a aplicação das restrições e do carregamento.

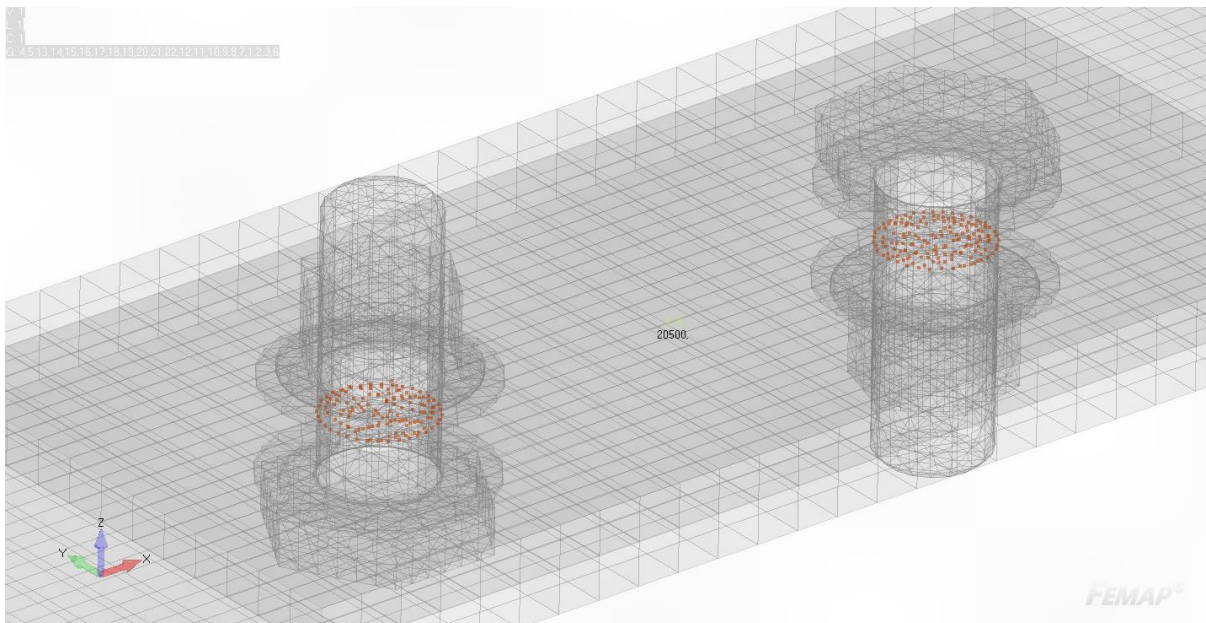
Figura 37 –Restrições e carregamento no corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, em cada parafuso foram aplicados os pré-carregamentos definidos na seção 3.5.1. Foi utilizada a ferramenta, do *software* Femap, específica para esse tipo de carregamento (*Bolt preload*). O procedimento demanda a definição da região onde o pré-carregamento será aplicado e, na condição de um parafuso modelado com elementos sólidos, essa região é definida pelos nós. Esses nós devem representar a seção transversal do parafuso para que haja uma distribuição de carga sobre toda essa área. Na Figura 38 estão mostrados os nós em destaque na cor vermelha, que definem as regiões nos parafusos.

Figura 38 –Regiões de aplicação do pré-carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6.4 Contato

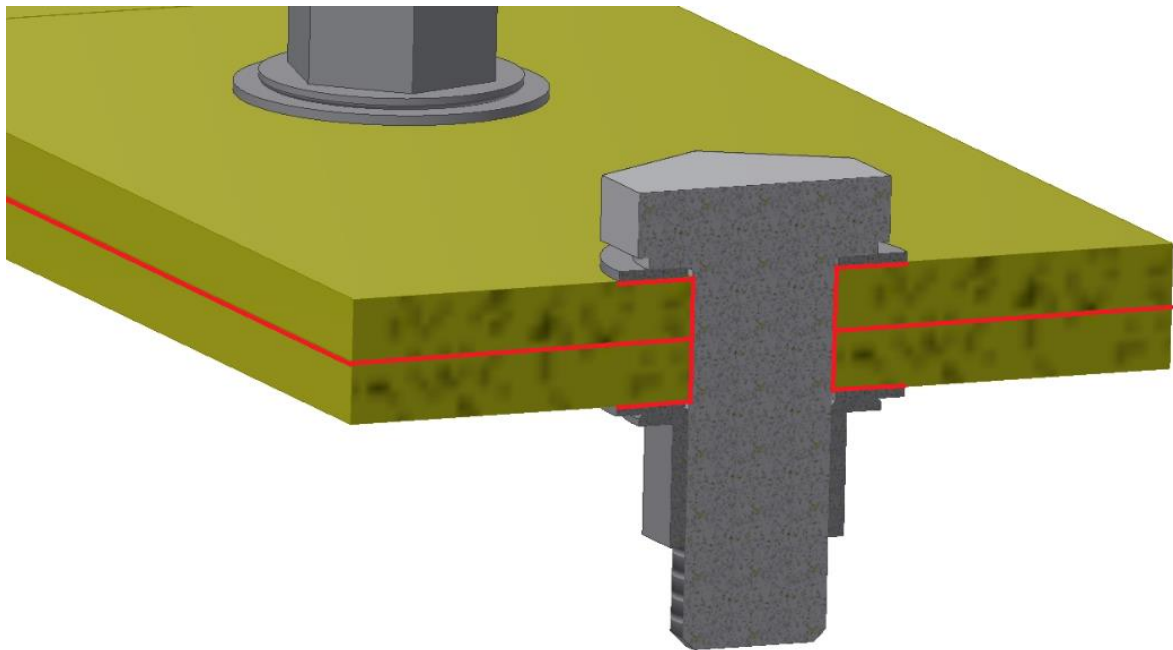
Nas interfaces dos componentes, os contatos foram considerados no modelo utilizando os recursos do software que permitem conectá-los, utilizando uma análise linear estática. Desta maneira, a interação entre parafusos, porcas, arruelas e placas foi contemplada, permitindo uma resposta da simulação às condições de contorno e de carregamento com maior detalhe e representatividade aos corpos de provas reais.

O desenvolvimento do algoritmo relacionado ao contato envolve equações cinemáticas que descrevem o movimento relativo de duas superfícies, a solução das equações de equilíbrio

estático, considerando as condições de contorno e restrições de contato, além de soluções de equações matriciais (SIEMENS PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT SOFTWARE INC., 2014).

No pré-processamento, inicialmente, definiu-se as regiões onde espera-se ocorrer contato utilizando as superfícies dos componentes analisados, as quais apresentam as faces livres dos elementos. Assim, foram criadas as regiões referentes aos corpos dos parafusos, as superfícies inferiores das cabeças dos parafusos, as superfícies externas das porcas, as superfícies dos furos das porcas, as superfícies das arruelas, as superfícies externas das placas e as superfícies dos furos das placas. A Figura 39 apresenta as regiões de interface dos componentes onde houve a consideração dos contatos.

Figura 39 – Regiões de contato



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez criadas as regiões de contato, os parâmetros de contato foram definidos e estão exemplificados na Figura 40.

Figura 40 –Parâmetro de contato – Exemplo do contato entre arruelas e placas

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as regiões foram definidas como contatos (“*Contact*”), onde há movimento relativo entre as superfícies, com exceção das relações entre parafusos, porcas e arruelas. Para essas relações, foi definida a conexão do tipo colada (“*Glued*”), que não permite movimento relativo entre os pares de componentes selecionados, pois a interação entre as regiões roscadas do parafuso e porca não foi objeto de estudo neste trabalho, mas sim a garantia que estariam solidárias após a aplicação do torque e cumprindo a função na união das placas. Da mesma maneira, na relação dos parafusos e porcas com as arruelas que, após a aplicação do torque, há uma maior consideração do movimento relativo entre as arruelas e as placas.

Para as conexões do tipo contato, um relevante parâmetro é o coeficiente de atrito entre as superfícies que foi definido em 0,3 entre as placas (QIN *et al.*, 2013), 0,1 entre parafuso e furos das placas (LU *et al.*, 2018) e 0,124 entre arruelas e placas (HERRINGTON; SABBAGHIAN, 1991). Assim, nestas condições, somente os coeficientes de atrito foram modificados para representar os contatos entre as superfícies dos componentes da junta, com o

objetivo de obter respostas convergentes da análise não-linear, mantendo os demais parâmetros conforme definidos na Figura 40.

### 3.7 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

Após a realização dos ensaios de resistência da junta em tração definidos na seção 3.5.2, análises fractográficas foram realizadas e permitiram a correlação com os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos e o critério de falha de Hashin. Foram contempladas observações macroscópicas e microscópicas.

A análise microscópica foi realizada utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura FEI Inspect S50 em um corpo de prova fraturado de cada configuração, de tal modo a caracterizar os aspectos da fratura, correlacionando com as configurações de juntas propostas, investigando os mecanismos de fratura devido ao carregamento aplicado, os possíveis modos de falha e evidências de fatores que tenham contribuído para a falha.

As superfícies de fratura foram submetidas a um recobrimento superficial de uma fina camada de ouro utilizando o equipamento Quorum Q150R ES, a fim de aumentar a condutividade elétrica para análise no MEV e sem que houvesse a degradação da topografia do corpo de prova.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 MÉTODO ANALÍTICO

Conforme descrito na seção 3.4, dois métodos analíticos foram utilizados para obter o pré-carregamento e sua relação com o torque aplicado. As três configurações definidas na seção 3.5.1, apresentam a aplicação do pré-carregamento, que está relacionado com a carga de prova e a carga de escoamento do material do parafuso. Considerando a resistência ao escoamento apresentada na Tabela 4, a resistência de prova foi obtida utilizando a equação (31) e, conseqüentemente, a carga de prova foi obtida utilizando a equação (29). Os valores calculados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resistência de prova, carga de prova e carga de escoamento do parafuso

Resistência de prova	832,23 MPa
Carga de prova	17566,48 N
Carga de escoamento	20666,45 N

Fonte: Elaborado pelo autor.

Definida a carga de prova, os valores dos pré-carregamentos esperados para as três configurações foram obtidos e estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Pré-carregamentos

	Porcentagem da carga de prova	Pré- carregamento
Configuração 1	68,0%	11945,21 N
Configuração 2	80,2%	14088,32 N
Configuração 3	96,2%	16904,23 N

Fonte: Elaborado pelo autor.

Desse modo, os torques aplicados nos corpos de prova foram determinados utilizando a equação (28), referente a juntas em geral (YU *et al.*, 2018), e a equação (3), referente ao método apresentado por Motosh (YU *et al.*, 2015). Os resultados estão apresentados na Tabela 13.

Especificamente para o método analítico geral, foi calculado o valor do coeficiente de torque (K), resultando em 0,1703.

Tabela 13 – Torques obtidos analiticamente

	Pré-carregamento	Motosh	Geral
Configuração 1	68,0%	21,2 N.m	11,6 N.m
Configuração 2	80,2%	25,0 N.m	13,6 N.m
Configuração 3	96,2%	30,0 N.m	16,4 N.m

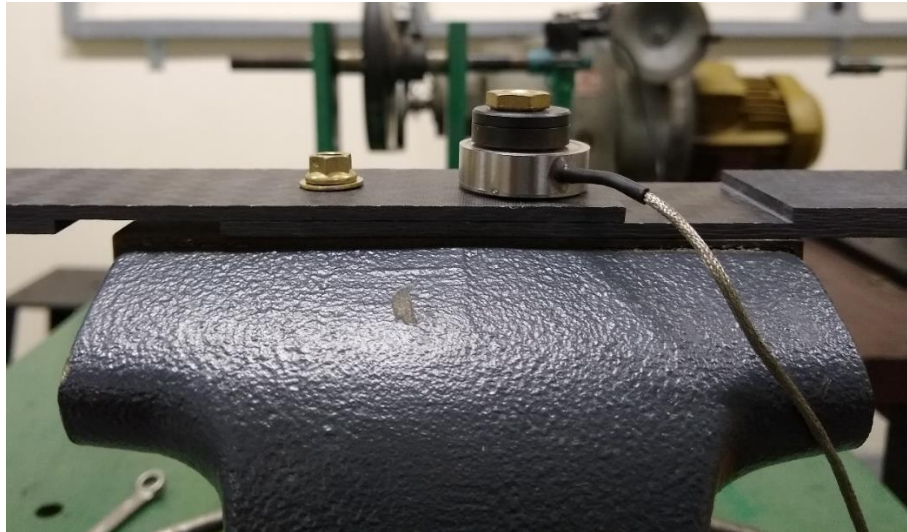
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos utilizando o método proposto por Motosh (YU *et al.*, 2015) apresentaram valores maiores de torque para produzir o mesmo pré-carregamento, quando comparado com os obtidos pela equação geral (YU *et al.*, 2018). Isso demonstra que o primeiro método citado neste parágrafo, considera uma maior perda de energia do torque aplicado por atrito, afetando diretamente o pré-carregamento gerado.

#### 4.2 ENSAIO PARA ANÁLISE DE TORQUE E PRÉ-CARREGAMENTO

Conforme descrito na seção 3.5.1, três configurações de corpos de prova foram propostas, variando o valor do torque aplicado, que produz pré-carregamentos de 68% da carga de prova (57,8% da carga de escoamento do material), 80,2 % da carga de prova (68,2% da carga de escoamento do material) e 96,2 % da carga de prova (81,8% da carga de escoamento do material). Além disso, para se obter o valor do pré-carregamento, foi utilizada a arruela célula de carga Omega LCMWD-20KN (Figura 41). A célula de carga apresentava a calibração válida, conforme documentação da fabricante.

Figura 41 –Arruela célula de carga - instalação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a aplicação do torque, a chave de aperto instrumentada, apresentada na seção 3.5.1, foi utilizada permitindo a medição do torque durante o ensaio.

A curva de calibração da instrumentação da chave de aperto foi definida pelo fabricante e os dados relativos ao processo de calibração estão detalhados por Encarnação (2019). No entanto, foi realizada uma verificação da calibração aplicando massas a uma distância de 380 mm do centro de rotação da chave. Os valores das massas foram obtidos por uma balança eletrônica de bancada Toledo Prix com capacidade de 30 kg e resolução de 5 g, a qual apresentava a calibração válida. O torque gerado pela presença das massas foi obtido através do processamento dos sinais no *software* CATMAN AP e comparado com os valores calculados analiticamente do produto da força total pela distância de aplicação, até o centro de rotação. A força total foi obtida pelo produto do valor da massa e da aceleração da gravidade. Esses dados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados da verificação da calibração

Distância [mm]	Força total [N]	Torque teórico	Torque	Razão Ta/Tt
		Tt [N.m]	experimental Ta [N.m]	
380	7,45	2,83	2,84	1,003
380	9,69	3,68	3,66	0,994
380	11,96	4,54	4,48	0,986
380	16,36	6,22	6,10	0,982

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores dos torques teóricos e dos torques experimentais, apresentados na Tabela 14, são muito próximos e a razão  $T_a/T_t$  possui uma média de 0,9914. Considerando isso, o erro relativo (CHOI *et al.*, 2018) para essa média é de 0,86%, indicando que os valores de torque obtidos pela chave de aperto são confiáveis.

Portanto, para a configuração 1, a cabeça do parafuso foi fixada nas garras de uma morsa e a chave de aperto foi utilizada para aplicar o torque na porca. O torqueamento foi interrompido até o pré-carregamento obtido pela leitura da arruela célula de carga atingir o valor próximo a 68% da carga de prova. Além disso, utilizando a equação (28) referente ao método analítico geral foi possível calcular o coeficiente de torque (K). Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de torque – Configuração 1

CDP - parafuso	Pré-carregamento [N]	Torque experimental [N.m]	Coefficiente de torque (K)
CDP 1 – 1	11354,69	20,36	0,315
CDP 1 – 2	11354,09	22,29	0,345
CDP 2 – 1	11358,20	18,02	0,279
CDP 2 – 2	11347,39	18,43	0,285
CDP 3 – 1	11383,39	18,43	0,284
CDP 3 – 2	11354,01	18,55	0,287
CDP 4 – 1	11353,70	18,64	0,288
CDP 4 – 2	11350,00	18,22	0,282
CDP 5 – 1	11980,21	21,63	0,317
CDP 5 – 2	11357,54	20,38	0,315
		$K_{\text{medio}}$	0,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os 10 parafusos instalados e torqueados, o pré-carregamento médio é de 11419,32 N e o torque médio experimental é de 19,50 N.m. Utilizando as equações dos métodos analíticos geral (28) e proposto por Motosh (3), foi possível obter o torque necessário para produzir o pré-carregamento médio submetido aos parafusos dos corpos de prova. Os valores dos torques obtidos para cada método analítico estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores de torques calculados analiticamente e torque médio experimental – configuração 1

Pré-carregamento [N]	Torque médio experimental Ta [N.m]	Torque teórico – Geral Tg [N.m]	Torque teórico – Motosh Tm [N.m]	Razão Tg/Ta	Razão Tm/Ta
11419,32	19,50	11,06	20,27	0,567	1,039

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificando os valores de torques apresentados na Tabela 16 e analisando os valores dos erros relativos dos resultados dos métodos analíticos e do valor obtido no ensaio, fica evidente a melhor correlação entre o torque experimental e o torque obtido analiticamente utilizando o método proposto por Motosh. O erro relativo considerando o método geral é de 38,3% e o erro relativo considerando o método proposto por Motosh é de 3,9%. Para que o torque teórico, segundo o método analítico geral, apresente um valor igual ao torque experimental e produza o pré-carregamento médio de 11419,32 N, o coeficiente de torque (K) deve ser igual a 0,3.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de torque – Configuração 2

CDP - parafuso	Pré-carregamento [N]	Torque experimental [N.m]	Coeficiente de torque (K)
CDP 1 – 1	13734,96	25,36	0,325
CDP 1 – 2	14255,43	24,91	0,307
CDP 2 – 1	14183,09	25,44	0,316
CDP 2 – 2	14301,24	25,00	0,307
CDP 3 – 1	13433,29	24,81	0,325
CDP 3 – 2	14521,83	25,08	0,304
CDP 4 – 1	12001,86	23,58	0,345
CDP 4 – 2	12933,80	24,92	0,339
CDP 5 – 1	13518,93	24,78	0,322
CDP 5 – 2	13247,38	24,58	0,326
$K_{\text{medio}}$			0,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo para aplicação de torque nos parafusos dos corpos de prova das configurações 2 e 3 foi o mesmo utilizado para a configuração 1. A diferença permaneceu somente no

interrompimento do torqueamento quando o pré-carregamento, obtido pela leitura da arruela célula de carga, atingiu o valor próximo a 80,2% e 96,2% da carga de prova, respectivamente.

Assim, os dados obtidos considerando a configuração 2 estão apresentados na Tabela 17 e, os referentes à configuração 3, na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de torque – Configuração 3

CDP - parafuso	Pré-carregamento [N]	Torque experimental [N.m]	Coefficiente de torque (K)
CDP 1 – 1	13314,82	28,35	0,375
CDP 1 – 2	12198,08	27,52	0,397
CDP 2 – 1	15406,98	26,71	0,305
CDP 2 – 2	14233,41	26,13	0,323
CDP 3 – 1	14563,12	27,51	0,332
CDP 3 – 2	15758,12	26,25	0,293
CDP 4 – 1	14183,25	29,10	0,361
CDP 4 – 2	15315,94	28,25	0,324
CDP 5 – 1	15234,56	28,63	0,331
CDP 5 – 2	14643,41	23,14	0,278
		$K_{\text{medio}}$	0,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os dados apresentados na Tabela 17 e na Tabela 18, o pré-carregamento médio para a configuração 2 é de 13613,18 N e o torque médio experimental é de 24,85 N.m. Para a configuração 3, o pré-carregamento médio é de 14485,17 N e o torque médio experimental é de 27,16 N.m. O pré-carregamento médio, para essa última configuração, apresentou valor 14,3% menor que o valor teórico esperado apresentado na Tabela 12. Essa redução está relacionada com a presença de deformação plástica dos filetes de rosca do parafuso (Figura 42), indicando uma menor resistência à tração, quando comparada com a calculada analiticamente e a aplicação de um pré-carregamento na junta de 100% da carga de prova.

Figura 42 – Deformação plástica dos filetes de rosca – Configuração 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma que foi realizada para a configuração 1, o torque necessário para produzir o pré-carregamento médio nos parafusos dos corpos de prova das demais configurações foi obtido utilizando as equações do método analítico geral (28) e o proposto por Motosh (3). Os valores dos torques obtidos para cada método analítico estão apresentados na Tabela 19 e na Tabela 20.

Tabela 19 – Valores de torques calculados analiticamente e torque médio experimental – configuração 2

Pré-carregamento [N]	Torque médio experimental $T_a$ [N.m]	Torque teórico – Geral $T_g$ [N.m]	Torque teórico – Motosh $T_m$ [N.m]	Razão $T_g/T_a$	Razão $T_m/T_a$
13613,18	24,85	13,18	24,16	0,530	0,972

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Valores de torques calculados analiticamente e torque médio experimental – configuração 3

Pré-carregamento [N]	Torque médio experimental $T_a$ [N.m]	Torque teórico – Geral $T_g$ [N.m]	Torque teórico – Motosh $T_m$ [N.m]	Razão $T_g/T_a$	Razão $T_m/T_a$
14485,17	27,16	14,03	25,71	0,516	0,947

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar os valores de torques obtidos analiticamente, utilizando o método proposto por Motosh, e os torques médios aquisitados nos ensaios, apresentados na Tabela 19 e na Tabela 20, os erros relativos são de 2,8% para a configuração 2 e 5,3% para a configuração 3. Realizando a mesma comparação com os valores obtidos pelo método geral, considerando as configurações 2 e 3, os erros relativos obtidos são de 46,9% e 48,4%, respectivamente. Assim como evidenciado para a configuração 1, os resultados alcançados utilizando o método proposto por Motosh apresentaram a melhor correlação com os dados obtidos nos ensaios das demais configurações.

Para que os torques teóricos referentes às configurações 2 e 3, segundo o método analítico geral, apresentem valores iguais aos torques médios experimentais e produzam os pré-carregamentos médios, os coeficientes de torque (K) devem ser iguais a 0,32 e 0,33, respectivamente.

Para verificar se os valores dos coeficientes de torque obtidos para as três configurações ensaiadas são considerados iguais, uma análise estatística para comparação das médias foi realizada utilizando o *software* Minitab.

A sequência da análise foi a aplicação do teste de normalidade, teste de homogeneidade de variâncias e o teste de hipóteses para os valores médios dos coeficientes de torque, que dependendo dos resultados dos testes anteriores, pode-se utilizar o método *One-way ANOVA* ou *Two-Sample t (t-Student)*.

Assim, o teste de normalidade foi realizado para verificar a normalidade dos dados, com um nível significância de 5%. Os testes realizados para as três configurações apresentaram probabilidades de significância maiores que 0,05 (valor- $p > 0,05$ ), o que indica a aceitação da hipótese nula, ou seja, que os dados referentes as três configurações apresentam uma distribuição normal.

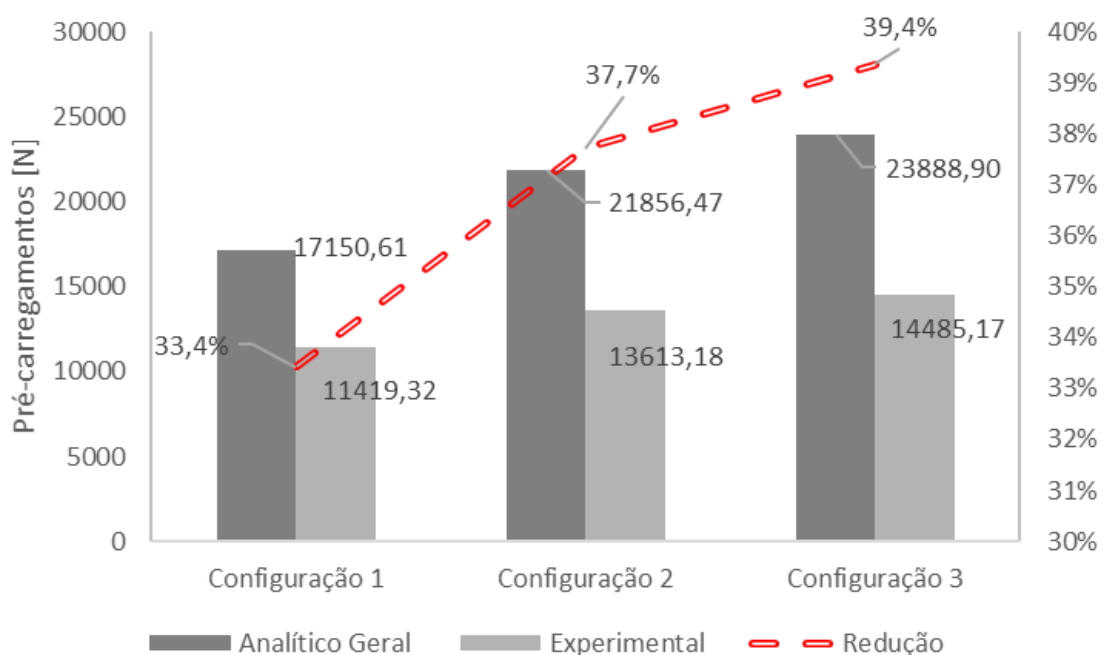
O teste de homogeneidade de variâncias foi realizado para comparar a variância das amostras por meio de hipóteses, sendo a nula como a igualdade de variâncias e a alternativa como sendo a diferença entre elas. Uma vez que, os dados das três configurações ensaiadas são iguais a uma distribuição normal, foi utilizado o teste de Bartlett (CUNHA, 2010). O resultado da probabilidade de significância foi menor que 0,05, rejeitando a hipótese nula, o que indica que ao menos uma variância é diferente das demais.

Portanto, uma vez que as amostras não possuem igualdade de variância, o método aplicável para o teste de hipóteses de médias foi o *Two-Sample t (t-Student)*, ao invés do método *One-way ANOVA*. Cada análise utilizando o teste *t-Student*, comparou as médias populacionais de duas configurações. Assim, três análises foram realizadas para abranger todas as

combinações entre as configurações. Com uma probabilidade de 95%, o método estatístico evidenciou que os valores dos coeficientes de torque são iguais. As análises estatísticas estão apresentadas no APÊNDICE A.

Considerando o exposto na seção 2.2.1, na qual a utilização do coeficiente de torque (K) no valor de 0,2 é apresentado por Budynas e Nisbett (2016), Chen, Lee e Yeh (1995) e Qin, Zhao e Zhang (2013), caso este valor fosse aplicado para a junta aparafusada proposta neste estudo, onde o diferencial está na presença de componentes de material compósito de fibra de carbono e matriz polimérica, os valores de pré-carregamento apresentariam uma redução de até 39,4%. Este caso de maior redução refere-se à configuração 3, que ao ser submetida a um torque médio experimental de 27,16 N.m, pelo método analítico geral, o valor do pré-carregamento é de 23888,90 N, enquanto o valor obtido experimentalmente é de 14485,17 N. Os valores comparativos dos pré-carregamentos de todas as configurações referentes aos torques médios experimentais e as reduções estão apresentados na Figura 43.

Figura 43 – Pré-carregamentos referentes aos torques médios experimentais e coeficiente de torque igual a 0,2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a aplicação dos torques e o registro dos valores de pré-carregamentos, todos os corpos de prova foram submetidos a ensaios não-destrutivos por ultrassom para verificar a

integridade dos laminados nas regiões ao redor dos furos, devido à aplicação destas forças de união com 68%, 80,2% e 96,2% da carga de prova. Os resultados não apresentaram danos ou defeitos em nenhum corpo de prova, indicando a possibilidade de aplicação de altos valores de pré-carregamentos em relação à resistência mecânica dos parafusos e porcas. Isso beneficia a junta com ganhos na resistência à fadiga, resistência à tração e ao cisalhamento. Os relatórios dos ensaios por ultrassom estão disponíveis no ANEXO B.

### 4.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Como descrito na seção 3.6, foi criado um modelo que representa o corpo de prova recomendado pela norma ASTM D5961 (ASTM, 2003), contendo os laminados de material compósito e os prendedores de materiais metálicos. Esse modelo foi submetido a seis casos de carregamentos considerando os pré-carregamentos nos parafusos e as forças de tração aplicadas em uma das extremidades do corpo de prova, referentes às três configurações definidas na seção 3.5. Os casos estão discriminados na Tabela 21.

Tabela 21 – Casos de carregamentos

Casos de carregamentos	Carregamentos aplicados
LC1	Pré-carregamento da configuração 1
LC2	Pré-carregamento da configuração 2
LC3	Pré-carregamento da configuração 3
LC4	Pré-carregamento da configuração 1 + Força de tração
LC5	Pré-carregamento da configuração 2 + Força de tração
LC6	Pré-carregamento da configuração 3 + Força de tração

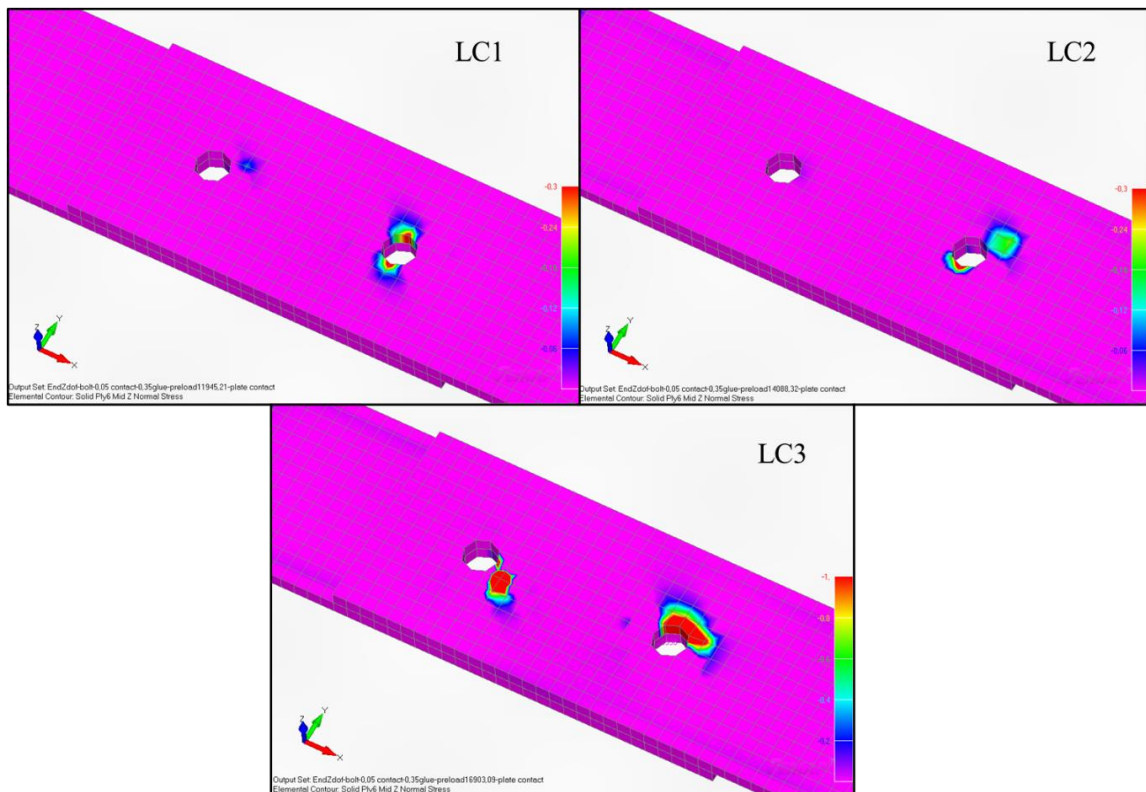
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os três primeiros casos de carregamentos permitiram a análise do efeito dos pré-carregamentos sobre os laminados e os demais componentes de ligação da junta, parafusos, porcas e arruelas. Levando-se em consideração que esses esforços são aplicados ao longo do corpo dos parafusos, os laminados apresentaram concentrações de tensão ao redor dos furos,

mas com níveis desprezíveis quando comparados aos valores de resistência mecânica do material compósito, independente do pré-carregamento aplicado.

Os mapas de tensões normais às superfícies dos laminados estão apresentados na Figura 44. Assim, utilizando o critério de Hashin, não houveram regiões passíveis de falhas, mesmo para a configuração 3 que contempla a submissão do maior esforço externo, apresentando índices de falha próximos ao valor 0.

Figura 44 – Mapa de tensões nos laminados – LC1, LC2 e LC3 [MPa].



Fonte: Elaborado pelo autor.

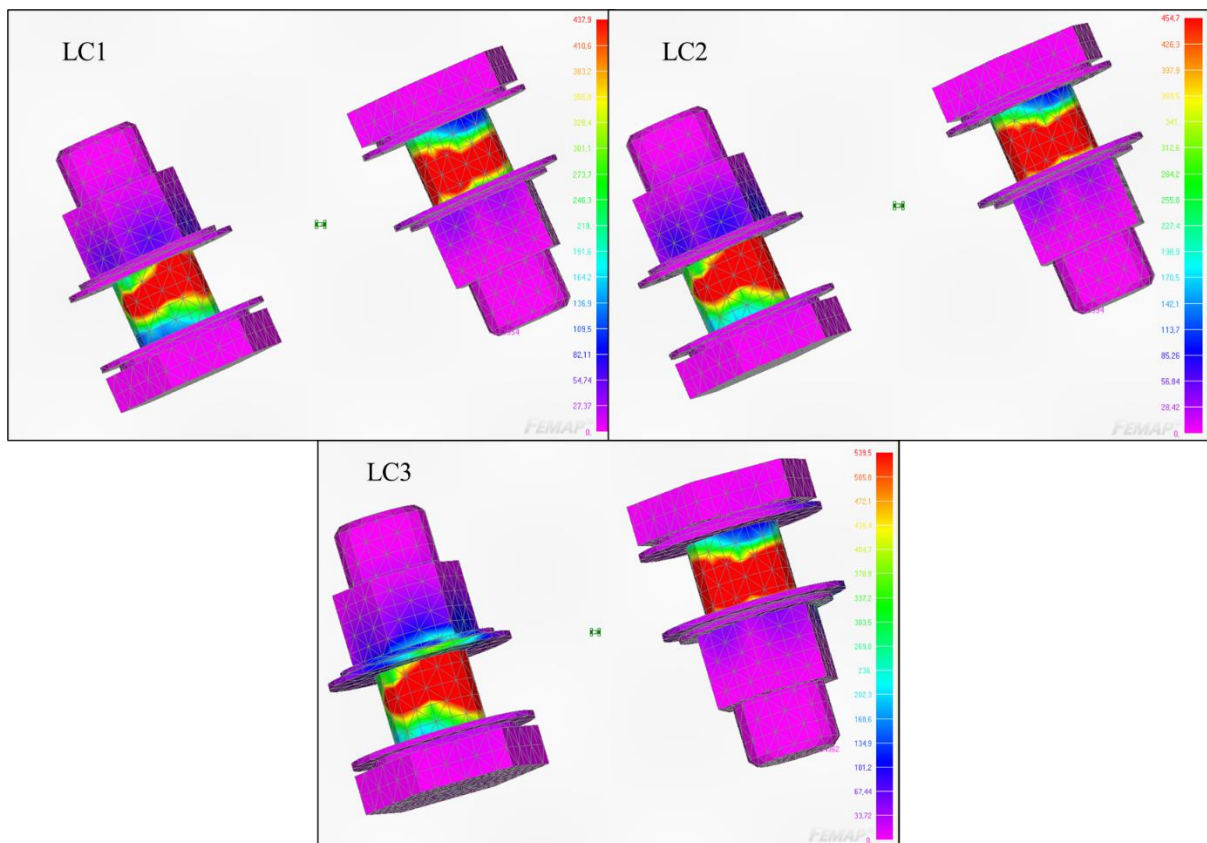
Para os parafusos, as tensões presentes foram relevantes em comparação à resistência de prova do parafuso e, utilizando o critério de von Mises, os valores das tensões obtidas na simulação, conforme esse critério, estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Critério de von Mises -Tensões	
Casos de carregamentos	Tensão – von Mises [MPa]
LC1	437,93
LC2	454,71
LC3	539,54

Fonte: Elaborado pelo autor.

As tensões descritas na Tabela 22 referem-se à região não roscada do parafuso, uma vez que os filetes de rosca não foram modelados, pois não estavam incluídos no escopo deste trabalho. Na Figura 45, é possível visualizar essas regiões considerando as três configurações de pré-carregamento nos parafusos. Verifica-se que os valores das tensões nos modelos estão abaixo da resistência de prova do parafuso, não indicando a presença de falha nessa região.

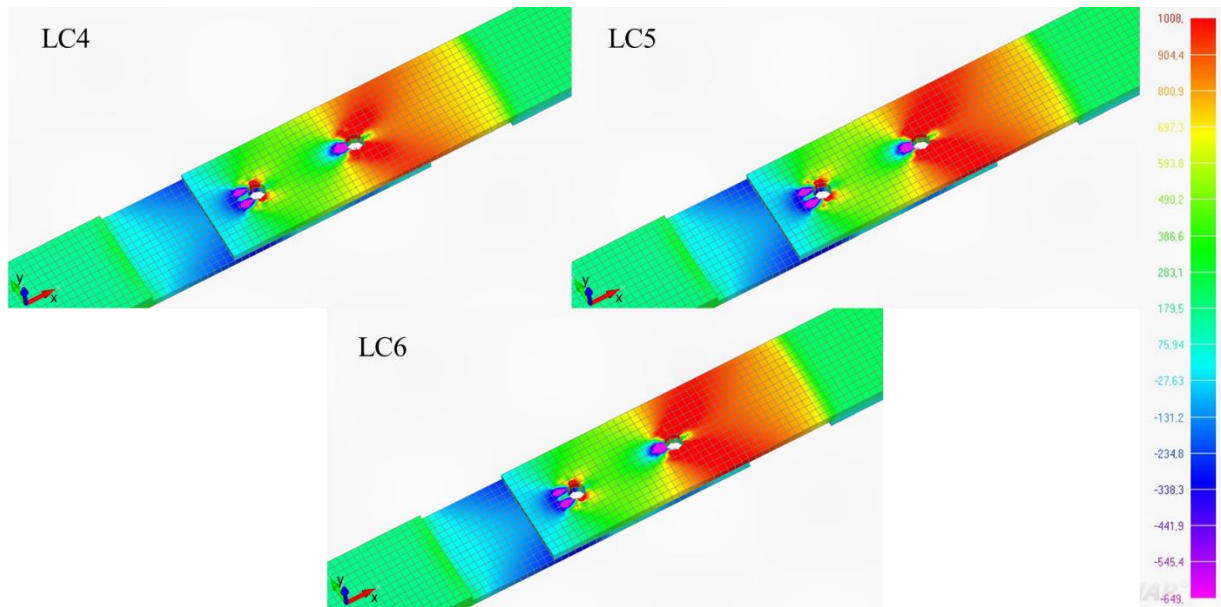
Figura 45 – Mapa de tensões nos parafusos – LC1, LC2 e LC3 [MPa].



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os casos LC4, LC5 e LC6, além dos pré-carregamentos referentes às configurações dos corpos de prova, foram aplicadas forças de tração que acarretaram alguma falha de acordo com o critério de Hashin.

Figura 46 – Tensão normal – Laminados [MPa].



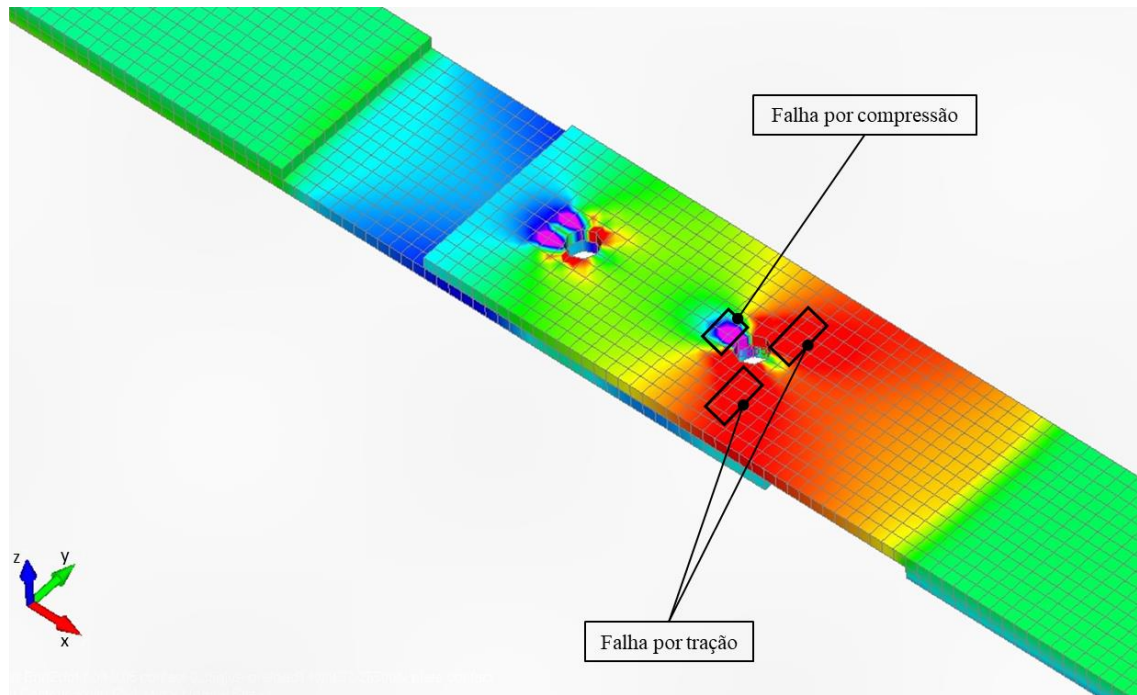
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 46 estão apresentados os mapas de tensões normais na direção  $0^\circ$  em relação ao eixo x do sistema de coordenadas utilizado para definir as direções das camadas dos laminados. Considerando todos os casos de carregamentos que apresentam forças de tração aplicada em uma das extremidades do corpo de prova, representando o ensaio de resistência da junta em tração, há a presença de tensões compressivas à esquerda dos furos, indicando o contato dos parafusos e o efeito de esmagamento. Além disso, constata-se uma região considerável à direita dos furos que apresenta tensões de tração, as quais contribuem para a presença de falha.

Os elementos que apresentaram tensões que acarretaram a falha do laminado e índice de falha igual à 1, conforme o critério de Hashin, estão localizados em torno dos furos, como apresentados na Figura 47.

Analisando as tensões nos elementos presentes nas regiões identificadas na Figura 47 e utilizando as equações do critério de falha de Hashin, verificou-se falha interlaminar por compressão na matriz, corroborando o efeito de esmagamento, como também falha da fibra na direção longitudinal ao corpo de prova por tração. As forças de tração que produziram esses dois modos de falha para os casos de carregamento LC4, LC5 e LC6 estão apresentadas na Tabela 23.

Figura 47 – Elementos nas regiões de falha do laminado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 – Forças de tração para falha

Casos de carregamentos	Falha interlaminar na matriz [N]	Falha de tração na fibra [N]
LC4	6611,81	21018,55
LC5	6704,92	21133,75
LC6	6868,10	21597,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Levando-se em consideração que os casos de carregamentos se diferenciam somente pelo valor do torque aplicado, verifica-se que os valores das forças de tração necessárias para ocasionar uma falha são maiores com o aumento do torque aplicado.

Os parafusos apresentaram níveis de tensão maiores quando comparados às respostas nos casos LC1, LC2 e LC3 e estão apresentados na Tabela 24.

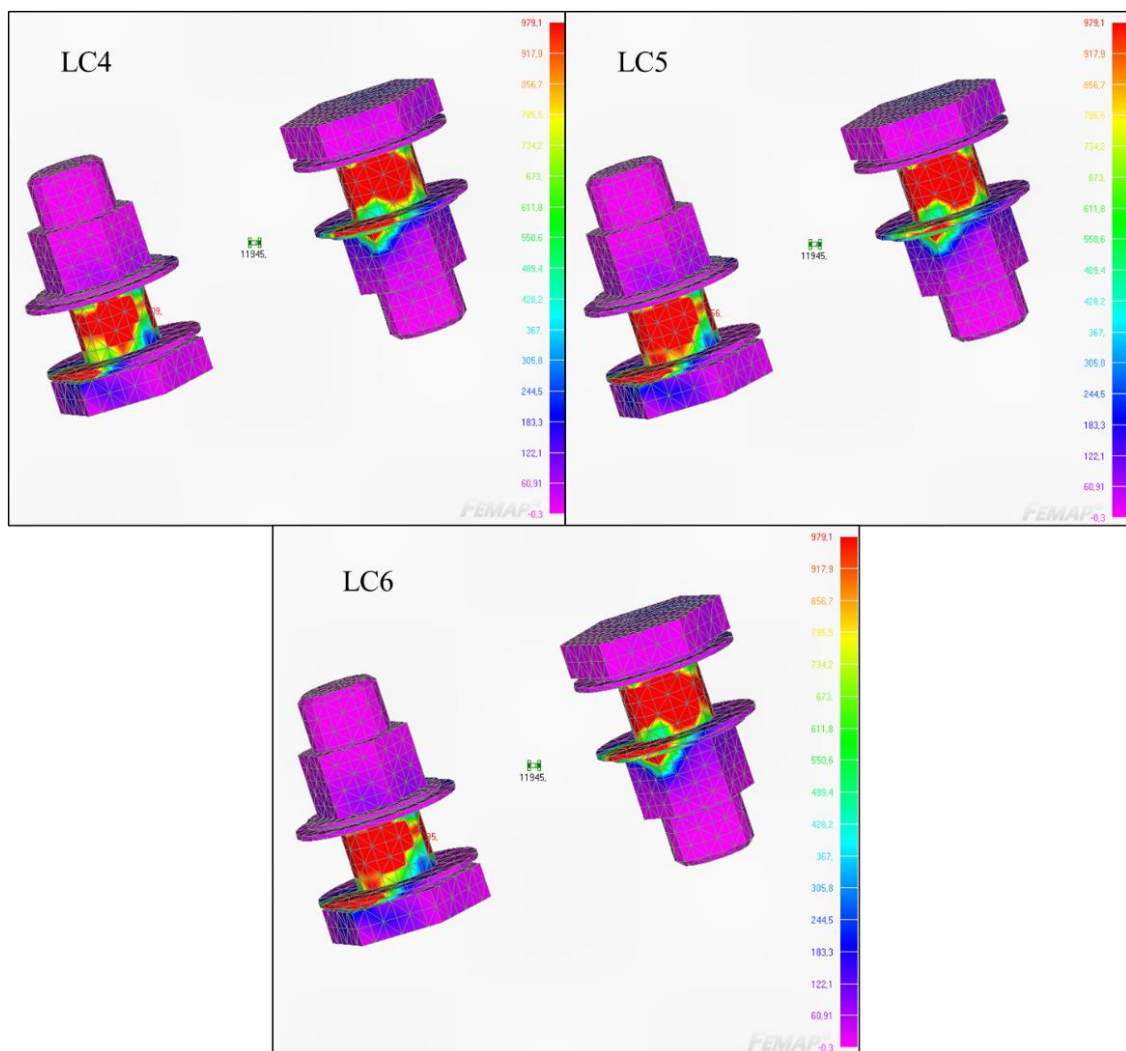
Tabela 24 – Critério de von Mises -Tensões

Casos de carregamentos	Tensão – von Mises [MPa]
LC4	769,05
LC5	951,06
LC6	965,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme descrito na Tabela 4, a resistência ao escoamento do material do parafuso é de 979,09 MPa. Isso demonstra que os casos de carregamentos produziram, segundo o critério de von Mises, resultados que não definem a presença de falha por escoamento. No entanto, os casos LC5 e LC6 apresentam uma maior possibilidade de existir deformação plástica ao longo do corpo do parafuso. Os mapas de tensões dos parafusos, porcas e arruelas mostram as regiões mais críticas, segundo o critério de falha, e estão apresentados na Figura 48.

Figura 48 – Mapa de tensões nos parafusos – LC4, LC5 e LC6 [MPa].



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, na Figura 49 está apresentada uma representação da mudança de forma do corpo de prova após a aplicação do carregamento de tração que ocasionou a falha nas fibras. A flexão fora do plano ou secundária está presente no modelo, considerando os três casos de carregamento, LC4, LC5 e LC6, conforme descrito por Zhao *et al.* (2016) e ASTM (2003).

Figura 49 – Representação da mudança de forma do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA JUNTA EM TRAÇÃO

Conforme descrito na seção 4.2, o método analítico proposto por Motosh apresentou valores de torque com baixos erros relativos aos obtidos pelos ensaios de aplicação de torque. Portanto, para a montagem dos corpos de prova para o ensaio de resistência da junta em tração e, conseqüentemente, a aplicação dos torques nas porcas, os valores utilizados foram os calculados pela equação (3) referente ao método proposto por Motosh. Assim, considerando os valores obtidos na seção 0, os corpos de prova da configuração 1 foram montados aplicando o torque de 21,2 N.m nas porcas. Para a configuração 2, foi utilizado o torque de 25 N.m e, para a configuração 3, o torque de 30 N.m.

Nas configurações 1 e 2, utilizou-se o torquímetro Torcofix K, pois apresenta escala de 2 até 25 N.m. Já para a configuração 3, devido ao torque de 30 N.m, o torquímetro utilizado foi o modelo Flex O-Click linha L com escala de 30 até 160 N.m.

Para todos os corpos de prova, um pano umedecido com álcool isopropílico foi utilizado para realizar a limpeza das superfícies e minimizar efeitos no coeficiente de atrito devido a impurezas e substâncias indesejadas na região de interface entre as placas. Estudos realizados (MATSUBARA *et al* apud YU; YANG; ZHOU, 2018) mostraram que a velocidade de aperto afeta o coeficiente de torque, sendo que com o aumento da velocidade há uma diminuição do coeficiente e, conseqüentemente, no pré-carregamento da junta. Assim, a aplicação do torque foi realizada em velocidade reduzida para apresentar menor influência no resultado do pré-carregamento.

Na Figura 50 está apresentada a utilização do torquímetro Torcofix K nos corpos de prova para as configurações 1 e 2.

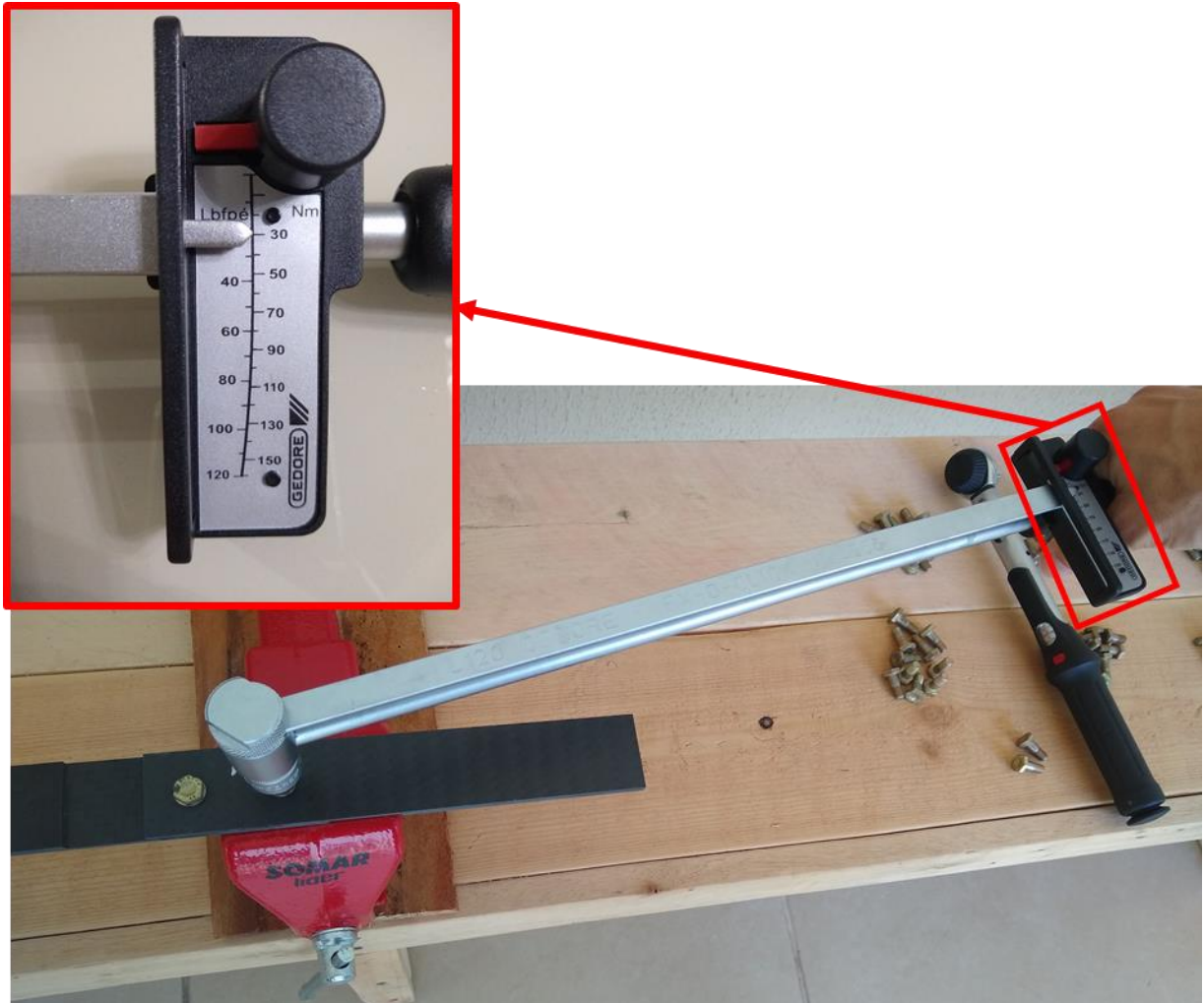
Figura 50 – Representação da aplicação do torque para as configurações 1 e 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 51 está demonstrada a aplicação do torque em um corpo de prova da configuração 3 utilizando o torquímetro Flex O-Click.

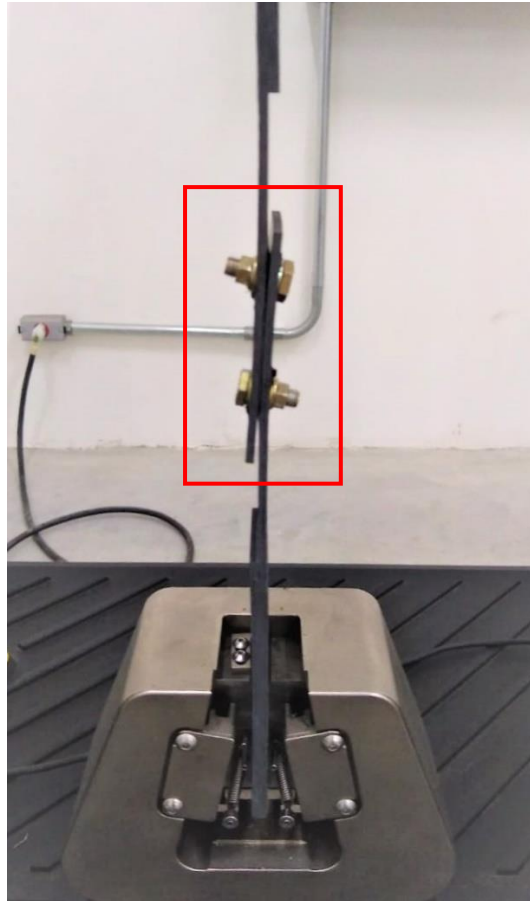
Figura 51 – Representação da aplicação do torque para a configuração 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como descrito na seção 3.5.2, vinte e quatro corpos de prova, divididos nas três configurações (Tabela 10), foram submetidos ao ensaio de resistência da junta em tração, conforme norma ASTM D5961 (ASTM, 2003), obedecendo uma taxa de 2 mm/min até ocorrer a falha. O corpo de prova durante o ensaio está apresentado na Figura 52.

Figura 52 – Corpo de prova durante o ensaio de resistência da junta em tração.

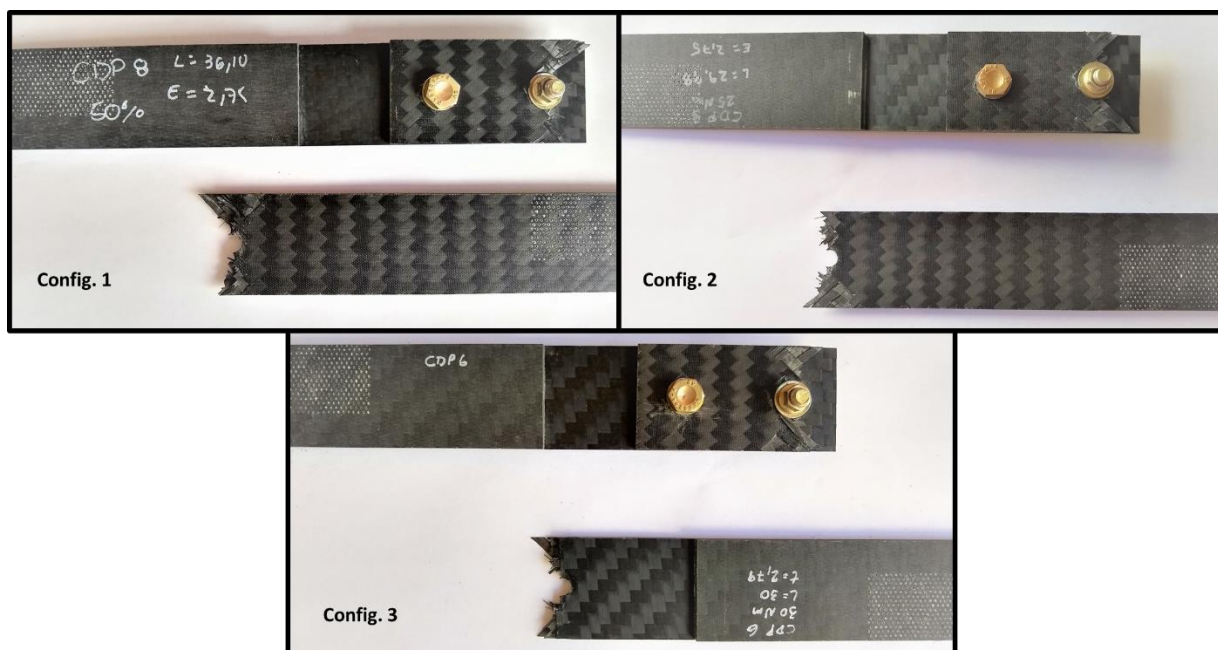


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 52, é possível observar o efeito da flexão fora do plano, típica de juntas aparafusadas com configuração de simples cisalhamento, rotacionando os parafusos e produzindo uma distribuição irregular das tensões de contato (ZHAO *et al.*, 2016) (ASTM, 2003). A presença de dois parafusos minimiza esse comportamento devido à ação de um binário na direção dos eixos longitudinais destes prendedores. Esse efeito durante o ensaio demonstra a boa correlação com o resultado obtido na simulação (Figura 49).

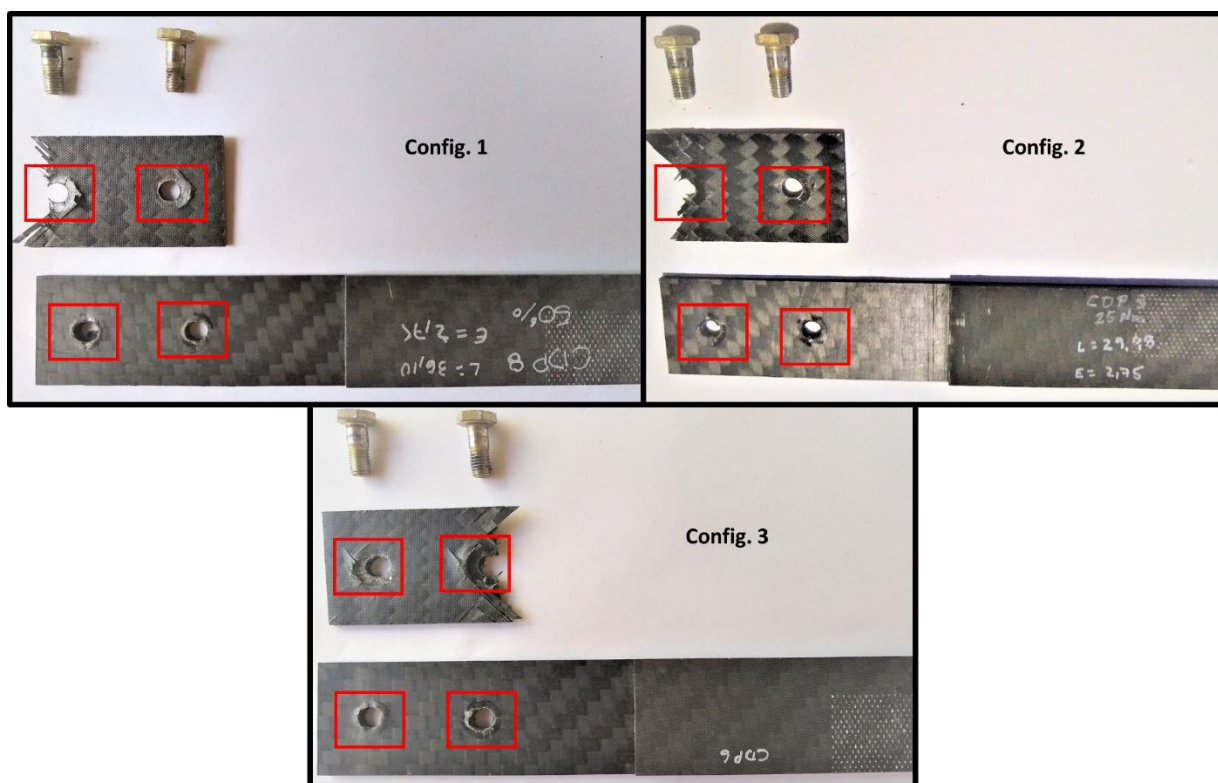
Além disso, em uma análise macroscópica, verifica-se na Figura 53 a presença do modo de falha por tração na seção líquida, caracterizada pela ruptura de cabos de fibras, e na Figura 54, o modo de falha por esmagamento nos corpos de prova, como apresentados na seção 2.2. Esse comportamento esteve presente nas três configurações ensaiadas. Ambos os modos são dependentes do material e provavelmente ocorreram a partir da influência de mecanismos microscópicos, como trincas na matriz, danos nas fibras ou na interface fibra/matriz até estabilizar a falha completa do laminado com o rompimento total das fibras e delaminação entre camadas.

Figura 53 – Corpo de prova após o ensaio de resistência da junta em tração – modo de falha por tração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 – Corpo de prova após o ensaio de resistência da junta em tração – modo de falha por esmagamento

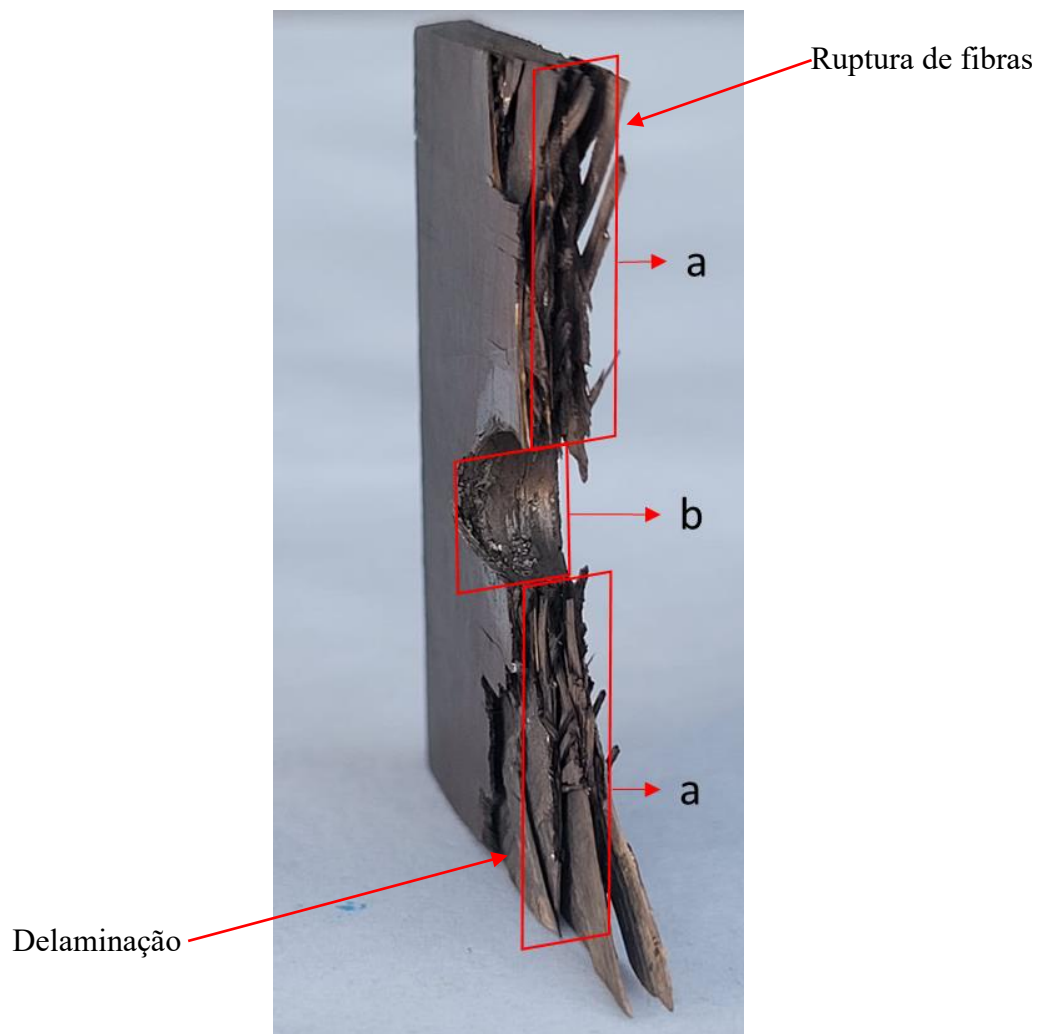


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos pela simulação numérica, descritos na seção 4.3, apresentam uma boa correlação utilizando o critério de falha de Hashin, em que, a falha interlaminar por compressão na matriz corresponde à falha por esmagamento, identificada nos corpos de prova do ensaio. Além disso, a falha por tração das fibras também foi determinada utilizando o critério de falha (Tabela 23). Cabe ressaltar que não houve presença de fratura dos parafusos nos corpos de prova.

Para investigar os principais modos e mecanismos de fratura atuantes, as análises fractográficas microscópicas da morfologia de fratura foram realizadas em um corpo de prova de cada configuração, nas regiões destacadas na Figura 55. A região “a” contempla a superfície de fratura do laminado compósito após falha catastrófica por tração e a região “b” considera a superfície do furo que foi submetida ao carregamento de compressão, devido ao contato com o parafuso.

Figura 55 – Regiões das análises fractográficas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

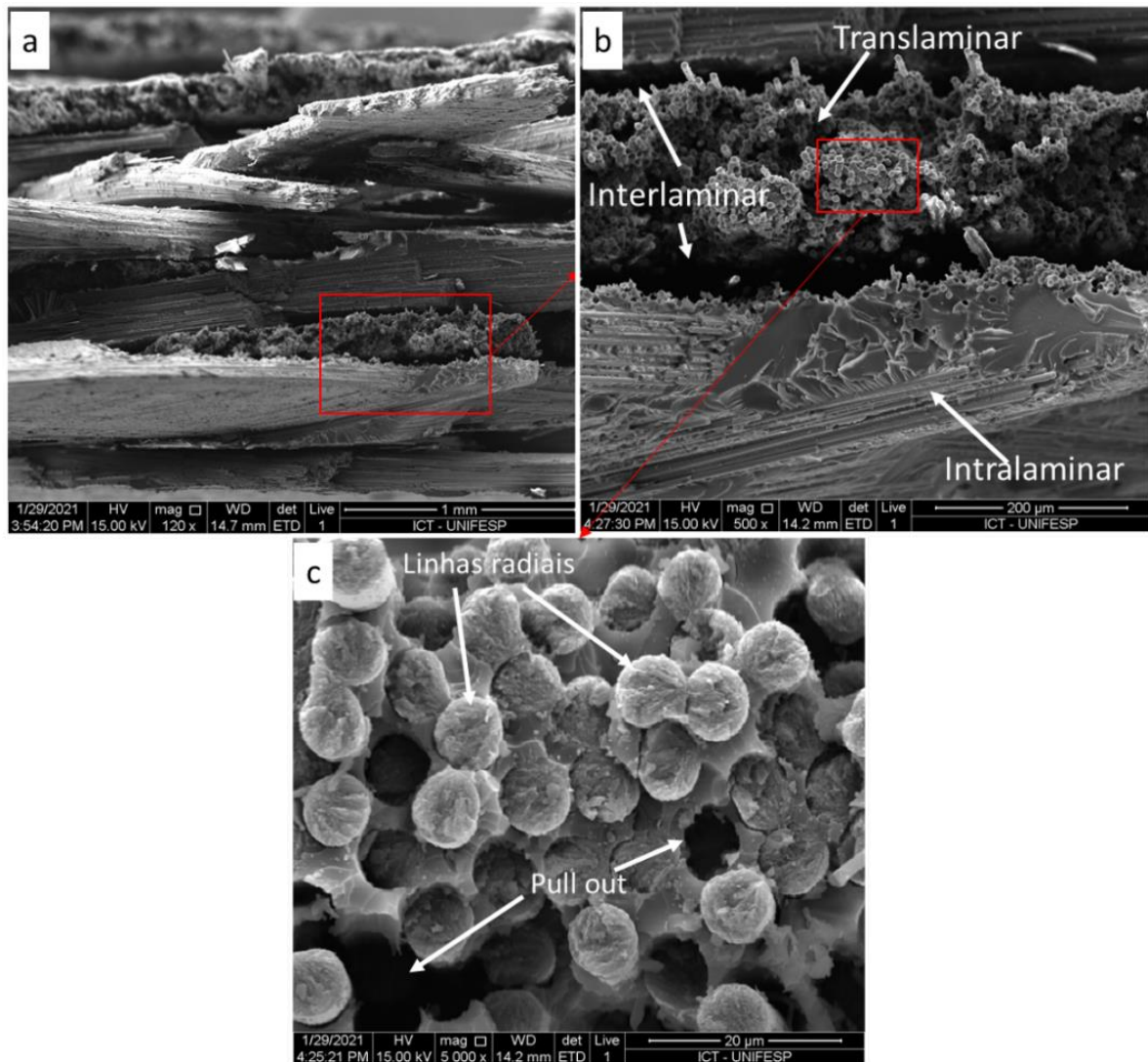
Assim, com base na interpretação visual da Figura 55, pode-se constatar que o processo de falha resultante nos corpos de prova estudados exibe uma característica muito complexa, em virtude de variações que ocorreram na formação das superfícies de fratura. Conseqüentemente, a propagação da falha até a ruptura final das juntas aparafusadas propiciou o desenvolvimento de três classes diferentes de modos de fratura, identificados como: fratura translaminar, intralaminar e interlaminar (GREENHALGH, 2009). Os modos de fratura translaminar e intralaminar manifestaram-se através da espessura, enquanto a fratura interlaminar aconteceu no plano do laminado. A fratura translaminar provocou a ruptura total das fibras, a intralaminar causou a fratura da matriz entre fibras ou próxima à interface fibra/matriz e a fratura interlaminar ocasionou a separação entre duas camadas adjacentes (delaminação).

Diante do exposto, pode ser compreendido que a evolução do processo de falha nos laminados que compõe as juntas aparafusadas, sucedeu devido à interação entre esses modos de fratura e, portanto, determinando o perfil das superfícies de fratura. Contudo, uma análise aprofundada em escala microscópica de alta ampliação das superfícies de fratura foi realizada pelo uso da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os modos de fratura e os aspectos fractográficos pelos quais as morfologias foram produzidas foram identificados e são apresentados a seguir.

Na Figura 56, Figura 57 e Figura 58, compostas por imagens microscópicas com diferentes ampliações, é possível observar aspectos típicos de falha por tração das juntas aparafusadas de compósito carbono/epóxi.

Em todas as configurações, na região da falha por tração, identificou-se propagação de trincas intralaminares e translaminares (Figura 56 b, Figura 57 a e Figura 58 a), sendo que as intralaminares tendem a se formar no início da falha, ao longo do comprimento dos cabos de fibras, e as translaminares estão relacionadas diretamente com a fratura das fibras. Para a configuração 1, foi possível identificar também uma propagação interlaminar (Figura 56 b) que, assim como a intralaminar, ocorre na matriz (PURSLOW, 1986).

Figura 56 – Análise por MEV da superfície de fratura por tração – Configuração 1.

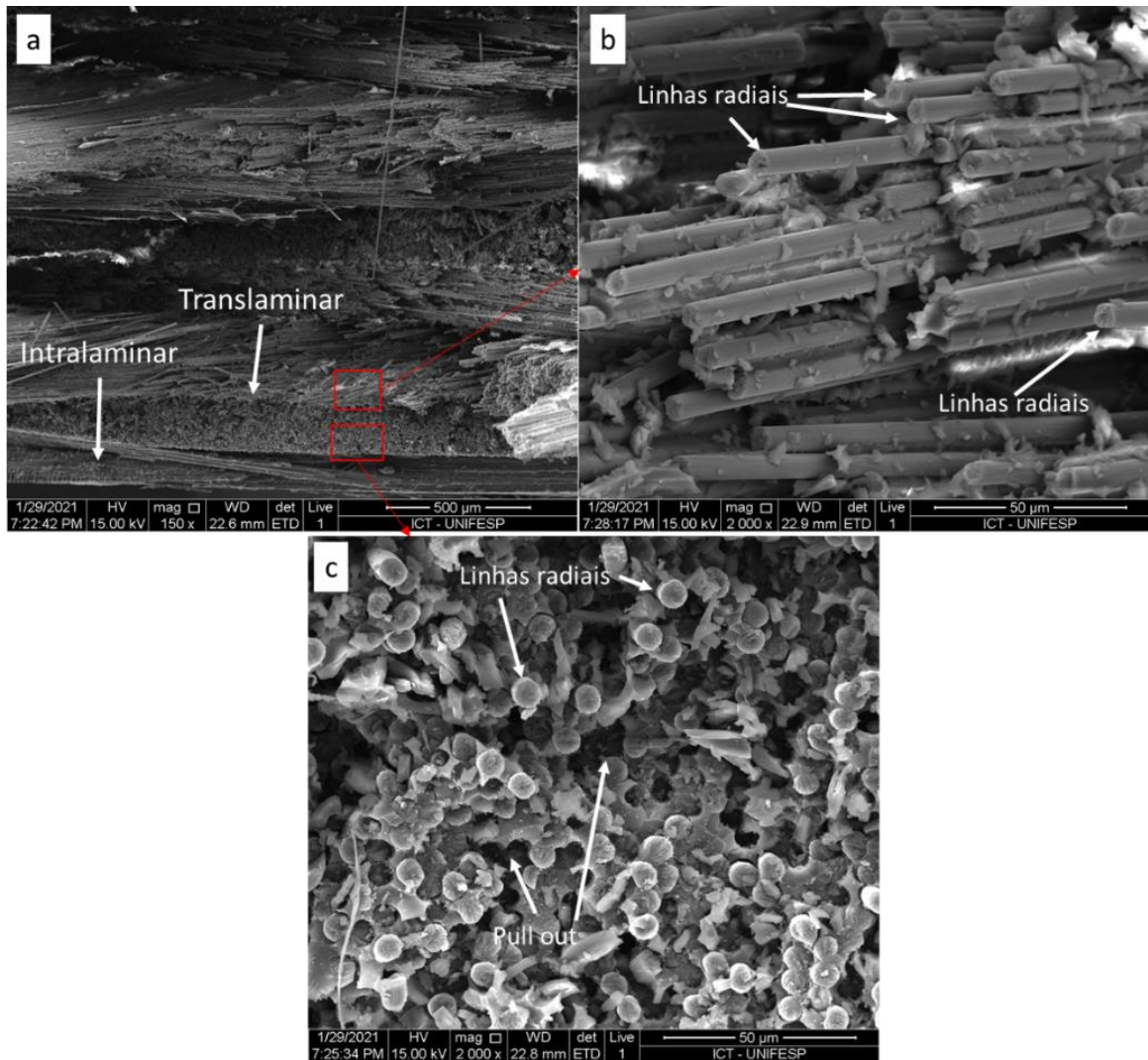


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas fibras orientadas a  $0^\circ$ , é possível verificar em todas as configurações a presença de linhas radiais nas seções transversais das fibras fraturadas (PURSLOW, 1988) (PURSLOW, 1981), bem como o arrancamento de fibras (*pull out*) (Figura 56 c, Figura 57 c e Figura 58 b), que são aspectos fractográficos típicos de fratura por tração (MARQUES *et al.*, 2021) (ZIMMERMANN; WANG, 2020).

Nestas imagens, é possível visualizar as linhas radiais se espalhando a partir de um ponto de origem da falha, geralmente localizado na superfície da fibra ou em um defeito interno da fibra. A identificação deste aspecto fractográfico possibilita determinar a origem da falha e indicar a direção de propagação da trinca através da fibra (PURSLOW, 1988) (PURSLOW, 1981).

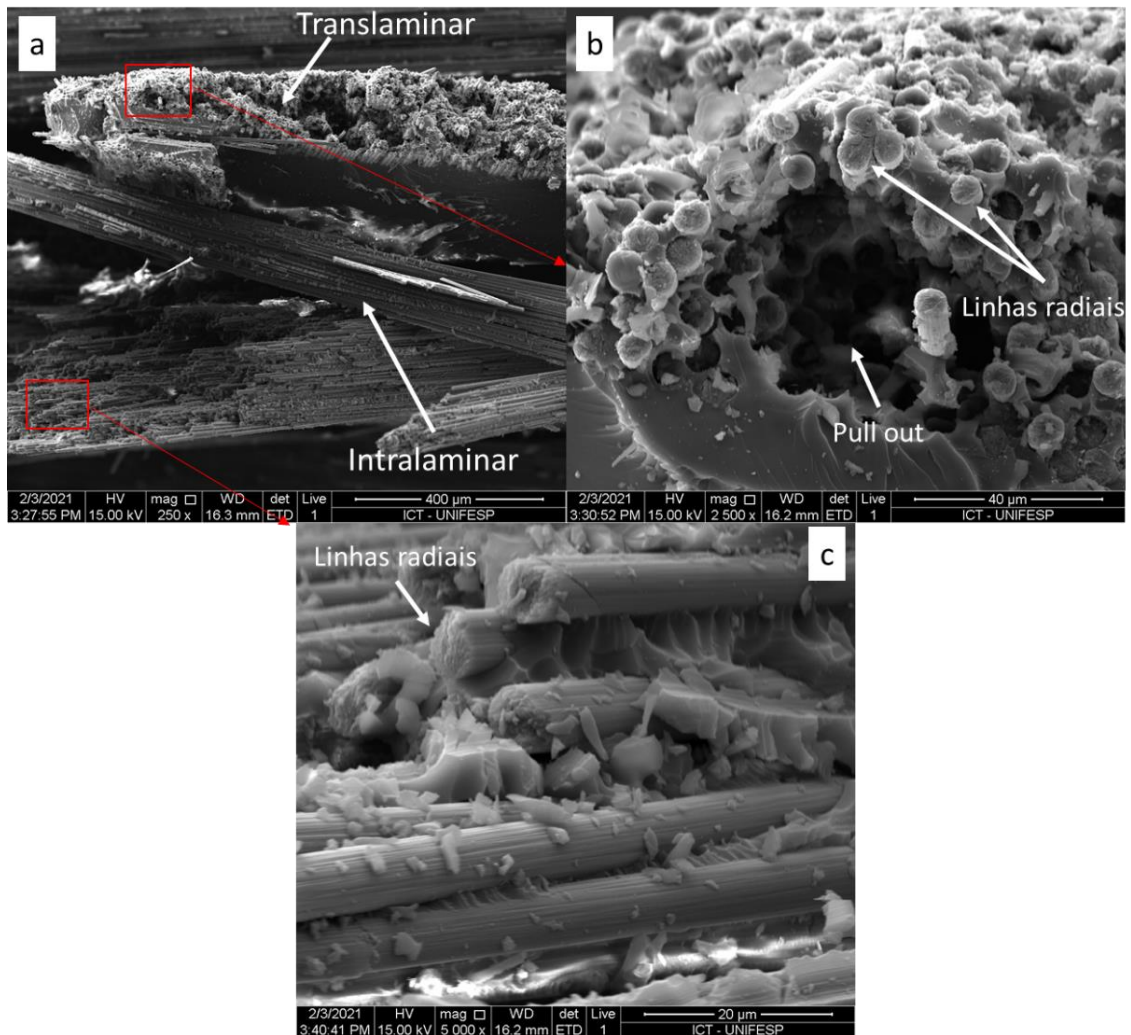
Figura 57 – Análise por MEV da superfície de fratura por tração – Configuração 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o aspecto que caracteriza o arrancamento de fibras sob carregamento de tração é consequência da resistência da adesão interfacial fibra/matriz. Dessa forma, o arrancamento de fibras identificado nas respectivas imagens das superfícies de fratura, pode ser um indicativo de que ocorreu um enfraquecimento de qualquer um desses constituintes no interior do laminado.

Figura 58 – Análise por MEV da superfície de fratura por tração – Configuração 3.

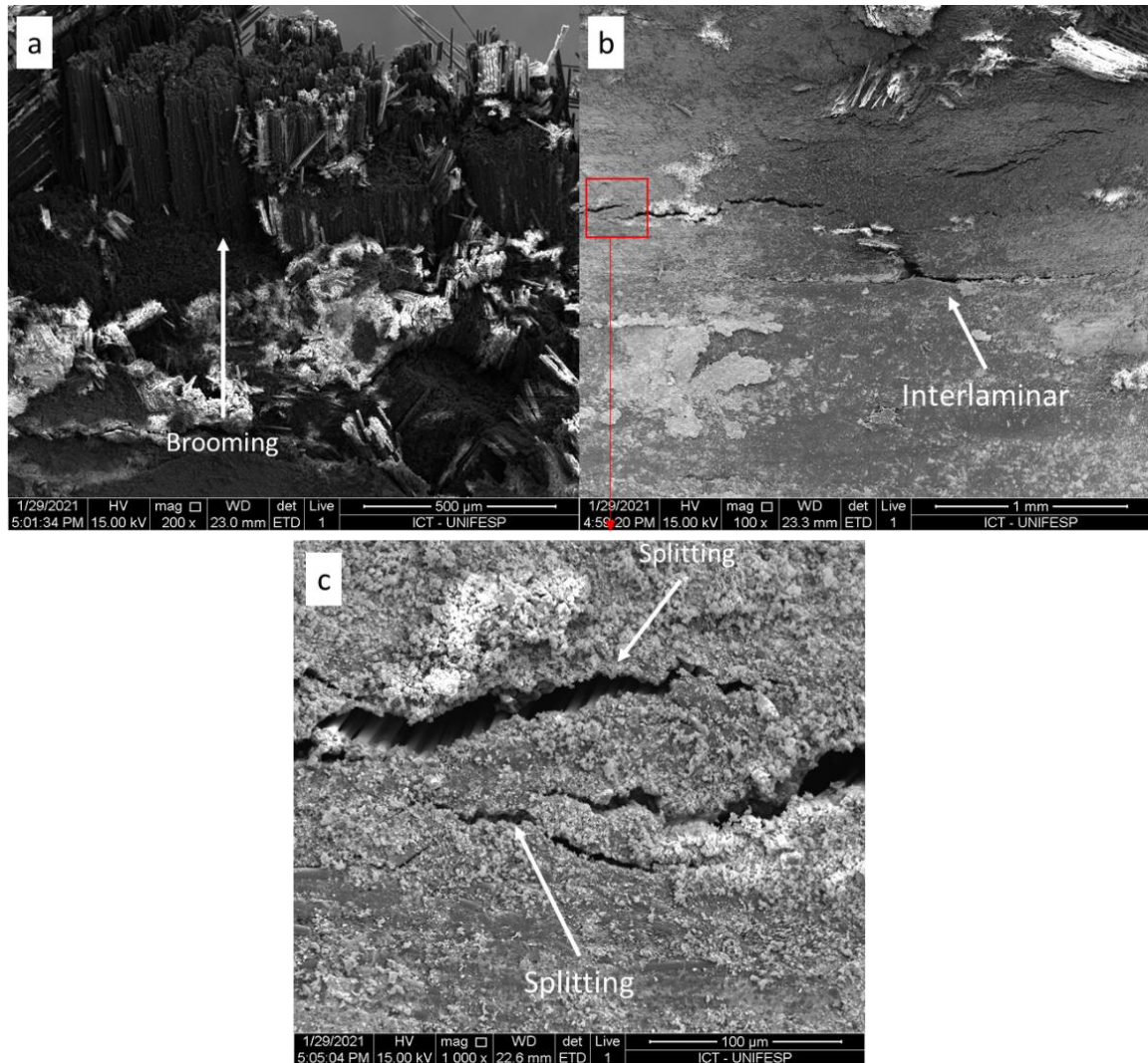


Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas características corroboram os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos e a aplicação do critério de falha de Hashin. Além disso, na superfície de fratura dos CDP's das configurações 2 e 3, as fibras da camada na direção  $\pm 45^\circ$  apresentaram linhas radiais, indicando falha por tração (Figura 57 b e Figura 58 c). Isso ocorre devido à interação fibra/matriz mais fraca, ocorre a separação destes constituintes e as fibras se alinham à direção de carregamento, acarretando na falha por tração com aspecto similar ao observado nas fibras a  $0^\circ$  (OPELT, 2017).

Na Figura 59, Figura 60 e Figura 61 estão apresentadas as imagens microscópicas com diferentes ampliações das superfícies dos furos, considerando os corpos de prova das configurações 1, 2 e 3, respectivamente.

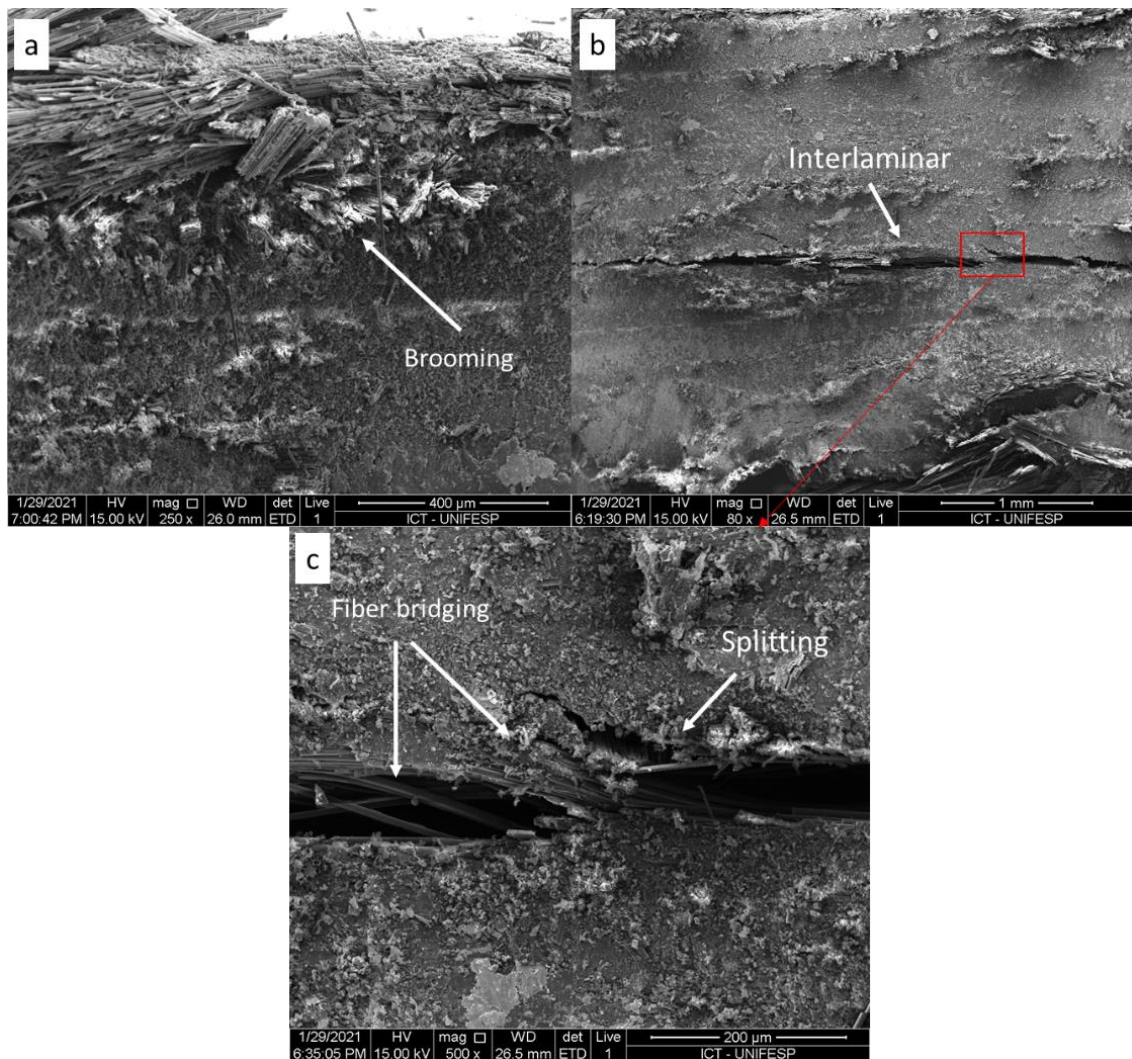
Figura 59 – Análise por MEV da superfície do furo – Configuração 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas bordas dos furos onde ocorreu o contato com o corpo do parafuso durante o ensaio de resistência da junta em tração, é constatada a presença de *brooming* (Figura 59 a, Figura 60 a e Figura 61 a), ocorrido devido à cargas de compressão, onde a propagação de trincas interfaciais aumenta a instabilidade lateral das fibras, promovendo falha por flexão nas regiões mais próximas à borda e por compressão nas regiões mais internas ao laminado, ocasionando aspecto similar a uma vassoura (OPELT *et al.*, 2018).

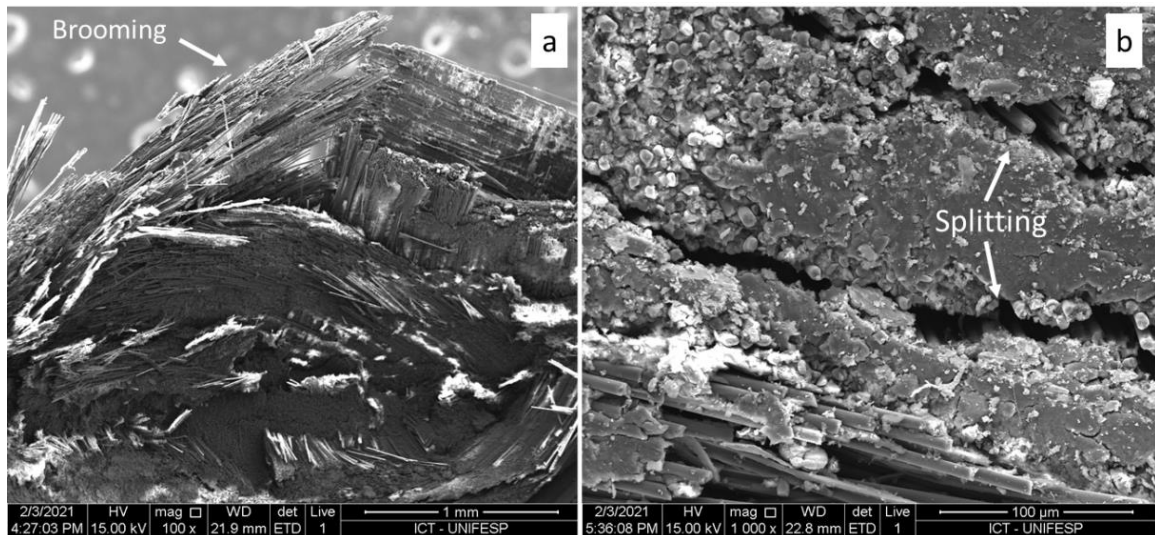
Figura 60 – Análise por MEV da superfície do furo – Configuração 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, falhas interlaminares do tipo *splitting* (Figura 59 c, Figura 60 c e Figura 61 b) foram identificadas nas regiões mais internas das superfícies dos furos, que apresentam uma resistência maior à flambagem, e a fratura do laminado ocorre quando os níveis de tensão e deformação por compressão das camadas superam a resistência do material, fazendo com que as camadas falhem isoladamente (OPELT, 2017). Considerando a configuração 2, neste tipo de falha interlaminar, pode-se observar o mecanismo de absorção de dano conhecido por *fiber bridging*, que proporciona uma resistência à propagação da trinca. A fibra resiste aos esforços aplicados estabelecendo uma ponte entre as duas superfícies de matriz fraturada, devido ao descolamento na região interfacial fibra/matriz.

Figura 61 – Análise por MEV da superfície do furo – Configuração 3.

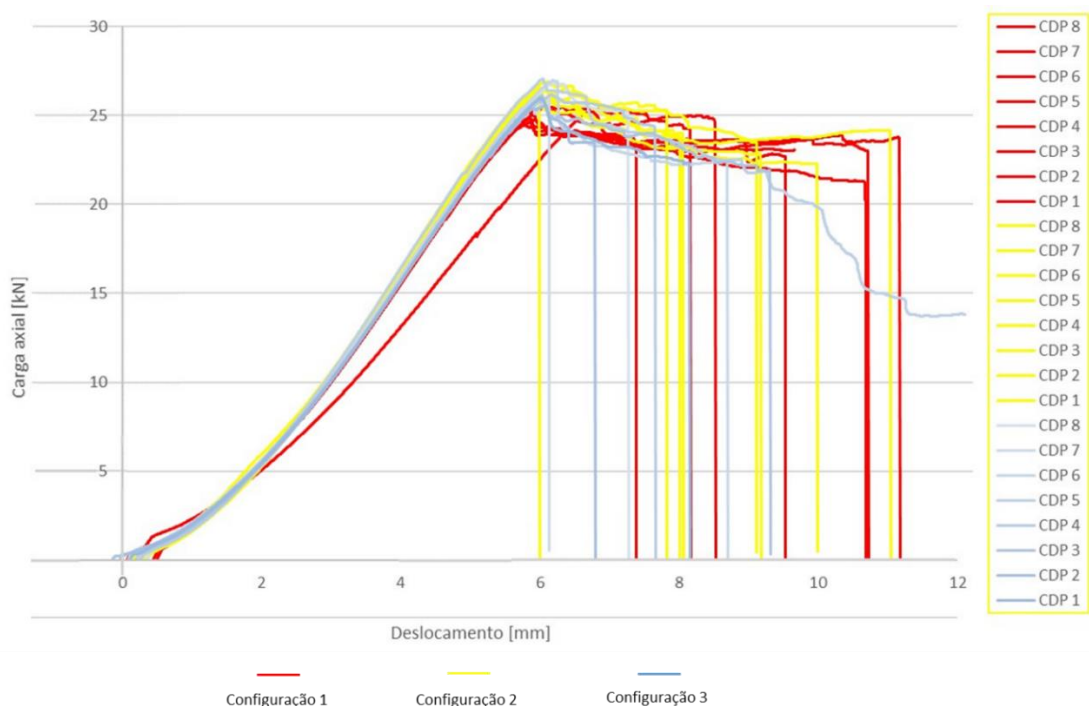


Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses resultados da análise fractográfica nas superfícies dos furos, confirmam a previsão da simulação numérica utilizando o critério de falha de Hashin, discutida na seção 4.3.

Na Figura 62, as curvas relacionadas aos dados de carregamento e deslocamento obtidos durante os ensaios dos corpos de prova estão apresentadas.

Figura 62 – Curvas carregamento-deslocamento obtidas nos ensaios de resistência da junta em tração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores médios das forças máximas com os respectivos desvios padrão e os deslocamentos estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Valores médios das forças máximas e os respectivos deslocamentos

Configuração	Força máxima média [N]	Deslocamento médio [mm]
1	25111,93 ± 0,30	5,71
2	26479,99 ± 0,27	5,76
3	26343,47 ± 0,52	5,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante dos dados obtidos, realizou-se uma análise estatística para verificar se há um aumento da resistência à tração com o aumento do torque aplicado, comparando os valores obtidos para as três configurações. Assim, foi utilizado o *software* MiniTab para realizar testes de hipóteses pelo método *One-way* ANOVA, que permite avaliar se as médias de duas ou mais populações são iguais ou diferentes. Para atingir essas respostas, algumas verificações foram realizadas para viabilizar a utilização do método estatístico escolhido. Primeiramente, testes de normalidade foram utilizados para examinar se os resultados seguem ou não uma distribuição normal, com nível de significância de 5%. As respostas dos testes apresentaram probabilidades de significância maiores que 0,05 (valor- $p > 0,05$ ), o que indica a aceitação da hipótese nula de que os dados apresentam uma distribuição normal.

Em seguida, testes de homogeneidade de variâncias foram realizados para comparar a variância das amostras por meio de hipóteses, sendo a hipótese nula como igualdade de variâncias e a alternativa com sendo a diferença entre elas. Uma vez que os dados das três configurações ensaiadas são iguais a uma distribuição normal, foi utilizado o teste de Bartlett. O resultado da probabilidade de significância foi maior que 0,05, aceitando a hipótese nula, que é a igualdade de variâncias.

Considerando a igualdade de variâncias das amostras, o método *One-way* ANOVA é considerado aplicável e o resultado obtido, associado ao teste de *Tukey*, mostrou que os valores médios das forças máximas não apresentaram diferenças entre as configurações 2 e 3. No entanto, os dados da configuração 1 foram definidos como diferentes em relação às configurações 2 e 3, segundo o teste de *Tukey*. As análises estatísticas estão apresentadas no APÊNDICE A.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios para análise de torque e pré-carregamento permitiram constatar a melhor correlação com o método analítico proposto por Motosh, sendo que o método geral apresentou diferenças de até aproximadamente 50% no valor do torque, quando comparado com os dados experimentais. Para que o torque teórico, segundo o método analítico geral, apresente um valor igual ao torque experimental e produza o mesmo pré-carregamento, os valores dos coeficientes de torque para as configurações 1, 2 e 3 devem ser 0,3; 0,32 e 0,33, respectivamente, além de ser demonstrado que esses valores são estatisticamente iguais. Verificou-se também que, os valores dos pré-carregamentos experimentais foram menores que os valores teóricos, quando utilizado o método analítico geral com a aplicação do coeficiente de torque igual a 0,2, apresentando redução de até aproximadamente 40%. Assim, constata-se que a aplicação indiscriminada desse valor de coeficiente de torque, recomendado e utilizado em vários trabalhos, pode gerar projetos de juntas aparafusadas subdimensionados do ponto de vista dos componentes unidos, e superdimensionados com relação aos parafusos. Além disso, os parafusos dos corpos de prova da configuração 3 apresentaram deformação plástica nos filetes de rosca, após a aplicação de pré-carregamento médio 14,3% menor ao valor teórico esperado, indicando que a junta foi submetida a 100% da carga de prova. Ainda, é possível definir que, para as juntas aparafusadas utilizando o material compósito proposto neste trabalho, é recomendado aplicar pré-carregamentos entre 68% a 100% da carga de prova do parafuso, uma vez que os resultados dos ensaios por ultrassom realizados em todos os corpos de prova não identificaram danos nos laminados.

Os ensaios de resistência da junta em tração demonstraram que, estatisticamente, houve um aumento da resistência à tração da junta nas configurações 2 e 3, quando comparadas com a configuração 1. No entanto, comparando as configurações 2 e 3, as resistências à tração dessas duas configurações são consideradas iguais, conforme o teste estatístico utilizado. Considerando os resultados da simulação numérica e a utilização do critério de falha de Hashin, eles foram validados pelos resultados dos ensaios de resistência da junta em tração e pela análise fractográfica, demonstrando a aplicabilidade dos modelos para outras configurações com carregamentos e condições de contorno distintas das consideradas neste estudo. Com relação às análises fractográficas das superfícies de fratura dos laminados, foi verificado que todas as três configurações apresentaram aspectos de fratura por tração e mecanismos de fratura típicos de compressão na região do furo, complementando as análises macroscópicas que indicaram modo de falha por tração na seção líquida do corpo de prova e esmagamento em torno dos furos.

Assim, levando-se em consideração a resistência à tração e ao esmagamento, a aplicação de um torque que produza um pré-carregamento de 100% da carga de prova do parafuso não apresenta vantagens em comparação à utilização de um pré-carregamento em torno de 80% da carga de prova.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise e determinação do coeficiente de torque utilizando corpos de prova fabricados com diferentes prendedores, diferentes materiais compósitos, diferentes configurações dos laminados, diferentes orientações das camadas e submetidos às condições ambientais;
- Verificação da relação do pré-carregamento e da carga de prova para corpos de prova fabricado com diferentes prendedores, diferentes materiais compósitos, diferentes configurações dos laminados, diferentes orientações das camadas e submetidos às condições ambientais;
- Desenvolvimento de uma equação para determinar o coeficiente de torque para juntas que utilizam o material compósito de matriz epóxi com reforço de fibra de carbono pré-impregnada utilizando tecido bidirecional;
- Análise e verificação do comportamento mecânico de juntas aparafusadas em material compósito com a presença de adesivo estrutural na região de contato dos laminados entre os prendedores;
- Análise e verificação das tensões residuais nos laminados devido a aplicação do pré-carregamento sobre a junta aparafusada em material compósito.
- Análise da influência do pré-carregamento na resistência à fadiga da junta aparafusada em material compósito.

## 5.2 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS GERADAS

- MARQUES, B. M. F.; MARQUES, T. P. Z., SILVA, F. A.; CÂNDIDO, G. M.; REZENDE, M. C. Failure criteria assessment of carbon/epoxy laminate under tensile loads using finite element method: validation with experimental tests and fractographic

analysis. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, 2021. DOI: 10.1080/15376494.2022.2029984

- MARQUES, B. M. F.; MARQUES, T. P. Z., SILVA, F. A. Coefficient of torque determination for twill weave composite laminates bolted joints considering different torque values. **Composite Structures**, 2022. (em submissão)
- MARQUES, T. P. Z.; MARQUES, B. M. F.; CÂNDIDO, G. M.; REZENDE, M. C. Effect of butt joints of prepeg plies on the tensile mechanical performance and fracture behavior of carbon/epoxy laminates. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, 2022. (em processo de revisão pela revista)
- MARQUES, T. P. Z.; MARQUES, B. M. F.; CÂNDIDO, G. M.; REZENDE, M. C. Influence of different geometric arrangements of discontinuous reinforcement on tensile strength and fracture behavior of carbon/epoxy laminates. **Engineering Failure Analysis**, 2022. (em processo de revisão pela revista)

## REFERÊNCIAS

AIA - AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION OF AMERICA INC. **NAS1149** - washer, flat. Arlington: AIA, 2008.

AIA - AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION OF AMERICA INC. **NAS6203 thru NAS6220**: bolt, tension, hex head, close tolerance, alloy steel, short thread, reduced major thread dia., self-locking and nonlocking, 160 KSI Ft. Arlington: AIA, 2013.

AIA - AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION OF AMERICA INC. **NASM 21042**: Nut, self-locking, 450 f, reduced hexagon, reduced height, ring base, non-corrosion resistant steel. Arlington: AIA, 2013.

AKLILU, G.; ADALI, S.; BRIGHT, G. Failure analysis of rotating hybrid laminated composite beams. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 101, n. July 2017, p. 274–282, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.019>. Acesso em: 22 abr. 2020.

ANISH; KUMAR, A.; CHAKRABARTI, A. Failure mode analysis of laminated composite sandwich plate. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 104, n. October 2018, p. 950–976, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.080>. Acesso em: 22 abr. 2020.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys**. 10th. ed. Materials Park: ASM International, 2009. v. 1.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5961/D5961M**: standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates annual book of astm standards. West Conshohocken, PA: [s. n.], 2003. Disponível em: [www.astm.org](http://www.astm.org). Acesso em: 02 abr. 2019.

BOND, J.; HJELMGREN, V. **Dynamic and economic aspects of carbon fiber reinforced polymer footbridges**. 2018. Chalmers University of Technology, Chalmers, 2018. Disponível em: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/255631/255631.pdf>. Acesso em: 25 set. 2020.

CATALANOTTI, G.; CAMANHO, P. P.; MARQUES, A. T. Three-dimensional failure criteria for fiber-reinforced laminates. **Composite Structures**, Oxford, v. 95, p. 63–79, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.07.016>. Acesso em: 22 abr. 2020.

CHEN, W.-H.; LEE, S.-S.; YEH, J.-T. Three-dimensional contact stress analysis of a composite laminate with bolted joint. **Composite Structures**, Oxford, v. 30, n. 3, p. 287–297, 1995.

CHENG, X.; WANG, S.; ZHANG, J.; HUANG, W.; CHENG, Y.; ZHANG, Jikui. Effect of damage on failure mode of multi-bolt composite joints using failure envelope method. **Composite Structures**, Oxford, v. 160, p. 8–15, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.042>. Acesso em: 22 abr. 2020.

CHOI, J. II; HASHEMINIA, S. M.; CHUN, H. J.; PARK, J. C.; CHANG, H. S. Failure load

prediction of composite bolted joint with clamping force. **Composite Structures**, Oxford, v. 189, n. January, p. 247–255, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.037>. Acesso em: 01 nov. 2020.

COSTA, G. G. **Avaliação da Influência dos Ciclos Térmicos nas Propriedades dos Compósitos Termoplásticos de PPS e PEI com Fibras de Carbono e Vidro Conformados por Prensagem a Quente**. 2006. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.

CROCCOLO, D.; DE AGOSTINIS, M.; VINCENZI, N. Failure analysis of bolted joints: Effect of friction coefficients in torque-preloading relationship. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 18, n. 1, p. 364–373, 2011.

CUNHA, J. A. P. **Estudo Da Influência De Diferentes Tipos De Condicionamentos Ambientais nas Propriedades Mecânicas de Compósitos de Fibras de Carbono/Epóxi**. 2010. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.

ENCARNAÇÃO, R. R. da. **Análise do torque de aperto em uniões parafusadas**. 2019. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2019.

ESMAEILI, F.; CHAKHERLOU, T. N.; ZEHSAZ, M. Investigation of bolt clamping force on the fatigue life of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints via experimental and numerical analysis. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 45, p. 406–420, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.07.014>. Acesso em: 01 nov. 2020.

FAA - FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS)**. Columbus, OH: [s. n.], 2008. 2008.v. 27.

GANESHMURTHY, S.; NASSAR, S. A. Finite element simulation of process control for bolt tightening in joints with nonparallel contact. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, Nova Iorque, v. 136, n. 2, p. 1–9, 2014.

GIANNOPOULOS, I. K.; DORONI-DAWES, D.; KOUROUSIS, K. I.; YASAEI, M. Effects of bolt torque tightening on the strength and fatigue life of airframe FRP laminate bolted joints. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 125, p. 19–26, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.059>. Acesso em: 05 mai. 2020.

GILLESPIE, J. W.; GAMA, B. A.; CICHANOWSKI, C. E.; XIAO, J. R. Interlaminar shear strength of plain weave S2-glass/SC79 composites subjected to out-of-plane high strain rate compressive loadings. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 65, n. 11–12, p. 1891–1908, 2005.

GOMES, V. M. G.; RODRIGUES, M.; CORREIA, J. A. F. O.; FIGUEIREDO, M. A. V.; JESUS, A. M. P.; FERNANDES, A. A. Monotonic and fracture behaviours of bolted connections with distinct bolt preloads and surface treatments. **Frattura ed Integrità Strutturale**, [s. l.], v. 13, n. 48, p. 304–317, 2019.

GREENHALGH, E. S. **Failure analysis and fractography of polymer composites**. Boca

Raton, Florida: CRC Press, 2009. 2009.

GU, J.; CHEN, P. Some modifications of Hashin's failure criteria for unidirectional composite materials. **Composite Structures**, Oxford, v. 182, n. June, p. 143–152, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.011>. Acesso em: 01 nov. 2020.

GURIT LTD. **SE84LV Low temperature cure epoxy prepreg**. Wattwill: GURIT, 2017.

HASSAN, N. K.; MOHAMEDIEN, M. A.; RIZKALLA, S. H. Finite element analysis of bolted connections for PFRP composites. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 3–4, p. 339–349, 1996.

HERRINGTON, P. D.; SABBAGHIAN, M. Factors affecting the friction coefficients between metallic washers and composite surfaces. **Composites**, Surrey, v. 22, n. 6, p. 418–424, 1991.

HIZAM, R. M.; MANALO, A. C.; KARUNASENA, W.; BAI, Y. Effect of bolt threads on the double lap joint strength of pultruded fibre reinforced polymer composite materials. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 181, p. 185–198, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.061>. Acesso em: 01 nov. 2020.

HWANG, H.-Y. Bolted joint torque setting using numerical simulation and experiments. **Journal of Mechanical Science and Technology**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 1361–1371, 2013. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12206-013-0317-2>. Acesso em: 01 nov. 2020.

KHASHABA, U. A.; SALLAM, H. E. M.; AL-SHORBAGY, A. E.; SEIF, M. A. Effect of washer size and tightening torque on the performance of bolted joints in composite structures. **Composite Structures**, Oxford, v. 73, n. 3, p. 310–317, 2006.

KLASZTORNY, M.; NYCZ, D.; LABUDA, R. Modelling, simulation and experimental validation of bend tests on GFRP laminate beam and plate specimens. **Composite Structures**, Oxford, v. 184, n. Oct. 2017, p. 604–612, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.046>. Acesso em: 22 jan. 2021.

KUMAR, T. V. V.; SHANKAR, G. S. S.; SHANKAR, B. L. Experimental study on effect of stacking sequence, clearance and clamping torque on strength of FRP composite bolted joints. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 4, n. 10, p. 10746–10750, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.022>. Acesso em: 22 jan. 2021.

LI, N.; GU, J. F.; CHEN, P. H. Fracture plane based failure criteria for fibre-reinforced composites under three-dimensional stress state. **Composite Structures**, Oxford, v. 204, n. July, p. 466–474, 2018.

LI, S.; SITNIKOVA, E. A critical review on the rationality of popular failure criteria for composites. **Composites Communications**, [s. l.], v. 8, n. Nov. 2017, p. 7–13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2018.02.002>. Acesso em: 22 jan. 2021.

LIU, F.; LU, X.; ZHAO, L.; ZHANG, J.; HU, N.; XU, J. An interpretation of the load distributions in highly torqued single-lap composite bolted joints with bolt-hole clearances. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 138, n. Nov. 2016, p. 194–205, 2018. Disponível

em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.027>. Acesso em: 22 jan. 2021.

LIU, G. R.; QUEK, S. S. **The finite element method**. Seconded. [S. l.: s. n.], 2014.

LU, F.; CAI, D.; TANG, J.; LI, W.; DENG, J.; ZHOU, G. Bearing failure of single-/double-shear composite bolted joints: An explicit finite element modeling. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Westport, v. 37, n. 14, p. 933–944, 2018.

MANDAL, B.; CHAKRABARTI, A. Numerical failure assessment of multi-bolt FRP composite joints with varying sizes and preloads of bolts. **Composite Structures**, Oxford, v. 187, n. Oct. 2017, p. 169–178, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.048>. Acesso em: 22 jan. 2021.

MARQUES, L. S. **Estudo do processamento de compósitos termoplásticos PPS/Carbono obtidos por consolidação em autoclave**. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.

MARQUES, T. P. Z.; MAYER, S.; CÂNDIDO, G. M.; REZENDE, M. C. Fractographic analysis of scarf repaired carbon/epoxy laminates submitted to tensile strength. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 124, n. March, p. 1–11, 2021.

MONTAGNE, B.; LACHAUD, F.; PAROISSIEN, E.; MARTINI, D.; CONGOURDEAU, F. Failure analysis of single lap composite laminate bolted joints: comparison of experimental and numerical tests. **Composite Structures**, Oxford, v. 238, n. October 2019, p. 111949, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111949>. Acesso em: 05 mai. 2020.

MTS SYSTEMS CORPORATION. **MTS criterion ® series 40 electromechanical universal test systems high-performance monotonic testing solutions for research, development and manufacturing**. Minnesota: MTS, 2018. Disponível em: [https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts\\_006225.pdf](https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_006225.pdf). Acesso em: 05 maio 2020.

NALI, P.; CARRERA, E. A numerical assessment on two-dimensional failure criteria for composite layered structures. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 280–289, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.018>. Acesso em: 18 dez. 2019.

NIKBAKT, S.; KAMARIAN, S.; SHAKERI, M. A review on optimization of composite structures Part I: laminated composites. **Composite Structures**, Oxford, v. 195, n. February, p. 158–185, 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OBERG, E.; JONES, F. D.; HORTON, H. L.; RYFFEL, H. H. **Machinery's handbook**. 31st. ed. Connecticut: Industrial Press, 2020.

OLMEDO, Á.; SANTIUSTE, C. On the prediction of bolted single-lap composite joints. **Composite Structures**, Oxford, v. 94, n. 6, p. 2110–2117, 2012.

OMEGA ENGINEERING. **LCWD series**. Stamford, CT: Omega Engineering, 2009.

ONKAR, A. K.; UPADHYAY, C. S.; YADAV, D. Probabilistic failure of laminated composite plates using the stochastic finite element method. **Composite Structures**, Oxford, v. 77, n. 1, p. 79–91, 2007.

OPELT, C. V. **Estudo dos Modos de Falha em Compressao Uniaxial de Compósitos Avancados: Nova Proposta de Classificacao**. 2017. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

OPELT, C. V.; CÂNDIDO, G. M.; REZENDE, M. C. Compressive failure of fiber reinforced polymer composites: a fractographic study of the compression failure modes. **Materials Today Communications**, [s. l.], v. 15, n. Jan., p. 218–227, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.03.012>. Acesso em: 18 dez. 2019.

PENG, X.; LI, X.; LIU, G.; ZHAO, J. Prediction of net-tension failure of multi-bolt composite joints: A fast approach for laminates with arbitrary layup. **European Journal of Mechanics, A/Solids**, Paris, v. 87, n. Dec. 2020, p. 104213, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2021.104213>. Acesso em: 18 dez. 2019.

PURSLOW, D. Fractography of fibre-reinforced thermoplastics, Part 3. Tensile, compressive and flexural failures. **Composites**, Surrey, v. 19, n. 5, p. 358–366, 1988.

PURSLOW, D. Matrix fractography of fibre-reinforced epoxy composites. **Composites**, Surrey, v. 17, n. 4, p. 289–303, 1986.

PURSLOW, D. Some fundamental aspects of composites fractography. **Composites**, Surrey, v. 12, n. 4, p. 241–247, 1981.

QIN, T.; ZHAO, L.; ZHANG, J. Fastener effects on mechanical behaviors of double-lap composite joints. **Composite Structures**, Oxford, v. 100, p. 413–423, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.008>. Acesso em: 01 nov. 2020.

ROSALES-IRIARTE, F.; FELLOWS, N. A.; DURODOLA, J. F. Failure prediction in carbon composites subjected to bearing versus bypass loading. **Journal of Composite Materials**, Lancaster, v. 46, n. 15, p. 1859–1878, 2012.

SABA, N.; JAWAID, M. A Review on Thermomechanical Properties of Polymers and Fibers Reinforced Polymer Composites. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1226086X18303083>. Acesso em: 01 nov. 2020.

SAE INTERNATIONAL. **AS8879**: screw threads - UNJ profile, inch controlled radius root with increased minor diameter. Pensilvania: SAE International, 2004.

SCHÖN, J. Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite. **Wear**, [s. l.], v. 257, n. 3–4, p. 395–407, 2004.

SCOTCH-WELD 3M. **AF 163-2 structural adhesive film**. St. Paul, MN: SAE

INTERNATIONAL, 2009.

SIEMENS PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT SOFTWARE INC. **NX Nastran User's Guide**. Plano, TX: Siemens, 2014.

SOUSA, B. S. de; GOMES, G. F.; JORGE, A. B.; DA CUNHA, S. S.; ANCELOTTI, A. C. A modified topological sensitivity analysis extended to the design of composite multidirectional laminates structures. **Composite Structures**, Oxford, v. 200, n. February, p. 729–746, 2018.

SOUZA, M. F. de. **Influência do ângulo entre cargas de bearing e bypass na resistência de juntas cravadas de carbono/epóxi**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2016.

TOBALINA-BALDEON, D.; SANZ-ADÁN, F.; MARTINEZ-CALVO, M.; GÓMEZ, C.; SANZ-PENA, I.; CAVAS, F. Feasibility analysis of bolted joints with composite fibre-reinforced thermoplastics. **Polymers**, [s. l.], v. 13, n. 12, p. 1904, 2021.

WANG, Z. W.; ZHAO, J. P.; ZHANG, X. Finite element analysis of composite laminates subjected to low-velocity impact based on multiple failure criteria. **Materials Research Express**, [s. l.], v. 5, n. 6, 2018.

WELCH, M. A paradigm for the analysis of preloaded bolted joints. **Strojnický Casopis**, [s. l.], v. 69, n. 1, p. 143–152, 2019.

YOON, D.; KIM, S.; KIM, J.; DOH, Y. Study on bearing strength and failure mode of a carbon-epoxy composite laminate for designing bolted joint structures. **Composite Structures**, Oxford, v. 239, n. Feb., p. 112023, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112023>. Acesso em: 01 nov. 2020.

YU, Q. M.; YANG, X. J.; ZHOU, H. L. An experimental study on the relationship between torque and preload of threaded connections. **Advances in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1–10, 2018.

YU, Q. M.; ZHOU, H. L. Finite element study on pre-tightening process of threaded connection and failure analysis for pressure vessel. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 130, p. 1385–1396, 2015.

YU, Q.; ZHOU, H.; WANG, L. Finite element analysis of relationship between tightening torque and initial load of bolted connections. **Advances in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 5, p. 1–8, 2015.

ZHANG, J.; LIU, F.; ZHAO, L.; ZHI, J.; ZHOU, L.; FEI, B. Influence of end distances on the failure of composite bolted joints. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Westport, v. 34, n. 5, p. 388–404, 2015.

ZHAO, L.; XIN, A.; LIU, F.; ZHANG, J.; HU, N. Secondary bending effects in progressively damaged single-lap, single-bolt composite joints. **Results in Physics**, [s. l.], v. 6, p. 704–711, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2016.08.021>. Acesso em: 22 abr. 2020.

ZHOU, G.; SUN, Q.; LI, D.; MENG, Z.; PENG, Y.; ZENG, D.; SU, X. Effects of fabric

architectures on mechanical and damage behaviors in carbon/epoxy woven composites under multiaxial stress states. **Polymer Testing**, Essex, v. 90, 2020.

ZHOU, G.; SUN, Q.; MENG, Z.; LI, D.; PENG, Y.; ZENG, D.; SU, X. Experimental investigation on the effects of fabric architectures on mechanical and damage behaviors of carbon/epoxy woven composites. **Composite Structures**, Oxford, v. 257, 2021.

ZIMMERMANN, N.; WANG, P. H. A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 115, n. June, p. 104692, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104692>. Acesso em: 22 abr. 2020.

## APÊNDICE A – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

### ANÁLISE ESTATÍSTICA – COEFICIENTES DE TORQUE

#### Teste de igualdade de variâncias: Conf 1; Conf 2; Conf 3

##### Método

Hipótese nula	Todas as variâncias são iguais
Hipótese alternativa	No mínimo uma variância é diferente
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

*Foi utilizado o método de Bartlett. Esse método é preciso apenas para dados normais.*

#### Intervalos de 95% de Confiança Bonferroni para os Desvios Padrão

Amostra	N	DesvPad	IC
Conf 1	8	0,0219059	(0,0133126; 0,0536502)
Conf 2	10	0,0136453	(0,0086926; 0,0290383)
Conf 3	10	0,0367759	(0,0234277; 0,0782622)

*Nível de confiança individual = 98,3333%*

##### Testes

Método	Estatística de teste	Valor-p
Bartlett	7,79	0,020

#### Teste de igualdade de variâncias: Conf 1; Conf 2; Conf 3

### Teste e IC para Duas Variâncias: Conf 1; Conf 2

##### Método

$\sigma_1$ : desvio Padrão de Conf 1

$\sigma_2$ : desvio Padrão de Conf 2

Razão:  $\sigma_1/\sigma_2$

O método F foi usado. Esse método é preciso apenas para dados normais.

##### Estatísticas Descritivas

Variável	N	DesvPad	Variância	IC de 95% para $\sigma$
Conf 1	8	0,022	0,000	(0,014; 0,045)
Conf 2	10	0,014	0,000	(0,009; 0,025)

##### Razão de desvios padrão

Razão Estimada	95% IC da Razão usando F
1,60538	(0,784; 3,526)

##### Teste

Hipótese nula  $H_0: \sigma_1 / \sigma_2 = 1$

Hipótese alternativa  $H_1: \sigma_1 / \sigma_2 \neq 1$

Nível de significância  $\alpha = 0,05$

Método	Estatística de teste	GL1	GL2	Valor-p
F	2,58	7	9	0,187

#### Teste e IC para Duas Variâncias: Conf 1; Conf 2

## Teste e IC para Duas Variâncias: Conf 1; Conf 3

### Método

$\sigma_1$ : desvio Padrão de Conf 1

$\sigma_2$ : desvio Padrão de Conf 3

Razão:  $\sigma_1/\sigma_2$

O método F foi usado. Esse método é preciso apenas para dados normais.

### Estatísticas Descritivas

Variável	N	DesvPad	Variância	IC de 95% para $\sigma$
Conf 1	8	0,022	0,000	(0,014; 0,045)
Conf 3	10	0,037	0,001	(0,025; 0,067)

### Razão de desvios padrão

Razão Estimada	95% IC da	
	Razão usando	Razão usando
	F	F
0,595658	(0,291; 1,308)	

### Teste

Hipótese nula  $H_0: \sigma_1 / \sigma_2 = 1$

Hipótese alternativa  $H_1: \sigma_1 / \sigma_2 \neq 1$

Nível de significância  $\alpha = 0,05$

Método	Estatística de teste	Valor-p		
		GL1	GL2	Valor-p
F	0,35	7	9	0,186

## Teste e IC para Duas Variâncias: Conf 1; Conf 3

## Teste e IC para Duas Variâncias: Conf 2; Conf 3

### Método

$\sigma_1$ : desvio Padrão de Conf 2

$\sigma_2$ : desvio Padrão de Conf 3

Razão:  $\sigma_1/\sigma_2$

O método F foi usado. Esse método é preciso apenas para dados normais.

### Estatísticas Descritivas

Variável	N	DesvPad	Variância	IC de 95% para $\sigma$
Conf 2	10	0,014	0,000	(0,009; 0,025)
Conf 3	10	0,037	0,001	(0,025; 0,067)

### Razão de desvios padrão

Razão Estimada	95% IC da	
	Razão usando	Razão usando
	F	F
0,371039	(0,185; 0,744)	

### Teste

Hipótese nula  $H_0: \sigma_1 / \sigma_2 = 1$

Hipótese alternativa  $H_1: \sigma_1 / \sigma_2 \neq 1$

Nível de significância  $\alpha = 0,05$

Método	Estatística de teste	Valor-p		
		GL1	GL2	Valor-p
F	0,14	9	9	0,007

## Teste e IC para Duas Variâncias: Conf 2; Conf 3

## Teste T para Duas Amostras e IC: Conf 1; Conf 2

### Método

$\mu_1$ : média de Conf 1

$\mu_2$ : média de Conf 2

Diferença:  $\mu_1 - \mu_2$

*Assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.*

### Estatísticas Descritivas

Amostra	N	Média	DesvPad	EP Média
Conf 1	8	0,3052	0,0219	0,0077
Conf 2	10	0,3218	0,0136	0,0043

### Estimativa da diferença

Diferença	DesvPad Combinado	IC de 95% para a Diferença
-0,01661	0,01774	(-0,03445; 0,00123)

### Teste

Hipótese nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótese alternativa  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor-T	GL	Valor-p
-1,97	16	0,066

### Gráfico de Valores Individuais de Conf 1; Conf 2

## Teste T para Duas Amostras e IC: Conf 1; Conf 3

### Método

$\mu_1$ : média de Conf 1

$\mu_3$ : média de Conf 3

Diferença:  $\mu_1 - \mu_3$

*Assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.*

### Estatísticas Descritivas

Amostra	N	Média	DesvPad	EP Média
Conf 1	8	0,3052	0,0219	0,0077
Conf 3	10	0,3319	0,0368	0,012

### Estimativa da diferença

Diferença	DesvPad Combinado	IC de 95% para a Diferença
-0,0267	0,0312	(-0,0580; 0,0046)

### Teste

Hipótese nula  $H_0: \mu_1 - \mu_3 = 0$

Hipótese alternativa  $H_1: \mu_1 - \mu_3 \neq 0$

Valor-T	GL	Valor-p
-1,81	16	0,090

### Gráfico de Valores Individuais de Conf 1; Conf 3

## Teste T para Duas Amostras e IC: Conf 2; Conf 3

### Método

$\mu_1$ : média de Conf 2

$\mu_2$ : média de Conf 3

Diferença:  $\mu_1 - \mu_2$

*Não assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.*

### Estatísticas Descritivas

Amostra	N	Média	DesvPad	EP Média
Conf 2	10	0,3218	0,0136	0,0043
Conf 3	10	0,3319	0,0368	0,012

### Estimativa da diferença

Diferença	IC de 95% para a Diferença
-0,0101	(-0,0374; 0,0172)

### Teste

Hipótese nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótese alternativa  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor-T	GL	Valor-p
-0,81	11	0,433

## ANÁLISE ESTATÍSTICA – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

### Teste de igualdade de variâncias: 21.2 N.m; 25 N.m; 30 N.m

#### Método

Hipótese nula Todas as variâncias são iguais

Hipótese alternativa No mínimo uma variância é diferente

Nível de significância  $\alpha = 0,05$

*Foi utilizado o método de Bartlett. Esse método é preciso apenas para dados normais.*

#### Intervalos de 95% de Confiança Bonferroni para os Desvios Padrão

Amostra	N	DesvPad	IC
21.2 N.m	8	0,325278	(0,197677; 0,79665)
25 N.m	8	0,286347	(0,174018; 0,70130)
30 N.m	8	0,559473	(0,340001; 1,37022)

*Nível de confiança individual = 98,3333%*

#### Testes

Método	Estatística de teste	Valor-p
Bartlett	3,54	0,170

### Teste de igualdade de variâncias: 21.2 N.m; 25 N.m; 30 N.m

## ANOVA com um fator: 21.2 N.m; 25 N.m; 30 N.m

### Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

*Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise*

### Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	3	21.2 N.m; 25 N.m; 30 N.m

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	2	9,085	4,5426	27,21	0,000
Erro	21	3,506	0,1669		
Total	23	12,591			

### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,408579	72,16%	69,51%	63,63%

### Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
21.2 N.m	8	25,112	0,325	(24,812; 25,412)
25 N.m	8	26,480	0,286	(26,180; 26,780)
30 N.m	8	26,343	0,559	(26,043; 26,644)

*DesvPad Combinado = 0,408579*

## Comparações Emparelhadas de Tukey

### Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%


Fator	N	Média	Agrupamento
25 N.m	8	26,480	A
30 N.m	8	26,343	A
21.2 N.m	8	25,112	B



*Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.*


### ICs Simultâneos de 95% de Tukey

#### Gráfico de Intervalos de 21.2 N.m; 25 N.m; ...


## ANEXO A – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS POR ULTRASSOM REALIZADOS NOS LAMINADOS

	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR ULTRASSOM - RIEUS</b>			DATA: 04/04/19		RELATÓRIO N° 0012019
				REV. 0		
				FOLHA: 01 de 02		
Cliente		Padrão de Referência		Descrição da Peça		PN / Rev.
Universidade Federal de São Paulo – Unifesp (Thais)		ALL1318		Junta Aparafusada 01		0001
Pedido de Compra		Código da peça		Quantidade de peças		Ordem de Fabricação N°
N/A		0001		Aprovada	Não Conforme	N° de Serie da peça
				01	00	0001
Equipamento		Número de Série	Transdutor	Validade da Calibração		Plano de Inspeção de Ensaio Não Destrutivo - PIEND
Olympus OmniScan SX		ALL2692	V201/25* – 5MHz	20/01/2020		N/A
<b>CONFIGURAÇÃO</b>						
Voltagem	Ganho	Modo	Tipo	Retificação	Filtro	
95 (Baixo)	37 dB	PE (Pulso-eco)	A Scan	HW-	Nenhum (1.0 - 17.8 MHz)	
<b>PORTA</b>						
Porta	Iniciar	Largura	Liminar	Sincron.	Seleção de Pico	
A	0,85 mm	13.00 mm	55.00%	Pulso	Pico máximo	
<b>LEI FOCAL</b>						
Quantidade de elementos usados	Primeiro elemento	Último elemento		Resolução	Configuração da Lei	
NA	NA	NA		NA	NA	
<b>CURVA TCG</b>						
N° do pnto TCG		Posição (meia trajetória)		Ganho		
0		0		0		

	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR ULTRASSOM - RIEUS</b>			DATA: 04/04/19	RELATÓRIO N° 0012019
				REV. 0	
				FOLHA: 02 de 02	
<b>MAPEAMENTO DA DESCONTINUIDADE</b>					
Tipo de Descontinuidade	Dano	Região	Comprimento	Largura	Profundidade (Menor / Maior)
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
<p><b>Descrição:</b> Realizada a inspeção por ultrassom utilizando a técnica de Pulso eco tipo A scan em toda a região da peça, onde não foi encontrado nenhuma indicação de defeito conforme descrito na tabela acima. Inspeção realizada utilizando o equipamento detector de falhas por ultrassom da marca Olympus, Omniscan SX, transdutor V201 – 5MHz. Equipamento calibrado em padrão de referencia ALL1318 em região de espessura aproximada a da peça a ser ensaiada.</p>					
Nome do Técnico	Nível de Qualificação em END - Ultrassom	Carimbo	Assinatura do técnico		
<i>Renan</i>	2	AL236 - US			


 <b>ALLTEC</b> MATERIAIS COMPOSTOS	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR ULTRASSOM - RIEUS</b>		DATA: 04/04/19		RELATÓRIO N° 0022019		
			REV. 0				
			FOLHA: 01 de 02				
Cliente		Padrão de Referência		Descrição da Peça		PN / Rev.	
Universidade Federal de São Paulo – Unifesp (Thais)		ALL1318		Junta Aparafusada 02		0002	
Pedido de Compra		Código da peça		Quantidade de peças		Ordem de Fabricação N°	N° de Serie da peça
N/A		0002		Aprovada	Não Conforme	N/A	0002
				01	00		
Equipamento	Número de Série	Transdutor	Validade da Calibração		Plano de Inspeção de Ensaio Não Destrutivo - PIEND		
Olympus OmniScan SX	ALL2692	V201/25* – 5MHz	20/01/2020		N/A		
<b>CONFIGURAÇÃO</b>							
. Voltagem	Ganho	Modo	Tipo	Retificação	Filtro		
95 (Baixo)	37 dB	PE (Pulso-eco)	A Scan	HW-	Nenhum (1.0 - 17.8 MHz)		
<b>PORTA</b>							
Porta	Iniciar	Largura	Liminar	Sincron.	Seleção de Pico		
A	0,85 mm	13.00 mm	55.00%	Pulso	Pico máximo		
<b>LEI FOCAL</b>							
Quantidade de elementos usados	Primeiro elemento	Último elemento		Resolução	Configuração da Lei		
NA	NA	NA		NA	NA		
<b>CURVA TCG</b>							
		N° do pnto TCG	Posição (meia trajetória)		Ganho		
		0	0		0		


Fonte: Elaborado pelo autor.

 <b>ALITEC</b> MATERIAS COMPOSTOS	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR ULTRASSOM - RIEUS</b>	DATA: 04/04/19	RELATÓRIO N° 0022019
		REV. 0	
		FOLHA: 02 de 02	


MAPEAMENTO DA DESCONTINUIDADE					
Tipo de Descontinuidade	Dano	Região	Comprimento	Largura	Profundidade (Menor / Maior)
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

**Descrição:** Realizada a inspeção por ultrassom utilizando a técnica de Pulso eco tipo A scan em toda a região da peça, onde não foi encontrado nenhuma indicação de defeito conforme descrito na tabela acima. Inspeção realizada utilizando o equipamento detector de falhas por ultrassom da marca Olympus, Omniscan SX, transdutor V201 – 5MHz. Equipamento calibrado em padrão de referencia ALL1318 em região de espessura aproximada a da peça a ser ensaiada.


Nome do Técnico	Nível de Qualificação em END - Ultrassom	Carimbo	Assinatura do técnico
<i>Renan</i>	<i>2</i>	AL236 - US	

 <b>ALITEC</b> MATERIAIS COMPOSTOS	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR          ULTRASSOM - RIEUS</b>		DATA: 04/04/19		RELATÓRIO N° 0032019		
			REV. 0				
			FOLHA: 01 de 02				
Cliente		Padrão de Referência		Descrição da Peça		PN / Rev.	
Universidade Federal de São Paulo – Unifesp (Thais)		ALL1318		Junta Aparafusada 03		0003	
Pedido de Compra		Código da peça		Quantidade de peças		Ordem de Fabricação N°	N° de Serie da peça
N/A		0003		Aprovada	Não Conforme	N/A	0003
				01	00		
Equipamento	Número de Série	Transdutor	Validade da Calibração		Plano de Inspeção de Ensaio Não Destrutivo - PIEND		
Olympus OmniScan SX	ALL2692	V201/25" – 5MHz	20/01/2020		N/A		
<b>CONFIGURAÇÃO</b>							
.Voltagem	Ganho	Modo	Tipo	Retificação	Filtro		
95 (Baixo)	37 dB	PE (Pulso-eco)	A Scan	HW-	Nenhum (1.0 - 17.8 MHz)		
<b>PORTA</b>							
Porta	Iniciar	Largura	Liminar	Sincron.	Seleção de Pico		
A	0,85 mm	13.00 mm	55.00%	Pulso	Pico máximo		
<b>LEI FOCAL</b>							
Quantidade de elementos usados	Primeiro elemento	Último elemento		Resolução	Configuração da Lei		
NA	NA	NA		NA	NA		
<b>CURVA TCG</b>							
		N° do pnto TCG	Posição (meia trajetória)		Ganho		
		0	0		0		

Fonte: Elaborado pelo autor.


	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR ULTRASSOM - RIEUS</b>		DATA: 04/04/19		RELATÓRIO N° 0042019		
			REV. 0				
			FOLHA: 01 de 03				
Cliente		Padrão de Referência		Descrição da Peça		PN / Rev.	
Universidade Federal de São Paulo – Unifesp (Thais)		ALL1318		Junta Aparafusada 04		0004	
Pedido de Compra		Código da peça		Quantidade de peças		Ordem de Fabricação N°	N° de Serie da peça
N/A		0004		Aprovada	Não Conforme	N/A	0004
				01	00		
Equipamento	Número de Série	Transdutor	Validade da Calibração		Plano de Inspeção de Ensaio Não Destrutivo - PIEND		
Olympus OmniScan SX	ALL2692	V201/25* – 5MHz	20/01/2020		N/A		
<b>CONFIGURAÇÃO</b>							
. Voltagem	Ganho	Modo	Tipo	Retificação	Filtro		
95 (Baixo)	37 dB	PE (Pulso-eco)	A Scan	HW-	Nenhum (1.0 - 17.8 MHz)		
<b>PORTA</b>							
Porta	Iniciar	Largura	Liminar	Sincron.	Seleção de Pico		
A	0,85 mm	13.00 mm	55.00%	Pulso	Pico máximo		
<b>LEI FOCAL</b>							
Quantidade de elementos usados	Primeiro elemento	Último elemento		Resolução	Configuração da Lei		
NA	NA	NA		NA	NA		
<b>CURVA TCG</b>							
		N° do pnto TCG	Posição (meia trajetória)		Ganho		
		0	0		0		


Fonte: Elaborado pelo autor.

	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR ULTRASSOM - RIEUS</b>	DATA: 04/04/19	RELATÓRIO N° 0042019
		REV. 0	
		FOLHA: 02 de 03	


MAPEAMENTO DA DESCONTINUIDADE					
Tipo de Descontinuidade	Dano	Região	Comprimento	Largura	Profundidade (Menor / Maior)
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

**Descrição:** Realizada a inspeção por ultrassom utilizando a técnica de Pulso eco tipo A scan em toda a região da peça, onde não foi encontrado nenhuma indicação de defeito conforme descrito na tabela acima. Inspeção realizada utilizando o equipamento detector de falhas por ultrassom da marca Olympus, Omniscan SX, transdutor V201 – 5MHz. Equipamento calibrado em padrão de referencia ALL1318 em região de espessura aproximada a da peça a ser ensaiada.

Nome do Técnico	Nível de Qualificação em END - Ultrassom	Carimbo	Assinatura do técnico
<i>Renan</i>	<i>2</i>	AL236 - US	

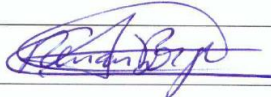
 <b>MATERIAIS COMPOSTOS</b>	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR ULTRASSOM - RIEUS</b>		DATA: 04/04/19		RELATÓRIO N° 0072019		
			REV. 0				
			FOLHA: 01 de 02				
Cliente		Padrão de Referência		Descrição da Peça		PN / Rev.	
Universidade Federal de São Paulo – Unifesp (Thais)		ALL1318		Junta Torque 01		0001	
Pedido de Compra		Código da peça		Quantidade de peças		Ordem de Fabricação N°	N° de Serie da peça
N/A		0001		Aprovada	Não Conforme	N/A	0001
				01	00		
Equipamento	Número de Série	Transdutor	Validade da Calibração		Plano de Inspeção de Ensaio Não Destrutivo - PIEND		
Olympus OmniScan SX	ALL2692	V201/25" – 5MHz	20/01/2020		N/A		
<b>CONFIGURAÇÃO</b>							
.Voltagem	Ganho	Modo	Tipo	Retificação	Filtro		
95 (Baixo)	37 dB	PE (Pulso-eco)	A Scan	HW-	Nenhum (1.0 - 17.8 MHz)		
<b>PORTA</b>							
Porta	Iniciar	Largura	Liminar	Sincron.	Seleção de Pico		
A	0,85 mm	13.00 mm	55.00%	Pulso	Pico máximo		
<b>LEI FOCAL</b>							
Quantidade de elementos usados	Primeiro elemento	Último elemento		Resolução	Configuração da Lei		
NA	NA	NA		NA	NA		
<b>CURVA TCG</b>							
		N° do pnto TCG	Posição (meia trajetória)		Ganho		
		0	0		0		

Fonte: Elaborado pelo autor.


 MATERIAIS COMPOSTOS	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR ULTRASSOM - RIEUS</b>	DATA: 04/04/19	RELATÓRIO N° 0072019
		REV. 0	
		FOLHA: 02 de 02	

MAPEAMENTO DA DESCONTINUIDADE					
Tipo de Descontinuidade	Dano	Região	Comprimento	Largura	Profundidade (Menor / Maior)
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

**Descrição:** Realizada a inspeção por ultrassom utilizando a técnica de Pulso eco tipo A scan em toda a região da peça, onde não foi encontrado nenhuma indicação de defeito conforme descrito na tabela acima. Inspeção realizada utilizando o equipamento detector de falhas por ultrassom da marca Olympus, Omniscan SX, transdutor V201 – 5MHz. Equipamento calibrado em padrão de referencia ALL1318 em região de espessura aproximada a da peça a ser ensaiada.

Nome do Técnico	Nível de Qualificação em END - Ultrassom	Carimbo	Assinatura do técnico
<i>Renan</i>	2	AL236 - US	

Fonte: Elaborado pelo autor.


 <b>ALITEC</b> MATERIAIS COMPOSTOS	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR  ULTRASSOM - RIEUS</b>		DATA: 04/04/19		RELATÓRIO N° 0082019		
			REV. 0				
			FOLHA: 01 de 02				
Cliente		Padrão de Referência		Descrição da Peça		PN / Rev.	
Universidade Federal de São Paulo – Unifesp (Thais)		ALL1318		Junta Torque 02		0002	
Pedido de Compra		Código da peça		Quantidade de peças		Ordem de Fabricação N°	N° de Serie da peça
N/A		0002		Aprovada	Não Conforme	N/A	0002
				01	00		
Equipamento	Número de Série	Transdutor	Validade da Calibração		Plano de Inspeção de Ensaio Não Destrutivo - PIEND		
Olympus OmniScan SX	ALL2692	V201/25" – 5MHz	20/01/2020		N/A		
<b>CONFIGURAÇÃO</b>							
. Voltagem	Ganho	Modo	Tipo	Retificação	Filtro		
95 (Baixo)	37 dB	PE (Pulso-eco)	A Scan	HW-	Nenhum (1.0 - 17.8 MHz)		
<b>PORTA</b>							
Porta	Iniciar	Largura	Liminar	Sincron.	Seleção de Pico		
A	0,85 mm	13.00 mm	55.00%	Pulso	Pico máximo		
<b>LEI FOCAL</b>							
Quantidade de elementos usados	Primeiro elemento	Último elemento		Resolução	Configuração da Lei		
NA	NA	NA		NA	NA		
<b>CURVA TCG</b>							
		N° do pnto TCG	Posição (meia trajetória)		Ganho		
		0	0		0		

Fonte: Elaborado pelo autor.

 MATERIAIS COMPOSTOS	<b>RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E ENSAIO POR ULTRASSOM - RIEUS</b>	DATA: 04/04/19	RELATÓRIO N° 0082019
		REV. 0	
		FOLHA: 02 de 02	

MAPEAMENTO DA DESCONTINUIDADE					
Tipo de Descontinuidade	Dano	Região	Comprimento	Largura	Profundidade (Menor / Maior)
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A




**Descrição:** Realizada a inspeção por ultrassom utilizando a técnica de Pulso eco tipo A scan em toda a região da peça, onde não foi encontrado nenhuma indicação de defeito conforme descrito na tabela acima. Inspeção realizada utilizando o equipamento detector de falhas por ultrassom da marca Olympus, Omniscan SX, transdutor V201 – 5MHz. Equipamento calibrado em padrão de referencia ALL1318 em região de espessura aproximada a da peça a ser ensaiada.

Nome do Técnico	Nível de Qualificação em END - Ultrassom	Carimbo	Assinatura do técnico
<i>Renan</i>	<i>2</i>	AL236 - US	



Fonte: Elaborado pelo autor.

## ANEXO B – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS POR ULTRASSOM APÓS ENSAIO PARA ANÁLISE DE TORQUE E PRÉ-CARREGAMENTO

### CONFIGURAÇÃO 1

 <b>SOLICITAÇÃO / REGISTRO DE ENSAIO POR ULTRASSOM</b> <small>(REQUEST/REGISTRATION OF ULTRASOUND TEST)</small>	
Solicitante / OC (requestor/OC): ICT UNIFESP	
Data (date): 19/10/2020	
Departamento (department) <input checked="" type="checkbox"/> Qualidade (quality) <input type="checkbox"/> Processo (process) <input type="checkbox"/> Produção (production)	
Código Part Number (PN Code) :	Part Number (PN):
Material (Material): <input checked="" type="checkbox"/> Carbono <input type="checkbox"/> Fibra de Vidro (fiberglass) <input type="checkbox"/> Laminado/Colméia	
Ensaio desejado (Desired test): <input checked="" type="checkbox"/> Ultrassom - Detecção de Falhas (Ultrasound-discontinuity detection) <input type="checkbox"/> Medição de Espessura por Ultrassom (Measurement of thickness by ultrasound) <input type="checkbox"/> Tap Test - Verificação de Descolamento Laminado/Colméia (Disbond laminated/honeycomb)	
Qtd. peças da OC (number of parts OC): 12	Qtd. de peças para ensaio (number of parts inspected) : 12
Necessidade (need): <input checked="" type="checkbox"/> Normal (normal) <input type="checkbox"/> Urgente (urgent)	
Detalhamento do Ensaio - por exemplo: descrição do ocorrido com cotas de localização e outras informações necessárias) <small>(Details of the Test - for example: description of the occurred with quotas and other necessary information):</small>	
Realizado ensaio por ultrassom ao redor dos furos da placas identificadas como: CONF. 1, CDP 1, A e B // CONF. 1, CDP 2, A e B // CONF. 1, CDP 3, A e B // CONF. 1, CDP 4, A e B // CONF. 1, CDP 5, A e B // CONF. 2, CDP 1, A e B, não sendo detectado nenhuma descontinuidade.	
<b>Observações:</b> Foram utilizados os Padrões de Referência: PADRÃO TECPLAS FC PN 700-7725616-020 step 3, transdutor de 5Mhz V201, aparelho ultrassom Krautkramer USM36, Gel Acoplante Ultragel II	
Croqui (quando aplicável) (sketch where applicable):	
	
RESERVADO À ÁREA DE ULTRASSOM (reserved ultrasound test area)	
Resultado do Ensaio (result of testing): <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO (approved) <input type="checkbox"/> REJEITADO (rejected)	
Detalhamento do resultado (detailing of results): Peças aprovadas conforme DQ-04.	
Realizado por (inspected by): 	
Data (date): 19/10/2020	

## CONFIGURAÇÃO 2 E 3

		<b>SOLICITAÇÃO / REGISTRO DE ENSAIO POR ULTRASSOM</b> (REQUEST/REGISTRATION OF ULTRASOUND TEST)	
Solicitante / OC (requestor/OC): UNIFESP 2021 Epóxi/FC		Data (date): 23/12/2021	
Departamento (department) <input checked="" type="checkbox"/> Qualidade (quality) <input type="checkbox"/> Processo (process) <input type="checkbox"/> Produção (production)			
Código Part Number (PN Code) :		Part Number (PN):	
Material (Material): <input checked="" type="checkbox"/> Carbono <input type="checkbox"/> Fibra de Vidro (fiberglass) <input type="checkbox"/> Laminado/Colméia			
Ensaio desejado (Desired test): <input checked="" type="checkbox"/> Ultrassom - Detecção de Falhas (Ultrasound-discontinuity detection) (NE 07-011 e NE 20-032) <input type="checkbox"/> Medição de Espessura por Ultrassom (Measurement of thickness by ultrasound) <input type="checkbox"/> Tap Test - Verificação de Descolamento Laminado/Colméia (Disbond laminated/honeycomb)			
Qtd. peças da OC (number of parts OC): 20		Qtd. de peças para ensaio (number of parts inspected) : 20	
Necessidade (need): <input checked="" type="checkbox"/> Normal (normal) <input type="checkbox"/> Urgente (urgent)			
Detalhamento do Ensaio - por exemplo: descrição do ocorrido com cotas de localização e outras informações necessárias (Details of the Test - for example: description of the occurred with quotas and other necessary information):			
Realizado ensaio por ultrassom nas Placas de Epóxi/Fibra de carbono solicitadas, nas regiões ao redor dos furos, não sendo detectado nenhuma descontinuidade, tanto na configuração 2 (10 unid.) quanto na configuração 3 (10 unid.).			
<b>Observações:</b> Foram utilizados os Padrões de Referência: PADRÃO TECPLAS FC PN 700-7725616-020, Transdutor V201 5Mhz e Aparelho Detector de Falhas USM 36 krautkramer.			
Croqui (quando aplicável) (sketch where applicable):			
RESERVADO À ÁREA DE ULTRASSOM (reserved ultrasound test area)			
Resultado do Ensaio (result of testing): <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO (approved) <input type="checkbox"/> REJEITADO (rejected)			
Detalhamento do resultado (detailing of results): <b>Peças aprovadas conforme DQ-04.</b>			
Realizado por (inspected by):		Data (date): 23/12/2021	
			
Form. 125		Revisão:03	

Fonte: Elaborado pelo autor.