

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**FELIPE SPENGLER**

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE TUBOS EM AÇO COM A UTILIZAÇÃO DE  
LÂMINAS PULTRUDADAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO  
(PRFC) FIXADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL**

**CAXIAS DO SUL**

**2022**

**FELIPE SPENGLER**

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE TUBOS EM AÇO COM A UTILIZAÇÃO DE  
LÂMINAS PULTRUDADAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO  
(PRFC) FIXADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade de Caxias do  
Sul para obtenção do título de Engenheiro  
Mecânico. Área de concentração:  
Mecânica dos sólidos.

Orientador: Prof. Me. André Alaniz Cesário.

**CAXIAS DO SUL**

**2022**

**FELIPE SPENGLER**

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE TUBOS EM AÇO COM A UTILIZAÇÃO DE  
LÂMINAS PULTRUDADAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO  
(PRFC) FIXADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade de Caxias do  
Sul para obtenção do título de Engenheiro  
Mecânico.

**Aprovado em 08/07/2022**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Me. Eng. André Alaniz Cesário  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. Eng. Aleksandro Sordi  
Applus+ IDIADA

## RESUMO

O presente trabalho se propôs a analisar o modelamento pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) para a utilização de lâminas de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC) unidas com adesivo estrutural a tubos de aço-carbono, realizando o estudo por teste de três pontos em tubos com e sem a utilização de lâminas. Como modelamento para o adesivo estrutural foi utilizado um material que representa os modos de falha coesiva para o sentido normal e transversal. Já para a lâmina de PRFC que possui propriedades mecânicas transversalmente isotrópicas foi considerada como material ortotrópico com propriedades mecânicas iguais para duas das três direções, sendo utilizada como objeto de estudo sua elevada resistência na terceira direção. Como método para obtenção da energia total absorvida pelos corpos de prova na realização do ensaio experimental utilizou-se o método numérico de Newton-Cotes simples. A utilização de lâminas PRFC demonstraram um aumento na força máxima de 4,7% e um aumento na energia total absorvida de 5,56% nos ensaios experimentais, porém o resultado da simulação com lâmina PRFC apresentou uma diferença na força máxima de 11,98% inferior ao ensaio experimental e 7,33% de aumento na absorção de energia total.

**Palavras chaves:** Validação comparativa; Simulação numérica; Teste de três pontos; Teste experimental; Lâmina PRFC; Teoria de Rankine; Adesivo estrutural; Modo misto de falha coesiva; Método numérico Newton-Cotes.

## ABSTRACT

The present work proposed to analyze the modeling by the Finite Element Method (FEM) for the use of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheets bonded with structural adhesive to carbon steel tubes, carrying out the study by three-point test in tubes with and without the use of blades. As a model for the structural adhesive, a material that represents the cohesive failure modes for the normal and transverse direction was used. As for the CFRP sheet that has transversally isotropic mechanical properties, it was considered as an orthotropic material with equal mechanical properties for two of the three directions, and its high strength in the third direction was used as an object of study. As a method to obtain the total energy absorbed by the specimens during the experimental test, the simple Newton-Cotes numerical method was used. The use of CFRP blades showed an increase in the maximum force of 4.7% and an increase in the total energy absorbed of 5.56% in the experimental tests, however the result of the simulation with CFRP blade showed a difference in the maximum force of 11.98 % lower than the experimental test and 7.33% increase in total energy absorption.

**Keywords:** Comparative validation; Numerical simulation; Three-point test; Experimental test; CFRP blade; Rankine Theory; Structural adhesive; Cohesive failure mixed mode; Newton-Cotes numerical method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento elástico em uma curva tensão-deformação .....	18
Figura 2 - Comportamento plástico em uma curva tensão-deformação .....	20
Figura 3 - Método de Newton-Cotes de ordem zero .....	23
Figura 4 - Tensão normal na flexão de viga.....	24
Figura 5 - Região inicial de plastificação parcial da seção .....	25
Figura 6 - Representação de região com formação de rótula plástica .....	26
Figura 7 - Análise e condições de contorno de Tuberga .....	27
Figura 8 - Utilização de lâminas PRFC como reforço em placas de tração e uniões parafusadas.....	28
Figura 9 - Modelo numérico e experimental de avaliação de Selvakumarasami e Paramasivan .....	28
Figura 10 - Resultados numéricos e experimentais em tubos com diferentes envoltórios de lâminas PRFC .....	29
Figura 11 - Posições de colagem das lâminas PRFC para experimento de Kandhim, Wu e Cunningham.....	30
Figura 12 - Material transversalmente isotrópico.....	31
Figura 13 - Modos de falha coesiva .....	32
Figura 14 - Gráfico de formação de modo misto em lei de tração-separação bilinear .....	34
Figura 15 - Deslocamentos e pontos de Gauss em elemento coesivo.....	34
Figura 16 - Gráfico tração-separação bilinear .....	36
Figura 17 - Fluxograma do processo pelo MEF .....	38
Figura 18 - Elemento tipo casca totalmente integrada .....	39
Figura 19 - Elemento sólido com formulação coesiva .....	40
Figura 20 - Método iterativo BFGS.....	42
Figura 21 – Pontos de aplicação de lâmina PRFC.....	43
Figura 22 - Organograma da proposta de trabalho .....	44
Figura 23 - Curva coletada em ensaio de tração.....	46
Figura 24 - Lâmina PRFC.....	47
Figura 25 - Adesivo estrutural SikaPower .....	48
Figura 26 - Processo de preparação para aplicação de adesivo estrutural.....	51

Figura 27 - Pressão aplicada em corpos de prova para maior aderência .....	52
Figura 28 - Sistema de ensaio utilizado para curva de força em função do deslocamento .....	53
Figura 29 – Parâmetros métricos de modelos tridimensionais .....	54
Figura 30 - Simplificação de malha em componentes rígidos .....	55
Figura 31 - Discretização de malha hexaédrica .....	56
Figura 32 - Transformação de gráficos de modos de falha para modo misto.....	60
Figura 33 - Considerações referentes ao contato com adesivo estrutural .....	61
Figura 34 - Obtenção de resultados pelo MEF .....	62
Figura 35 - Elementos utilizados para estudo de convergência de malha .....	63
Figura 36 - Resultados convergência de malha .....	64
Figura 37 - Discretização de curva força em função do deslocamento experimental	66
Figura 38 - Força em função do deslocamento sem lâmina PRFC experimental.....	67
Figura 39 - Força em função do deslocamento com lâmina PRFC experimental.....	68
Figura 40 - Imagem de resultado experimental com e sem lâmina PRFC .....	68
Figura 41 - Comparativo de força em função do deslocamento numérico e experimental sem lâmina PRFC .....	69
Figura 42 - Comparativo de força em função do deslocamento numérico e experimental com lâmina PRFC .....	70
Figura 43 - Energia total em função do deslocamento sem lâmina PRFC .....	71
Figura 44 - Energia total em função do deslocamento com lâmina PRFC .....	72
Figura 45 - Resultado de tensões em lâmina PRFC .....	74
Figura 46 - Resultado de tensões em adesivo estrutural .....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do aço utilizado em análise .....	45
Tabela 2 - Propriedades para lâmina PRFC .....	47
Tabela 3 – Propriedades mecânicas para adesivo estrutural .....	49
Tabela 4 - Curva tensão-deformação real efetiva utilizada para o MEF .....	57
Tabela 5 - Propriedades de lâminas PRFC utilizadas para o MEF .....	58
Tabela 6 - Propriedades mecânicas adesivo estrutural utilizado para o MEF .....	59
Tabela 7 - Energia total absorvida experimentalmente.....	66
Tabela 8 - Resultados de correlação de método numérico experimental .....	73



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computed Aided Design</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
GDL	Graus De Liberdade
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
Inc.	<i>Incorporation</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
PRFC	Polímero Reforçado com Fibras de Carbono
SA	Sociedade Anônima
SI	Sistema Internacional de unidades

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_{lp}$	Limite de Proporcionalidade (Pa)
$\sigma$	Tensão (Pa)
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young (Pa)
$\varepsilon$	Deformação (mm/mm)
$\sigma_e$	Limite de escoamento (Pa)
$A_0$	Seção transversal inicial (mm <sup>2</sup> )
$L_0$	Comprimento inicial (mm)
A	Seção transversal real (mm <sup>2</sup> )
L	Comprimento real (mm)
u	Energia de deformação (J)
$\Delta U$	Variação da energia interna (J)
$\Delta V$	Variação Volumétrica (mm <sup>3</sup> )
b	Limite superior de avaliação
a	Limite inferior de avaliação
n	Número de divisões no espaço de tempo entre a e b
h	Intervalo de tempo/passo
$\omega$	Pesos da ponderação
x	Passo de tempo geral
$\sigma_x$	Tensão normal no eixo x (Pa)
M	Momento fletor (N·mm)
I	Momento de inércia da seção transversal (mm <sup>4</sup> )
y	Distância em relação ao eixo x (mm)
$\sigma_e$	Tensão de escoamento do material (Pa)
$W_f$	Módulo de resistência à flexão da seção da viga (mm <sup>3</sup> )
c	Profundidade de região plastificada (mm)
h	Altura da seção transversal (mm)
$M_e$	Momento de escoamento (N·mm)
$M_p$	Momento de plastificação (N·mm)
$E_1$	Módulo de elasticidade na direção 1 (Pa)
$E_2$	Módulo de elasticidade na direção 2 (Pa)
$E_3$	Módulo de elasticidade na direção 3 (Pa)

$G_{12}$	Módulo de cisalhamento na direção 12 (Pa)
$G_{23}$	Módulo de cisalhamento na direção 23 (Pa)
$G_{13}$	Módulo de cisalhamento na direção 13 (Pa)
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson no plano 12
$\nu_{23}$	Coefficiente de Poisson no intralaminar 13
$\nu_{13}$	Coefficiente de Poisson no intralaminar 23
$G_{IC}$	Energia para o modo de falha I (N/mm)
$G_{IIC}$	Energia para o modo de falha II (N/mm)
T	Pico de tração na direção normal (Pa)
S	Pico de tração na direção tangencial (Pa)
UND	Deslocamento final na direção normal (mm)
UTD	Deslocamento final na direção tangencial (mm)
$u_m$	Deslocamento total relativo referente ao modo misto (mm)
$u_I$	Deslocamento referente ao modo de falha I (mm)
$u_{II}$	Deslocamento referente ao modo de falha II (mm)
$u_1$	Deslocamento na direção 1 (mm)
$u_2$	Deslocamento na direção 2 (mm)
$u_3$	Deslocamento na direção 3 (mm)
$\sigma_m$	Limite de resistência a tração referente ao modo misto (Pa)
$\sigma_I$	Tensão normal (Pa)
$\sigma_{II}$	Tensão tangencial (Pa)
$E_N$	Módulo de elasticidade na direção normal (Pa)
$E_T$	Módulo de elasticidade na direção tangencial (Pa)
$K_t$	Matriz de rigidez tangente definida positiva
$\Delta u_0$	Incremento desejado no deslocamento
$P(x)$	Vetor de carga externa (N)
$F(x)$	Vetor divergente de força (N)
$\vec{x}$	Vetor de deslocamento (mm)
$j$	Iteração atual
$i$	Iteração seguinte
$s$	Decimal de incremento desejado no deslocamento
$Q$	Trabalho virtual (N·mm)
$G$	Módulo de cisalhamento (Pa)

$F_{m\acute{e}dia}$  Força média para intervalo de deslocamento coletado (N)  
 $\Delta d$  Variação de deslocamento para retângulo de energia (mm)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	15
1.2	EMPRESA E AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	15
1.3	OBJETIVOS .....	16
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS .....	17
<b>2.1.1</b>	<b>Diagrama do ensaio de tração.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Comportamento elástico.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Comportamento plástico .....</b>	<b>19</b>
2.1.3.1	Escoamento.....	19
2.1.3.2	Endurecimento de deformação.....	20
2.1.3.3	Curva real de tensão x deformação.....	20
<b>2.1.4</b>	<b>Não Linearidade.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Energia de deformação .....</b>	<b>21</b>
2.1.5.1	Manipulação de dados experimentais .....	22
2.2	FLEXÃO COM CARREGAMENTO NÃO UNIFORME DE VIGA SIMPLISMENTE APOIADA.....	23
<b>2.2.1</b>	<b>Tensões normais na flexão de vigas.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Flexão com plastificação parcial da seção .....</b>	<b>24</b>
2.3	MATERIAIS COMPÓSITOS TRANSVERSALMENTE ISOTRÓPICOS .....	26
<b>2.3.1</b>	<b>Matriz polimérica .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Propriedades mecânicas de lâminas PRFC .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Modos de falha em PRFC.....</b>	<b>31</b>
2.4	ADESIVOS ESTRUTURAIS .....	31
<b>2.4.1</b>	<b>Adesivo estrutural de resina epóxi .....</b>	<b>32</b>

<b>2.4.2</b>	<b>Modos de falha em adesivos estruturais.....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Verificação de autenticidade para dados de materiais .....</b>	<b>36</b>
<b>2.5</b>	<b>MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>37</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Fundamentos do MEF .....</b>	<b>37</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Formulação dos elementos .....</b>	<b>38</b>
2.5.2.1	Elementos de Estado Plano de Tensões – Formulação de casca totalmente integrada .....	39
2.5.2.2	Elementos Sólido Hexaédrico - elemento coeso de 4 pontos com deslocamentos para uso com elementos de casca .....	40
<b>2.5.3</b>	<b>Análise estática não-linear implícita.....</b>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
3.1	OBJETO DE ESTUDO .....	43
3.2	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO .....	44
<b>3.2.1</b>	<b>Pré-análise .....</b>	<b>45</b>
3.2.1.1	Tubo de aço estrutural.....	45
3.2.1.2	Lâmina PRFC .....	46
3.2.1.3	Adesivo Estrutural .....	48
<b>3.2.2</b>	<b>Análise Experimental .....</b>	<b>49</b>
3.2.2.1	Preparação dos componentes.....	50
3.2.2.2	Análise experimental para obtenção da curva de força em função do deslocamento.....	52
<b>3.2.3</b>	<b>Análise computacional utilizando o MEF .....</b>	<b>53</b>
3.2.3.1	Preparação de modelo tridimensional .....	54
3.2.3.2	Preparação de malha e componentes não avaliados.....	55
3.2.3.3	Aço-carbono .....	57
3.2.3.4	Lâmina PRFC .....	57
3.2.3.5	Adesivo Estrutural .....	58
3.2.3.6	Contatos utilizados .....	61

3.2.3.7	Método de coleta de dados através do MEF .....	62
3.2.3.8	Condições de contorno para análise de obtenção da curva de força em função do deslocamento pelo MEF .....	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>64</b>
4.1	PREPARAÇÃO DO MODELO .....	64
4.1.1	Convergência de malha .....	64
4.1.2	Cálculo de energia em função do deslocamento .....	65
4.2	AVALIAÇÃO NUMÉRICA EXPERIMENTAL.....	66
4.2.1	Experimental .....	67
4.2.2	Correlação numérico experimental.....	68
4.2.3	Energia total em função do deslocamento.....	70
4.2.4	Correlação entre método numérico e experimental .....	73
4.3	AVALIAÇÃO DE TENSÕES.....	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>76</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE A – DADOS ADQUIRIDOS EXPERIMENTALMENTE EM MODELO SEM UTILIZAÇÃO DE LÂMINA PRFC .....</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE B – DADOS ADQUIRIDOS EXPERIMENTALMENTE EM MODELO COM UTILIZAÇÃO DE LÂMINA PRFC .....</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE C – DADOS ADQUIRIDOS EM SIMULAÇÃO DE MODELO SEM UTILIZAÇÃO DE LÂMINA PRFC.....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE D – DADOS ADQUIRIDOS EM SIMULAÇÃO DE MODELO COM UTILIZAÇÃO DE LÂMINA PRFC .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos estruturais está sendo amplamente introduzida na produção de componentes mecânicos para indústrias de ramos variados, sendo principalmente utilizada na indústria náutica e aeronáutica devido à grande necessidade de redução de massa dos componentes. As fibras de aramida e de carbono apresentam resistência mecânica elevada, densidade baixa e, apesar do preço elevado, são utilizadas em diversas aplicações, especialmente na indústria aeroespacial. Compósitos reforçados com fibras de carbono são caracterizados pelo fato de apresentarem uma combinação de baixo peso, rigidez e resistência mecânica elevadas (VENTURA, 2009).

Porém com o passar do tempo, a necessidade de redução de massa estrutural também se fez necessária para a indústria automobilística, tanto para soluções ambientais como na redução do consumo de combustível reduzindo a emissão de gases nocivos ao ecossistema, por exemplo, quanto pelo aumento de qualidade do produto garantindo maior vida útil e possivelmente menores custos de produção.

A utilização de compósitos de alta resistência em superfícies de estruturas metálicas é realizada através de colagem. Esta colagem é executada após a completa fabricação da estrutura, o que se torna uma vantagem em termos de processo de fabricação. Outro benefício do referido processo é a possibilidade de aumentar localmente as propriedades mecânicas da estrutura, uma vez que o compósito será fixado apenas em regiões críticas do produto.

Como possível solução para este problema de engenharia, o desenvolvimento deste trabalho apresentará os resultados obtidos da avaliação de lâminas Pultrudadas de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) aderida a estruturas metálicas como reforço por colagem externa utilizando-se adesivo epóxi na região com tensões de tração em um perfil de aço. O motivo pelo qual a lâmina é colada apenas em região de tração se destaca pela elevada resistência a tração devido ao sentido da fibra de carbono contínua interna à lâmina.

No presente trabalho pretende-se avaliar os resultados obtidos tanto pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) quanto por testes físicos experimentais a fim de validar o método numérico para a utilização posterior em situações de carregamentos normativos de impacto. Todos os testes experimentais foram realizados em laboratório pela empresa Marcopolo SA.



## 1.1 JUSTIFICATIVA

Conforme Green (1996), o objetivo da validação do método analítico é garantir que todas as medições futuras na análise de rotina serão próximas o suficiente do valor verdadeiro desconhecido para o conteúdo analisado na amostra. As abordagens clássicas para validação apenas verificam o desempenho em relação aos valores de referência, mas isso não reflete as necessidades dos consumidores. Uma abordagem abrangente para validação também leva em consideração a proporção esperada de resultados aceitáveis dentro de intervalos de aceitabilidade predefinidos.

A validação numérica e experimental do conjunto avaliado neste trabalho poderá ser utilizada posteriormente em análises de impacto veicular, tanto para ensaios normativos quanto para o aprimoramento estrutural em situações de colisão. Uma das principais vantagens da utilização do material compósito em regiões previamente analisadas é o aumento da resistência em relação a tração, desta forma a área de sobrevivência em veículos é ampliada aumentando a chance de sobrevivência de motorista e passageiros em casos de impacto.

Uma vez que a validação da análise contida neste estudo tenha êxito, pode-se cogitar a utilização do compósito em pontos estrategicamente dispostos em regiões de elevadas deformações para condições como as apresentadas pela norma ECE-R66.02 para veículos de transporte de passageiros, onde a superestrutura do veículo deve ter a resistência suficiente para garantir que o espaço residual durante e após o ensaio de tombamento do veículo completo não seja danificado.

O perfil tubular utilizado como base de estudos nesta análise foi baseado em perfis utilizados em componentes estruturais de ônibus com elevadas solicitações nestas condições, visando a posterior utilização do estudo aqui compreendido em regiões críticas destes veículos e implementação do método numérico computacional como referência de projetos futuros com a utilização do compósito como reforço estrutural.

## 1.2 EMPRESA E AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Fundada em 6 de agosto de 1949 na cidade de Caxias do Sul, a empresa Marcopolo SA é conhecida como uma das maiores encarroçadoras de ônibus sul-

americanas com mais de 400 mil carrocerias produzidas. Com matriz localizada na Avenida Rio Branco, número 4889 do bairro Ana Rech, na Cidade de Caxias do Sul, participa ativamente na implementação e desenvolvimento de soluções de transportes coletivos, sendo eles urbanos, rodoviários, escolares, microônibus e aplicações específicas de acordo com as exigências dos clientes (MARCOPOLO, 2021).

Atuante no setor metal mecânico, investe continuamente em inovação, aprimoramento, tecnologia e expansão tanto de seus produtos quanto empresas, contando atualmente com quatro plantas fabris no Brasil e mais treze distribuídas em quatro continentes.

A elaboração deste estudo compreenderá principalmente a área de engenharia de confiabilidade do produto da empresa Marcopolo SA, incorporando inicialmente a área de engenharia de cálculo estrutural para a aplicação do MEF para todas as condições estipuladas e posteriormente a utilização do laboratório para aplicação dos testes físicos experimentais.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo geral

Analisar numericamente pelo MEF e, experimentalmente pelo método de três pontos seções tubulares de aço com e sem a utilização de lâminas de PRFC.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- a) realizar testes experimentais de três pontos com e sem a utilização de lâminas PRFC obtendo a curva de força em função do deslocamento do punção;
- b) executar análise de convergência de malha em comparação a teste físico experimental pela curva de força em função do deslocamento do punção;
- c) efetuar simulações numéricas estáticas não-lineares pelo MEF com a utilização de método de integração implícita em modelos com e sem lâmina PRFC;
- d) comparar os resultados de força e energia em função do deslocamento do punção obtidos pelos métodos numéricos e experimentais para validação do modelamento pelo MEF e posterior utilização em simulação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma revisão da literatura acerca de conteúdos de engenharia que posteriormente serão utilizados nos métodos numéricos e ensaios experimentais.

O desenvolvimento deste se inicia pela descrição de propriedades dos materiais dúcteis isotrópicos, em um segundo momento serão apresentadas propriedades e características técnicas voltadas principalmente aos materiais compósitos e adesivos estruturais e, por fim serão apresentados o equacionamento e uma breve explicação da utilização pelo MEF.

### 2.1 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Conforme Hibbeler (2018) a resistência dos materiais é um ramo da mecânica que estuda as relações entre as cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que agem no interior do corpo.

De acordo com Gere e Goodno (2009) o principal objetivo da resistência dos materiais é determinar as tensões, deformações e deslocamentos em estruturas e seus componentes devido a ação de cargas. Compreendendo todas estas variáveis desde o início de aplicação de carga até a falha do material, o autor conclui que teremos uma noção completa do comportamento mecânico da estrutura.

#### 2.1.1 Diagrama do ensaio de tração

De acordo com Timoshenko (1974), um diagrama de ensaio de tração traz informações importantes sobre as propriedades mecânicas de um material como o limite de proporcionalidade, o limite de escoamento e a tensão de ruptura do material.

Conforme o autor recorrido, ao selecionar a grandeza da tensão admissível para o aço, devemos levar em conta que, para tensões abaixo do limite de proporcionalidade esse material pode ser considerado como perfeitamente elástico e, além desse limite, parte da formação permanece, isto é, ocorre uma deformação permanente (TIMOSHENKO, 1974).

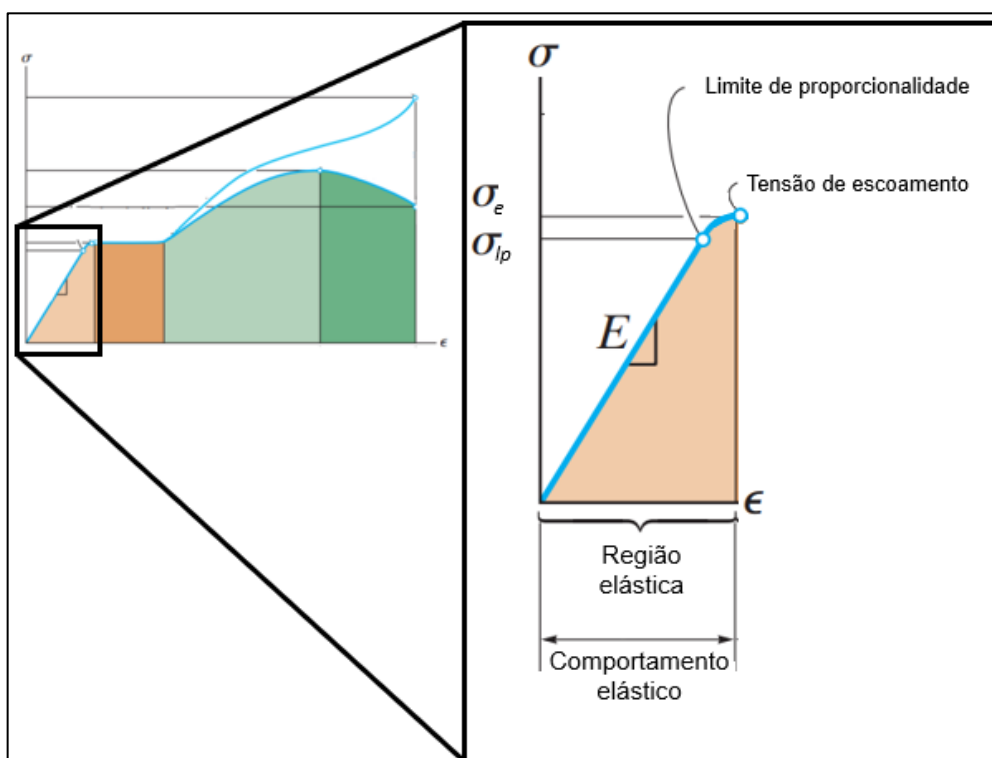
Os tópicos a seguir apresentarão separadamente as distintas regiões da curva de um ensaio de tração aplicado a um aço de construção explicando seus comportamentos e dissemelhanças.

### 2.1.2 Comportamento elástico

Segundo Hibbeler (2018) a curva tensão-deformação, para materiais isotrópicos na região elástica, é caracterizada por uma linha reta até o ponto onde a tensão atinge o limite de proporcionalidade  $\sigma_{lp}$ .

Conforme Alves Filho (2013), um pouco acima do limite de proporcionalidade situa-se o limite de escoamento do material, em que o corpo de prova liberado da carga atuante apresenta uma deformação permanente de 0,2% e para propósitos práticos, é considerado coincidente com o limite de proporcionalidade conforme é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Comportamento elástico em uma curva tensão-deformação



Fonte: adaptado de Hibbeler (2018).

O mesmo autor ainda menciona que, pelo fato da curva ser uma linha reta até  $\sigma_{lp}$ , qualquer aumento na tensão causará um aumento proporcional na deformação.

Este princípio foi descoberto por Robert Hooke e é conhecido como Lei de Hooke, expresso matematicamente pela Equação 1.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão;

$E$  = módulo de elasticidade ou módulo de Young;

$\varepsilon$  = deformação.

### 2.1.3 Comportamento plástico

De acordo com Owen e Hilton (1980), o objetivo da teoria matemática da plasticidade é fornecer uma descrição teórica de relação entre tensão e deformação para um material que exibe uma resposta elastoplástica.

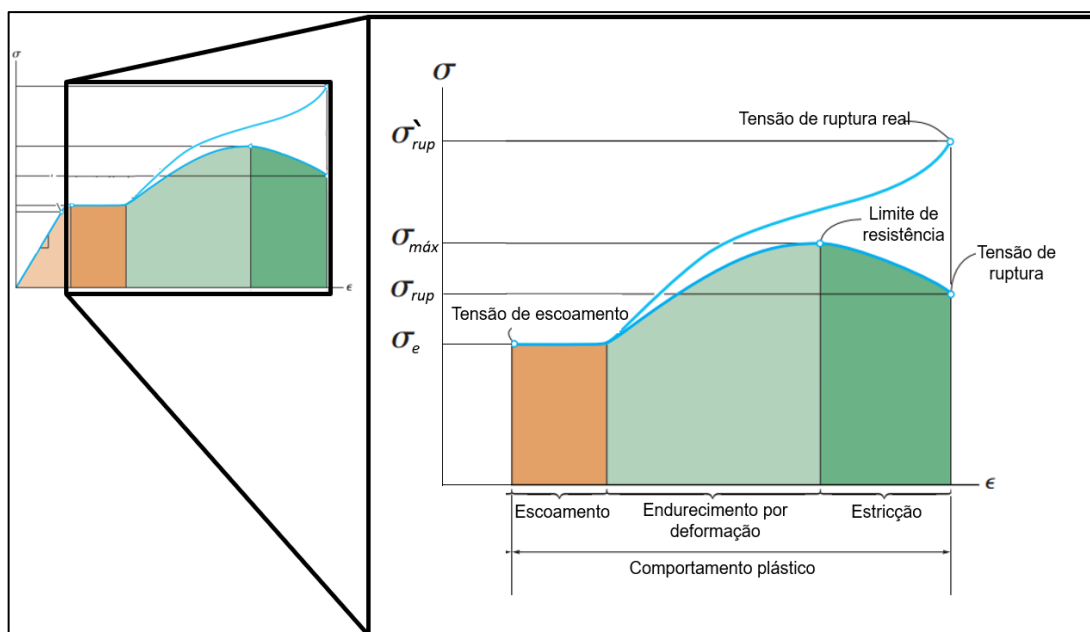
O comportamento da plasticidade é uma teoria matemática de deformações irreversíveis independentes do tempo, que envolve principalmente o movimento de discordâncias sem influência de um fenômeno viscoso ou presença de descoesão que danifica o material (LEMAITRE; CHABOCHE, 1990).

O comportamento plástico é subdividido em três principais comportamentos, sendo que logo após o limite da região elástica encontra-se a região de escoamento do material, seguida pela região de endurecimento por deformação e, por fim a região de estricção do corpo de prova conforme a Figura 2 apresentada posteriormente, que está compreendida no tópico da curva real de tensão-deformação.

#### 2.1.3.1 Escoamento

Para Hibbeler (2018) um ligeiro aumento na tensão acima do limite elástico resultará em uma deformação permanente do material. Esse comportamento é chamado de escoamento e é apresentado pela Figura 2. A tensão que causa o escoamento é chamada de tensão de escoamento ou ponto de escoamento  $\sigma_e$  e a deformação que ocorre é chamada de deformação plástica.

Figura 2 - Comportamento plástico em uma curva tensão-deformação



Fonte: adaptado de Hibbeler (2018).

### 2.1.3.2 Endurecimento de deformação

Conforme Gere e Goodno (2009), após passar pelas grandes deformações que ocorrem durante o escoamento, o aço inicia a recuperação (ou encruamento). Durante esta etapa o material passa por mudanças em sua estrutura cristalina, resultando em um aumento da resistência do material para deformações superiores. O alongamento do corpo de prova nessa região exige um aumento na carga de tração, e por isso o diagrama tensão-deformação tem inclinação positiva, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

### 2.1.3.3 Curva real de tensão x deformação

Em relação a região após o escoamento do material, Gere e Goodno (2009) explicam que a carga total que o corpo de prova pode suportar de fato diminui depois que a tensão máxima é atingida, mas essa redução é devida à diminuição na área da barra e não a uma perda na resistência do material.

Hibbeler (2018) sugere que deveríamos substituir a seção transversal inicial  $A_0$  e o comprimento inicial  $L_0$  da amostra para calcular a tensão e deformação (de engenharia) pela seção transversal real  $A$  e o comprimento real  $L$  da amostra no instante em que a carga é medida. Os valores de tensão e deformação encontrados

nessas medições são chamados de tensão verdadeira e deformação verdadeira, e um gráfico de seus valores é chamado de diagrama tensão-deformação verdadeira.

O autor também cita que geralmente não há necessidade de alteração deste diagrama pelo fato de que a maioria dos projetos de engenharia é aplicada apenas dentro da faixa elástica, porém para aplicação deste trabalho é de suma importância a transformação e aplicação da curva real de tensão-deformação pois nos testes e simulações que serão realizados, as tensões atuantes serão elevadas a pontos que entrarão no regime plástico do material dúctil.

#### **2.1.4 Não Linearidade**

Bathe (1996) remete o comportamento não linear a três principais causas:

a) comportamento não linear cinemático devido a grandes deslocamentos, rotações e deformações que ocorrem durante o processo de aplicação dos carregamentos;

b) comportamento não linear constitutivo, atribuído ao caráter inelástico (plástico, viscoplástico, degradação) que caracteriza a deformação do material;

c) comportamento não linear devido à iteração (contato e atrito) produzida ao longo de uma superfície de contato em que inicialmente não é conhecida e varia ao longo do processo iterativo. No caso em particular, Alves Filho (2012) explica que este tipo de não linearidade envolve uma variação de condições de contorno, onde há a alteração da matriz de rigidez do componente sob cada nova condição de contorno. O procedimento numérico deve verificar a cada incremento de carga se esta quebra de continuidade entre os corpos já foi vencida e a partir deste ponto, assumir uma nova condição de contorno.

#### **2.1.5 Energia de deformação**

No estudo de uma barra solicitada à tração simples, durante o alongamento que se manifesta sob a ação de uma carga que cresce gradualmente, produz-se trabalho na barra e que este trabalho é transformado parcial ou totalmente em energia potencial de deformação. Se a deformação permanece entre os limites elásticos, o trabalho produzido será totalmente transformado em energia potencial, podendo ser recuperado durante o descarregamento gradual da barra deformada (TIMOSHENKO,

1974). Esta energia está relacionada com as deformações no material e é representada pela Equação 2.

$$u = \frac{\Delta U}{\Delta V} \quad (2)$$

Onde:

$u$  = energia de deformação;

$\Delta U$  = variação da energia interna;

$\Delta V$  = variação Volumétrica.

#### 2.1.5.1 Manipulação de dados experimentais

Para tratamento de dados e cálculo de área abaixo de curvas o método selecionado foi Newton-Cotes de ordem  $n$ , que consiste em estimar o valor da integral por meio da média ponderada apresentada pela Equação 3.

$$\int_a^b f(x) dx \approx (b - a) [\omega_0 f(x_0) + \omega_1 f(x_1) + \dots + \omega_n f(x_n)] \quad (3)$$

Em que os valores de  $x$  são assumidos pela sequência de equações apresentada pela Equação 4.

$$x_0 = a, \quad x_1 = a + h, \quad x_2 = a + 2h, \quad \dots, \quad x_n = a + nh = b \quad (4)$$

E a Equação 5 atribui o valor ao intervalo de tempo.

$$h = \frac{b - a}{n} \quad (5)$$

Onde:

$b$  = limite superior de avaliação;

$a$  = limite inferior de avaliação;

$n$  = número de divisões no espaço de tempo entre  $a$  e  $b$ ;

$h$  = intervalo de tempo;

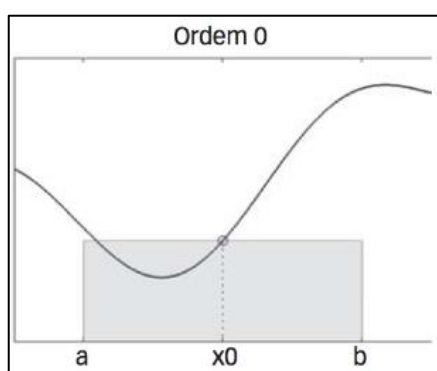
$\omega$  = pesos da ponderação;



$x$  = passo de tempo geral;

Como descrito por Adalberto Filho (2016) a quantidade de nodos e os respectivos pesos são definidos de acordo com a ordem do método, onde a ideia principal é aproximar a função de integração  $f(x)$  por um polinômio interpolador de grau  $n$ . O grau 0 foi utilizado para esta análise representando a regra dos retângulos e a Figura 3 apresenta graficamente o método mencionado.

Figura 3 - Método de Newton-Cotes de ordem zero



Fonte: Adalberto Filho (2016).

## 2.2 FLEXÃO COM CARREGAMENTO NÃO UNIFORME DE VIGA SIMPLISMENTE APOIADA

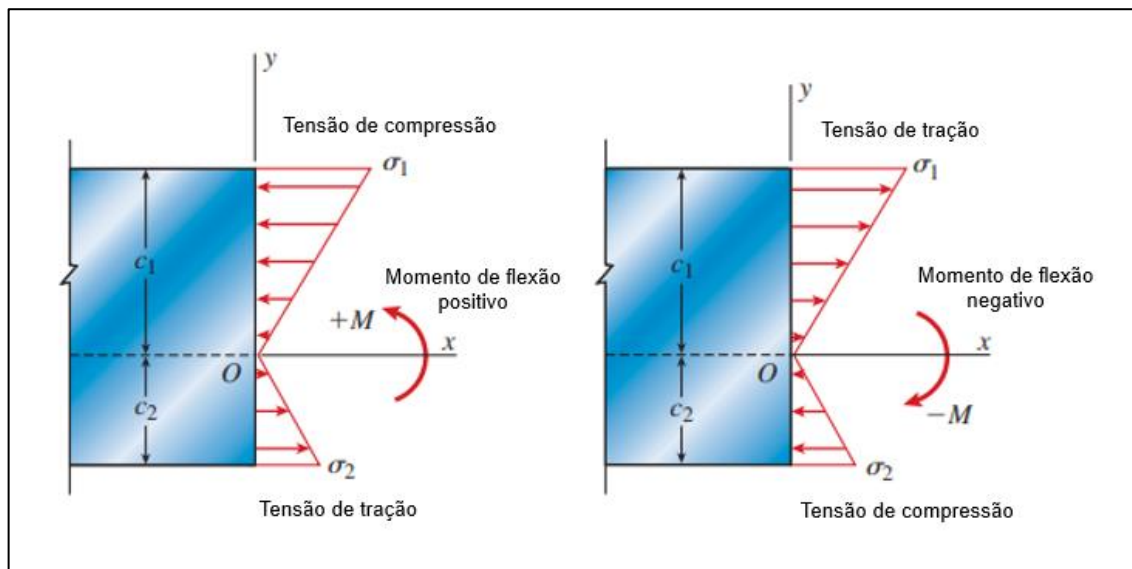
Conforme Gere e Goodno (2009), quando cargas são aplicadas a uma viga, seu eixo longitudinal é deformado em uma curva, onde as tensões e deformações resultantes estão diretamente relacionadas a curvatura, mais conhecida como curva de deflexão da viga. Os mesmos autores salientam que a flexão com carregamento não uniforme se refere a flexão na presença de forças cortantes, o que significa que o momento fletor varia conforme se desloca ao longo do eixo da viga.

### 2.2.1 Tensões normais na flexão de vigas

Uma vez que elementos longitudinais em uma viga estão submetidos apenas à tração ou compressão, podemos utilizar a curva de tensão x deformação do material para determinar as tensões a partir das deformações. As tensões atuam sobre toda a seção transversal da viga e variam de intensidade, dependendo da forma da curva tensão-deformação e das dimensões de sua seção transversal (GERE e GOODNO,

2009). A Figura 4 apresenta de forma esquemática as tensões normais geradas a partir de um esforço de flexão aplicado ao modelo.

Figura 4 - Tensão normal na flexão de viga



Fonte: Adaptado de Gere e Goodno (2009).

Gere e Goodno (2009) ainda apresentam a Equação 6, conhecida como fórmula de flexão e mostram que as tensões são diretamente proporcionais ao momento fletor  $M$  e inversamente proporcionais ao momento de inércia  $I$  da seção transversal. Além disso, as tensões variam linearmente na região elástica do material com a distância  $y$  da linha neutra.

$$\sigma_x = -\left(\frac{M \times y}{I}\right) \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_x$  = tensão normal no eixo  $x$ ;

$M$  = momento fletor;

$I$  = momento de inércia da seção transversal;

$y$  = distância em relação ao eixo  $x$ .

### 2.2.2 Flexão com plastificação parcial da seção

A Figura 5 apresenta a distribuição de tensões para uma seção parcialmente plastificada, ou seja, onde a plastificação ocorre apenas em determinada região sob carregamento crítico, em uma viga de seção retangular constituída de um material

elastoplástico ideal. A região plastificada da seção penetra uma profundidade  $c$  no material, onde a tensão é constante e igual à tensão de escoamento. No núcleo, ainda elástico, a tensão possui uma distribuição linear, desde zero sobre a linha neutra até a tensão de escoamento na interface elastoplástica. Conforme o autor, pode-se decompor o momento externo aplicado em duas partes, uma equilibrada pela distribuição de tensões da região que excedeu o limite de escoamento pelo momento  $M_1$ , e outra equilibrada pela distribuição elástica pelo momento  $M_2$ , na parte interna, chegando à Equação 7 (ROSA, 2004).

$$M = \sigma_e \cdot W_f \left[ 1 + 2 \left( \frac{c}{h} \right) - 2 \left( \frac{c}{h} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Onde:

$M$  = momento fletor;

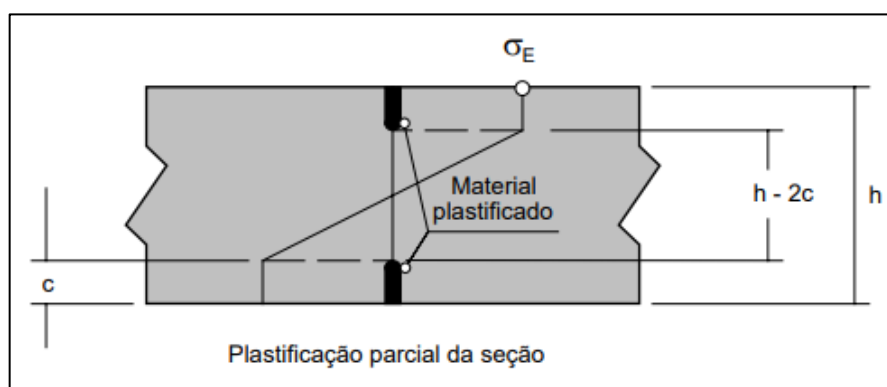
$\sigma_e$  = tensão de escoamento do material;

$W_f$  = módulo de resistência à flexão da seção da viga;

$c$  = profundidade de região plastificada;

$h$  = altura da seção transversal;

Figura 5 - Região inicial de plastificação parcial da seção

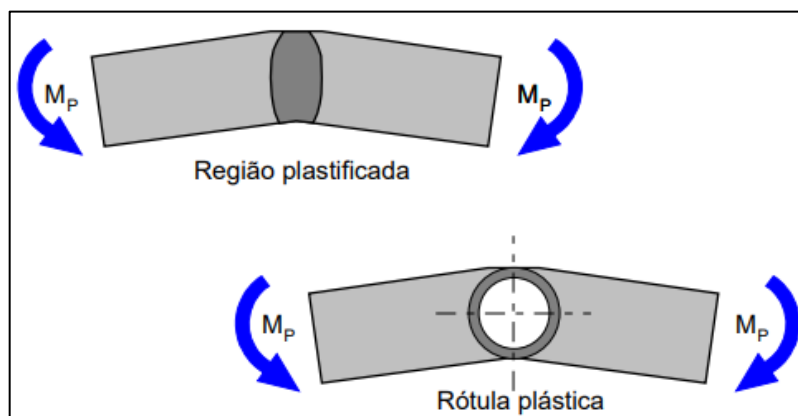


Fonte: Rosa (2004).

Rosa (2004) constatou que quando o momento  $M$  supera o valor do momento no início de escoamento  $M_e$  e se aproxima do momento de plastificação  $M_p$ , as deformações e deslocamentos passam a aumentar mais rapidamente se comparada ao caso elástico e a seção não possui mais condições de suportar qualquer acréscimo de carga, fazendo com que a curvatura tenda ao infinito. Assim, a viga age como uma

rótula na seção escoada, dobrando sob a ação do momento  $M_p$ , como a Figura 6 ilustra.

Figura 6 - Representação de região com formação de rótula plástica



Fonte: Rosa (2004).

### 2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS TRANSVERSALMENTE ISOTRÓPICOS

Para Barbero (2017) um material compósito é o material formado pela combinação de dois ou mais materiais distintos para a formação de um novo material com propriedades aprimoradas. Os compostos mais comuns são aqueles com fibras fortes, como fibras de vidro ou fibras de carbono, mantidas juntas em um aglutinante, considerados mais eficazes com relação as propriedades mecânicas se comparados aos compostos que utilizam partículas ou flocos.

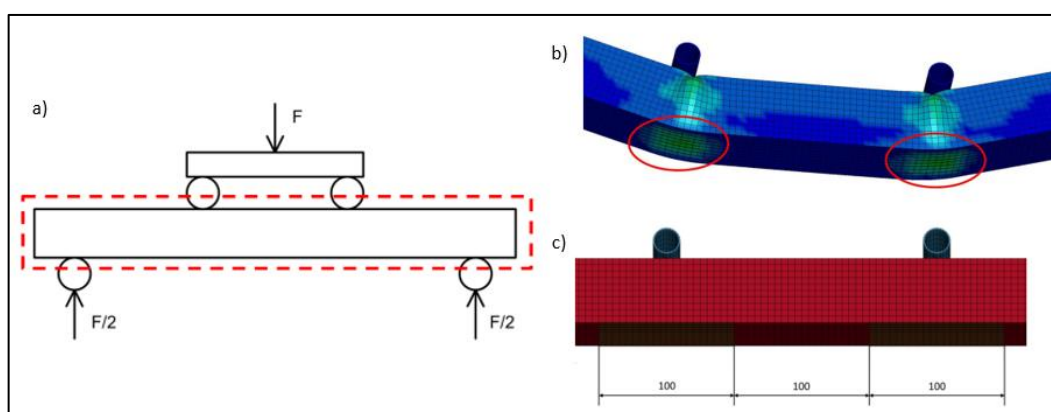
Os materiais compósitos podem ser distintos entre si por três principais características:

- a) pelo reforço, que pode ainda ser subdividido em fibras longas, fibras descontínuas ou partículas;
- b) pela configuração da lâmina, sendo esta subdividida em lâminas unidirecionais, laminados com orientações ou materiais distintos e por fim, em compósitos abundantes, onde não se pode distinguir a direção e sentido da fibra;
- c) pela utilização de materiais diversos, identificada também como compósitos de estrutura híbrida (BARBERO, 2017).

Tuberga (2020) realizou uma análise comparativa com a utilização de lâminas de PRFC aderidas a seção inferior de um perfil tubular com comprimento de 1500 mm pelo teste de quatro pontos, conforme Figura 7a. O autor confrontou 5 aplicações: a

primeira com a adição de lâmina PRFC na região inferior, a segunda com lâminas nas regiões superior e inferior, uma terceira com chapa de aço soldada na região inferior, a quarta pela elevação de espessura do perfil tubular e como possível solução, a adição de adesivo apenas nas regiões inferiores às rótulas plásticas conforme apresentado na Figura 7b e 7c. O autor concluiu que a força máxima obtida das simulações com a utilização de lâminas PRFC se apresentaram superiores se comparadas com a utilização de chapa soldada na região inferior, atribuindo este comportamento principalmente ao desempenho da ligação adesiva. Porém, se comparadas ao aumento de espessura do perfil tubular, a força encontrada na utilização de lâminas PRFC é inferior.

Figura 7 - Análise e condições de contorno de Tuberga



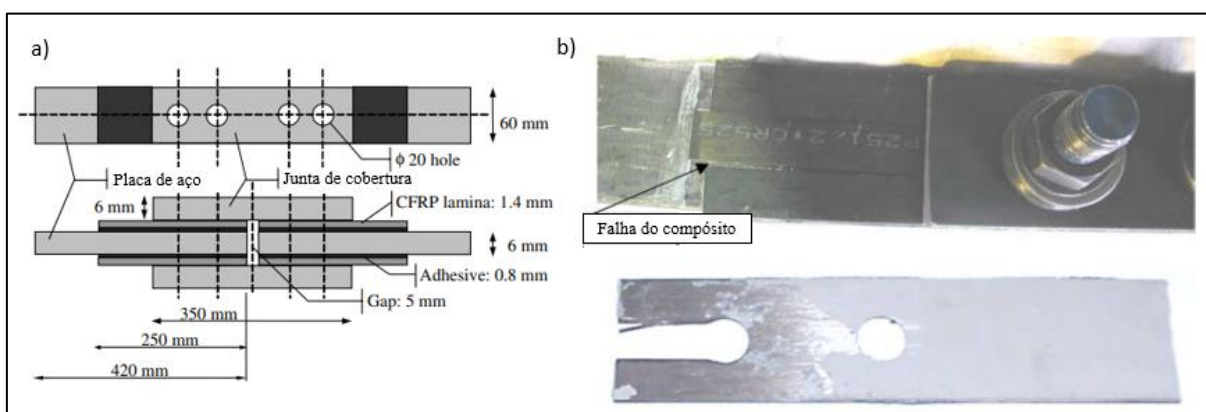
Fonte: adaptado de Tuberga (2020).

Colombi e Poggi (2006) realizaram uma análise para a caracterização do comportamento estático de reforços de lâminas PRFC pelo teste de três pontos em vigas de aço com perfil H variando o comprimento das lâminas e alterando o adesivo epóxi utilizado para a união. Os autores consideraram os resultados de todos os experimentos promissores, visto que todos os corpos de prova apresentaram melhoria na capacidade de carga. A utilização de diferentes adesivos epóxi não interferiu nos resultados. Uma observação muito relevante foi o incremento de rigidez plástica de todos os corpos de prova utilizando lâminas, porém apenas com a sobreposição de duas camadas de lâminas PRFC obtiveram uma elevação significativa na rigidez elástica.

Colombi e Poggi (2006) também avaliaram numericamente e experimentalmente a utilização de lâminas PRFC em duas extremidades de uma chapa com o propósito de reforçar membros de aço de tração ou reparar uniões

parafusadas conforme apresentado na Figura 8. Com a avaliação dos resultados numéricos foi possível se concluir que a distribuição de tensões e possíveis modos de falha reproduziram com fidelidade os modelos experimentais, onde houve falhas distintas apenas na região do adesivo estrutural, porém com um incremento razoável da carga até a falha em apenas um dos dois corpos de provas ensaiados.

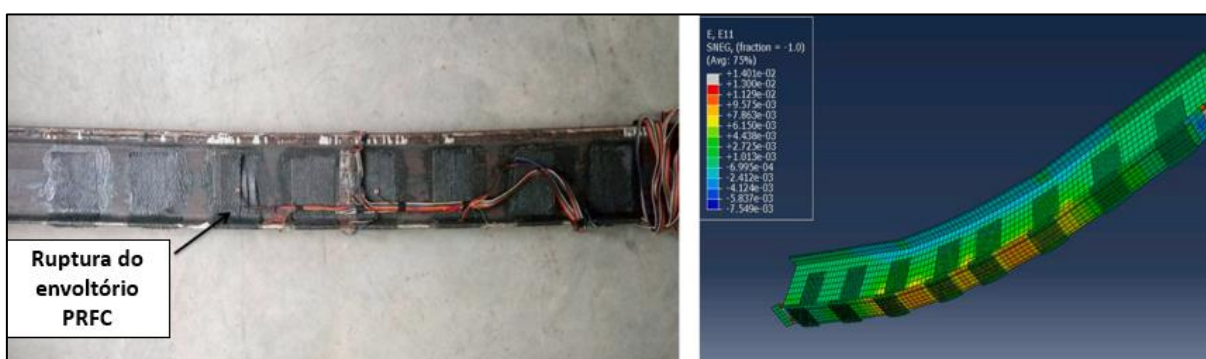
Figura 8 - Utilização de lâminas PRFC como reforço em placas de tração e uniões parafusadas



Fonte: adaptado de Colombi e Poggi (2006).

Selvakumarasami e Paramasivan (2021) avaliaram pelo teste de quatro pontos utilizando métodos experimentais e numéricos a influência dos sistemas de ancoragem nos comportamentos mecânicos para a deflexão de vigas I utilizando reforços de lâminas PRFC em diferentes posições e sentidos conforme a Figura 9. Para este estudo foi concluído que existe um aumento significativo na resistência a flexão dos corpos de prova, que são dependentes da espessura das lâminas de compósito e das propriedades do tecido.

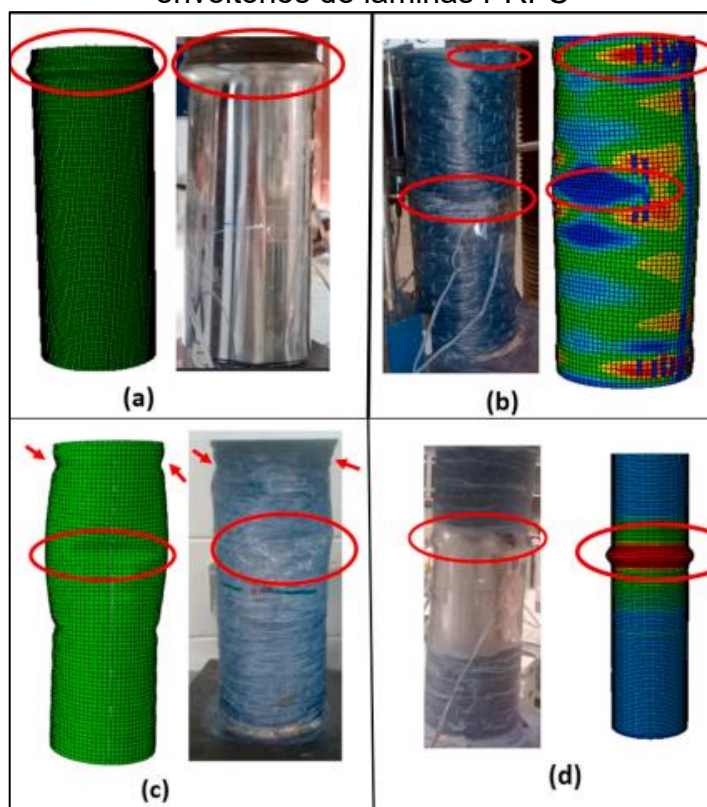
Figura 9 - Modelo numérico e experimental de avaliação de Selvakumarasami e Paramasivan



Fonte: adaptado de Selvakumarasami e Paramasivan (2021).

Al-Mekhlafi, Al-Osta e Sharif (2020) realizaram um estudo sobre a influência do reforço externo de envoltórios de PRFC em colunas tubulares de aço inoxidável com a variação de espessura do compósito, a variação do envoltório em total ou parcial e a variação da relação diâmetro e espessura dos tubos de aço inoxidável. Como resultado dos ensaios e cálculos foi possível concluir que o envoltório completo elevou razoavelmente a resistência a compressão final, porém o envoltório parcial não apresentou alteração. Foi possível também concluir que a taxa de reforço diminui com o aumento do diâmetro dos tubos e que a elevação da espessura do compósito não possui comportamento linear com a elevação da força de compressão. Os resultados de deformações do estudo realizado na compressão de tubos sem a utilização de lâminas PRFC são apresentados na Figura 10a, os resultados de deformações para utilização do mesmo tubo com uma única camada de lâmina PRFC apresentados na Figura 10b, os resultados das deformações para a utilização de duas ou três camadas de lâminas PRFC apresentados pela Figura 10c e por fim, apresentados pela Figura 10d os resultados de deformação numéricos e experimentais para a utilização parcial de lâminas PRFC deixando apenas a região central sem o invólucro.

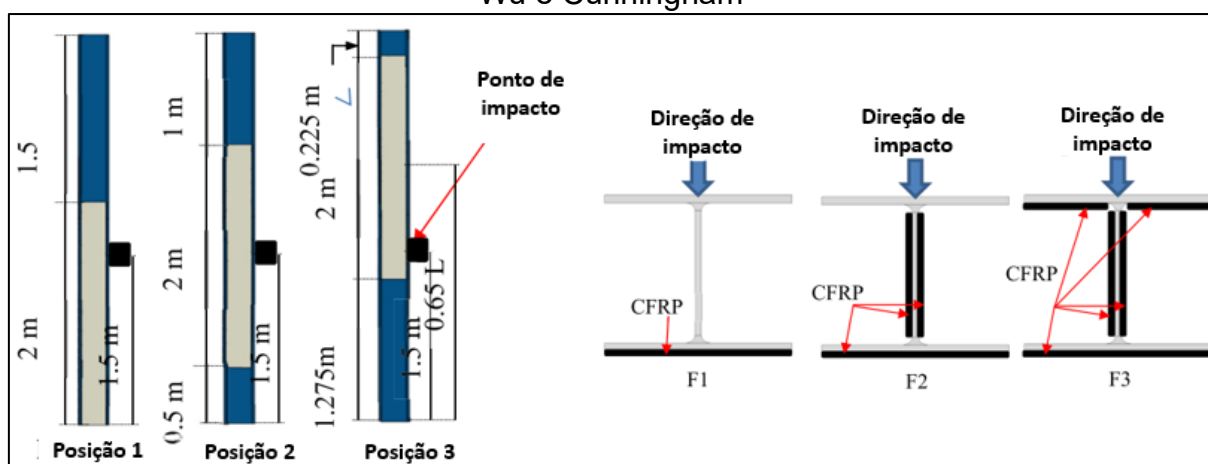
Figura 10 - Resultados numéricos e experimentais em tubos com diferentes envoltórios de lâminas PRFC



Fonte: Al-Mekhlafi, Al-Osta e Sharif (2020).

Kandhim, Wu e Cunningham (2019) utilizaram reforços estruturais de PRFC em perfis H utilizados como colunas e avaliaram em diversas análises pelo MEF utilizando o software ABAQUS com 3 diferentes distribuições de lâminas a condição de impacto lateral conforme condições demonstradas na Figura 11. Neste estudo conseguiram concluir que os principais parâmetros que influenciam a eficácia da utilização de lâminas de PRFC são suas próprias dimensões, portanto suas dimensões e espessuras devem ser selecionadas cuidadosamente.

Figura 11 - Posições de colagem das lâminas PRFC para experimento de Kandhim, Wu e Cunningham



Fonte: adaptado de Kandhim, Wu e Cunningham (2019).

### 2.3.1 Matriz polimérica

Harper (2002, p. 162) descreve uma matriz polimérica termoendurecível como:

Matriz termoendurecível é definida como uma matriz composta capaz de curar a alguma temperatura desde o ambiente até várias centenas de graus de temperatura elevada e não pode ser remodelado por reaquecimento subsequente. Em geral, os polímeros termoendurecíveis contêm dois ou mais ingredientes - uma matriz resinosa com um agente de cura que faz com que a matriz polimerize (cura) à temperatura ambiente, ou uma matriz resinosa e um agente de cura que, quando submetido a temperaturas elevadas, começará a polimerizar e curar.

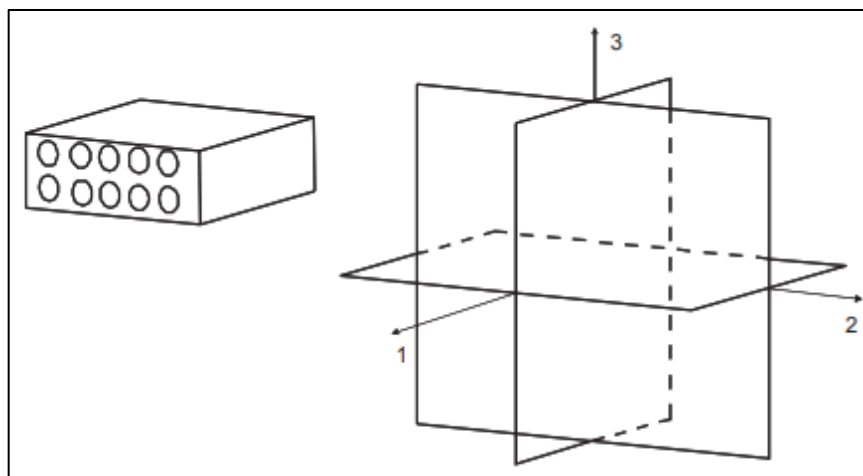
### 2.3.2 Propriedades mecânicas de lâminas PRFC

Conforme Barbero (2017) um material transversalmente isotrópico tem um eixo de simetria, de forma que o plano que possui a direção da fibra é o plano de simetria. O autor usa como exemplo a direção da fibra de compósito reforçado com fibra unidirecional para exemplificar esta afirmação. A Figura 12 apresenta de forma



gráfica a conclusão do autor, onde o eixo 1 representa o plano de simetria com a direção das fibras, logo os planos transversais possuem propriedades mecânicas análogas

Figura 12 - Material transversalmente isotrópico



Fonte: Barbero (2017).

O material transversalmente isotrópico é descrito por seis constantes, sendo elas o módulo de elasticidade ( $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ ), o módulo de cisalhamento ( $G_{12}$ ,  $G_{23}$  e  $G_{13}$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $\nu_{13}$ ) para cada direção da lâmina.

### 2.3.3 Modos de falha em PRFC

Para Harper (2002, p. 260) um feixe de fibras unidas por uma matriz geralmente não falha quando a primeira fibra se rompe. Em vez disso, a falha final é precedida por um período de dano progressivo.

Ainda conforme o autor, lâminas com matriz polimérica seguem a teoria da tensão máxima, onde as tensões da camada, tração no plano e tração fora do plano são calculadas para cada camada individual e comparadas aos limites permissíveis. No momento em que as tensões se equivalem ou excedem a tensão permitida, este é considerado como uma camada falha.

## 2.4 ADESIVOS ESTRUTURAIS

Conforme Harper (2002) um adesivo estrutural é uma substância capaz de manter substratos unidos por fixação superficial. Para que um adesivo seja eficiente,

ele deve não apenas manter os materiais unidos, mas também suportar as cargas operacionais e equivaler a vida útil do produto.

Para Tartaglione (2021) juntas adesivas são o estado da arte em muitos componentes de teste de colisão, pois superam as fraquezas que o aço de alta resistência e o material composto exibem sob as cargas concentradas introduzidas pelas técnicas de junção tradicionais.

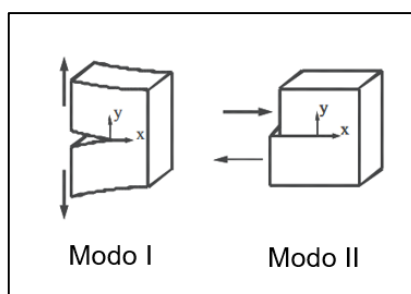
#### 2.4.1 Adesivo estrutural de resina epóxi

Para Barbero (2017) resinas epóxi são extensivamente utilizadas devido à sua versatilidade, altas propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão. Um dos grandes benefícios de resinas epóxi é o encolhimento inferior a outros materiais, o que explica suas excelentes características de adesão quando utilizados como adesivos. Se comparada às demais matrizes poliméricas, com determinada formulação as resinas epóxi possuem maior resistência a água e calor, além de ser favorecidas por seu processo de cura simples, que pode ser alcançado em temperatura ambiente.

#### 2.4.2 Modos de falha em adesivos estruturais

Segundo Harper (2002) a falha coesiva dentro do adesivo ou de um dos aderentes é o tipo ideal de falha, pois a resistência máxima dos materiais da junta foi atingida. No entanto, o modo de falha não deve ser usado como um critério para uma junta eficiente, pois a mesma só se mostra útil superando o modo de falha dos componentes que mantem em contato. Uma análise do modo de falha pode ser uma ferramenta extremamente útil para determinar se uma falha é causada por uma camada limite fraca ou preparação inadequada da superfície.

Figura 13 - Modos de falha coesiva



Fonte: Adaptado de Barbero (2017).

Uma das metodologias seguidas para representar os modos de energia de falha utilizam o princípio da lei de tração-separação bilinear com critério de delaminação por modo misto quadrático e formulação para dano, que aplicado em sua forma discreta (finita) também pode ser utilizado para formulação como elemento coesivo, a fim de descrever os comportamentos observados na Figura 13. A seguir são apresentadas as Equações 8 e 9 utilizadas por este método para representar cada modo de falha:

a) modo de falha I - Abertura de fenda

$$G_{IC} = T \times \frac{UND}{2} \quad (8)$$

b) modo de falha II - Cisalhamento de rachadura

$$G_{IIC} = S \times \frac{UTD}{2} \quad (9)$$

Onde:

$G_{IC}$  = energia para o modo de falha I;

$G_{IIC}$  = energia para o modo de falha II;

T = pico de tração na direção normal;

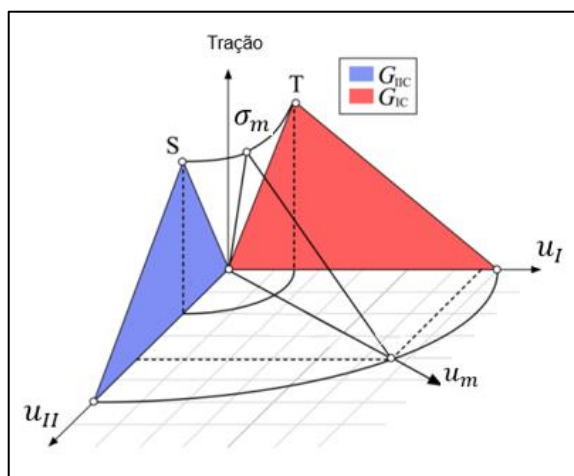
S = pico de tração na direção tangencial;

UND = deslocamento final na direção normal;

UTD = deslocamento final na direção tangencial.

A Figura 14 demonstra graficamente como é determinada a curva bilinear para os dois modos de falha separadamente formando assim a curva utilizada para o cálculo do modo misto de falha.

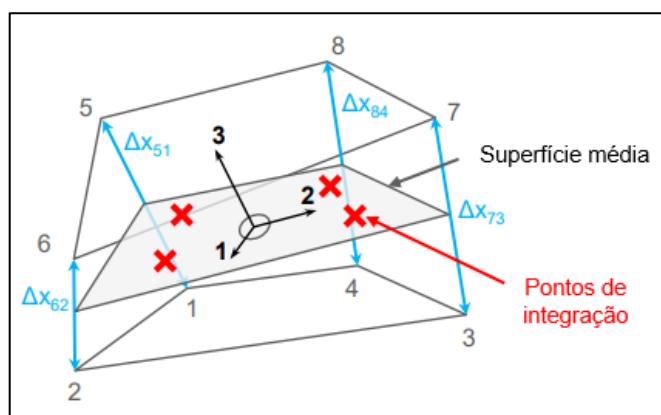
Figura 14 - Gráfico de formação de modo misto em lei de tração-separação bilinear



Fonte: Adaptado de THE ARUP CAMPUS (2019).

Devido ao fato de elementos coesivos normalmente serem formulados em termos de uma relação tração em função do deslocamento relativo em vez da tradicional relação tensão em função da deformação, as trações na superfície média são funções dos deslocamentos relativos entre os pares nodais 1-5, 2-6, 3-7 e 4-8, interpolados aos quatro (2x2) pontos de integração de Gauss no plano. A partir destes pontos de integração é definido o deslocamento máximo e assim definindo o ponto de falha do material. A Figura 15 apresenta a relação de deslocamentos nodais em um plano de superfície média, onde estão dispostos os pontos de Gauss mencionados anteriormente, além de apresentar um eixo de convenção para as equações apresentadas posteriormente.

Figura 15 - Deslocamentos e pontos de Gauss em elemento coesivo



Fonte: Adaptado de THE ARUP CAMPUS (2019).

O deslocamento total relativo para o modo misto é definido pela Equação 10 que é diretamente dependente das equações de deslocamento para a direção normal,

ou seja, para o modo de falha I, representada pela Equação 11 e pela equação de deslocamento para a direção tangencial, referente ao modo de falha II apresentada pela Equação 12. A Equação 13 apresenta o limite de resistência a tração do modo misto, onde a condição para falha do elemento é alcançada ao atender a condição da Equação 14.

a) deslocamento total relativo referente ao modo misto:

$$u_m = \sqrt{u_I^2 + u_{II}^2} \quad (10)$$

b) deslocamento referente ao modo de falha I:

$$u_I = u_3 \quad (11)$$

c) deslocamento referente ao modo de falha II:

$$u_{II} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (12)$$

d) limite de resistência a tração referente ao modo misto:

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2} \quad (13)$$

e) condição de falha do elemento referente ao modo misto:

$$\left(\frac{\sigma_I}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{S}\right)^2 = 1 \quad (14)$$

Seguindo as direções 1, 2 e 3 para o elemento da Figura 15, onde:

$u_m$  = deslocamento total relativo referente ao modo misto;

$u_I$  = deslocamento referente ao modo de falha I;

$u_{II}$  = deslocamento referente ao modo de falha II;

$u_1$  = deslocamento na direção 1;

$u_2$  = deslocamento na direção 2;

$u_3$  = deslocamento na direção 3;

$\sigma_m$  = limite de resistência a tração referente ao modo misto;

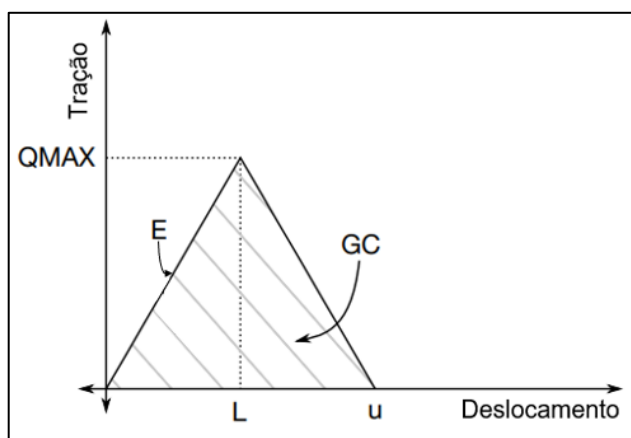
$\sigma_I$  = tensão normal;

$\sigma_{II}$  = tensão tangencial.

### 2.4.3 Verificação de autenticidade para dados de materiais

Como critério para a possibilidade de avaliação de um material que segue a lei de tração-separação bilinear são executadas duas principais avaliações. Como a curva de tração-separação possui forma triangular, equações podem ser desenvolvidas para garantir que o deslocamento na carga de pico seja menor que a distância final para falha conforme demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Gráfico tração-separação bilinear



Fonte: Adaptado de HALLQUIST (2006).

Para que este material seja válido os dados de entrada devem satisfazer a condição apresentada pela Equação 15 e pela Equação 16.

a) verificação de erro para tensão normal:

$$\frac{u_I}{L_I} = \frac{2 \times G_{IC}}{E_N \times \left(\frac{T}{E_N}\right)^2} > 1 \quad (15)$$

b) verificação de erro para tensão tangencial:

$$\frac{u_{II}}{L_{II}} = \frac{2 \times G_{IIC}}{E_T \times \left(\frac{S}{E_T}\right)^2} > 1 \quad (16)$$

Onde:

$L_I$  = deslocamento referente à tração máxima no modo de falha I;

$L_{II}$  = deslocamento referente à tração máxima no modo de falha II;

$E_N$  = módulo de elasticidade para a direção normal;

$E_T$  = módulo de elasticidade para a direção tangencial.

## 2.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Conforme Cesário (2012) o método numérico mais utilizado atualmente para soluções de engenharia é o MEF. Segundo o autor, a aplicação do método é aplicada à diferentes ramos da engenharia, tais como a indústria espacial, aeronáutica, naval, ferroviária, automobilística e muitas outras, contemplando a solução de cálculos relacionados a problemas estruturais, escoamento de fluidos, transferência de calor, eletromagnetismo, dentre outros.

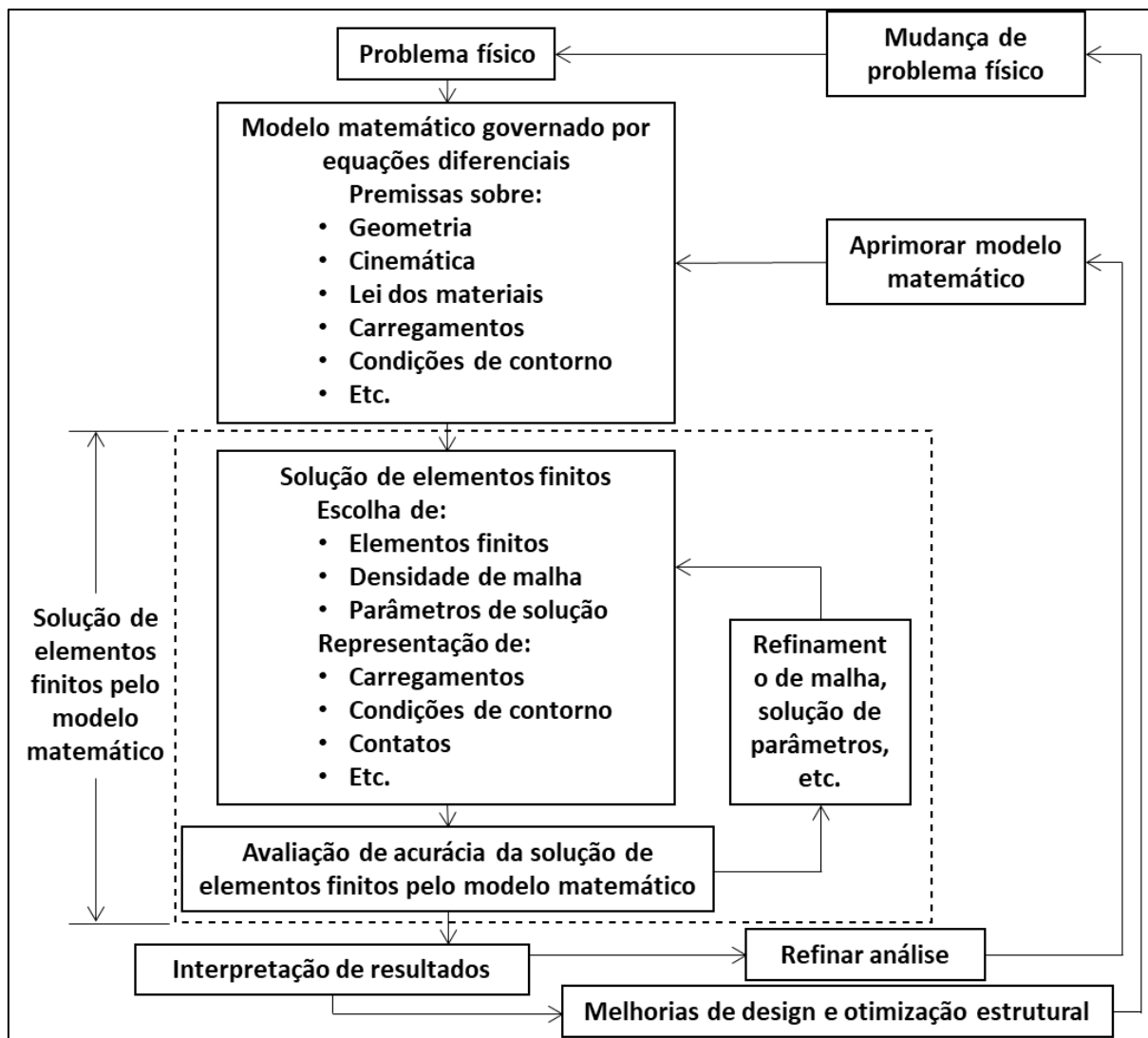
Ainda que o MEF tenha sido desenvolvido nos anos de 1940, somente nas últimas décadas o método se tornou popular devido a capacidade de processamento e armazenamento de novas tecnologias desenvolvidas em computadores, juntamente com o desenvolvimento de softwares de integração facilitada conhecidos como CAD (*Computer Aided Design*). Este somatório de fatores permite que, cada vez mais, problemas com maior grau de dificuldade sejam abordados e solucionados de maneira eficiente (CESÁRIO, 2012).

Para Tartaglione (2021) a modelagem numérica não apenas reduz o número de testes experimentais e destrutivos necessários, mas também fornece algum valor agregado a eles, como exemplo, a distribuição tensão-deformação e a concentração de um teste de impacto podem ser estudadas, fornecendo detalhes sobre o comportamento do material e do componente que são difíceis de obter por meio de testes experimentais ou abordagens teóricas.

### 2.5.1 Fundamentos do MEF

Conforme Bathe (1996) o MEF quando relacionado à problemas estruturais é utilizado para resolver um problema físico que normalmente envolve uma estrutura real ou componente estrutural sujeito a determinados carregamentos. A idealização do problema físico em um modelo matemático requer certas suposições que, juntas, levam a equações diferenciais que governam o modelo matemático. Como este método se trata de uma aproximação, é necessária a avaliação de sua precisão, desta forma, inicialmente utiliza-se um modelo simples discretizado para comparação com o método analítico. O fluxograma da Figura 17 apresenta uma correta linha de trabalho do engenheiro na realização de análise pelo método dos elementos finitos.

Figura 17 - Fluxograma do processo pelo MEF



Fonte: adaptado de Bathe (1996).

### 2.5.2 Formulação dos elementos

Conforme Alves Filho (2013) o importante na formulação dos elementos é identificar pelas funções de interpolação adotadas como são calculados os deslocamentos, deformações e tensões dentro do elemento, ou seja, a qualidade dessa resposta obtida. Para o autor, os pontos chave ao estudar cada um dos elementos finitos é estabelecer três pontos fundamentais, a saber:

- a) definição das Funções de Interpolação;
- b) cálculo das deformações;
- c) cálculo das tensões.



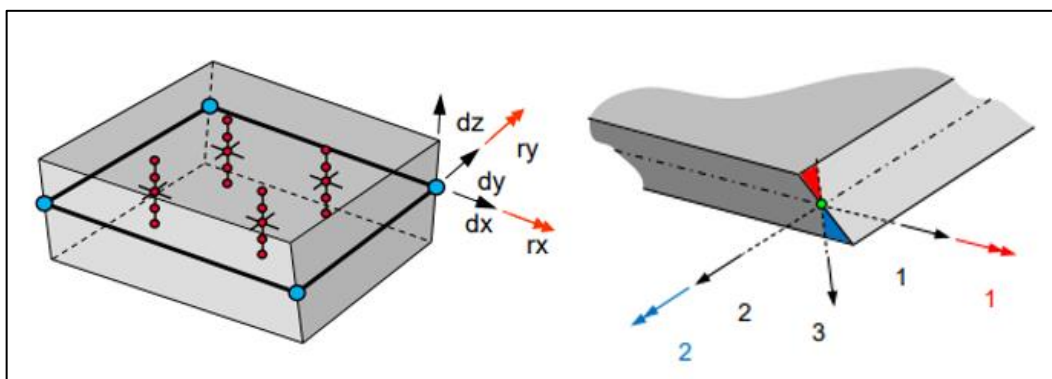
### 2.5.2.1 Elementos de Estado Plano de Tensões – Formulação de casca totalmente integrada

A Figura 18 apresenta o elemento de formulação de casca totalmente integrada que conforme Haufe, Schweizerhof e DuBois (2013) possui as seguintes características:

- base na superposição cinemática de Reissner-Mindlin (com 5 graus de liberdade (GDL) no sistema de coordenadas local que geram 6 GDL no sistema global);
- integração 2x2 no plano da casca;
- correção de cisalhamento transversal de Bathe-Dvorkin que elimina ampulheta de modo W;
- ampulheta tipo 8 adiciona rigidez de empenamento (facilitando a convergência);
- menor custo computacional dos elementos integrados 2x2;
- não degenera em triângulo;
- atualização objetiva de tensão utilizada;
- recomendado para simulações pelo método implícito.

Como ponto negativo do elemento descrito, Haufe, Schweizerhof e DuBois (2013) ainda concluem que este modelo de elemento possui custo computacional de duas a três vezes maior, se comparado com o modelo de casca de Belytschko-Tsay.

Figura 18 - Elemento tipo casca totalmente integrada



Fonte: Adaptado de Haufe, Schweizerhof e DuBois (2013).

### 2.5.2.2 Elementos Sólido Hexaédrico - elemento coeso de 4 pontos com deslocamentos para uso com elementos de casca

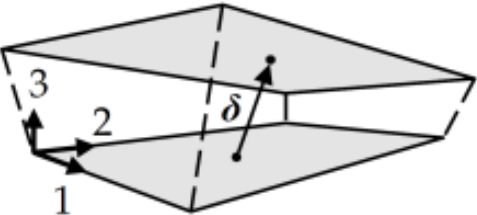
Para o presente trabalho elementos hexaédricos foram utilizados apenas para formulação de elementos de juntas adesivas. Para Tartaglione (2021) existem duas abordagens usadas atualmente para modelar adesivos: uma consiste na implementação de um modelo mesoscópico que incorpora as relações tensão-deformação, taxa de deformação, sensibilidade à pressão e efeitos de suavização utilizados principalmente para calibrar os modelos em análises de grande escala.

Ainda conforme o autor, a segunda abordagem descreve a camada adesiva usando um modelo de zona coesa ou uma restrição definida por uma lei de separação de tração. Essa abordagem vem com um menor custo computacional permitindo uma melhor implementação em análises em larga escala.

O comportamento do material dos elementos coesivos é definido na direção normal e de cisalhamento, que é estabelecida pela definição da direção da espessura. Essa direção é fixada pela numeração dos nós. Os elementos coesivos são fixados aos substratos por meio de nós coincidentes (nós de fusão) ou por meio de contato vinculado (TARTAGLIONE, 2021).

A grande vantagem para o autor na utilização de elementos sólidos com formulação coesiva é de que os momentos são transferidos, adequados para ligar os elementos da casca com deslocamento (momentos = forças · deslocamento). A Figura 19 apresenta a formulação matricial e a direção principal das coordenadas locais.

Figura 19 - Elemento sólido com formulação coesiva

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_t & 0 & 0 \\ 0 & E_t & 0 \\ 0 & 0 & E_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} [N/mm^2] = [N/mm^3] \cdot [mm]$$


Fonte: Tartaglione (2021).

### 2.5.3 Análise estática não-linear implícita

Conforme Bathe (1996) usando integração de tempo implícita, considera-se o equilíbrio do sistema no tempo  $t + \Delta t$ . Isso requer na análise não linear que uma iteração seja executada.

Conforme manual teórico do software LS-DYNA fornecido por Hallquist (2006), a análise implícita emprega esquemas incondicionalmente estáveis, permitindo passos maiores ao custo de uma atualização mais cara da geometria. A equação de equilíbrio para discretização que leva formalmente às equações matriciais de movimento pelo MEF é apresentada pela Equação 17.

$$K_t(x^n)\Delta u_0 = P(x^n)^{n+1} - F(x^n) \quad (17)$$

Onde:

$K_t$  = matriz de rigidez tangente definida positiva;

$\Delta u_0$  = incremento desejado no deslocamento;

$P(x^n)^{n+1}$  = vetor de carga externa em  $n+1$ ;

$F(x^n)$  = vetor divergente de força no tempo  $n$ .

O vetor de deslocamento é atualizado pela Equação 18:

$$\vec{x}_1^{n+1} = \vec{x}^n + s_0\Delta u_0 \quad (18)$$

E as iterações de equilíbrio começam conforme a Equação 19:

$$K_{t_j}\Delta u_i = P(\vec{x}_i^{n+1})^{n+1} - F(\vec{x}_i^{n+1}) = Q_i^{n+1} \quad (19)$$

Onde o subscrito  $i$  denota a iteração  $j < i$  e  $s_0$  é um parâmetro entre 0 e 1 encontrado em uma pesquisa de linha. Após cada iteração, a convergência será verificada e assumida se as condições da Equação 20 e da Equação 21 forem satisfeitas.

$$\frac{|\Delta u_i|}{|u_{máx}|} < \varepsilon_d \quad (20)$$

$$\frac{|\Delta u_i^t Q_i|}{|\Delta u_0^t Q_0|} < \varepsilon_e \quad (21)$$

Se a convergência não é alcançada, o vetor de deslocamento é atualizado pela Equação 22.

$$\vec{x}_{i+1}^{n+1} = \vec{x}_i^{n+1} + s_i \Delta u_i \quad (22)$$

A falta de convergência após o limite de iterações faz com que a matriz de rigidez tangente seja reformada. O término da análise ocorre se o número de reformas permitido pelo usuário for atingido.

Para atualização da matriz de rigidez será utilizado o método quase-Newton BFGS, criado por Broyden, Fletcher, Goldfarb e Shanno, que é o método de principal utilização pelo software LS\_DYNA. A Equação 23 apresenta os valores assumidos para o eixo x assim como a Equação 24 assume valores ao eixo y.

$$x = K_{i-1} \Delta u_{i-1} \quad (23)$$

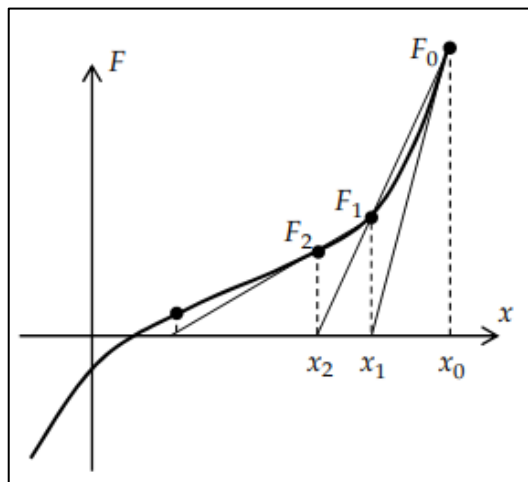
$$y = \Delta Q_i \quad (24)$$

Utilizando estes valores, chega-se à Equação 25 de atualização da matriz de rigidez:

$$K_i = K_{i-1} + \frac{\Delta Q_i \Delta Q_i^t}{\Delta u_{i-1}^t \Delta Q_i} - \frac{K_{i-1} \Delta u_{i-1} \Delta u_{i-1}^t K_{i-1}}{\Delta u_{i-1}^t K_{i-1} \Delta u_{i-1}} \quad (25)$$

Este preserva a simetria da matriz secante. A Figura 20 apresenta graficamente os passos dados para a busca da convergência utilizando o método BFGS.

Figura 20 - Método iterativo BFGS



Fonte: LSTC (2019).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

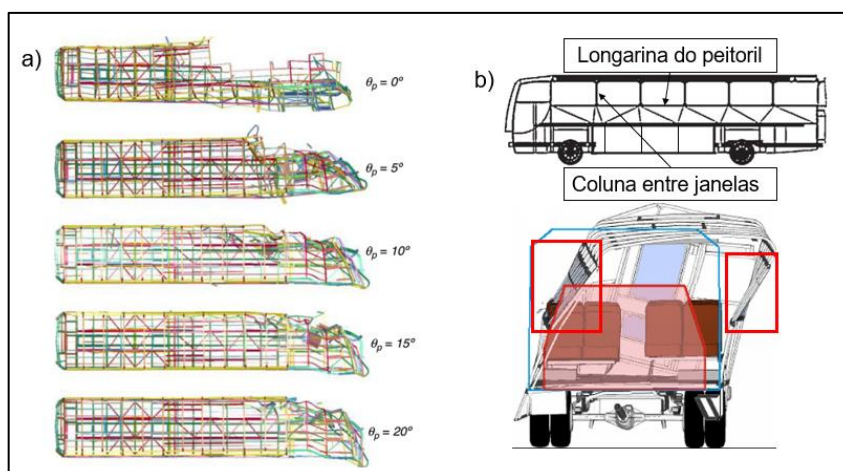
O presente capítulo apresenta a metodologia aplicada para o desenvolvimento do estudo realizado tanto pelos métodos experimentais quanto numéricos, utilizando o MEF. Este capítulo foi organizado de forma a inicialmente apresentar uma descrição dos materiais juntamente com suas características e propriedades obtidas através de suas fichas técnicas. Posteriormente detalharam-se os procedimentos experimentais e, por fim, evidenciaram-se os principais detalhes na aplicação de lâminas PRFC pelo MEF.

#### 3.1 OBJETO DE ESTUDO

Para o desenvolvimento da teoria apresentada pelo capítulo 2 foram utilizadas seções tubulares de paredes finas usualmente aplicadas em colunas laterais para veículos de transporte de passageiros, com a intenção de realizar a calibração diretamente em seções que posteriormente serão utilizadas em carrocerias de ônibus.

A área de maior influência no quesito normativo para tombamento são as regiões de ligação da coluna entre janelas com a longarina do peitoril que tem como objetivo preservar a área de sobrevivência dos passageiros. Estas regiões são apresentadas na Figura 21b juntamente com a simulação de um veículo após ensaio virtual de capotamento. A Figura 21a apresenta o trabalho realizado por Goedel, Iturrioz, Dias de Meira Júnior e Walber (2016) em que se analisou comparativamente o impacto semifrontal de uma carroceria de ônibus em uma parede rígida variando o ângulo de impacto da parede rígida, sendo esta condição potencialmente considerada para utilização de lâminas PRFC.

Figura 21 – Pontos de aplicação de lâmina PRFC

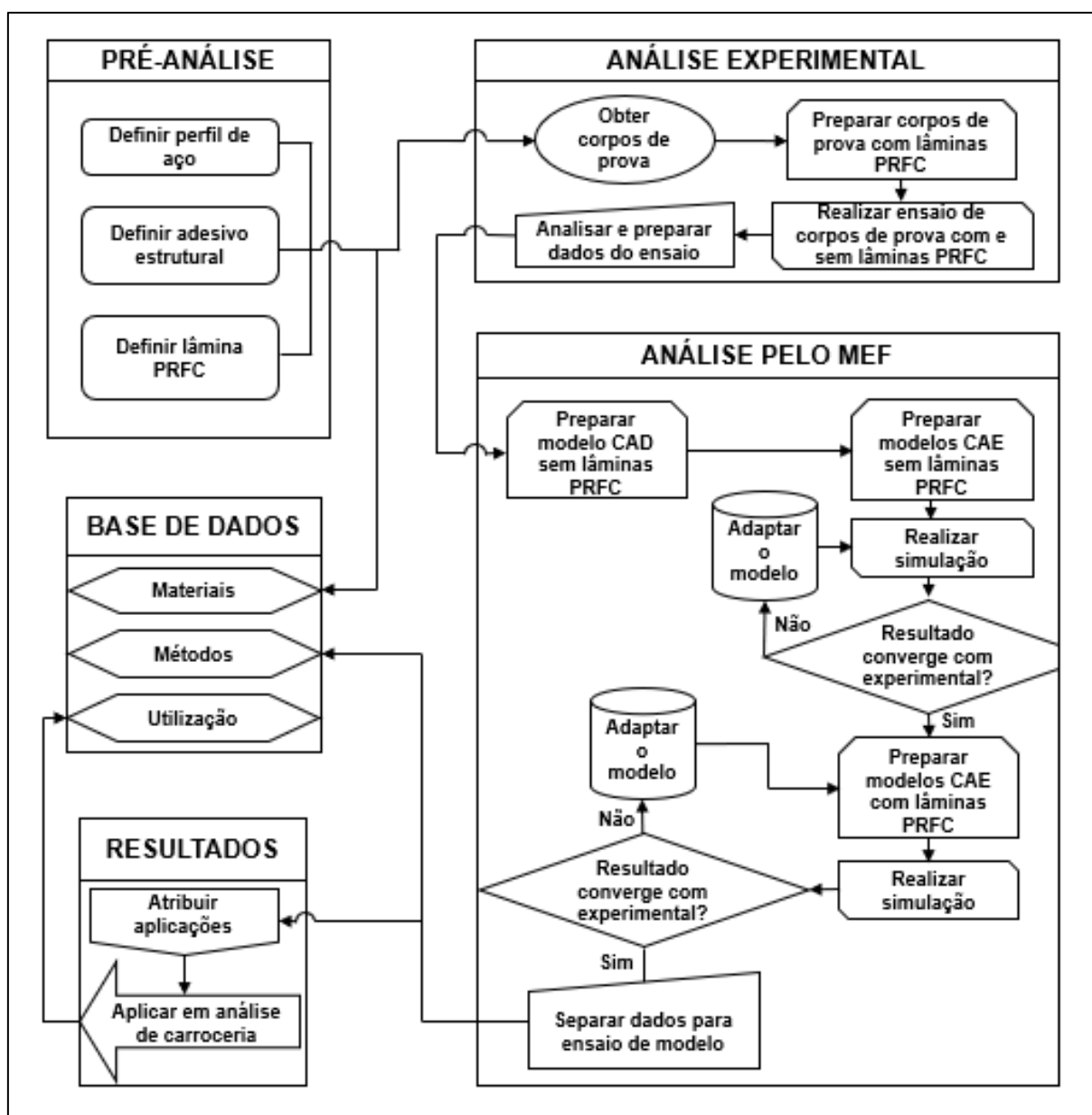


Fonte: Alterado de Goedel, Iturrioz, Dias de Meira Júnior, Walber (2016).

### 3.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Para melhor compreensão deste trabalho, as etapas foram subdivididas em 3 grupos principais. A primeira etapa realizada foi a pré-análise de materiais e componentes, seguido por testes experimentais e, por fim, cálculos utilizando o MEF. Com a realização deste trabalho foi possível criar uma metodologia para o uso de lâmina PRFC em aplicações de segurança veicular em ônibus. Cada passo do trabalho é apresentado no organograma da Figura 22.

Figura 22 - Organograma da proposta de trabalho



Fonte: O autor (2022).

### 3.2.1 Pré-análise

Esta Etapa teve como principal objetivo de análise de mercado sobre possíveis materiais capazes de fornecer a resistência necessária para elevação das propriedades mecânicas sobre perfil tubular retangular. Para obter os dados citados, foram realizados os seguintes passos:

- a) obtenção do tubo estrutural de paredes finas utilizado em colunas estruturais de ônibus;
- b) obtenção de lâmina PRFC;
- c) obtenção de adesivo estrutural.

#### 3.2.1.1 Tubo de aço estrutural

Definiu-se a utilização de tubos que são comumente empregados em ônibus rodoviários intermunicipais e interestaduais, uma vez que os ônibus destinados ao uso no interior de municípios não precisam atender às normas de tombamento.

O aço utilizado para esta análise trata-se de um aço de alta resistência (segundo a norma SEW 093) conhecido como ZSTE380 e possui em sua composição química as propriedades mecânicas apresentadas pela Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do aço utilizado em análise

TIPO DE AÇO	Composição química							
	C	Mn	P	S	Si	NB	Ti	Al
	0,1	1,2	0,03	0,03	0,5	0,09	0,2	0,002
ZSTE380	Propriedades mecânicas							
	Limite de escoamento (Mpa)	Densidade (ton./mm <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidade (Mpa)	Coeficiente de Poisson				
	380/500	7,58e-09	207000	0,3				

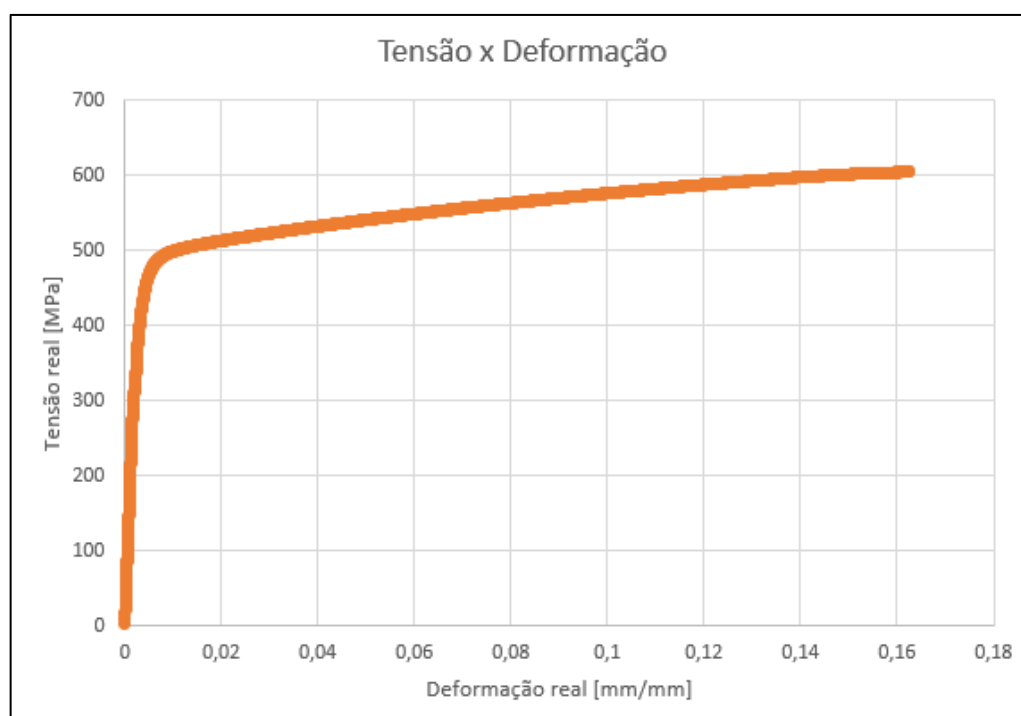
Fonte: Adaptado de CSN (2015, apud SORDI, 2016).

Com relação ao dimensionamento do tubo retangular empregado nesta análise, foi determinada a seção tubular de 60 mm de largura por 40 mm de altura, espessura da parede de 1,95mm e comprimento total de 700 mm para o teste estático.

### 3.2.1.1.1 Curva tensão-deformação real

Para obtenção da curva tensão-deformação do material ZSTE380 foram retirados corpos de prova dos tubos já ensaiados pelo método de três pontos para realização de teste de tração segundo a norma ISO6892 1. Um total de quatro ensaios foram realizados, encontrando assim a curva média apresentada pela Figura 23.

Figura 23 - Curva coletada em ensaio de tração



Fonte: adaptado de Marcopolo S.A. (2022)

A curva tensão-deformação apresentada na Figura 23 demonstra o comportamento elasto-plástico completo do material utilizado. Esta curva é apresentada como curva de tensão-deformação real pois leva em consideração a redução de área no momento da aplicação de carregamento no teste de tração.

### 3.2.1.2 Lâmina PRFC

A disponibilidade deste tipo de material no mercado brasileiro ainda é muito restrita se comparada com os mercados europeu e norte americano.

A lâmina analisada por este trabalho foi disponibilizada pela empresa Sika e é denominada Carbodur. De acordo com sua ficha técnica o produto é fornecido em rolos de 100 ou 250 metros de comprimento e possui aspecto de coloração preta referente a mistura de sua matriz epóxi com fibras de carbono. Além disso não possui



prazo de validade. A Figura 24 exibe uma seção da lâmina PRFC aparada de um rolo completo.

Figura 24 - Lâmina PRFC



Fonte: O autor (2022).

Ainda conforme descrito na ficha técnica do produto destacam-se características e vantagens na utilização do produto como alta resistência mecânica, excelente durabilidade e resistência a fadiga, sem limite de comprimento (não requer juntas), baixa espessura, simples execução de cruzamento de lâminas, facilidade no transporte, não corrosiva, baixa densidade, fácil instalação, requer pouco preparo para aplicação, possibilidade de sobreposição de lâminas e extremidades sem fibras expostas.

Com relação às propriedades mecânicas informadas pela ficha técnica do produto, a Tabela 2 informa tanto os dados gerais quanto as dimensões do produto selecionado para análise.

Tabela 2 - Propriedades para lâmina PRFC

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	1,60e-09	ton./mm <sup>3</sup>
Largura	40	Mm
Espessura	1,4	Mm
Módulo de elasticidade longitudinal	165000	MPa
Resistência a tração	3500	MPa
Alongamento de ruptura longitudinal	1,70	%
Temperatura de transição vítrea	>100	°C
Volume de fibras	>67	%

Fonte: Adaptado de SIKA BRASIL (2016).

### 3.2.1.3 Adesivo Estrutural

Como proposta de utilização de adesivo, seguiu-se a indicação do mesmo fornecedor da lâmina PRFC para aplicação. Para atender esta necessidade o fornecedor apresentou duas possibilidades de adesivos estruturais para o desenvolvimento do trabalho, sendo selecionada então o produto SikaPower-880 devido à disponibilidade de amostras em território nacional.

Trata-se de um adesivo estrutural bicomponente endurecido por cura rápida à temperatura ambiente, sendo o primeiro componente da mistura uma resina epóxi com coloração branca e o segundo componente representado por amina, de coloração cinza. A mistura dos dois componentes forma uma pasta tixotrópica de coloração cinza que em temperatura entre 15°C e 30°C necessita de aproximadamente 5 horas para cura, porém este tempo de processo pode ser acelerado com a aplicação em ambientes de temperatura elevada ou com a utilização de lâmpadas infravermelhas. Após a aplicação do adesivo entre dois componentes, a espessura é de apenas 0,3 mm, o que faz com que um único recipiente do produto possa render vários metros de lâminas PRFC.

A Figura 25 apresenta o recipiente do produto fornecido apenas como amostra para aplicação e avaliação do presente trabalho. Pode-se observar que o conjunto possui dois frascos isolando os componentes um ao outro, desta forma é necessária a utilização de bico de saída com misturador para aplicação do produto.

Figura 25 - Adesivo estrutural SikaPower



Fonte: O autor (2022).

Ainda conforme o manual técnico, SikaPower-880 foi projetada para uso em juntas estruturais que demandam elevada tenacidade e resistência. Adequado para colagem de substratos metálicos, como aço e alumínio, bem como substratos compostos, como laminados GFRP e CFRP. A Tabela 3 apresenta valores nominais expressos no manual técnico do fornecedor.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas para adesivo estrutural

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	1,26e-09	ton./mm <sup>3</sup>
Temperatura de aplicação	15 à 30	°C
Módulo de elasticidade	2100	MPa
Limite de resistência a tração	22	MPa
Limite de resistência ao cisalhamento	23	MPa
Alongamento até a falha	3	%
Temperatura de transição vítrea	70	°C

Fonte: Adaptado de SIKA BRASIL (2022).

Ainda conforme a ficha técnica do produto se destacam benefícios em sua utilização como a alta resistência à fadiga e impactos, cura rápida a temperatura ambiente, viscosidade propícia ao anti-escorregamento na aplicação, não conta com a utilização de solventes ou PVC e possui gotas de vidro de 0,3 mm para garantir ideal espessura de ligação.

### 3.2.2 Análise Experimental

A análise experimental concentra os dados coletados a partir das amostras que foram submetidas ao teste de três pontos com o objetivo da obtenção da curva força em função do deslocamento experimental para comparação, tanto para a seção tubular sem utilização do compósito quanto ao perfil tubular utilizando lâminas PRFC.

Para esta análise a área foi dividida em três etapas, a primeira etapa responsável pelo processo necessário para aderir lâminas aos tubos de aço-carbono, a segunda etapa representada pela realização dos ensaios laboratoriais de três pontos com corpos de prova com e sem a utilização de lâminas e como última etapa

e responsável pelo objetivo da análise experimental, a geração das curvas de força em função do deslocamento energia em função do tempo.

Todos os testes foram realizados com a utilização de apenas uma única lâmina PRFC na região tracionada do corpo de prova, avaliando assim o aumento da força necessária para o deslocamento do punção.

### 3.2.2.1 Preparação dos componentes

Inicialmente foi solicitado o corte e separação de seis tubos retangulares de aço-carbono com dimensões de 40x60x700 mm (altura x largura x comprimento), espessura de 1,95 mm e material ZSTE380 para realização dos testes de dois componentes sem a utilização de lâminas e outros quatro modelos utilizando lâminas PRFC. Estes modelos foram preparados para obtenção do gráfico força em função do deslocamento pelo método de três pontos realizado em laboratório da empresa Marcopolo S.A.

Conforme descrito anteriormente, as lâminas de Sika Carbodur aplicadas ao modelo, possuíam dimensões de 40 mm de largura, 1,4 mm de espessura e como não foram encontradas referências de comprimento ideal para aplicação da lâmina PRFC, utilizou-se um comprimento de 340 mm, como base para este estudo.

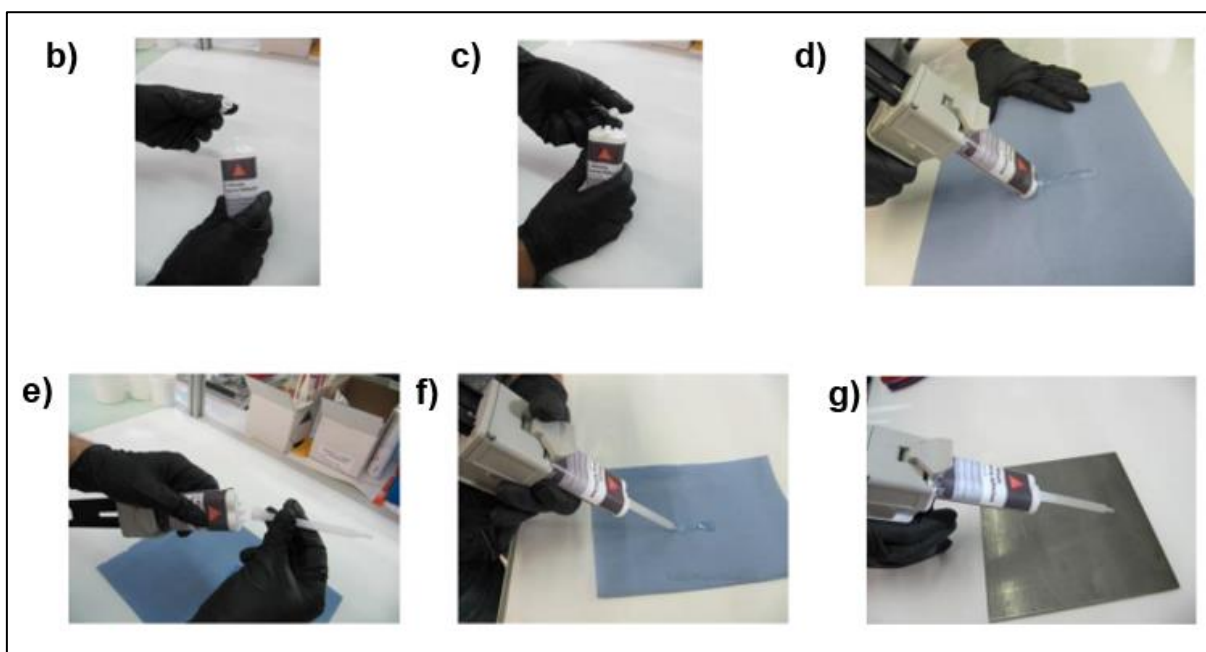
Após possuir todos os produtos necessários para a preparação dos corpos de prova, iniciou-se a aplicação de colagem das lâminas sobre os tubos de aço-carbono seguindo rigorosamente os passos solicitados pelo manual técnico de aplicação do adesivo estrutural. Para iniciar o processo descrito pelo manual técnico seguiu-se os seguintes passos:

- a) efetuada a limpeza da superfície do tubo com a utilização de pano com álcool etílico para remoção de gordura e detritos provenientes de sua fabricação, estocagem e corte até chegar ao laboratório de testes;
- b) remoção da capa de proteção plástica do recipiente;
- c) remoção da tampa de vedação dos componentes;
- d) acionamento do gatilho de pistola adequada para equalização da saída de produto para os dois recipientes;
- e) inserção da ponteira misturadora das substâncias;

- f) aplicação anterior à do produto para retirada de substância não misturada;
- g) inicialização da aplicação em tubos retangulares.

A Figura 26 apresenta detalhadamente em imagens enviadas pelo fornecedor o passo a passo efetuado para a aplicação.

Figura 26 - Processo de preparação para aplicação de adesivo estrutural



Fonte: O autor (2022).

Após o processo de preparação do adesivo estrutural aplicou-se um a um, mantendo o adesivo pressionado entre a lâmina PRFC e o corpo de prova por um tempo de 5 minutos para que posteriormente fosse retirado o excesso e realizada limpeza local do adesivo, para logo após pressioná-los novamente. Ao final deste processo, os quatro corpos de prova que possuíam lâminas foram prensados com o auxílio de grampos sargento e tubos sem a utilização de lâminas, conforme apresentado pela Figura 27, até a conclusão do processo de cura do adesivo estrutural.

As lâminas PRFC foram aderidas à lateral do tubo com dimensão de 60 milímetros, tornando esta região a largura do corpo de prova.

Figura 27 - Pressão aplicada em corpos de prova para maior aderência



Fonte: O autor (2022).

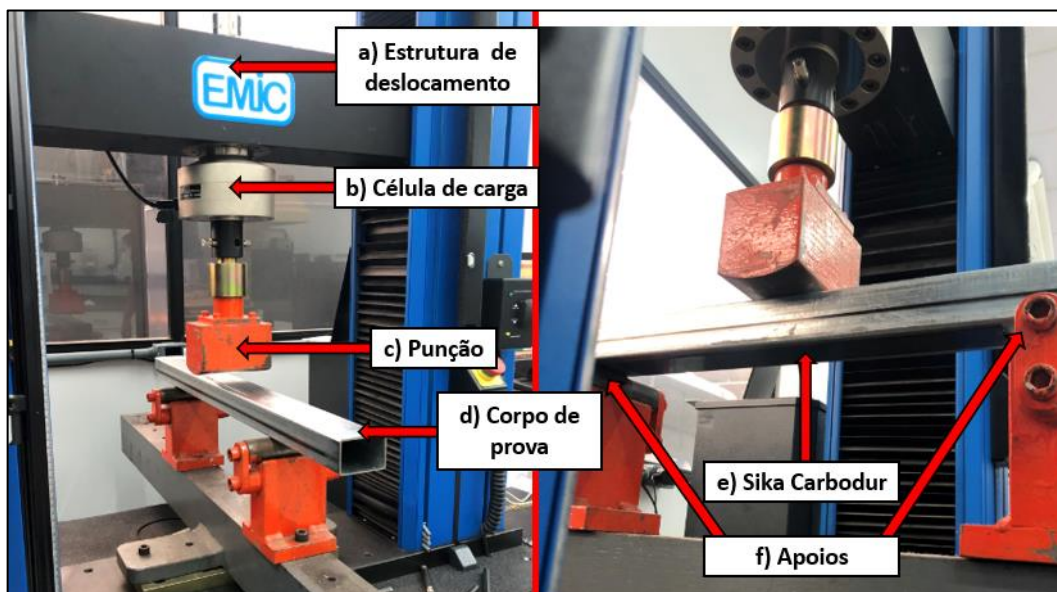
Como o tempo apropriado de cura pode variar de acordo com as condições climáticas do local de aplicação, optou-se por manter pressionados os corpos de prova durante 24 horas para a retirada dos grampos e assim, a conclusão do processo de preparação dos corpos de prova para ambos os testes realizados.

### 3.2.2.2 Análise experimental para obtenção da curva de força em função do deslocamento

Para realização do ensaio experimental foi necessária a utilização de sistema de ensaios EMIC 23100P-0025 presente no setor de laboratório da empresa Marcopolo SA. que utiliza para leitura de dados o *software* Bluehill 3 também da marca Isotron. A Figura 28 demonstra o sistema de ensaio utilizado.

Conforme informado pela equipe de laboratório o punção utilizada para análise neste conjunto possui raio de 77 mm e os dois apoios utilizados em análise possuem raio de 16 mm. A dimensão de fixação determinada entre os dois pontos de apoio foi de 400 mm se medido de centro a centro do raio de cada apoio. Os tubos com a utilização de lâminas PRFC foram centralizados com a lâmina.

Figura 28 - Sistema de ensaio utilizado para curva de força em função do deslocamento



Fonte: O autor (2022).

Conforme apresentado pela Figura 28a, a estrutura de deslocamento é movida para baixo e o punção é deslocado em velocidade constante até que ocorra o contato entre as superfícies do punção com o corpo de prova. Como forma de garantir o ponto zero de aplicação de carga, para que não houvesse erros em relação ao deslocamento, aplicou-se um carregamento de 20 N após o contato entre a punção e os corpos de prova.

A célula de carga apresentada pela Figura 28b é responsável pela medição da força aplicada ao sobre o corpo de provas e o deslocamento da punção é medido diretamente pelo deslocamento da estrutura superior. Para a análise em questão assumiu-se um valor máximo de deslocamento do punção de 70 mm.

### 3.2.3 Análise computacional utilizando o MEF

A análise computacional utilizando o MEF neste trabalho possui como principal objetivo a calibração da utilização de lâminas PRFC aderidas a tubos retangulares de paredes finas, desta forma utilizou-se diversas formas de avaliação para o maior compreensão das variáveis encontradas nesta análise.

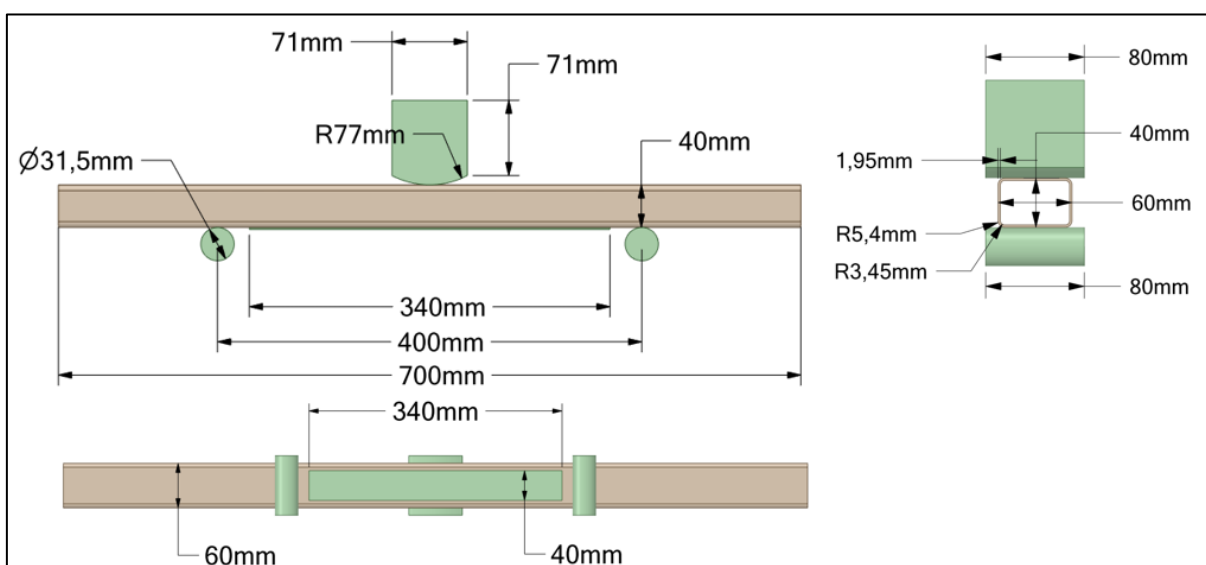
Para a análise pelo MEF foram utilizados três diferentes *softwares*, cada um realizando etapas fundamentais de avaliação estrutural. O processo de análise seguiu as etapas abaixo consecutivamente:

- a) pré-processamento (utilizando os softwares Ansys Spaceclaim 19.2 e Altair Hypermesh 2021.2: O primeiro software descrito possui a função de preparação do modelo CAD tridimensional para CAE. Já o segundo teve como função a geração de malha, propriedades dos materiais, contatos e condições de contorno;
- b) processamento (utilizando o solucionador LS-DYNA): O uso do software LS-DYNA como solver do sistema de equações.
- c) pós-processamento (utilizando os softwares Altair HyperView e Altair HyperGraph): Nesta etapa são analisados os dados de saída da análise apresentado avaliações e comparações gráficas bidimensionais, etapa onde será retirada a curva força em função do deslocamento para comparação com o ensaio laboratorial. Esta etapa é apresentada apenas na fase de resultados.

### 3.2.3.1 Preparação de modelo tridimensional

Possuindo as definições estabelecidas na fase de pré-análise foi possível realizar o modelamento do conjunto a ser estudado. Este foi inicialmente concebido como um conjunto tridimensional respeitando todas as dimensões reais dos componentes utilizados na análise experimental. A Figura 29 apresenta o modelo utilizado para a análise experimental de obtenção da curva força em função do deslocamento.

Figura 29 – Parâmetros métricos de modelos tridimensionais



Fonte: O autor (2022).

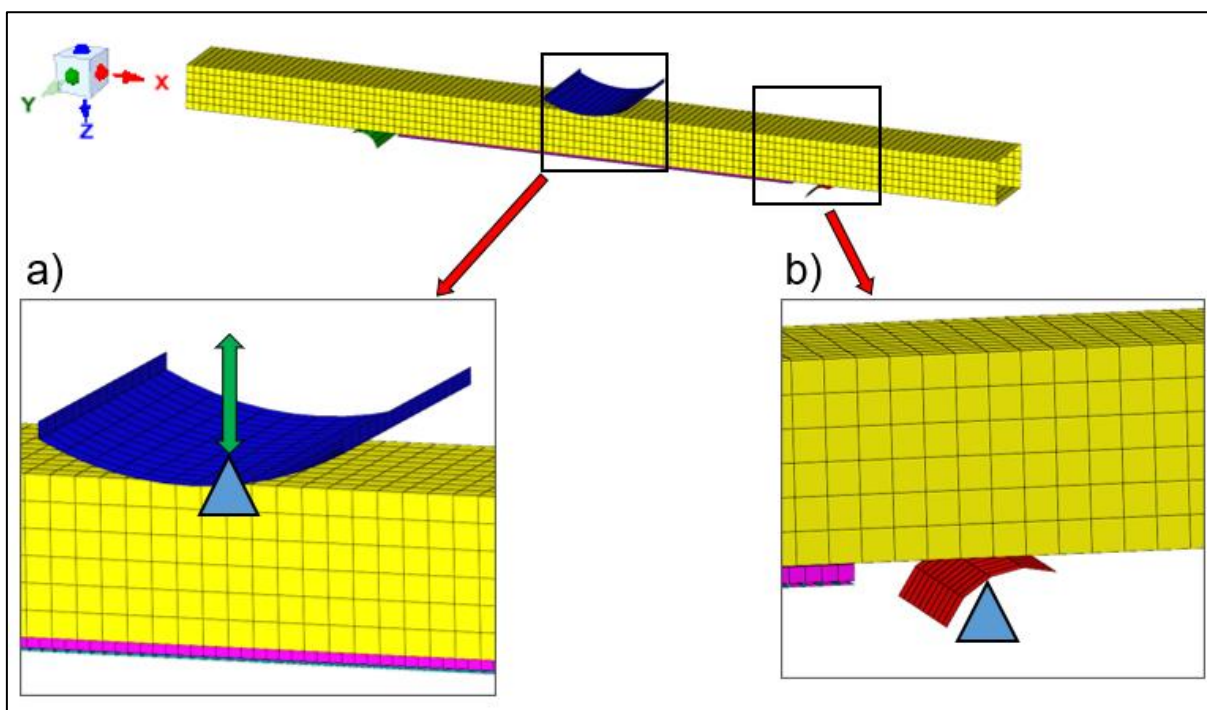


### 3.2.3.2 Preparação de malha e componentes não avaliados

Com a conclusão do modelo CAD tridimensional foi possível iniciar a preparação para o modelamento matemático, que se iniciou com a simplificação do perfil tubular, apoios, punção e lâmina PRFC para superfície média levando em conta a utilização de malha bidimensional (também conhecida como malha de superfície média ou elemento tipo casca) nestes componentes. Outra simplificação comumente utilizada em tubos retangulares que foi aplicada ao modelo foi a retirada de raios nas extremidades do perfil tubular, isto se deve a sua dimensão extremamente reduzida se comparada as dimensões das paredes do perfil tubular. Outro fator que induz a retirada de raios do modelo é a utilização desta simplificação ser amplamente utilizada na indústria.

Com relação aos componentes necessários para a aplicação do teste e que não foram avaliados durante a análise, levando em consideração à rigidez estrutural ser extremamente superior a rigidez do conjunto utilizado para teste, os componentes do punção e apoios foram considerados como materiais rígidos utilizando MAT\_RIGID\_(020) podendo assim serem simplificados para modelos em casca utilizando apenas a superfície de contato conforme a Figura 30a para a punção e a Figura 30b para os apoios.

Figura 30 - Simplificação de malha em componentes rígidos

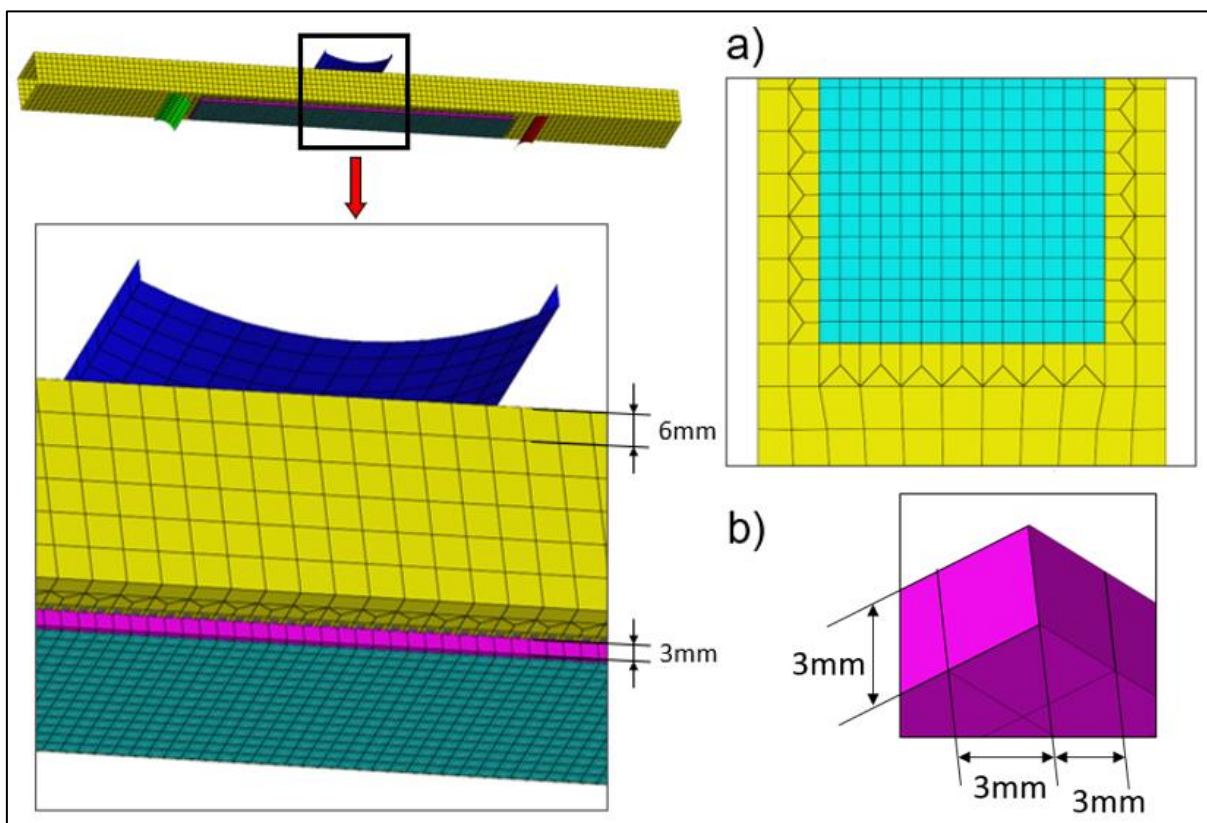


Fonte: O autor (2022).

Para o modelamento do adesivo estrutural seguiu-se o conceito de elementos tridimensionais aplicado pelo trabalho de Tuberga (2020) com formulação coesiva para apenas os dois principais modos de falha. A formulação utilizada foi a de número 20 no software LS-DYNA, que se trata de uma formulação de quatro pontos coesiva, com composição de elementos de componente sólido para união com elemento de casca.

Conforme o fornecedor do adesivo estrutural utilizado uma camada de adesivo de 0,3 mm é apontada como ideal para o teste experimental, porém o custo computacional para a análise pelo MEF utilizando elementos com esta dimensão torna inviável sua aplicação a modelos de maior escala. Para facilitar a simulação numérica pelo MEF o comprimento do elemento sólido hexaédrico foi considerado com 3mm devido à redução de custo computacional e a melhora dos aspectos de qualidade de malha, mantendo assim uma malha tridimensional com elementos de mesma dimensão em todas as direções conforme apresentado pela Figura 31b. A redução do comprimento dos elementos presente na malha sobre o corpo de prova em aço-carbono de 6 mm para 3mm foi realizada conforme demonstrado pela Figura 31a.

Figura 31 - Discretização de malha hexaédrica



Fonte: O autor (2022).

### 3.2.3.3 Aço-carbono

A curva tensão x deformação obtida no ensaio experimental foi representada no *software* LS-DYNA através de 8 pontos. Esses pontos localizam-se na parte plástica da curva, uma vez que a parte elástica é linear e pode ser representada apenas pelo valor da tensão de escoamento e pelo módulo de elasticidade do material. O material utilizado para representação é denominado MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_(024) pelo *software* LS-DYNA. A Tabela 4 abaixo exhibe os valores de tensão e deformação equivalentes utilizados para representar a curva tensão em função da deformação real efetiva, que utiliza apenas a região plástica do material aço-carbono.

Tabela 4 - Curva tensão-deformação real efetiva utilizada para o MEF

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8
Tensão (Mpa)	380	479	513	522	537	557	580	601
Deformação (mm/mm)	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08	0,12	0,1745

Fonte: O autor (2022).

O valor referente à tensão do ponto 1 foi estabelecido devido ao material possuir em sua especificação mínima o valor utilizado nesta análise, este valor é apresentado pela Tabela 1, onde as demais propriedades associadas ao material e aplicadas ao MEF foram apresentadas. Além disso, em fase de calibração do modelo sem a utilização de lâminas PRFC adotou-se este valor obtendo assim uma aproximação dos resultados utilizando este valor.

### 3.2.3.4 Lâmina PRFC

Para a representação de lâminas PRFC no modelo numérico utilizou-se o material denominado MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE\_(54-55) pelo *software* LS-DYNA e representa um material compósito ortotrópico com formulação para dano, que não será abrangida neste trabalho. A Tabela 5 apresenta os dados utilizados para a simulação considerando as direções do elemento coesivo apresentado pela Figura 15.

Tabela 5 - Propriedades de lâminas PRFC utilizadas para o MEF

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica	1,60e-09	ton./mm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade na direção 1	165000	MPa
Módulo de elasticidade na direção 2	13690	MPa
Módulo de elasticidade na direção 3	13690	MPa
Módulo de cisalhamento na direção 12	77190	MPa
Módulo de cisalhamento na direção 23	38890	MPa
Módulo de cisalhamento na direção 13	77190	MPa
Coeficiente de Poisson no plano 12	0,02	-
Coeficiente de Poisson no plano 13	0,02	-
Coeficiente de Poisson no plano 23	0,362	-
Resistência ao cisalhamento no plano 12	65	MPa
Resistência a tração longitudinal	3500	MPa
Resistência a compressão no eixo 2	14	MPa
Resistência a tração no eixo 2	65	MPa

Fonte: Adaptado de Tuberga (2020).

### 3.2.3.5 Adesivo Estrutural

A representação do adesivo estrutural concentrou o maior tempo de trabalho de calibração devido a maior dificuldade de representação de contatos e propriedades, sendo este utilizando o material denominado de MAT\_COHESIVE\_MIXED\_MODE\_ (138) que representa apenas os dois principais modos de falha apresentados na etapa 2.4.2.

Partindo das propriedades fornecidas pela ficha técnica do adesivo estrutural e das considerações referentes a se tratar de um material com falha bilinear, homogêneo e isotrópico pode-se utilizar o valor do módulo de elasticidade na direção normal para encontrar o módulo de cisalhamento pela Equação 26 com aproximação do coeficiente de Poisson indicado pelo fornecedor e apresentado pela Tabela 6.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (26)$$

A Tabela 6 apresenta os dados utilizados em análise final após diversas reiteraões, representando os dados utilizados para os resultados apresentados ao final deste trabalho.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas adesivo estrutural utilizado para o MEF

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica	1,20e-09	ton./mm <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	Aprox. 0,4	-
Módulo de elasticidade na direção normal	1900	MPa
Módulo de elasticidade na direção tangencial	678	MPa
Taxa de liberação de energia para modo I	2,967	N·mm
Taxa de liberação de energia para modo II	2,8	N·mm
Pico de tração na direção normal	45	MPa
Pico de tração na direção tangencial	40	MPa

Fonte: Adaptado de Tuberga (2020).

Os valores de pico de tração foram inicialmente utilizados conforme apresentado pela ficha técnica do produto, porém com o decorrer da análise foi necessária sua modificação devido à falha prematura do adesivo se comparado aos testes experimentais. Já os valores de taxa de liberação de energia para os dois modos de falha inicialmente utilizaram valores idênticos aos aplicados ao modelo de Tuberga (2020).

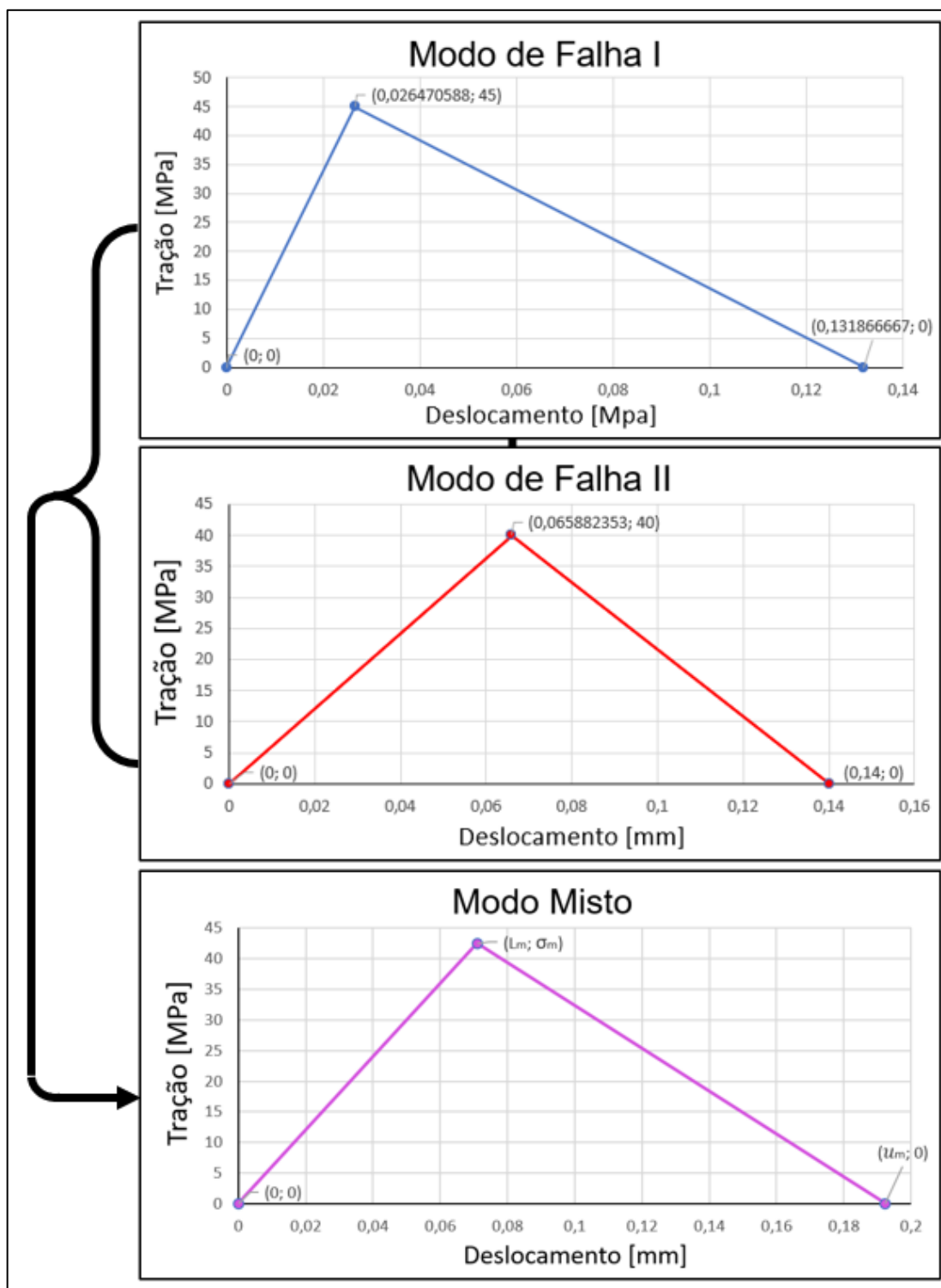
A avaliação do adesivo foi realizada sem a utilização da opção de falha com exclusão de elementos e, avaliando assim os vetores de tensão normal e tangencial até atingimento do valor de tensão máxima para o modo misto.

Para o processo de validação de alteração dos valores atribuídos às propriedades do adesivo estrutural criou-se uma planilha no *software* Microsoft Excel com valores de entrada de Módulo de Elasticidade normal e transversal, pico de tração normal e tangencial, taxa de liberação de energia para os modos de falha I e II para satisfazer as condições impostas pela Equação 15 referente ao modo de falha I e pela Equação 16 referente ao modo de falha II.

Ainda para a mesma planilha utilizada para a validação do material foi

adicionada uma visualização gráfica para os modos de falha I e II que, posteriormente utilizando os valores de deslocamento e aplicando às Equações 10, 11, 12, 13 e 14 foi possível a construção do gráfico respeitando a Lei de tração-separação para o modo misto de falha. Os três gráficos descritos são apresentados pela Figura 32.

Figura 32 - Transformação de gráficos de modos de falha para modo misto



Fonte: O autor (2022).

### 3.2.3.6 Contatos utilizados

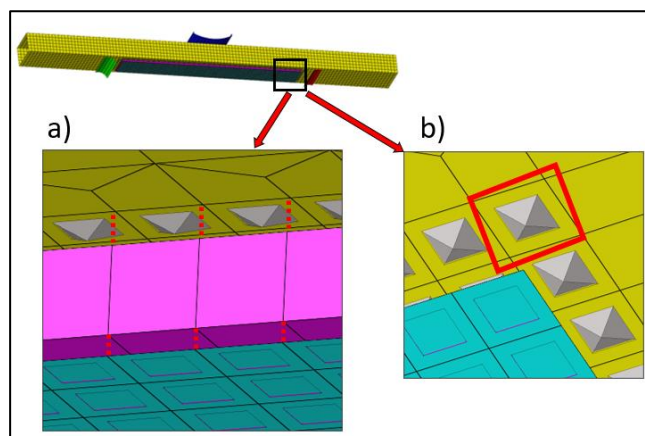
Como exigência de utilização o contato entre punção, apoios e corpo de prova deveria representar um contato com atrito. Considerando o fato de se tratar de contato entre duas superfícies, foi utilizado então o contato denominado CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE selecionando assim um único componente (através da definição PART\_ID) e, no caso dos apoios um conjunto de componentes (através da definição PART\_SET\_ID) como componente escravo e como componente mestre o corpo de prova em aço-carbono.

O valor utilizado para atrito estático foi de 0,14 e para atrito cinético foi utilizado o valor de 0,11. Ambos os valores foram utilizados baseados em testes realizados entre os dois materiais em análise experimental pelo laboratório de testes mecânicos internamente à empresa Marcopolo S.A. e não serão descritos neste trabalho.

Posteriormente, para modelos com a utilização de lâmina PRFC foi adicionado um contato referente a união entre o corpo de prova em aço-carbono com adesivo estrutural e outro contato referente a união entre a lâmina PRFC e o adesivo estrutural. O contato utilizado para esta função foi TIED\_SHELL\_EDGE\_TO\_SURFACE\_BEAM\_OFFSET que, conforme o manual teórico do software LS-DYNA é uma opção de contatos baseada em penalidades onde as faces em contato possuem vínculo, transmitindo forças e momentos entre os nós escravos e o segmento mestre.

Pelo fato de o contato interagir apenas entre nós alinhados a segmentos, a geração de malha deve levar em consideração o alinhamento correto entre os nós localizados na face de contato do elemento hexaédrico com a localização de segmentos conforme apresentado pelas linhas tracejadas em vermelho na Figura 33a.

Figura 33 - Considerações referentes ao contato com adesivo estrutural



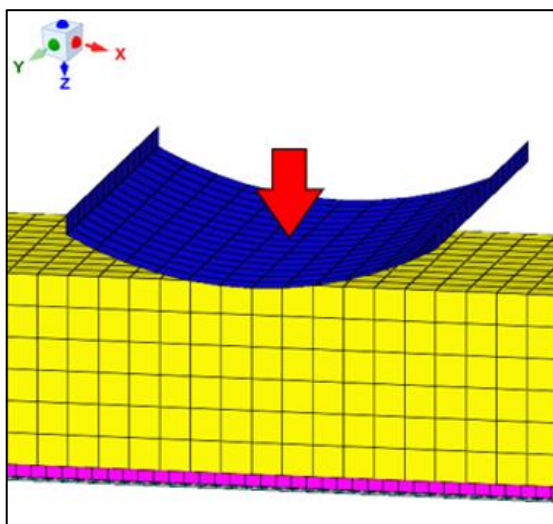
Fonte: O autor (2022).

Tanto para aplicação do contato entre o adesivo estrutural e corpo de prova quanto para a lâmina PRFC há a necessidade de criação de segmentos de contato, onde é selecionada apenas a malha representante da área de contato e criado um SET\_SEGMENT. Outro ponto de elevado cuidado é a orientação do eixo normal para este segmento de contato, que deve estar orientado em direção aos nós escravos (a representação de direção para o software Altair Hypermesh é realizada com a direção do segmento piramidal voltada para o eixo normal) conforme apresentado na Figura 33b.

### 3.2.3.7 Método de coleta de dados através do MEF

Os resultados foram coletados a partir da força resultante de interface para o contato entre corpo de prova e punção conforme apresentado pela Figura 34, onde a seta vermelha representa a aplicação de força. Os resultados foram obtidos ativando a opção DATABASE\_OPTION\_RCFORC e selecionando o par de contato de interesse.

Figura 34 - Obtenção de resultados pelo MEF



Fonte: O autor (2022).

### 3.2.3.8 Condições de contorno para análise de obtenção da curva de força em função do deslocamento pelo MEF

Para a análise pelo MEF referente ao teste não-linear estático foram considerados engastados os dois apoios inferiores adotando a geometria apresentada pela Figura 30. Já para o punção na parte superior foram aplicadas restrições de



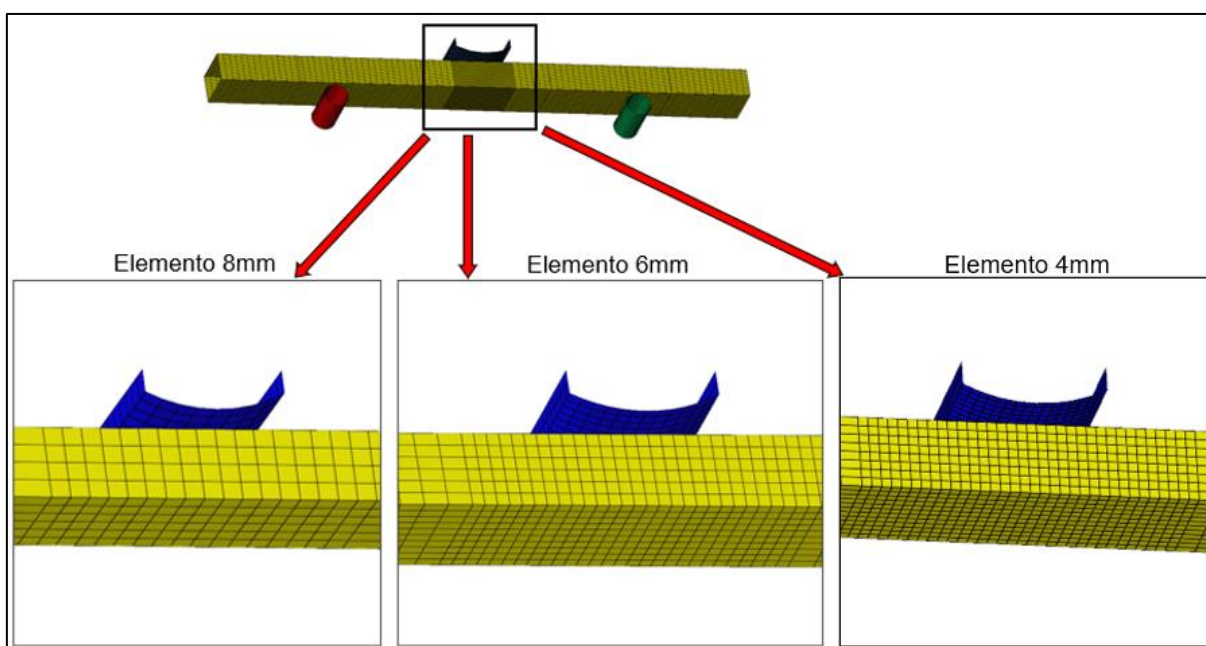
movimento de rotação para todos os eixos, porém com relação ao movimento de translação o movimento no sentido do eixo z conforme apresentado pela Figura 34 foi liberado para a aplicação do carregamento.

Foi assumida a condição de contato com atrito entre as faces do punção, apoios e corpo de provas fornecendo assim a estabilidade necessária para avaliação.

### 3.2.3.8.2 *Estudo de convergência de malha*

Para calibração dos resultados foi realizada análise de convergência de malha utilizando apenas seções tubulares sem a utilização de lâminas PRFC, visto que a complexidade na correspondência dos resultados é reduzida. Para isso foram criadas três malhas com diferentes dimensões médias dos elementos, são eles: 4, 6 e 8 mm. conforme apresentado pela Figura 35.

Figura 35 - Elementos utilizados para estudo de convergência de malha



Fonte: O autor (2022).

Este estudo tem como principal objetivo encontrar o tamanho de elemento que melhor represente a situação real de força em função deslocamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa do trabalho são apresentados os resultados referente à aplicação dos conceitos apresentados pela etapa 3 referente a calibração do modelo onde posteriormente apresentam-se os resultados comparativos entre os modelos numéricos e experimentais com e sem a utilização de lâminas PRFC.

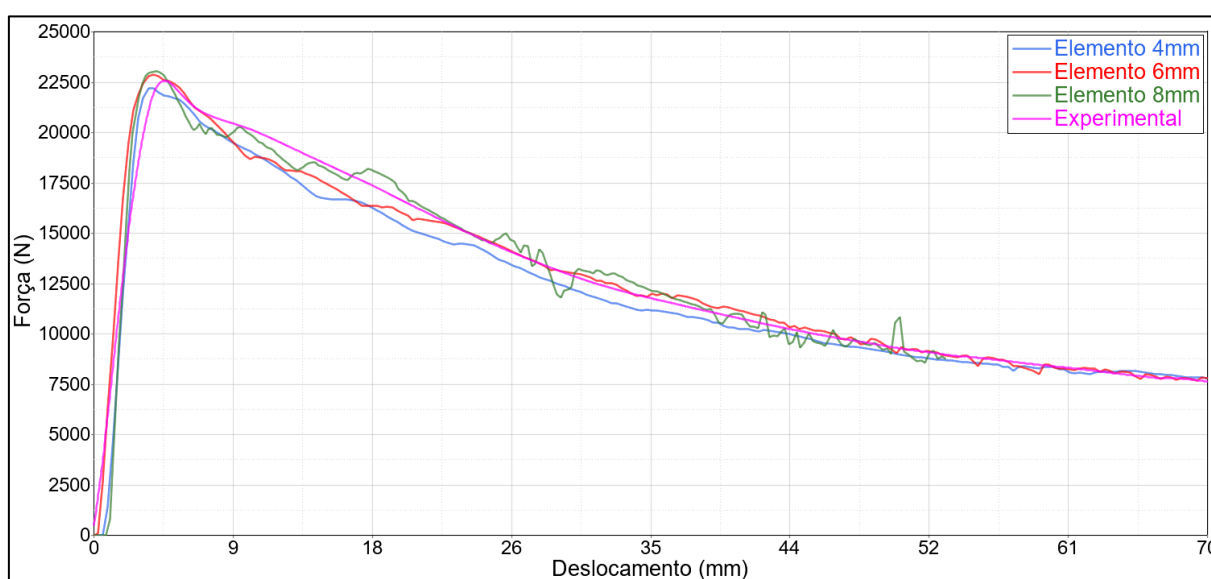
### 4.1 PREPARAÇÃO DO MODELO

Para esta etapa foram definidos o comprimento médio dos elementos utilizados no modelo de simulação e a energia total absorvida pelo modelo experimental, sejam ou não utilizadas lâminas de PRFC.

#### 4.1.1 Convergência de malha

As curvas apresentadas pela Figura 36 apresentam o resultado experimental realizado pelo laboratório e acompanhado pelo autor, bem como as curvas obtidas pelo MEF.

Figura 36 - Resultados convergência de malha



Fonte: O autor (2022).

Conforme analisado pelos dados de força máxima, buscando a aproximação ao valor de referência de 22580 N obtido em coleta experimental, o elemento de 4 mm

apresentou o valor de força máxima inferior ao real de 22217,6 N, seguido pelo elemento de 6 mm com uma força máxima e superior à real de 22852,4 N e por fim de 8 mm com 22959,1 N. Outro fator que pode ser visualizado é que há uma suavização da curva com a redução do comprimento médio do elemento.

Apenas o elemento de 8 mm não representa com proximidade a curva na região de força máxima, possuindo um pico de força mais elevado se comparado à curva real seguido de queda de força e alta vibração logo após este evento. Devido a este motivo o comprimento médio de 8 mm foi desconsiderado para a aplicação.

Ao comparar os elementos com comprimento médio de 4 mm e 6 mm é possível notar que existe pouca variação tanto no resultado de força máxima quanto na força final apresentando resultados similares. Desta forma optou-se pela utilização do elemento com comprimento médio de 6 mm devido ao menor número de elementos necessários para o modelo, ocasionando assim menor tempo computacional e menor utilização de memória ao final da análise.

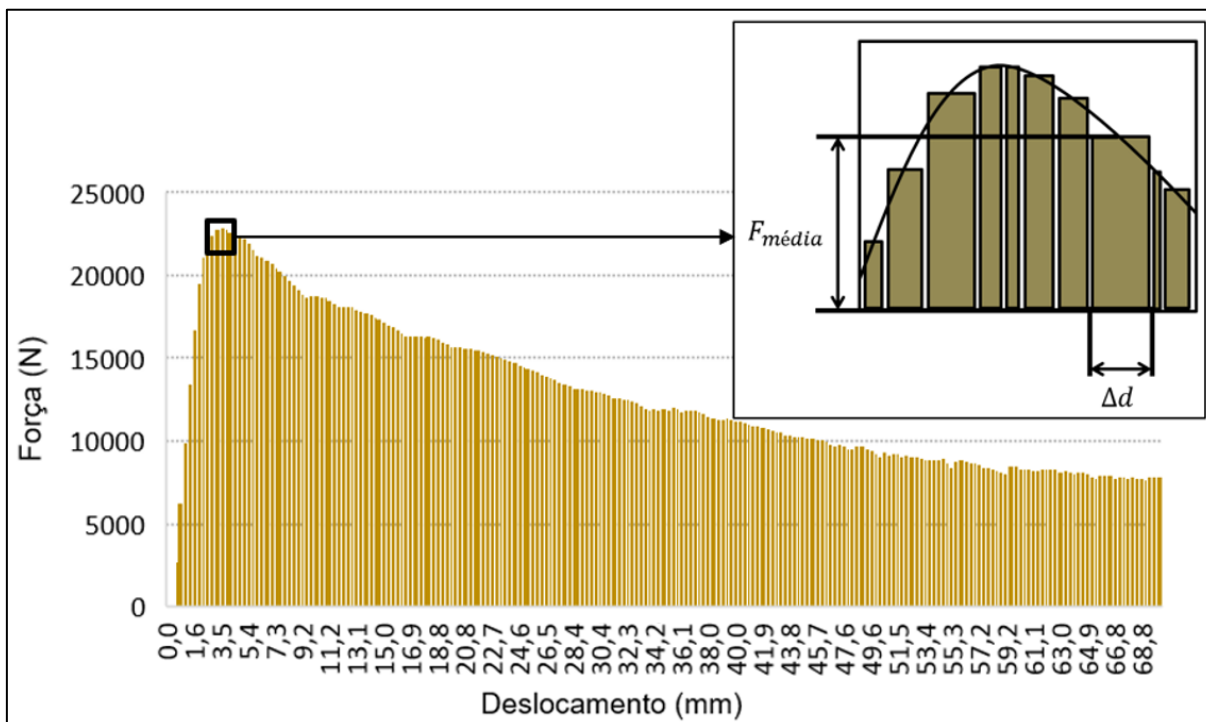
#### **4.1.2 Cálculo de energia em função do deslocamento**

Após a obtenção da curva de força em função do deslocamento para os modelos experimental e numérico, é possível a preparação de dados via *software* Microsoft Office Excel para cálculo para obtenção da energia total aplicada ao conjunto.

Utilizando a Equação 3 auxiliada pelas Equações 4, e 5 e aplicada sobre os resultados da curva força em função do deslocamento foi possível estimar, através do uso do método numérico de Newton-Cotes simples, o valor da energia aplicada ao conjunto, de acordo com a Tabela 7.

A Figura 37 apresenta a curva força em função do deslocamento sem a utilização de lâminas PRFC subdividida em retângulos para cálculo de energia através da discretização da área total subdividida em retângulos menores.

Figura 37 - Discretização de curva força em função do deslocamento experimental



Fonte: O autor (2022).

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos após a realização do cálculo pelo método de Newton-Cotes simples para modelos com e sem a utilização de lâminas PRFC juntamente com a conversão para unidade definida pelo Sistema Internacional (SI) de unidades.

Tabela 7 - Energia total absorvida experimentalmente

Ensaio	Energia (N·mm)	Energia (J)
Experimental sem lâmina PRFC	895150	895,15
Experimental com lâmina PRFC	947824	947,82

Fonte: O autor (2022).

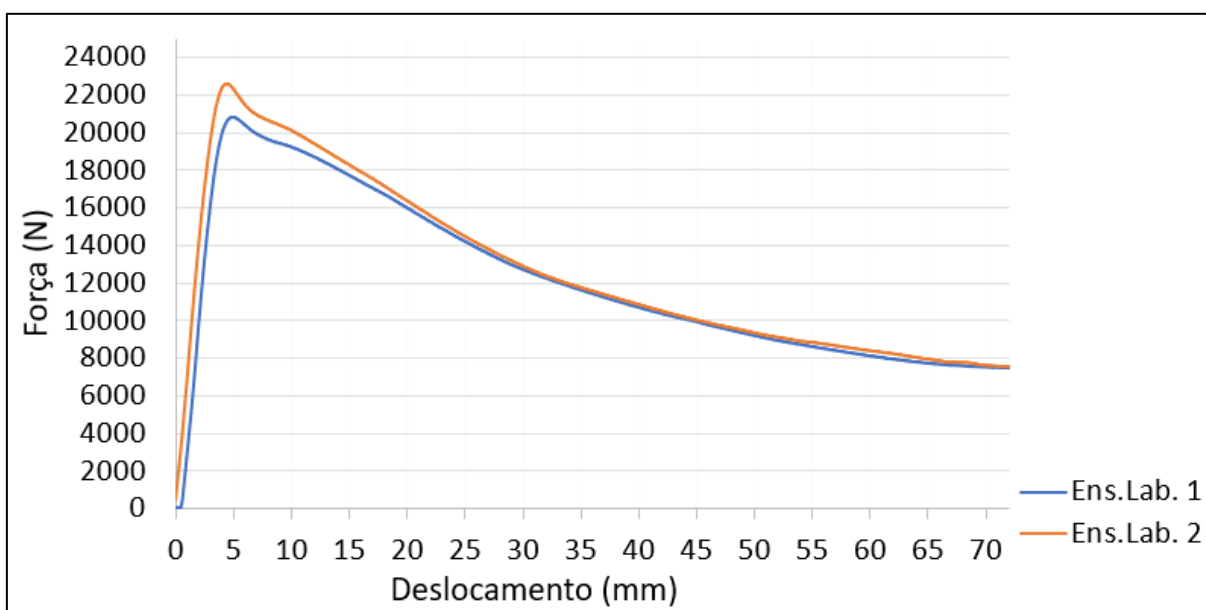
#### 4.2 AVALIAÇÃO NUMÉRICA EXPERIMENTAL

Nesta etapa são apresentados os resultados coletados nos testes experimentais e confrontados com os resultados numéricos obtidos de modelos com e sem a utilização de lâminas PRFC.

### 4.2.1 Experimental

A avaliação dos resultados sem a utilização de lâminas PRFC é iniciada pela obtenção das duas curvas de força em função do deslocamento obtidas através dos dois corpos de prova ensaiados. A Figura 38 apresenta os resultados obtidos através de planilha pelo *software Microsoft Office Excel* e plotados em um gráfico.

Figura 38 - Força em função do deslocamento sem lâmina PRFC experimental

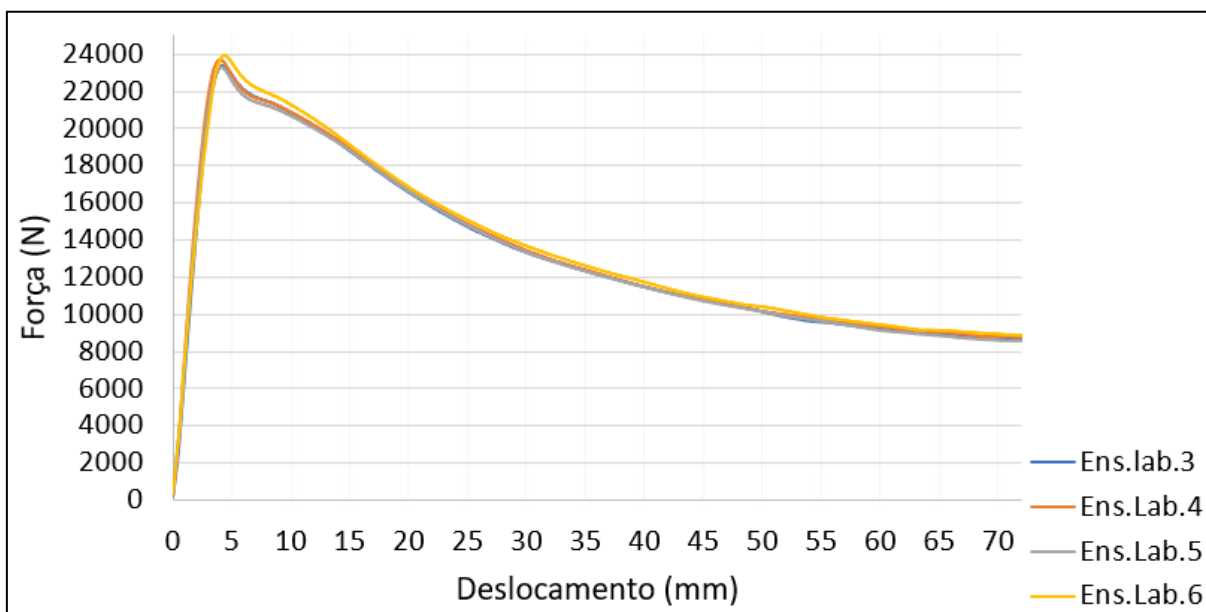


Fonte: O autor (2022).

Como pode ser observado através do gráfico houve uma divergência percentual de 7,66% de resultados com relação a força máxima com o primeiro atingindo 20849 N e o segundo 22580 N. Como foram realizados ensaios em apenas dois corpos de prova, obteve-se assim uma amostra com poucos dados para comparação impossibilitando a definição exata da curva. Desta forma o autor optou pela utilização da curva de Ensaio Laboratorial 2 devido à força máxima atingir valor mais elevado se comparado ao Ensaio Laboratorial 1.

Já a coleta com lâminas PRFC foi realizada com quatro corpos de prova onde a Figura 39 demonstra os resultados obtidos através de planilha pelo *software Microsoft Office Excel* e plotados em um gráfico.

Figura 39 - Força em função do deslocamento com lâmina PRFC experimental



Fonte: O autor (2022).

Diferentemente da situação encontrada nos corpos de prova sem a utilização de lâmina PRFC, mesmo possuindo quatro corpos de prova as curvas de força em função do deslocamento revelam pouca diferença de resultados quando comparados. Desta forma utilizou-se a curva referente ao Ensaio Laboratorial 4, que apresentou valor intermediário ao ser comparado com as demais curvas tanto no quesito de força máxima quanto no decorrer do ensaio.

A Figura 40 apresenta os resultados para os modelos utilizados nesta análise em sua deformada final, inferior à 70 mm devido ao retorno elástico do corpo de prova após a retirada de carga.

Figura 40 - Imagem de resultado experimental com e sem lâmina PRFC



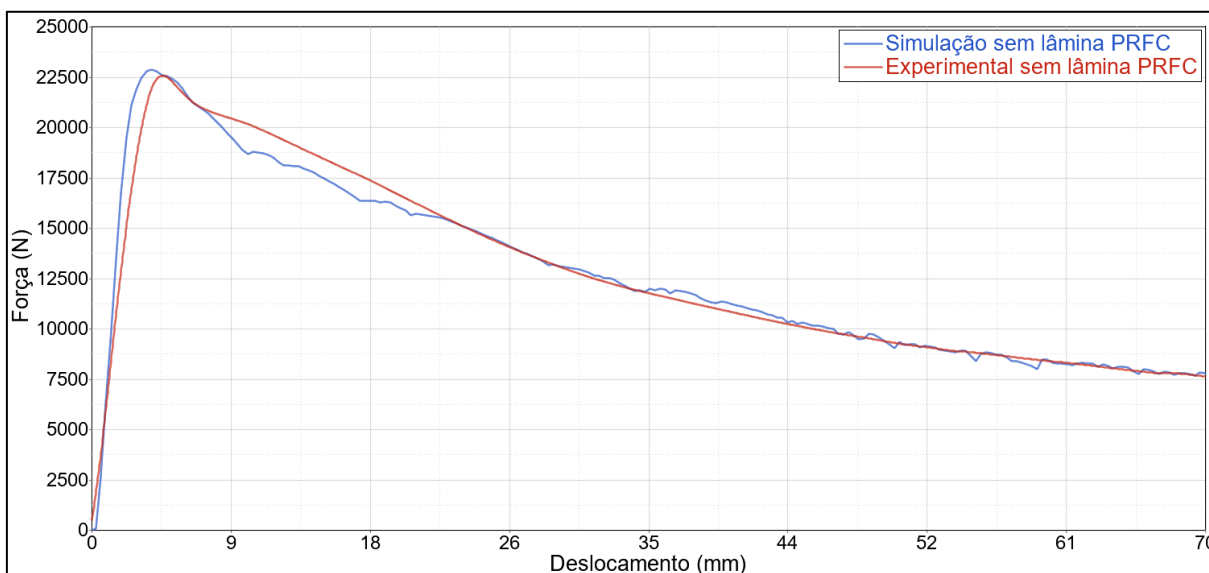
Fonte: O autor (2022).

#### 4.2.2 Correlação numérico experimental

Como objetivo do trabalho obteve-se a curva de força em função do deslocamento,

que é apresentada na Figura 41 em comparativo entre ensaio experimental e cálculo pelo MEF sem a utilização de lâminas PRFC.

Figura 41 - Comparativo de força em função do deslocamento numérico e experimental sem lâmina PRFC



Fonte: O autor (2022).

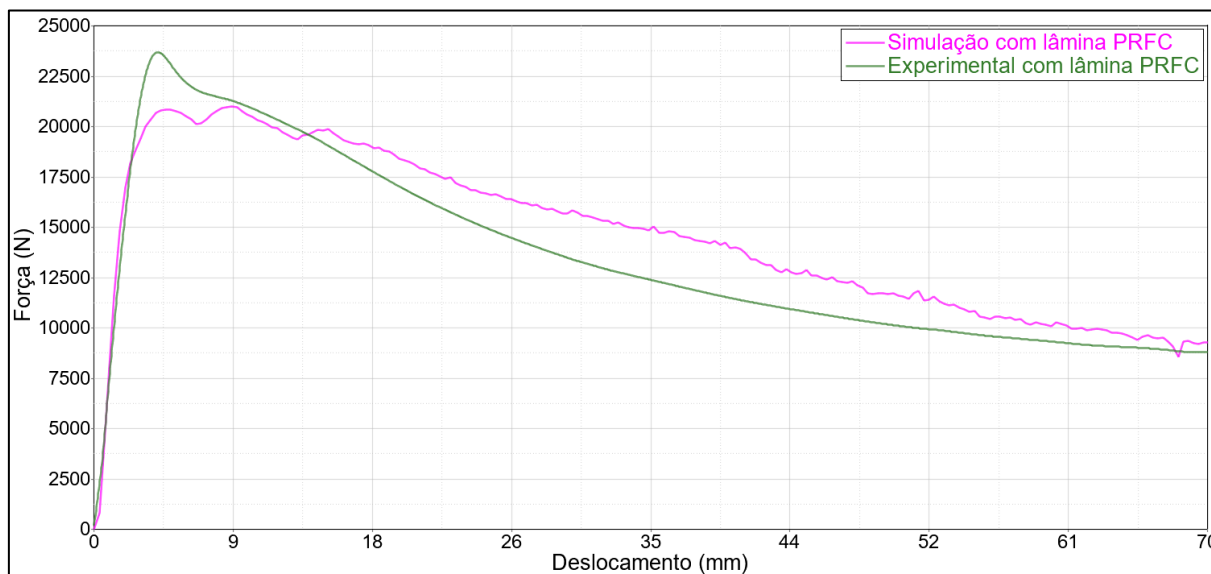
Como é possível se observar na Figura 41 desde o ponto zero até atingir a força máxima o cálculo sem lâmina PRFC possui inclinação da curva com valor maior se comparado ao ensaio experimental, este fato pode estar relacionado ao valor superior do módulo de elasticidade utilizado pelo cálculo em relação ao módulo de elasticidade real devido ao fato de ainda se encontrar no regime elástico do material, ou pelo atrito estático utilizado para o cálculo diferir do real.

Após atingir o pico de força e iniciar o declínio de força, o cálculo tende a realizar situação similar à realizada pela curva real, porém acaba extrapolando a queda e volta a se estabilizar por volta dos 22 mm de deslocamento, a partir deste ponto se mantém estabilizado.

Como resultado geral foi obtida uma curva muito semelhante a real, com diferença de 1,38% encontrando na simulação um valor de força máxima de 22896 N e experimentalmente uma força de 22580 N. Estes valores podem ser verificados no Apêndice A para ensaio experimental e Apêndice C para simulação.

A Figura 42 apresenta o gráfico de força em função do deslocamento da punção comparativo entre ensaio experimental e cálculo pelo MEF utilizando lâmina PRFC.

Figura 42 - Comparativo de força em função do deslocamento numérico e experimental com lâmina PRFC



Fonte: O autor (2022).

Como pode-se observar na Figura 42 de força em função do deslocamento com a utilização de lâmina PRFC a força máxima obtida no experimento é superior à força máxima obtida na simulação, porém se comparado ao modelo de cálculo sem a utilização de lâmina PRFC, a inclinação da curva inicialmente é representada de forma correta.

O teste experimental utilizando lâminas PRFC apresenta apenas um único pico de força máxima que não é visto no modelo simulado, este apresenta dois picos de força máxima que podem ser explicados pela troca de elementos de contato na região dos apoios ou pela medição que é aplicada na região do contato entre punção e corpo de prova no momento em que um elemento é unido ou desligado da área de contato.

Para comparação dos picos de força foi considerado o primeiro pico de força devido a este representar com maior fidelidade o ponto em que a força máxima é atingida em função do deslocamento experimental. Existe uma diferença de 0,76% entre as forças máxima presente nos dois picos de força, sendo o primeiro com uma força de 20852 N e o segundo de 21010 N. Estes dados podem ser verificados no Apêndice B para ensaio experimental e Apêndice D para simulação.

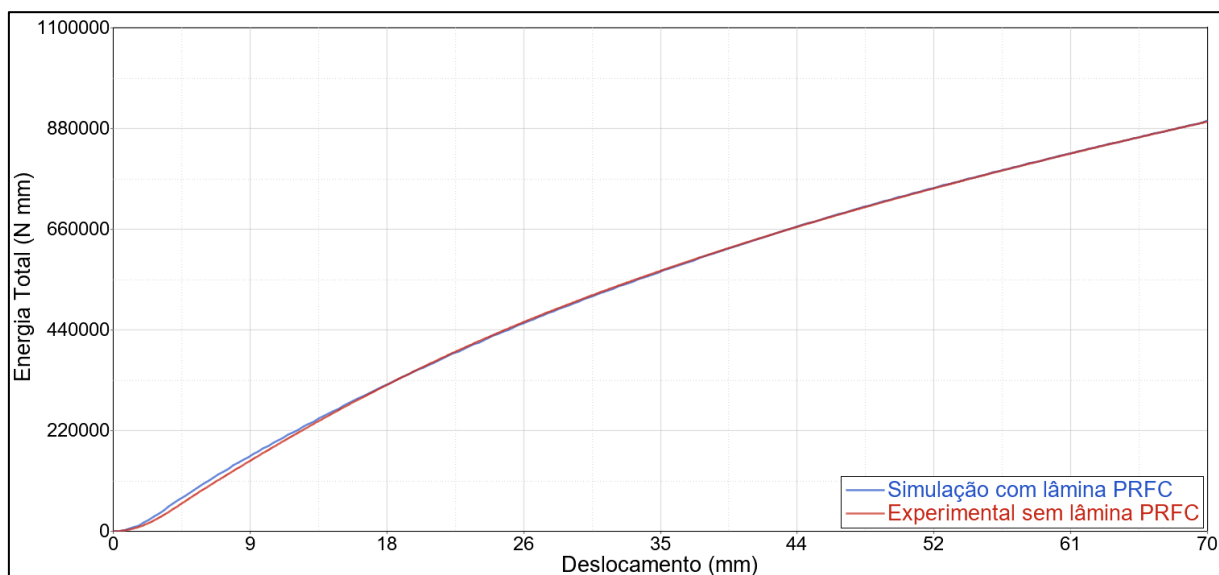
#### 4.2.3 Energia total em função do deslocamento

Seguindo a etapa 4.1.2 após a realização dos cálculos plotou-se a curva de



energia total em função do deslocamento. A Figura 43 apresenta os resultados para o cálculo em comparação com o ensaio experimental sem lâminas PRFC, que em grande parte do gráfico se encontra sobreposto.

Figura 43 - Energia total em função do deslocamento sem lâmina PRFC



Fonte: O autor (2022).

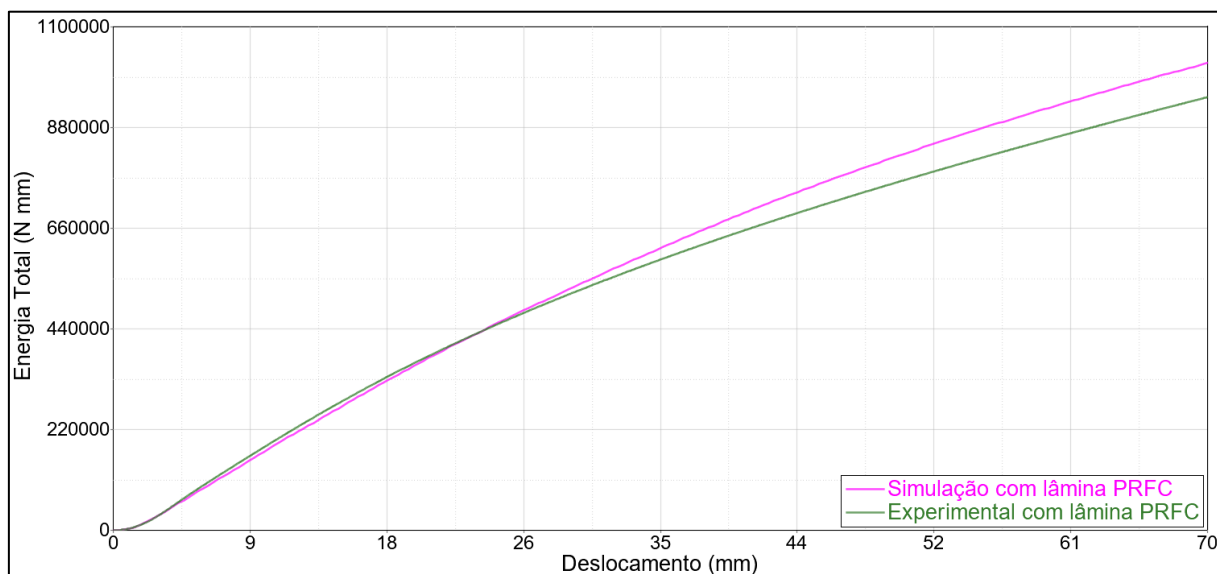
Conforme pode-se visualizar na Figura 43 os valores de energia total inicial se igualam até por volta de 3 milímetros de deslocamento, a partir deste ponto há um pequeno afastamento com ganho de energia para o cálculo sem lâmina PRFC. Este acontecimento era previsto devido a área abaixo da curva pouco antes de atingir a força máxima na Figura 41 ser maior se comparada ao ensaio experimental.

Porém logo após, ao se manter desde 7 milímetros de deslocamento até 22 mm abaixo da curva de força em função do deslocamento, a energia total também se estabiliza neste momento e, a partir deste ponto segue próxima a energia total do ensaio experimental.

Ao final da análise é possível observar que a energia total absorvida pelo corpo de prova apresenta uma diferença de 0,21% devido à energia total absorvida obtida pela simulação numérica de 897,06 J e calculada pelo método apresentado pela etapa 4.1.2 de 895,15 J.

Para modelo com a utilização de lâminas PRFC, a Figura 44 apresenta os resultados obtidos pela simulação em comparação com o ensaio experimental.

Figura 44 - Energia total em função do deslocamento com lâmina PRFC



Fonte: O autor (2022).

Este gráfico apresenta a energia total absorvida pelo conjunto de teste tanto experimental quanto simulado, logo pode-se observar que do deslocamento zero até aproximadamente 3 mm as curvas se mantêm sobrepostas, porém a partir deste ponto até o deslocamento de aproximadamente 24 mm a energia total absorvida para o ensaio experimental é superior.

Pode-se assimilar esta condição diretamente a diferença de área na Figura 42 abaixo da linha do teste experimental entre os deslocamentos de 3 mm à 14 mm um ganho de energia maior se comparado ao cálculo numérico. No ponto de deslocamento de 14mm, onde a curva experimental da Figura 42 transpassa a curva descrita pelo cálculo, a energia total absorvida pelo ensaio experimental tende a se igualar novamente ao cálculo.

Apartir do deslocamento de 24mm, quando a energia total absorvida pelos dois métodos novamente se igualam, o aumento da energia para a simulação é previsto devido a maior área abaixo da curva apresentada na Figura 42. A diferença de energia final apresentada pela Figura 44 é igual a diferença entre a área abaixo da curva do ensaio experimental e a área abaixo da curva representativa do cálculo com modelo utilizando lâmina PRFC na Figura 42.

#### 4.2.4 Correlação entre método numérico e experimental

A Tabela 8 apresenta os resultados de força máxima, deslocamento em força máxima e Energia total aplicada sobre o modelo experimental e numérico. Nela pode-se notar que para os ensaios sem lâminas PRFC a força máxima encontrada apresenta uma diferença de 1,38%. Com relação à energia total absorvida pelo sistema a correlação atingiu 0,213% de diferença ao final do cálculo, porém ao comparar em pontos intermediários como por exemplo entre o deslocamento de 3 mm e 9 mm na Figura 42 pode-se encontrar diferenças mais elevadas.

Com relação aos ensaios experimentais e simulações com a utilização de lâminas PRFC podemos concluir que a diferença associada ao modelo foi elevada se comparado ao modelo sem lâmina PRF, onde o erro associado a força máxima foi elevado para 13,61% e a energia total absorvida pelo conjunto atingiu a diferença de 7,33%. A Tabela 8 apresenta os resultados para modelos com e sem lâmina PRFC.

Tabela 8 - Resultados de correlação de método numérico experimental

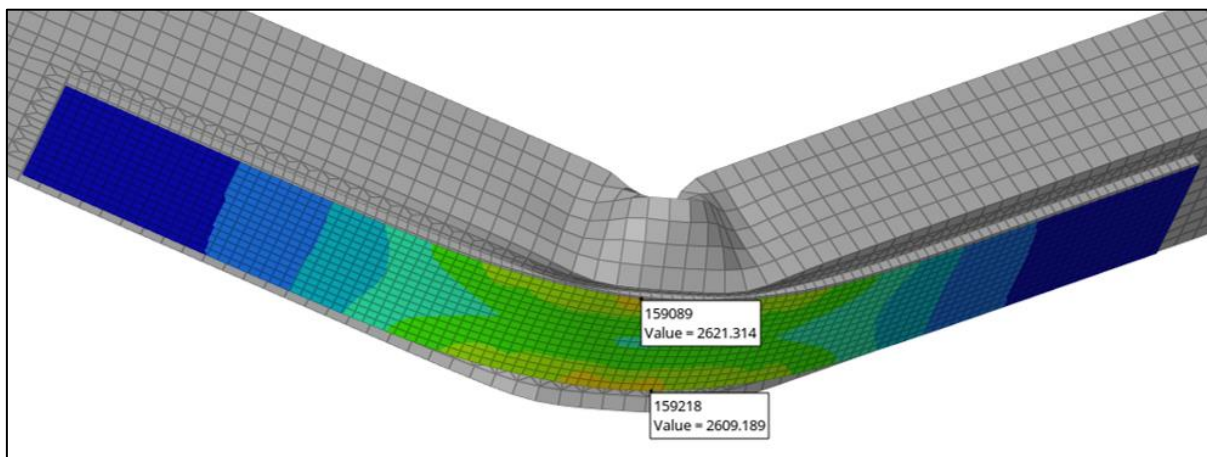
Ensaio	Força máxima (N)	Deslocamento em força máxima (mm)	Energia (J)
Simulação sem lâmina PRFC	22896	3,75	897,06
Experimental sem lâmina PRFC	22580	4,43	895,15
Simulação com lâmina PRFC	20852	4,83	1022,76
Experimental com lâmina PRFC	23690	4,03	947,82

Fonte: O autor (2022).

#### 4.3 AVALIAÇÃO DE TENSÕES

Abaixo é realizada a avaliação de resultados de tensão para a lâmina PRFC apresentada pela Figura 45.

Figura 45 - Resultado de tensões em lâmina PRFC

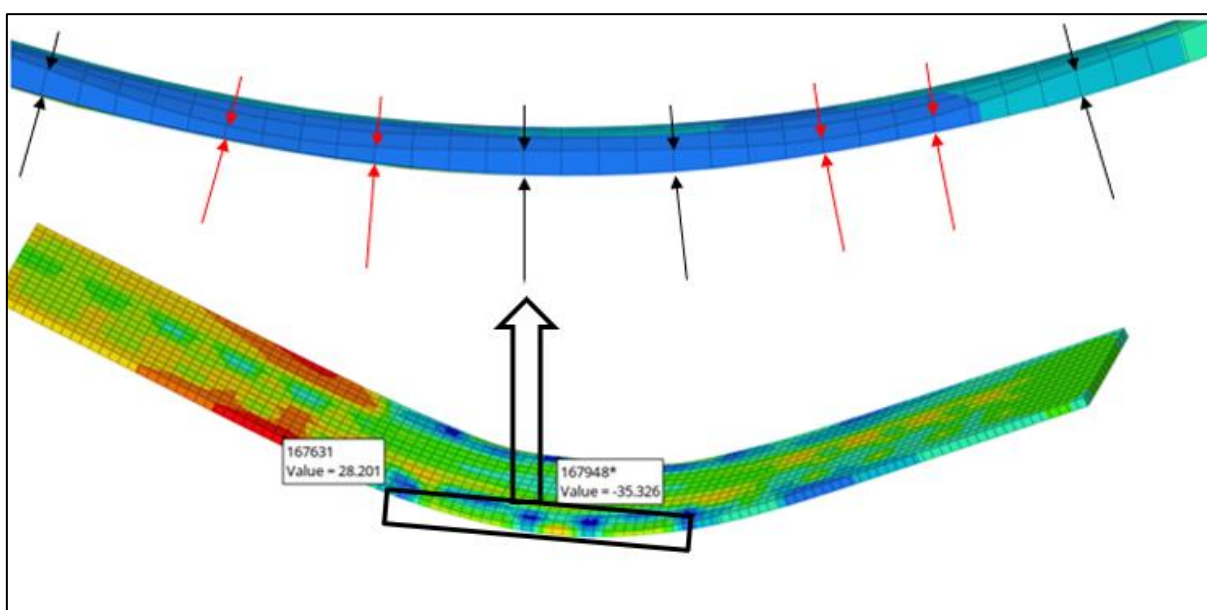


Fonte: O autor (2022).

A avaliação das tensões para a lâmina PRFC levam em consideração o fato de o material ser transversalmente isotrópico e frágil, desta forma foi avaliado pela Teoria de Rankine, mais conhecida como critério de falha da máxima tensão principal e, como demonstrado pela Figura 45 o valor não excede o limite de resistência a tração na região de maiores tensões encontradas, assim como o valor de limite de resistência a compressão no eixo y não é superado.

Por fim foi realizada a avaliação das tensões resultantes sobre o adesivo estrutural, que são apresentados pela Figura 46.

Figura 46 - Resultado de tensões em adesivo estrutural



Fonte: O autor (2022).

Na avaliação da camada de adesivo estrutural utilizando elementos hexaédricos pode-se concluir que o pico de tração apontado como 45 Mpa na direção normal e 40 Mpa na direção transversal e confrontando com condição imposta pela Equação 14, o limite de resistência não foi superado pelo modo de falha misto.

A Figura 46 também demonstra uma representatividade da redução de espessura da borda lateral do adesivo que ocorre devido a deformação do tubo durante o processo de aplicação do deslocamento, concentrando nesta região tensões compressivas. Percebe-se a diferença da dimensão entre as setas pretas quando comparadas as setas vermelhas.

## 5 CONCLUSÃO

Com o trabalho desenvolvido conclui-se que os objetivos propostos foram atingidos. Inicialmente realizou-se ensaios experimentais com e sem lâmina PRFC nos laboratórios da empresa Marcopolo. Após realizados os ensaios experimentais, o mesmo foi representado em software de elementos finitos para realizar a comparação entre o modelo experimental e o modelo virtual, para tanto inicialmente realizou-se um estudo de convergência de malha, com o objetivo de encontrar um tamanho de elemento a não interferir no resultado do modelo numérico se comparado ao real. Após realizados ambos os ensaios foi executada uma análise comparativa dos resultados numéricos e experimentais com e sem a utilização de lâminas PRFC.

Em uma comparação de ensaios experimentais é possível concluir que a força máxima atingida pelo ensaio com a utilização de lâmina PRFC é elevada 4,7% se comparado ao ensaio sem lâmina enquanto a energia total absorvida é elevada em 5,56%.

Os resultados do modelo experimental e do modelo numérico sem lâmina PRFC foram satisfatórios, apresentando uma diferença de 1,38% na força máxima. Com relação a energia total absorvida a diferença foi de 0,21%. Baseado nisso pode-se afirmar que o modelo numérico que representa o ensaio 3 pontos sem a placa de PRFC representa com fidelidade o ensaio experimental apresentando uma diferença irrisória nos resultados obtidos.

Ao avaliar os resultados do modelo com a utilização de lâminas PRFC foi encontrada uma diferença de 13,61% inferior à força máxima obtida no modelo experimental (23690 N). Foi observado no modelo numérico a formação de dois picos de força, comportamento não observado no ensaio experimental. A energia total absorvida ao final da análise FEA foi 7,33% superior ao ensaio real.

Se comparados apenas os resultados experimentais é possível concluir que com sua utilização há uma elevação tanto na força máxima aplicada pelo punção quanto a energia total absorvida, sendo esta elevação de 4,69% e 5,55% respectivamente. Devido ao ensaio experimental possuir apenas seis corpos de prova no total e, considerando a elevada variação dos valores de força máxima encontrados nos experimentos sem lâminas PRFC, não é possível a validação dos valores como

uma diferença exata. Para maior aproximação da validação é necessária a realização de maior número de testes.

Dados os resultados apresentados pelo modelo desenvolvido neste trabalho é possível constatar a dificuldade da calibração do modelo e exaltar a necessidade da mesma em componentes de menor complexidade, visto que a divergência de resultados encontrada será elevada quando aplicada a modelos de maior proporção.

É possível concluir que após este trabalho é necessária a realização de mais iterações de calibração do modelo para maior aproximação dos resultados, procurando aumentar a força máxima atingida pela simulação evitando o resultado de dois picos de força máxima além da redução da taxa de absorção de energia para grandes deformações.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros é proposta a continuação deste trabalho até a calibração completa e usual em modelos de grande escala, para aplicação e utilização em carrocerias de ônibus visando o aumento de segurança em relação à impacto, tombamento e capotamento do veículo.

Para o método de Newton-Cotes de ordem zero utilizado para a obtenção dos valores de energia total absorvida pelo corpo de prova durante a avaliação é sugerida a alteração de ordem ou a alteração do método para maior aproximação dos resultados.

Conforme pesquisa realizada durante a aplicação deste trabalho procurou-se um estudo que indicasse a influência da variação de espessura da seção tubular para a utilização de lâmina PRFC, onde não se encontrou estudos com relação a este assunto e assim sendo sugerida a aplicação deste.

Outra sugestão é a avaliação do material MAT\_CAHEISIVE\_MIXED\_MODE\_(138) para situação de vida em fadiga, visto que o software de elementos finitos dispõe de formulação para dano atrelada a este material.

Dentre as demais sugestões contemplam os seguintes estudos:

- a) variação da espessura do adesivo para verificação de sua influência;
- b) variação da formulação dos elementos sem a utilização de adesivo estrutural;
- c) considerando a resistência do adesivo estrutural a qualquer esforço, realizar estudo avaliando sem a utilização do mesmo, apenas com a seção tubular e lâmina PRFC;
- d) variação do material de representação da lâmina PRFC;
- e) realização de testes dinâmicos experimentais pelo método de três pontos comparando-os aos resultados de modelo calibrado deste trabalho, buscando a correlação com teste possuindo maior complexidade.



## REFERÊNCIAS

- AL-MEKHLAFI, Galal M.; AL-OSTA Mohammed A.; SHARIF, Alfarabi M. Experimental and numerical investigations of stainless steel tubular columns strengthened by CFRP composites. **Thin-Walled Structures**, Dhahran, v. 157, dezembro 2020.
- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia cae: Análise não linear**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia cae**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- BARBERO, Ever José. **Introdução ao projeto de materiais compostos**. 3. ed. Boca Raton: CRC, 2017. Título original: Introduction to Composite Materials Design.
- BATHE, Klaus-Jürgen. **Procedimentos de elementos finitos**. Nova Jersey: Prentice Hall, 1996. Título original: Finite element procedures.
- CESÁRIO, André Alaniz. **Estimativa da vida em fadiga de componentes e implementos rodoviários através de métodos espectrais**. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.
- CHEN, Wai-Fah; HAN, Da-Jian. **Plasticidade para engenheiros estruturais**. Nova Iorque: Springer, 1988. Título original: Plasticity for structural engineers.
- COLOMBI, Pierluigi; POGGI, Carlo. An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips. **Composites Part B: Engineering**, Milão, v. 37, p. 64-73, 2006.
- COLOMBI, Pierluigi; POGGI, Carlo. Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates. **Construction and Building Materials**, Milão, v.20, p. 22-33, 2006.
- FILHO, Adalberto.A. D. **Fundamentos de Cálculo Numérico**. Porto Alegre: Bookman, p.119-120, 2016.
- GERE, James Monroe; GOODNO, Barry J. **Mecânica dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2009.
- GOEDEL, F.; ITURRIOZ, I.; DIAS DE MEIRA, A.; WALBER, M. (2016). Simulação numérica da estrutura de um ônibus rodoviário submetida à impacto semifrontal contra uma parede rígida. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 32(1), 22–30.

GREEN, J. Mark. Um guia prático para validação de método analítico. [S.l.]: **Analytical Chemistry News & Features**, 1996. p.305A-309A. Título original: A practical guide to analytical method validation.

HALLQUIST, John O. **LS-DYNA Theory Manual**. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, Califórnia, 2006.

HARPER, Charles A. **Manual de plásticos, elastômeros e compostos**. 4. ed. [Nova Iorque, EUA]: Mc Graw Hill, 2002. Título original: Handbook of plastics, elastomers, & composites.

HAUFE, André; SCHWEIZERHOF, Karl; DUBOIS, Paul. Propriedades & Limites: revisão de formulação de elementos de casca. **Dynamore**, Filderstadt, 2013. Disponível em: <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session8-4.pdf>

HIBBELER, Russell C. **Mecânica dos materiais**. 10.ed. Harlow: Pearson, 2018. Título original: Mechanics of materials.

KADHIM, Majid M.A.; WU, Zhangjian; CUNNINGHAM, Lee S. Numerical study of full-scale CFRP strengthened open-section steel columns under transverse impact. **Thin-Walled Structures**, Amsterdã, v. 140, p. 99-113, julho 2019.

LEMAITRE, Jean; CHABOCHE, Jean-Louis. **Mecânica dos materiais sólidos**. Nova Iorque: Cambridge, 1990. Título original: Mechanics of solid materials.

LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION (LSTC). LS-DYNA Theory manual. Livermore, Califórnia, 2019. Disponível em: [https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT\\_Theory.pdf](https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf)

MARCOPOLO S.A.(a). **Nossa História**. Disponível em: <https://www.marcopolo.com.br/marcopolo/a-marcopolo/nossa-historia>. Acesso em: 06 setembro 2021.

OWEN. David Roger Jones; HILTON, Ed. **Elementos finitos na plasticidade: teoria e prática**. Swansea: Pineridge, 1980. Título original: Finite elements in plasticity: theory and practice.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica: Mecânica da fratura e fadiga**. Florianópolis: Grante, 2004. 417 p.

SELVAKUMARASAMI, Kumaraguru; PARAMASIVAN, Alagusundaramoorthy. Flexural strengthening of steel beams using pultruded CFRP composite sheets with anchorage mechanisms. **Institution of Structural Engineers**, Mumbai, v. 33, p. 1414-1427, outubro 2021.

SIKA BRASIL. SikaPower®-880. 02/2022. 1 ficha técnica. Disponível em: <https://industry.sika.com/content/dam/dms/gb01/t/sikapower-880.pdf> . Acesso em: 20 março 2022.

SIKA BRASIL. Sika® CarboDur® S. 12/2016. 1 ficha técnica. Disponível em: [https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/p/sika\\_carbodur\\_s.pdf](https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/p/sika_carbodur_s.pdf) . Acesso em: 20 março 2022.

SORDI, Aleksandro. **Análise da união estrutural de um ônibus em condição de tombamento utilizando MEF**. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

TARTAGLIONE, Alessandro. **Numerical simulation of adhesive joints under impact loading conditions**. 87f. Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering) – Politecnico di Torino. Torino, 2021. Disponível em: <https://webthesis.biblio.polito.it/18628/1/tesi.pdf>

THE ARUP CAMPUS. Introduction to Composites Modelling in LS-DYNA. 03/2019. 2 gravuras, color. Disponível em: [https://www.oasys-software.com/dyna/wp-content/uploads/2019/03/6\\_Composites\\_Modelling\\_LS-DYNA\\_Galal-Mohamed-IN.pdf](https://www.oasys-software.com/dyna/wp-content/uploads/2019/03/6_Composites_Modelling_LS-DYNA_Galal-Mohamed-IN.pdf) . Acesso em: 12 março 2022.

TIMOSHENKO, Stephen Prokofievich. **Resistência dos materiais**. 1.ed. Tradução de José Rodrigues de Carvalho. Rio de Janeiro: Ao livro técnico, 1974, v. 1.

TUBERGA, Marco. **Finite-Elemente Simulation des mechanischen Verhaltens von Stahlprofilen mit angeklebten Verstärkungen unter Biegebelastung**. 44f. Projektarbeit HS20 (Master of Science in Engineering) – Ostschweizer Fachhochschule. Kempten, 2020.

VENTURA, Ana Mafalda F.M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 21, n. 3/4, p. 10-19, 2009.

**APÊNDICE A – DADOS ADQUIRIDOS EXPERIMENTALMENTE EM MODELO SEM UTILIZAÇÃO DE LÂMINA PRFC**

<b>Ponto coletado</b>	<b>Deslocamento do punção(mm)</b>	<b>Força (N)</b>	<b>Ponto avaliado</b>
...	...	...	
129	4,27	22539,19	
130	4,30	22554,72	
131	4,33	22565,43	
132	4,37	22571,63	
133	4,40	22579,39	
<b>134</b>	<b>4,43</b>	<b>22580,56</b>	<b>Força máxima</b>
135	4,47	22579,39	
136	4,50	22578,95	
137	4,53	22571,81	
138	4,57	22561,37	
139	4,60	22552,66	
...	...	...	
2097	69,87	7651,05	
2098	69,90	7647,84	
2099	69,93	7647,32	
2100	69,97	7645,46	
<b>2101</b>	<b>70,00</b>	<b>7641,53</b>	<b>Força final</b>

**APÊNDICE B – DADOS ADQUIRIDOS EXPERIMENTALMENTE EM MODELO COM UTILIZAÇÃO DE LÂMINA PRFC**

<b>Ponto coletado</b>	<b>Deslocamento do punção(mm)</b>	<b>Força (N)</b>	<b>Ponto avaliado</b>
...	...	...	
117	3,87	23647,14	
118	3,90	23663,32	
119	3,93	23675,71	
120	3,97	23680,76	
121	4,00	23686,71	
<b>122</b>	<b>4,03</b>	<b>23690,13</b>	<b>Força máxima</b>
123	4,07	23685,43	
124	4,10	23679,04	
125	4,13	23670,51	
126	4,17	23658,43	
127	4,20	23640,77	
...	...	...	
2097	69,87	8805,28	
2098	69,90	8807,10	
2099	69,93	8806,30	
2100	69,97	8805,22	
<b>2101</b>	<b>70,00</b>	<b>8804,19</b>	<b>Força final</b>

**APÊNDICE C – DADOS ADQUIRIDOS EM SIMULAÇÃO DE MODELO SEM  
UTILIZAÇÃO DE LÂMINA PRFC**

<b>Ponto coletado</b>	<b>Deslocamento do punção(mm)</b>	<b>Força (N)</b>	<b>Ponto avaliado</b>
...	...	...	
9	2,27	21136,31	
10	2,59	21865,97	
11	2,91	22420,80	
12	3,23	22811,64	
13	3,55	22895,66	
<b>14</b>	<b>3,87</b>	<b>22788,79</b>	<b>Força máxima</b>
15	4,19	22585,49	
16	4,51	22560,63	
17	4,83	22458,13	
18	5,15	22253,76	
19	5,47	21967,28	
...	...	...	
217	68,80	7744,55	
218	69,12	7669,85	
219	69,44	7820,41	
220	69,76	7818,53	
<b>221</b>	<b>70,08</b>	<b>7856,52</b>	<b>Força final</b>

**APÊNDICE D – DADOS ADQUIRIDOS EM SIMULAÇÃO DE MODELO COM  
UTILIZAÇÃO DE LÂMINA PRFC**

<b>Ponto coletado</b>	<b>Deslocamento do punção(mm)</b>	<b>Força (N)</b>	<b>Ponto avaliado</b>
...	...	...	
15	4,51	20835,30	
<b>16</b>	<b>4,83</b>	<b>20852,75</b>	<b>Pico de força 1</b>
17	5,15	20760,06	
18	5,47	20672,78	
19	5,79	20500,89	
20	6,11	20358,75	
21	6,43	20120,19	
22	6,75	20160,28	
23	7,07	20357,07	
24	7,39	20587,68	
25	7,71	20773,98	
26	8,03	20903,29	
27	8,35	20945,99	
<b>28</b>	<b>8,67</b>	<b>21010,30</b>	<b>Pico de força 2</b>
29	8,99	20942,11	
...	...	...	
219	69,76	9268,38	
<b>220</b>	<b>70,08</b>	<b>9260,93</b>	<b>Força final</b>