

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

**WILLIAM PEGORARO**

**ANÁLISE NORMATIVA E ESTRUTURAL DE UMA POLTRONA DE ÔNIBUS  
ESCOLAR PARA USO NO MERCADO NORTE-AMERICANO**

**CAXIAS DO SUL  
2020**

**WILLIAM PEGORARO**

**ANÁLISE NORMATIVA E ESTRUTURAL DE UMA POLTRONA DE ÔNIBUS  
ESCOLAR PARA USO NO MERCADO NORTE-AMERICANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. André Alaniz Cesário.

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**WILLIAM PEGORARO**

**ANÁLISE NORMATIVA E ESTRUTURAL DE UMA POLTRONA DE ÔNIBUS  
ESCOLAR PARA USO NO MERCADO NORTE-AMERICANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Aprovado em 01/12/2020**

**Banca Examinadora**

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

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

Prof. Me. Vagner Grison  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram e estiveram comigo nesta etapa de minha vida: aos meus pais, Viviane e João, pelo zelo, incentivo e amor desde sempre, e por compreender os momentos de ausência. À minha namorada, Larissa, pela compreensão, apoio, amor, e por estar ao meu lado durante boa parte do período da graduação. À família, pelo incentivo e por me guiar na direção correta. Aos amigos e colegas, pela amizade, companheirismo e por não medirem esforços para me auxiliar nessa etapa tão importante. Aos professores e mestres, por compartilharem parte da sua experiência, zelando pelo aprendizado de qualidade em sala de aula; em especial ao meu orientador, André, por todas as horas desprendidas em prol deste trabalho. À Marcopolo S.A. e a todos os colegas envolvidos, por acreditar neste trabalho e fazer com que sua viabilidade fosse possível. Por fim, à Deus, que nos protege e coloca no caminho correto, na hora e com as pessoas certas.

## RESUMO

Com o passar dos anos, a indústria automotiva melhorou consideravelmente na questão da segurança veicular. No início da década de 60, após anos de desenvolvimento dos motores a combustão, notou-se que os veículos deveriam ter condições seguras de circulação. Isso incluía cintos de segurança em todos os assentos, estrutura que evitasse perfurações e invasão do habitáculo em caso de acidente, materiais resistentes contra a propagação de chamas e barreiras físicas no interior dos veículos para evitar que os ocupantes tivessem ferimentos durante uma colisão. No setor de transportes coletivos não foi diferente. Sobretudo, o transporte coletivo escolar tem se mostrado mais eficaz e seguro, sendo uma alternativa para levar crianças até a escola, já que um ônibus deste tipo é projetado para ter maior capacidade de absorção de energia, reduzindo os riscos de lesões dos passageiros em caso de colisão. O presente trabalho teve como objetivo analisar, do ponto de vista normativo e estrutural, a resistência mecânica de uma poltrona escolar, seguindo a normativa estadunidense FMVSS 222, que trata dos veículos escolares, buscando o atendimento da mesma. A análise foi realizada por meio do Método dos Elementos Finitos e validada experimentalmente, mostrando que o protótipo atendeu parcialmente os requisitos apresentados na normativa, sem apresentar falha estrutural, com deflexão do encosto abaixo do valor máximo especificado, porém com energia absorvida de 1.327 J, valor 2,18% abaixo do mínimo exigido. Vale ressaltar que a análise numérica se mostrou mais conservadora que a experimental em termos de tensão e energia absorvida, enquanto a deflexão do encosto foi maior, considerando a mesma carga aplicada.

**Palavras-chave:** Segurança veicular. Ônibus escolar. Poltrona. Método dos Elementos Finitos.

## ABSTRACT

Over the years, the automotive industry has improved considerably in terms of vehicle safety. In the early 1960s, after years of combustion engine development, it was noted that vehicles should have safe driving conditions. This included seat belt in all seats, a structure to prevent perforations and the invasion of the passenger compartment in the event of an accident, resistant materials against flame propagation and physical barriers inside the vehicles to prevent the occupants from being injured during a collision. In the public transport sector, it was no different. Specially, public school transport has been shown to be more effective and safer, being an alternative to take children to school, since a bus of this type is designed to have a greater capacity for absorbing energy, reducing the risk of injury to passengers in case of collision. The present work had as objective to analyze, from the normative and structural point of view, the mechanical strength of a school seat, following the American Regulation FMVSS 222, that deals with school vehicles, seeking to meet it. The analysis was performed using the Finite Element Method and validated experimentally, showing that the prototype partially meets the requirements presented in the standard, without presenting structural failure, with backrest deflection below the maximum specified value, but with an absorbed energy value of 1.327 J, value 2,18% below the minimum required. It is worth mentioning that the numerical analysis proved to be more conservative than the experimental one in terms of tension and absorbed energy, while the deflection of the backrest was greater, considering the same applied load.

**Key words:** Vehicle safety. School bus. Seat bus. Finite Elements Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transporte escolar americano.....	13
Figura 2 – Anúncio publicitário da NHTSA .....	15
Figura 3 – Método de aplicação das cargas na poltrona .....	17
Figura 4 – Modelo de barra para aplicação de cargas no encosto .....	19
Figura 5 – Poltrona com barras de carga no espaldar.....	20
Figura 6 – Curva força versus deflexão do encosto da poltrona.....	21
Figura 7 – Caminhos para resolução de problemas estruturais .....	23
Figura 8 – Malha discretizada .....	24
Figura 9 – Tipos de elemento e respectivos graus de liberdade.....	26
Figura 10 – Fontes de não linearidade em uma análise.....	30
Figura 11 – Efeito das grandes deformações no comportamento não linear da estrutura ....	31
Figura 12 – Efeito do contato na análise não linear .....	33
Figura 13 – Fluxograma de atividades .....	34
Figura 14 – Principais dimensões da poltrona utilizada.....	36
Figura 15 – Principais etapas do ensaio .....	38
Figura 16 – Barras de carga .....	39
Figura 17 – Curva Tensão x Deformação real para o aço Inox 304.....	40
Figura 18 – Curva Tensão x Deformação real para o aço LN 280 .....	40
Figura 19 – Curva Tensão x Deformação real para o aço ZAR 230 .....	41
Figura 20 – Curva Tensão x Deformação real para o Aço ZSTE 380 .....	41
Figura 21 – Modelo discretizado da barra de cargas .....	42
Figura 22 – Poltrona preparada em superfícies médias .....	43
Figura 23 – Condições de contorno e carregamento.....	44
Figura 24 – Poltrona discretizada representada por elementos bidimensionais .....	45
Figura 25 – Poltrona preparada para ensaio experimental.....	46
Figura 26 – Distribuição de tensões de von Mises na barra.....	47
Figura 27 – Deslocamentos apresentados.....	48
Figura 28 – Deflexão máxima resultante na poltrona .....	49
Figura 29 – Resultados da tensão para a poltrona.....	50
Figura 30 – Tensão máxima verificada.....	51
Figura 31 – Curva de força versus deflexão do encosto para a análise MEF.....	51
Figura 32 – Curva de força versus deflexão do encosto na condição até 5.900 N .....	52
Figura 33 – Curva de força versus deflexão na condição acima de 5.900 N .....	53
Figura 34 – Poltrona ao final do ensaio.....	53
Figura 35 – Comparativo entre as análises.....	54

Figura 36 – Comparativo entre as análises com curva numérica ajustada.....	55
Figura 37 – Comparativo entre as deformações em vista isométrica .....	56
Figura 38 – Comparativo entre as deformações laterais .....	56
Figura 39 – Comparativo entre as deformações da fixação ao assento .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de ocupantes em relação à largura do assento.....	17
Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.....	39
Tabela 3 – Deflexão do encosto no ponto de aplicação da carga superior .....	49

## LISTA DE SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
FMVSS	<i>Federal Motor Vehicle Safety Standard</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
PBT	Peso Bruto Total
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	OBJETIVOS.....	14
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
2.1	A NORMA AMERICANA PARA VEÍCULOS ESCOLARES.....	15
<b>2.1.1</b>	<b>Definições e pontos importantes.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Procedimentos de ensaio.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Requisitos para aprovação da poltrona.....</b>	<b>20</b>
2.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	21
<b>2.2.1</b>	<b>Tipos de análise.....</b>	<b>22</b>
2.2.1.1	Análise dinâmica ou estática.....	22
2.2.1.2	Análise linear e não linear.....	22
<b>2.2.2</b>	<b>Discretização.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Tipos de elementos.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Etapas de uma análise.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Matriz de rigidez.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Não linearidades envolvidas.....</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>34</b>
3.1	A POLTRONA ESCOLAR.....	35
3.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA DO ENCOSTO.....	37
3.3	PROJETO DA BARRA DE CARGAS.....	38
3.4	MATERIAIS.....	39
3.5	PRÉ PROCESSAMENTO.....	41
<b>3.5.1</b>	<b>Barra de carga.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Poltrona.....</b>	<b>43</b>
3.6	DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ABSORVIDA.....	45
3.7	PREPARAÇÃO DA POLTRONA PARA O ENSAIO EXPERIMENTAL.....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1	BARRA DE CARGAS.....	47
4.2	POLTRONA ANALISADA PELO MEF.....	48

4.3	POLTRONA AVALIADA EXPERIMENTALMENTE .....	52
4.4	COMPARATIVO DE RESULTADOS.....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o crescente desejo pela expansão de mercado por parte das empresas multinacionais, bem como a exigência mundial de nível de qualidade e confiabilidade elevados para os produtos, busca-se cada vez mais o aprimoramento de projetos, a otimização estrutural, o aumento do conforto e, principalmente, a segurança. Com base nisso, diversas indústrias, por meio de seus Engenheiros de Homologação, buscam traduzir e analisar as mais variadas normativas à nível mundial, com o intuito de enquadrar seus produtos no mercado pretendido, tornando-o comercializável globalmente.

Uma das legislações mais rígidas é a *Federal Motor Vehicle Safety Standard* (FMVSS), normativa norte-americana regulamentada pela *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA). Em suas mais de sessenta resoluções, a FMVSS trata de aspectos construtivos, dimensionais, estruturais e de segurança para veículos automotores. Orienta também a realização de testes em componentes de motocicletas, veículos automotores de passeio, veículos de carga leve, carga pesada e veículos para transporte de passageiros. Além disso, é utilizada como referência em diversas outras normas pelo mundo, incluindo normas brasileiras, no que diz respeito à inflamabilidade de materiais e métodos de ensaio de componentes.

Desta forma, a indústria automobilística é muito rigorosa no quesito normativo, tornando marcas como *Ford*, *Chevrolet*, *Dodge*, *Cadillac* e *Chrysler* referências em segurança e desempenho, características essas que às tornam cobiçadas e símbolos de robustez. Por conta disso, veículos fabricados seguindo normas norte-americanas são comercializados em praticamente qualquer lugar do planeta, dada sua ampla segurança e confiabilidade proporcionada.

Para o transporte coletivo de passageiros, cada vez mais este mercado busca a segurança e a redução de mortes e ferimentos durante acidentes, visto que isso gera, além das perdas humanas, custos para o governo com seguros de vida, assistência médica e psicológica. No que diz respeito ao transporte escolar, o assunto é ainda mais delicado, visto que o mercado americano se preocupa com a segurança dos estudantes no trajeto para a escola, principalmente após 1939, quando foram desenvolvidos os primeiros padrões mínimos para ônibus escolares (Business Insider, 2020).

A Figura 1 ilustra um ônibus escolar americano, no qual percebe-se o aparato de segurança utilizado, como luzes delimitadoras superiores frontais e um equipamento em formato de placa, que é acionado quando o veículo para na via de trânsito. Tais dispositivos indicam a passagem de crianças, que podem facilmente não serem vistas por outros veículos.

Figura 1 – Transporte escolar americano



Fonte: Aventura Americana (2015).

Dentro das normativas da FMVSS, a Resolução número 222 trata das poltronas para passageiros nos ônibus escolares, no que tange a sua integridade estrutural, quando solicitada mecanicamente. Nesse ponto em específico, há requisitos que devem ser cumpridos pela poltrona e o veículo para que os mesmos possam ser comercializados.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Para comercializar produtos internacionalmente, além da concorrência de indústrias do mesmo segmento e apoio governamental às empresas locais de cada país, a questão regulamentadora é um grande empecilho. Um produto utilizado no Brasil, dificilmente atenderá por completo as exigências de outros locais. Isso ocorre pelo fato de cada nação ter sua legislação própria e subdividir-se em outras tantas, específicas para cada região onde o produto será utilizado.

No setor de transporte coletivo, as diferenças vão desde à obrigatoriedade de dispositivos de acessibilidade, especificações da via, como altura, largura, comprimento e peso bruto total (PBT), controle de emissões de poluentes e nível de segurança. À vista disso, necessita-se de um projeto estrutural próprio para cada país onde o veículo é destinado. Esses requisitos são comprovados em ensaios que verificam a resistência da carroceria, componentes internos, poltronas, janelas e materiais que estão em contato direto ou indireto com os ocupantes.

Desta forma, justifica-se a utilização de técnicas computacionais, a exemplo do Método dos Elementos Finitos (MEF), para mensurar numericamente a resistência dos componentes veiculares, em específico, as poltronas dos passageiros, que serão objeto de estudo do presente trabalho. Logo, *softwares* baseados neste método auxiliam na verificação do atendimento das especificações normativas mais diversas, permitindo o desenvolvimento

de um projeto adequado para a localidade de destino do veículo. Com uma análise preliminar, posteriormente poderão ser validados os resultados, através de um protótipo físico, utilizando-se das cargas aplicadas no método computacional. Por fim, pode-se analisar a viabilidade técnica e normativa de um veículo de transporte escolar da empresa Volare, uma das controladas da Marcopolo S.A., ser comercializado no mercado norte-americano.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo analisar, numérica e experimentalmente, do ponto de vista normativo e estrutural, a viabilidade do uso de uma poltrona de ônibus escolar, utilizada no mercado brasileiro e fabricada pela empresa Marcopolo S.A., ser empregada em um projeto para o mercado norte-americano.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

A fim de garantir que o objetivo geral proposto seja atendido, tornam-se necessários cumprir alguns objetivos específicos, descritos a seguir:

- a) estabelecer, com base na normativa FMVSS, número 222, as condições de ensaio e os critérios de aprovação para a poltrona;
- b) projetar e simular estruturalmente, por meio de análise numérica, a integridade estrutural dos dispositivos para realização do ensaio;
- c) simular, com o uso de *software* de análise numérica apropriado, a resistência mecânica da poltrona, modelo Escolar 1000, de acordo com os carregamentos propostos na normativa;
- d) verificar o atendimento da poltrona aos critérios estabelecidos;
- e) avaliar experimentalmente a estrutura da poltrona aprovada por método numérico;
- f) comparar a análise numérica e o ensaio experimental, no que diz respeito a deflexão do encosto e a energia absorvida pelo mesmo, identificando pontos críticos na estrutura da poltrona e as diferenças entre os modelos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho. De maneira geral, a análise da normativa estadunidense que trata de veículos escolares e o uso do Método dos Elementos Finitos são os temas centrais deste texto. Para tanto, serão abordados os principais itens normativos que tratam do ensaio estrutural de uma poltrona escolar, bem como a formulação e utilização da análise numérica.

### 2.1 A NORMA AMERICANA PARA VEÍCULOS ESCOLARES

A NHTSA é uma agência do governo federal americano, vinculada ao Departamento de Transportes, que tem como missão salvar vidas, prevenir lesões e reduzir acidentes envolvendo veículos (NHTSA, 2020). Possui, dentre outras divisões, uma que trata em específico da segurança nas estradas (*road safety*) e, dentro desta, está a segurança dos ônibus escolares. Segundo a própria agência, “O ônibus escolar é o mais seguro veículo na estrada – seu filho está muito mais seguro pegando um ônibus de e para a escola do que viajando de carro”. Por esse motivo, as legislações para ônibus escolares são mais rigorosas do que para ônibus regulares de transporte. Como pode ser observado na Figura 2, que é um anúncio publicitário da NHTSA, há grande preocupação com a segurança no trajeto até a escola.

Figura 2 – Anúncio publicitário da NHTSA



Fonte: Adaptado de NHTSA (2020).

Dentro das resoluções da FMVSS, há dois possíveis grupos onde um veículo escolar se enquadra, dependendo do seu Peso PBT: ônibus escolares grandes (*large school buses*), com PBT maior que 4.536 kg (10.000 libras) e ônibus escolares pequenos (*small school buses*), com PBT igual ou menor a 4.536 kg. Por possuírem um *design* diferenciado, serem mais robustos e pesados, ônibus escolares grandes apresentam uma dissipação de energia diferente dos veículos de passeio e dos ônibus escolares pequenos. Isso ocorre, pois, sua área de contato, tanto frontal e traseira, quanto lateral, é maior (devido às suas dimensões) e a energia é dissipada mais uniformemente. À vista disso, esta categoria de ônibus possui o conceito de compartimentalização<sup>1</sup>.

Desta forma, em caso de uma freada brusca ou acidente, o que garante a proteção é a estrutura da poltrona da frente (o encosto) à qual o ocupante está sentado, ou a parede de separação que divide o posto do motorista do salão dos passageiros. Nesse aspecto, a FMVSS número 222 exige e orienta que os ônibus escolares grandes ofereçam essa proteção, estando os usuários respaldados sem a necessidade de utilizar o cinto de segurança afivelado (FMVSS 222, 1976).

### 2.1.1 Definições e pontos importantes

Para iniciar a análise da poltrona, devem ser observadas algumas definições citadas na normativa FMVSS número 222, com o intuito de aplicá-la em um veículo escolar de transporte de passageiros. Tais definições, aliadas aos conhecimentos de engenharia e embasamento teórico, levarão ao desenvolvimento e aplicação do ensaio de resistência proposto.

Segundo a normativa, recomenda-se que todos os ocupantes estejam sentados inteiramente dentro dos limites do assento, enquanto o veículo estiver em movimento. Para isso, deve-se dividir a largura nominal do assento da poltrona por 380 mm (este valor representa a largura mínima que uma criança americana ocupa no assento), arredondando o resultado da divisão para o número inteiro mais próximo. O valor obtido é a quantidade máxima de passageiros que podem viajar sentados na poltrona, conforme indicado na Tabela 1. Esse número de ocupantes é representado pela letra *W*, sendo posteriormente multiplicado pela carga aplicada na poltrona durante o ensaio de resistência, indicando o valor de energia teórico que cada passageiro exerce ao colidir contra o encosto.

---

<sup>1</sup> Conceito utilizado na normativa, que representa a proteção passiva do ocupante somente com elementos que estão em seu entorno, como poltronas, parede divisória, paredes laterais, teto, etc.

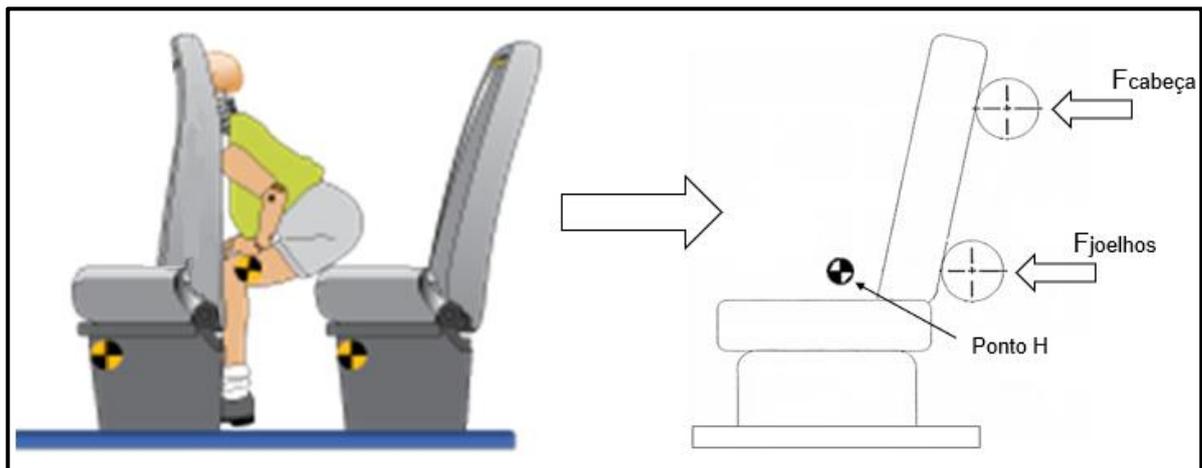
Tabela 1 – Número de ocupantes em relação à largura do assento

Largura do assento (mm)	380 a 659	660 a 989	990 ou maior
Ocupação máxima - $W$	1	2	3

Fonte: Adaptado de FMVSS número 222.

O ensaio de aplicação das cargas simula uma colisão contra a parte posterior do encosto da poltrona, onde o ocupante bate os joelhos e, posteriormente, a cabeça, na parte traseira da mesma (também conhecida como espaldar). Já em uma colisão na traseira do veículo, a aplicação da carga na poltrona simula o comportamento do encosto sendo compelido pela cabeça (o chamado efeito chicote que a cabeça realiza na poltrona). A Figura 3 exemplifica como as cargas devem ser aplicadas no espaldar, simulando o choque de um ocupante da poltrona logo atrás, sem o cinto de segurança afivelado.

Figura 3 – Método de aplicação das cargas na poltrona



Fonte: Adaptado de Safeguard Seat (2020).

As cargas devem ser aplicadas com relação a um ponto fixo, denominado de ponto de referência do assento (*Seating Reference Point*). Esse ponto simula a articulação do tronco com a coxa de um ocupante sentado, conforme descreve a *Society of Automotive Engineers* (SAE), nas suas normas SAE J826 (1995) e SAE J1100 (2009). Tal ponto é específico para cada projeto de poltrona, sendo estabelecido pelo projeto da mesma, servindo como referência para aplicação de esforços e determinação da resistência mecânica e critérios de aprovação da estrutura.

O ponto de referência do assento é conhecido em outras literaturas como Ponto H, como mostrado na Figura 3. A diferença consiste no fato de que, enquanto o ponto H pode variar, dependendo dos níveis de reclinção do encosto, o ponto de referência do assento é fixo, definido para qualquer posição sentada da poltrona. No caso de não ser conhecido o

ponto de referência do assento, ou a poltrona não possuir reclinções, o mesmo pode ser considerado como o ponto H da poltrona.

### **2.1.2 Procedimentos de ensaio**

No presente trabalho, a poltrona será ensaiada numericamente e, após, os resultados serão verificados de forma experimental. Além de cumprir com requisitos dimensionais estabelecidos pela normativa FMVSS número 222, deve ter sua resistência mecânica testada em uma das condições de ensaio descritas. Os requisitos para aprovação são:

- a) ser submetida a cargas aplicadas em seu espaldar;
- b) ser submetida a cargas de compressão para trás;
- c) ser submetida ao ensaio de impacto de cabeça;

O item (a), específico da resistência do encosto quando submetido à carga aplicada no espaldar, é válido para todas as poltronas do veículo que tiverem outra à sua frente. Representa, assim, o anteparo no qual o indivíduo pode vir a colidir em um acidente ou freada brusca do veículo, não estando com o cinto de segurança afivelado (conforme exemplifica a Figura 3). Devem ser aplicados carregamentos estáticos principais e, posteriormente, acrescentado um valor de força para deformar o encosto, onde espera-se que o mesmo absorva 1.356 J de energia durante a deflexão. Para este ensaio, devem ser observadas as posições das barras de carregamento para aplicação de tais cargas. Os valores e o método de realização do ensaio serão discutidos no Capítulo 3.

O item (b) testa a resistência do encosto quando submetido à carga aplicada para trás, simulando uma colisão na traseira do veículo, onde a energia do usuário que está sentado na poltrona é projetada em direção ao encosto. Logo, devem de ser aplicados carregamentos em regime estático, conforme descrito na normativa.

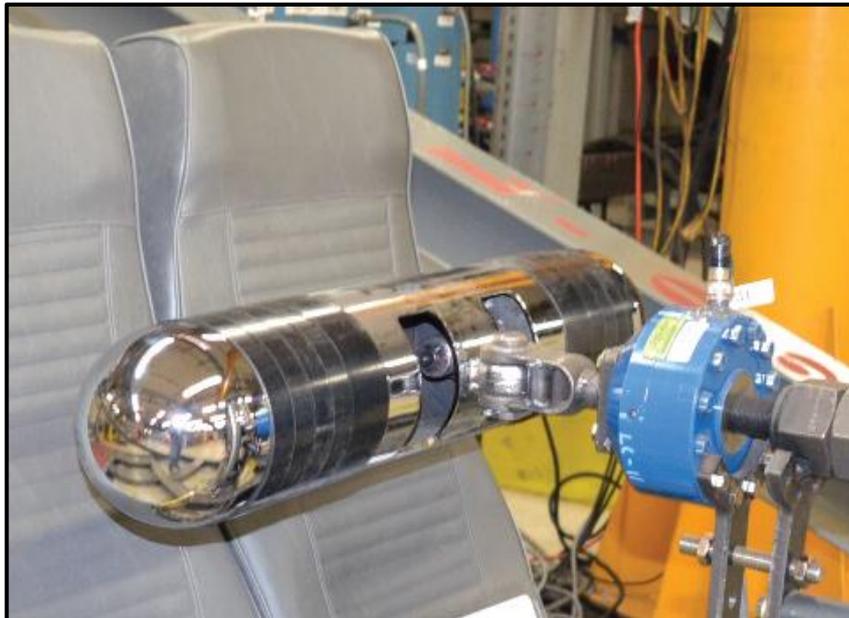
Por conseguinte, o item (c) é relacionado aos requisitos da zona de impacto da cabeça, uma área delimitada na base do encosto onde é simulado o impacto da cabeça do ocupante contra o encosto, descrevendo também o procedimento de ensaio e as cargas que devem ser aplicadas.

Estes requisitos de teste são equivalentes às normas da União Europeia para ensaio e aprovação das poltronas, variando as cargas aplicadas, devido a estatura e dimensões corporais da população daquela região geográfica. Segundo a legislação, é recomendado que uma poltrona possa cumprir qualquer um destes requisitos. Contudo, mediante ensaio experimental, seguindo qualquer um dos métodos práticos descritos, o cumprimento de somente um dos itens supracitados a torna aprovada perante toda a norma, podendo ser então comercializada no mercado estadunidense.

As cargas são aplicadas por meio de uma barra rígida, que é o único elemento que entra em contato com a poltrona durante a realização do ensaio. A barra para aplicação das cargas deve ter formato cilíndrico, com diâmetro externo de 152 mm, extremidades hemisféricas com raio de 76 mm e rugosidade superficial máxima de 1,6  $\mu\text{m}$ . Seu comprimento deve ser em torno de 102 mm menor que a largura do encosto da poltrona à qual será utilizada.

O mecanismo de acionamento que aplica a força é um pivô no ponto central da barra de carga, permitindo que a mesma gire no mínimo em um plano horizontal  $30^\circ$  em qualquer direção, a partir da posição transversal. A Figura 4 exemplifica como a barra deve ser projetada para atender a normativa, incluindo o pivô para fixação da barra ao dispositivo que aplica da força.

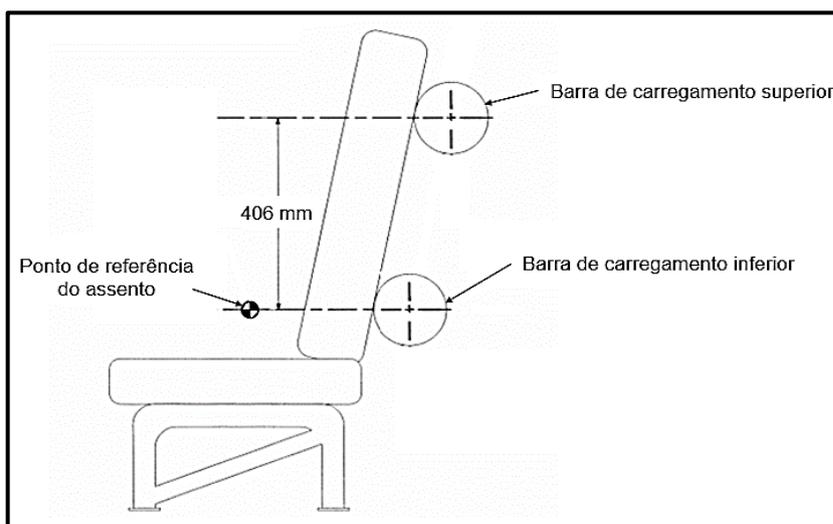
Figura 4 – Modelo de barra para aplicação de cargas no encosto



Fonte: Freedman Seating Company (2020).

A Figura 5 demonstra a posição correta para aplicação das cargas no espaldar da poltrona. Uma das barras deve ser posicionada em uma faixa 102 mm acima ou abaixo do ponto de referência da poltrona (na Figura 5, a barra está coincidindo com o plano longitudinal do ponto de referência), e outra barra à 406 mm acima deste ponto.

Figura 5 – Poltrona com barras de carga no espaldar



Fonte: Adaptado de FMVSS 222.

### 2.1.3 Requisitos para aprovação da poltrona

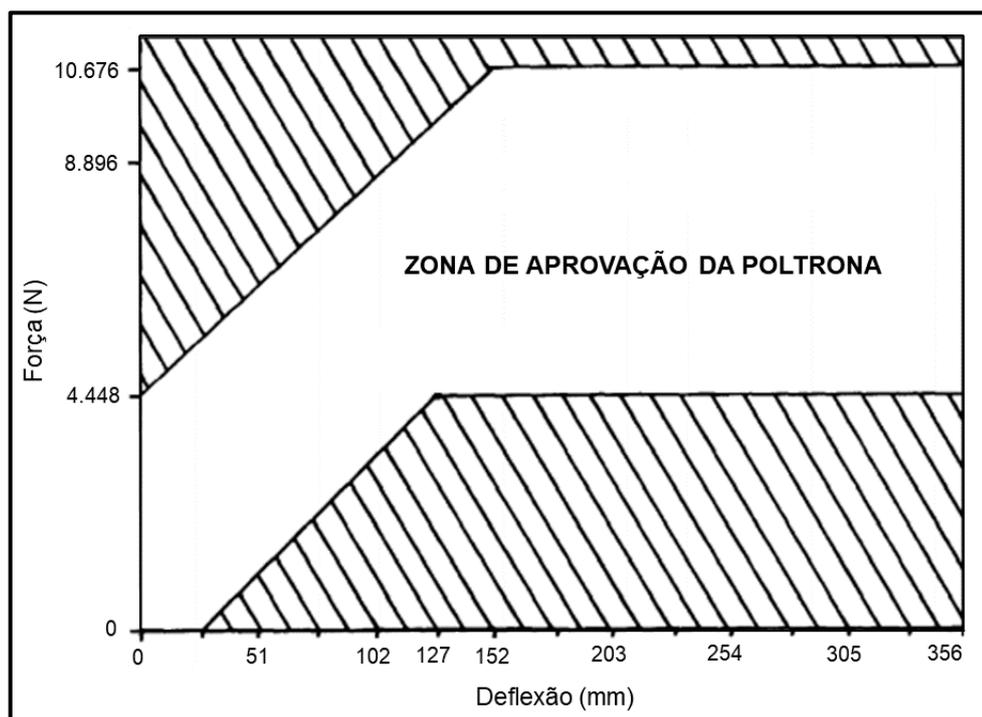
Para ser aprovada conforme ensaios já previamente descritos, a poltrona deve cumprir alguns requisitos normativos. Assim, quando aplicada carga no espaldar, a poltrona:

- deve ter a curva força *versus* deflexão do encosto situada na zona sem hachuras da Figura 6;
- não deve apresentar deflexão do encosto acima de 356 mm;
- não deve invadir mais do que 102 mm qualquer projeção ou parte de outra poltrona ou barreira de restrição instalada próxima à mesma;
- não deve separar-se do veículo ou módulo de teste em nenhum ponto de fixação;
- não deve se separar de seus componentes em nenhum ponto de fixação.

Para determinação dos itens (a) e (b), a curva força *versus* deflexão descreve a força aplicada através da barra de carga superior, bem como seu deslocamento horizontal, medido a partir do ponto em que a aplicação de uma pré-carga inicial de 44 N é atingida.

A Figura 6 deve ser comparada com o gráfico força *versus* deflexão do encosto quando a carga na traseira da poltrona for aplicada. Tal curva pode ser plotada com os dados de saída do *software*, ao final da análise numérica, bem como durante a análise experimental, por meio do sistema integrado do dispositivo que aplicará as cargas. Tais gráficos, aliados à Figura 6, servem como alicerce fundamental na verificação da aprovação da poltrona perante a normativa, no que diz respeito à deflexão máxima permitida para o encosto e a energia absorvida.

Figura 6 – Curva força versus deflexão do encosto da poltrona



Fonte: Adaptado de FMVSS 222.

## 2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A análise de um conjunto estrutural nem sempre é uma tarefa simples. Na quase totalidade dos casos, as estruturas avaliadas são compostas de elementos com diversos materiais e que não podem ser analisados separadamente, já que o resultado da aplicação das cargas no sistema não é distribuído por igual sobre cada elemento estrutural. Para isso, é necessário empregar-se métodos numéricos que, desde a década de 1960, são facilitados pela popularização dos computadores, e fortemente utilizados na resolução deste tipo de análise (FISH E BELYTSCHKO, 2009). Este mecanismo de soluções numéricas é conhecido como Métodos dos Elementos Finitos.

Os métodos analíticos clássicos permitem o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões em todos os pontos da estrutura por intermédio de funções matemáticas, já que a geometria e os carregamentos envolvidos são simples e bem definidos. Para problemas diferentes deste escopo, a solução é aproximada, devendo ser utilizados métodos computacionais, a exemplo do MEF. Segundo Alves Filho (2009), o princípio do MEF é a discretização de um sistema contínuo, considerando-se a divisão da estrutura avaliada em pequenas partes distintas, conectadas entre si por pontos discretos, chamados de nós. Entende-se por contínuo toda a região limitada de matéria isenta de vazios, tais como furos, trincas ou poros. A solução numérica tratada simula a estrutura como uma

montagem de elementos com tamanho finito, e não diferencial. Por esse motivo, a análise tem uma solução finita de resultados, normalmente convergindo para um valor, depois de  $n$  iterações.

Apesar de ter sido inicialmente desenvolvido para aplicações estruturais, como análises lineares de estruturas, vibrações livres e forçadas, análises não lineares, plasticidade e instabilidade estrutural, o MEF se mostra efetivo também para resolução de problemas no campo fluidodinâmico, eletromagnético, térmico e hidrodinâmico. São assim chamados de *softwares* do tipo multifísica, utilizados na resolução simultânea de problemas físicos de áreas distintas, sendo aplicados em todas as áreas de ciências exatas.

### **2.2.1 Tipos de análise**

Quando há necessidade de se resolver um problema de análise estrutural, as primeiras questões que devem ser levantadas se referem à geometria, material constituinte e ações que serão aplicadas (AZEVEDO, 2003). Dependendo de como o MEF for aplicado, o modelo pode não representar o problema em estudo, levando a simplificações grosseiras e resultados incoerentes. Inicialmente, deve-se levar em consideração que uma análise pode ser dinâmica ou estática e linear ou não-linear.

#### **2.2.1.1 Análise dinâmica ou estática**

A análise dinâmica considera que as cargas são aplicadas em um intervalo curto de tempo, como por exemplo em uma colisão veicular, ou ainda, quando a frequência de aplicação dos carregamentos é próxima de alguma frequência natural da estrutura. Neste caso, as forças de inércia associadas às acelerações que cada um dos componentes fica sujeito devem ser consideradas, pois afetam no resultado da análise, já que as cargas variam rapidamente com o tempo (AZEVEDO, 2003). Já na análise estática, a força de inércia pode ser desprezada, já que a aplicação de carga na estrutura ocorre de modo lento, sendo que o carregamento é praticamente invariável ao longo do tempo.

#### **2.2.1.2 Análise linear e não linear**

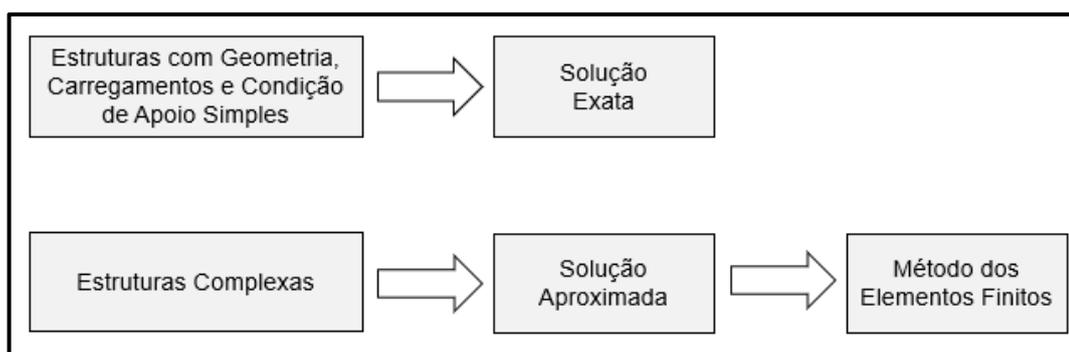
Uma estrutura apresenta comportamento linear quando os deslocamentos resultantes na estrutura variam linearmente com o carregamento atuante (ALVES FILHO, 2008). Na prática, os sistemas lineares têm proporcionalidade entre causa e efeito, onde, aplicando uma maior carga à estrutura avaliada, maior serão os valores de deslocamento,

deformação e tensão, mantendo-se a rigidez da estrutura constante. Esta rigidez é um dado que deve ser conhecido no início da resolução do problema.

Nos casos em que esta simplificação não possa ser considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análise não linear. Na mecânica estrutural, um conjunto é não linear quando a rigidez da estrutura depende dos deslocamentos. Isso ocorre, pois, a estrutura possui uma rigidez que varia com o estágio de carregamento em que a mesma se encontra (ALVES FILHO, 2012).

Algumas diferenças primordiais caracterizam a análise linear e não linear, sendo a mais expressiva, o método de resolução. A análise não linear tem uma complexa formulação do problema e maior tempo para encontrar um resultado, já que é um método iterativo. O *software* de análise MEF irá aproximar os resultados calculados, depois de  $n$  iterações realizadas, buscando uma solução convergente. As iterações visam garantir o equilíbrio entre as forças externas e internas. Em acréscimo ao valor exato, a matriz de rigidez também é recalculada a cada incremento de carga, até que se alcance uma tolerância (diferença entre as forças internas e externas, que devem ficar dentro de um limite máximo). Uma análise linear é normalmente resolvida em poucos minutos, enquanto a não linear, por ser iterativa, pode levar até dias para convergir (ALVES FILHO, 2012). A Figura 7 representa de forma mais clara o caminho que deve ser seguido para a resolução de uma análise, dependendo do grau de complexidade da estrutura.

Figura 7 – Caminhos para resolução de problemas estruturais



Fonte: Adaptado de Alves Filho (2012).

### 2.2.2 Discretização

Para avaliar o comportamento de uma estrutura que é analisada numericamente, é necessário uma discretização adequada do modelo. Assim sendo, deve-se segmentar a mesma em elementos de tamanho adequado e com dimensão definida, chamados de elementos de malha. A partir disso, aplicam-se condições de contorno para a resolução do problema pretendido. Por consequência da discretização, um componente relativamente

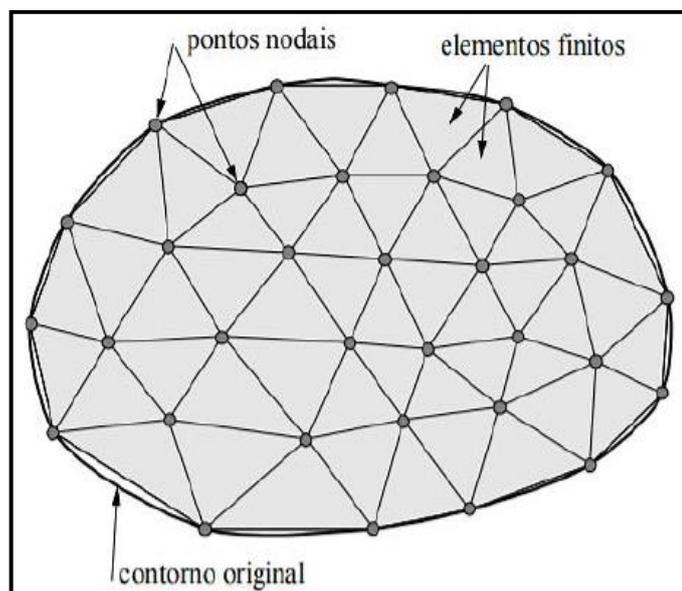
complexo e com formas irregulares é resumido em elementos de malha com tamanho finito, com dimensões que variam conforme o refino e modelo de elemento utilizado na malha (ALVES FILHO, 2009).

Elementos menores produzem resultados mais refinados e precisos, devido ao tamanho da malha e maior divisão do componente para a análise. Como afirmam Chandrupatla e Belegundu (2014), o fato de todos os elementos serem similares e bem definidos, é a razão pela qual o MEF é bastante adequado à implementação em problemas estruturais complexos.

Alves Filho (2009) afirma que a maneira como os elementos se comportam entre os nós depende do tipo de elemento escolhido para análise, bem como das propriedades atribuídas aos mesmos. Com o conhecimento a respeito do deslocamento dos nós, pode-se calcular o comportamento interno de cada elemento, o nível de deformação e tensão podendo, assim, prever falhas pontuais na estrutura. Portanto, o deslocamento nodal é o parâmetro utilizado para calcular numericamente as tensões e deformações, à qual a estrutura foi sujeita durante a análise.

Segundo Souza (2003), as subdivisões do domínio, ou elementos finitos, são conectadas por meio dos nós, formando a malha, similar à apresentada na Figura 8. Percebe-se que o modelo apresentado na referida figura possui elementos que não preenchem totalmente o contorno original do corpo em análise. Isso indica que o refino da malha não está adequado para o modelo. Isso pode ser causado pela seleção inapropriada do tipo de elemento, tipo de malha, tamanho dos elementos (*sizing*), ou ainda a falta de experiência do analista CAE.

Figura 8 – Malha discretizada



Fonte: Souza (2003).

Azevedo (2003) explica que as estruturas podem ser classificadas, quanto à sua geometria, em reticuladas, laminares ou sólidas. As reticuladas são estruturas do tipo treliça, viga, pórtico e grelha, sendo formadas por barras prismáticas cuja seção transversal possui dimensões muito menores do que seu comprimento ao longo do eixo. Estruturas laminares são as que apresentam espessura muito inferior às demais dimensões, sendo que a carga aplicada não é influenciada por esse parâmetro. Exemplos destas são as placas, cascas e chapas, que formam diversos componentes veiculares, como a estrutura do chassi, chapas que revestem a carroceria, além das poltronas. Geometrias não englobadas nos dois tipos descritos anteriormente são chamadas de sólidas.

Uma estrutura reticulada pode ser definida como um conjunto onde os diversos membros interagem e trocam forças entre si somente nas juntas ou nós. Desta forma, os deslocamentos nodais são compartilhados entre os elementos que constituem a estrutura. Para a resolução deste tipo de modelo discretizado, as equações de equilíbrio são suficientes. Já para estruturas contínuas (laminares e sólidas), é feita uma representação aproximada de um corpo contínuo, já que os diversos trechos do mesmo não estão conectados apenas em alguns pontos, mas formando uma rede de nós interligada (ALVES FILHO, 2009). Com isso, consideram-se algumas condições adicionais, além da imposição do equilíbrio e da compatibilidade apenas nos nós do modelo.

Conforme Alves Filho (2009), estruturas constituídas por elementos cujas conexões são discretas na própria estrutura real (formadas por barras prismáticas), apresentam menor dificuldade no procedimento de montagem das equações que governam o comportamento do sistema. Por outro lado, estruturas cuja subdivisão dos elementos é artificial no modelo (sólidos, chapas e estruturas mais complexas) estão sujeitas, além do mesmo processo de modelagem das estruturas reticuladas, a procedimentos adicionais. Isso ocorre pois há maior dificuldade em estabelecer condições de compatibilidade de deslocamentos ao longo dos contornos comuns dos elementos.

Os elementos infinitesimais apresentam um estado de tensão que age em torno de cada ponto do sólido, sendo caracterizado pelas componentes de tensão normal  $\sigma$ , que atuam na direção normal das superfícies, representando os esforços de tração e compressão; e tensão cisalhante  $\tau$ , atuando perpendicularmente às superfícies, e representa os esforços de cisalhamento (HIBBELER, 2009).

### **2.2.3 Tipos de elementos**

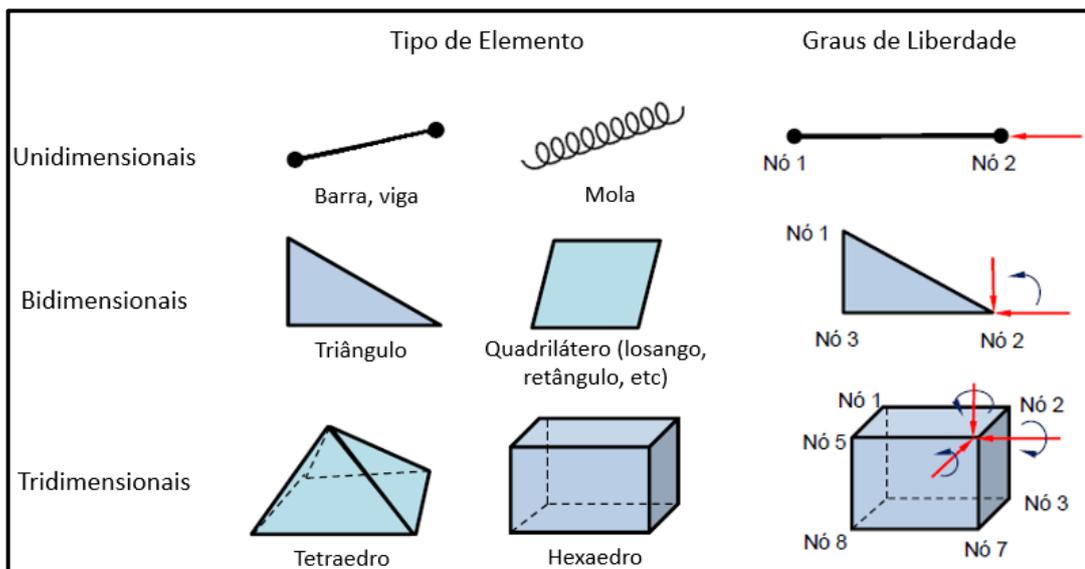
A seleção do modelo de elemento apropriado para a resolução do problema pode ser feita considerando a facilidade de geração da malha, a forma primordial da estrutura em análise, bem como os materiais que a compõe e o formato dos mesmos (vigas, tubos, chapas,

etc). Usualmente, cada *software* de elementos finitos oferece uma biblioteca com os diversos elementos que representam um diferente comportamento físico conhecido da mecânica estrutural (estado plano de tensões, placas, cascas, membranas, sólidos, etc) (ALVES FILHO, 2009). Esse comportamento é descrito por meio das funções matemáticas que representam o comportamento interno do elemento, bem como o equilíbrio entre forças que agem no sólido em análise. Como afirmam Fish e Belytschko (2009), os elementos podem ser:

- a) unidimensionais: representam geometrias reticuladas, apresentando elementos como barra, viga e mola;
- b) bidimensionais: representam geometrias laminares, apresentando os elementos placas, cascas, triângulos e retângulos;
- c) tridimensionais: representam geometrias sólidas, apresentando os elementos tetraedro e hexaedro).

Além disso, o número de graus de liberdade por nó de cada elemento é outro fator intrínseco ao selecionar um elemento. Elementos unidimensionais possuem apenas um grau de liberdade, somente na direção da aplicação do esforço. Elementos bidimensionais apresentam três graus de liberdade (movimento nos eixos horizontal e vertical, além da rotação), e elementos tridimensionais com seis graus de liberdade (movimento horizontal, vertical e longitudinal, além da rotação nestes três eixos). A Figura 9 exemplifica os tipos de elementos mais utilizados na análise numérica, bem como seus respectivos graus de liberdade.

Figura 9 – Tipos de elemento e respectivos graus de liberdade



Fonte: Adaptado de Oliveira Azevedo (2020).

#### 2.2.4 Etapas de uma análise

Os passos para a resolução de uma análise por MEF podem variar dependendo do *software* utilizado. Entretanto, a sequência de procedimentos é a mesma, começando pelo pré-processamento, passando pelo processamento e finalizando no pós-processamento. Fish e Belytschko (2009) dividem ainda em dois passos adicionais, que nada mais são do que os procedimentos já descritos, porém abordando com maior ênfase a importância de cada um:

- a) pré-processamento: subdivisão do domínio do problema em elementos finitos;
- b) formulação dos elementos: desenvolvimento de equações para os elementos;
- c) montagem: obtenção do sistema global de equações, a partir das equações individuais dos elementos;
- d) resolução das equações;
- e) pós-processamento: determinação e visualização dos valores de interesse.

Para Chandrupatla e Belegundu (2014, p. 462), “O pré-processamento abrange a preparação de dados, como coordenadas nodais, conectividade, condições de contorno e informações de carregamento e material”. Nesta etapa, é identificado o problema a ser resolvido e realizada a discretização do modelo. Para tanto, esta é aplicada pensando no modelo mais conveniente que descreva a estrutura avaliada. É a etapa mais demorada do processo, em que os dados devem ser corretamente inseridos, minimizando equívocos ou resultados incoerentes com o comportamento real. Nesta etapa, a matriz de rigidez também é gerada.

No processamento, o *software* irá aplicar as condições pré-estabelecidas, utilizando o modelo matemático que descreve o deslocamento dos nós, para então fazer o processamento dos cálculos. Nesta etapa, as equações são resolvidas e os dados de deformação e tensões no modelo são avaliados.

Na etapa de pós-processamento, os deslocamentos nodais, configuração deformada, formas nodais e distribuição de tensão são calculadas e exibidas (CHANDRUPATLA E BELEGUNDU, 2014). A apresentação dos resultados pode ser por meio de figuras, tabelas e gráficos, facilitando a análise do fenômeno físico estudado (ALVES FILHO, 2012). Além disso, podem ser mensuradas outras propriedades mecânicas, exibidas conforme necessidade. Cada *software* possui uma relação de resultados que podem ser calculados e exibidos, devendo o usuário escolher o que melhor se adapta à sua necessidade.

#### 2.2.5 Matriz de rigidez

A rigidez da estrutura é o conceito fundamental da análise, variando, agora, com o carregamento imposto. Deste modo, ao analisar uma estrutura pelo MEF, a tarefa

fundamental consiste em determinar a matriz de rigidez de cada um de seus elementos e, por consequência, a matriz de rigidez da estrutura inteira (ALVES FILHO, 2012). A partir do momento em que o *software* calcula e gera a malha, a matriz de rigidez está finalizada.

A Equação 1 ilustra o comportamento de qualquer sistema em que há forças sendo aplicadas e um deslocamento acontecendo. No caso de uma mola, por exemplo, a constante elástica  $K$ , que é a medida quantitativa da rigidez, é expressa por intermédio da relação entre a força aplicada e o deslocamento na extremidade da mola, podendo ser entendida como seu coeficiente de rigidez. Extrapolando para uma análise linear mais complexa,  $[K]$  é a matriz de rigidez do sistema, que contém os coeficientes de rigidez de cada elemento e, por fim, de toda a estrutura analisada, já que, ao final da análise, a soma das rigidezes dos elementos fornece a rigidez do sistema. Esta matriz estabelece a correspondência entre forças e deslocamentos nodais. Já a matriz  $\{U\}$  representa os deslocamentos associados aos elementos, e na matriz  $\{F\}$  estão os componentes de força que justificam a deformação dos elementos.

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad (1)$$

Implementando-se uma relação constitutiva não linear entre as tensões e as deformações, o vetor das forças internas  $\{F\}$  passa a depender não linearmente do vetor dos deslocamentos  $\{U\}$ . Assim, torna-se necessária a implementação de uma solução incremental e iterativa (CRISFIELD, 1991 apud SOUTO FILHO, 2003).

A matriz de rigidez relaciona forças internas nodais dos elementos aos seus respectivos deslocamentos (FISH; BELYTSCHKO, 2009). Utilizando a notação matricial, podem ser descritas as forças e deslocamentos nodais para um elemento, neste exemplo, com dois nós, representados nas matrizes coluna a seguir:

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}$$

A matriz  $[K]$  de rigidez do elemento que relaciona estas matrizes é obtida pela aplicação da Lei de Hooke, das equações de tensão-deformação e com base nas condições de equilíbrio, chegando-se na Equação 2:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

A Equação 3 relaciona o valor da rigidez atualizada,  $[K]_{\text{incremento}}$ , que é a soma da rigidez inicial  $[K]_0$  (recebida pelo *software* no momento em que a malha está gerada) com a matriz de rigidez geométrica  $[K]_G$ , referente a geometria deformada que contabiliza as forças internas resultantes do último incremento de carga. Já na Equação 4, o incremento da força  $\{F\}$  atuante na estrutura é dado com base na rigidez atualizada e no incremento de deslocamento. Com base nestas equações, o *software* de análise MEF recalcula os valores de K a cada incremento de carga no sistema, atualizando também o deslocamento e a rigidez individual de cada elemento, buscando a convergência do resultado.

$$[K]_{\text{incremento}} = [K]_0 + [K]_G \quad (3)$$

$$\{F\} = [K]_{\text{incremento}} \cdot \{\Delta\} \quad (4)$$

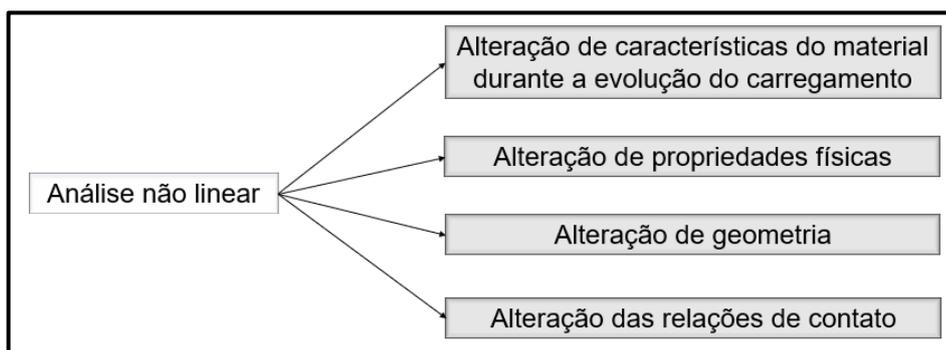
Alves Filho (2012) afirma que o procedimento de cálculo da matriz de rigidez deve ser atualizado durante a análise, já que esta não se mantém constante. Esta atualização precisa ser feita por meio da análise incremental, ou seja, a cada incremento de carga na estrutura analisada, devem ser observados os deslocamentos decorrentes para o cálculo da nova rigidez neste intervalo.

Para a análise não linear, são requeridas repetidas soluções das equações de equilíbrio, de forma que as forças internas calculadas sejam coerentes com os deslocamentos de todos os nós do modelo, no processo incremental ao qual se aplicou um incremento de carga. Em decorrência disso, é proposto um incremento de deslocamentos de todos os nós, com base na rigidez inicial do incremento, sendo acrescentado a cada novo incremento, até que as forças externas sejam equilibradas pelas forças internas (ALVES FILHO, 2012).

### 2.2.6 Não linearidades envolvidas

Algumas características do material e da estrutura avaliada contribuem para não linearidades, conforme ilustrado na Figura 10. Nestes casos, a matriz de rigidez não é constante durante a análise, sendo as soluções analíticas inapropriadas para resolução deste tipo de problema. À medida que a estrutura recebe acréscimos de carga, novos fenômenos vão ocorrendo em seu interior, e a matriz de rigidez é progressivamente alterada, sendo que cada elemento individualmente irá apresentar uma rigidez diferente, contribuindo para a formação da rigidez global da estrutura. Nestes casos, os resultados de tensão, deformação e deslocamento irão convergir, após o refino adequado da malha e a aplicação do método iterativo, realizado pelo *software* de análise CAE (ALVES FILHO, 2012). Tais valores são os que melhor descrevem o problema real, podendo ser exatos ou aproximados.

Figura 10 – Fontes de não linearidade em uma análise



Fonte: Adaptado de Alves Filho (2012).

Considerando materiais elásticos isotrópicos, os quais apresentam propriedades elásticas iguais nas diferentes direções, com os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson conhecidos, é possível descrever a relação entre tensão e deformação (ALVES FILHOS, 2012). Entretanto, essa relação é somente válida na região elástica, já que, após a entrada do material no regime plástico, suas propriedades se alteram. Esse é o caso dos materiais mais comuns utilizados na mecânica estrutural, como o aço e o alumínio.

Em uma estrutura onde as tensões se distribuem de modo não uniforme, os elementos podem vir a apresentar comportamento elástico e plástico quando analisados na mesma região. Como afirmam os autores Alves Filho (2012) e Fish e Belytschko (2009), a rigidez de cada trecho da estrutura pode variar durante a análise, alterando a rigidez geral. Essa mudança na rigidez ocorre devido à alteração das características mecânicas do material ao entrar na região plástica (devido à carga excessiva que o faz mudar suas propriedades, ultrapassando o limite de escoamento) e pelo fato da plasticidade ocorrer em regiões distintas da estrutura. Ao caso descrito, chama-se de não linearidade associada ao material, ocorrendo devido à alteração das propriedades físicas, provocadas quando os carregamentos provocam tensões além do limite elástico.

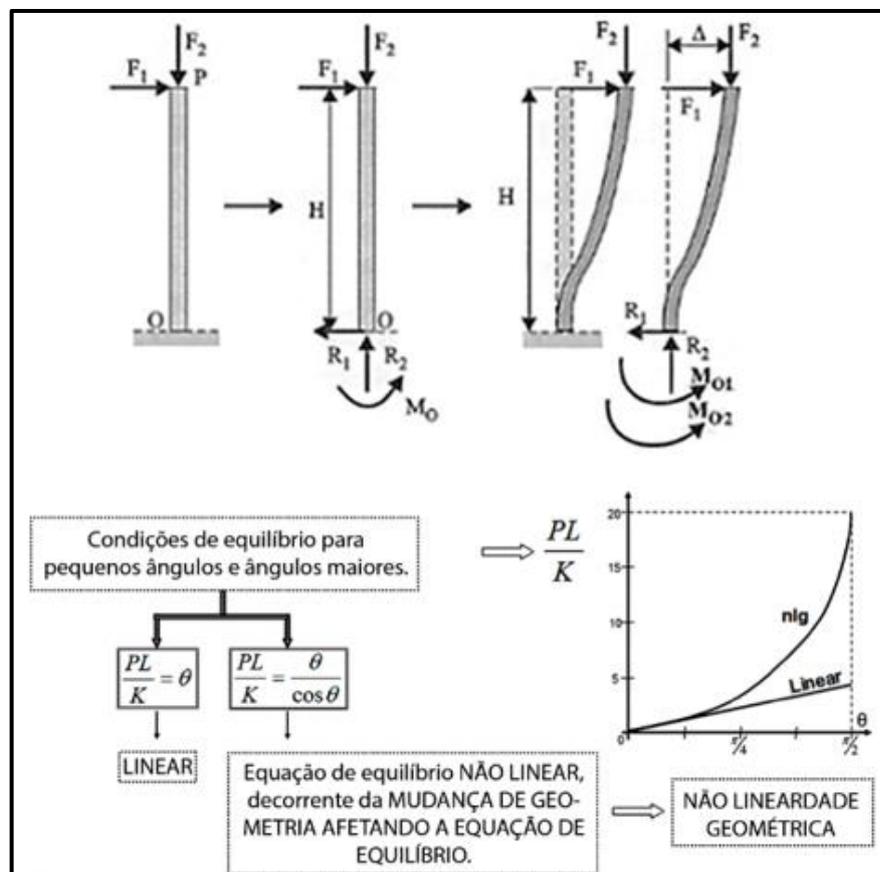
Em processos de conformação com grandes reduções da área de seção transversal, a matriz de rigidez também deve ser atualizada durante a análise. Esta não linearidade é normalmente mais observada em estruturas ou matérias-primas que sofrem grandes deformações, principalmente em processos industriais com deformação plástica do componente em análise.

Como destaca Alves Filho (2012), as deformações podem ser muito grandes, ocasionando variações consideráveis no comprimento do corpo, juntamente com deformações plásticas. Esta é conhecida como não linearidade geométrica, já que a mudança na forma do modelo altera as propriedades da matriz de rigidez e da estrutura. Neste tipo de não linearidade, a tensão e deformação verdadeiras, que relacionam a área verdadeira e não mais a área inicial, são recalculados pelo *software*.

Para valores relativamente grandes de deslocamentos nodais, a deflexão de um membro resulta no aparecimento de momentos fletores adicionais que agem na estrutura, em virtude da presença de forças decompostas e novas cargas que surgem. Com isso, a rigidez estrutural é afetada, pelo fato de haver grandes deflexões. “A geometria deformada da estrutura altera as equações de equilíbrio e, devido a isso, chamamos essa dependência de não linearidade geométrica” (ALVES FILHO, 2012, p. 31). Por isso, deve ser recalculada a matriz de rigidez a cada incremento de carga, pois as equações de equilíbrio dependem da deformação total, bem como a evolução dos deslocamentos e aparecimento de novas variáveis de carga. A Figura 11 mostra como uma estrutura é afetada pelas grandes deflexões.

O gráfico ilustra como uma estrutura pode apresentar carregamento linear até certo ponto e, com o aparecimento de novas componentes de força, tornar-se não linear, induzido pela Equação 5. Nesta, uma relação não linear entre carga e deflexão é exposta e, como esta caracteriza a rigidez da estrutura, haverá variação significativa após  $\theta$  atingir um certo valor (no gráfico, pouco antes de  $\pi/8$ ). Na equação,  $\Delta$  representa a deflexão no sentido transversal à aplicação da força,  $\text{sen}(\theta)$  é o ângulo de deflexão do membro, e  $H$  o comprimento do membro avaliado.

Figura 11 – Efeito das grandes deformações no comportamento não linear da estrutura



Fonte: Adaptado de Alves Filho (2012).

$$\text{sen}(\theta) = \frac{\Delta}{H} \quad (5)$$

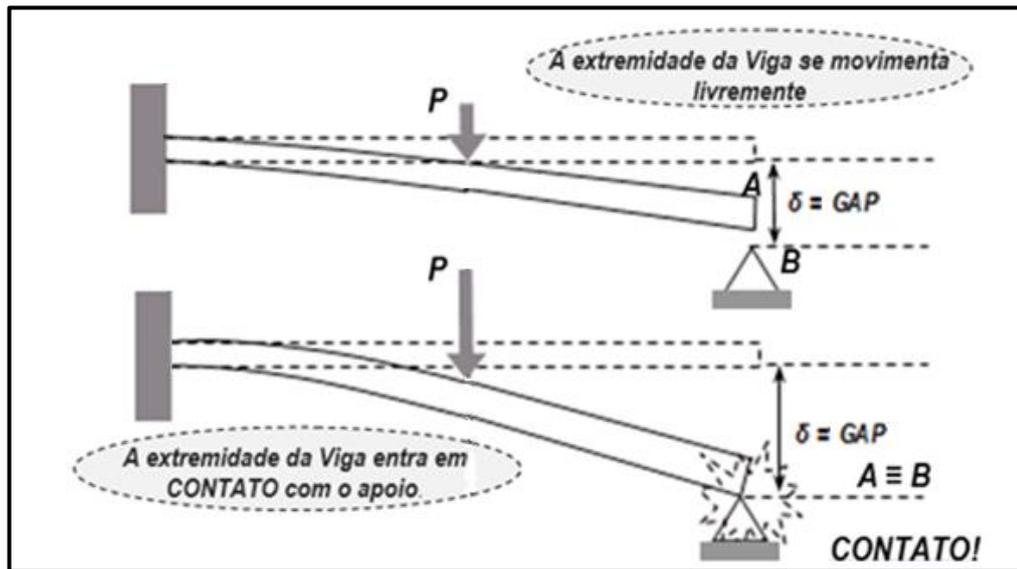
Por fim, ao analisar uma estrutura, é compreensível que irão ocorrer contatos entre os nós dos diversos elementos que a compõe. Estes mesmos elementos possuem uma rigidez conhecida na condição indeformável, sendo que esta será alterada à medida que a estrutura é deformada assim que entrar em contato com seu elemento adjacente. O procedimento numérico inserido para este caso deve verificar, de forma incremental, se a distância livre (termo também conhecido como *gap*) a ser vencida entre dois nós foi atingida, assumindo condições de contorno novas a cada contato adicional realizado (ALVES FILHO, 2012). É fundamental definir a rigidez dos elementos colocados entre os nós, para que o fenômeno do contato seja representado fielmente. Para isso, cada *software* possui uma biblioteca de elementos onde, além das propriedades mecânicas, o tamanho e forma destes pode ser alterada para melhor contornar o problema.

A não linearidade por contato tem grande influência no resultado da matriz de rigidez global. Devem ser quantificados, por meio do *software*, as rigidezes a serem introduzidas no problema, de forma que não ocorram penetrações entre dois corpos da estrutura, somente deformações nos mesmos. A atualização da rigidez deve ser feita por algum elemento que já faça parte da malha e no modelo essa restrição também já deve existir originalmente, manifestando-se no momento oportuno.

Na análise é inserido, de forma teórica, um elemento de *gap*, que verifica a evolução dos deslocamentos entre nós, até que se estabeleça o contato entre eles, e essa variável torne-se nula. (ALVES FILHO, 2012). Enquanto os dois nós não se tocam, têm-se uma rigidez considerada nula. Junto ao elemento *gap* é inserido um valor muito maior de rigidez do que o do material da estrutura, a fim de tornar os deslocamentos nodais muito pequenos quando o espaço entre os nós é zerado. Ao atingir o nó seguinte, o *gap* com rigidez “infinita” praticamente não terá deslocamentos, impedindo que um nó penetre no outro.

A indústria automotiva utiliza a análise por contato ao ensaiar colisões de veículos, onde o contato aparece de forma mais explícita nas grandes deformações plásticas apresentadas. A Figura 12 demonstra como o problema de contato pode ser contornado, utilizando como exemplo uma viga e sua base.

Figura 12 – Efeito do contato na análise não linear



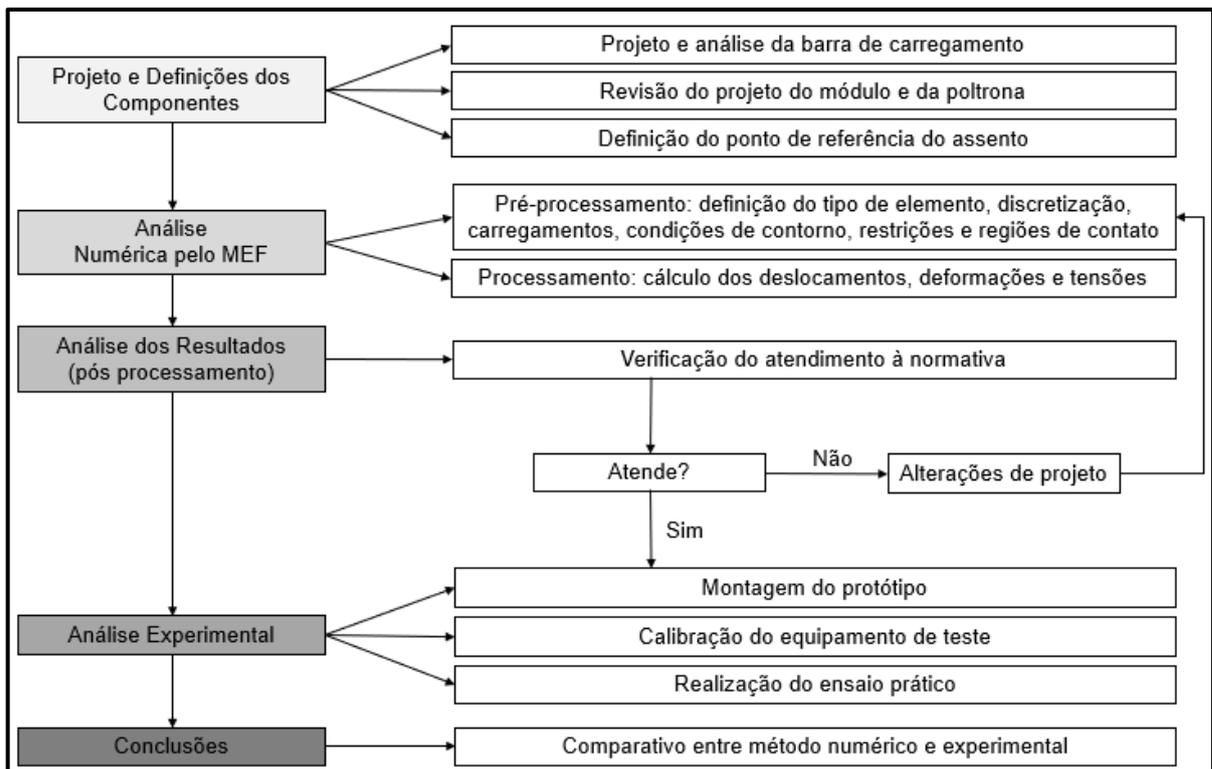
Fonte: Adaptado de Alves Filho (2012).

### 3 METODOLOGIA

A viabilidade estrutural e técnica para o uso e a comercialização do modelo de poltrona Escolar 1000 foram verificadas em dois momentos: primeiramente, a mesma foi ensaiada numericamente, utilizando o MEF, para a verificação da integridade física e o atendimento normativo, por meio dos requisitos já citados. Já no segundo momento, com os dados de resistência estrutural e a deflexão do encosto aferidos na análise numérica, realizou-se a análise experimental (prática), para a comprovação e comparação dos resultados, verificando também a precisão do método numérico.

O fluxograma da Figura 13 ilustra como o trabalho foi desenvolvido, aplicando a metodologia proposta.

Figura 13 – Fluxograma de atividades



Fonte: O autor (2020).

O trabalho foi desenvolvido na empresa Marcopolo S.A., líder mundial na fabricação de ônibus das linhas leve e pesada, para os segmentos rodoviário, fretamento, urbano e veículos de especiais de pequeno porte, como é o caso dos ônibus escolares. O projeto da barra de carga foi desenvolvido no departamento de Engenharia do Produto da empresa.

A poltrona escolar e o módulo para testes já eram projetos consolidados, sendo assim, seus projetos somente foram revisados pelo autor. Os ensaios experimentais tiveram

apoio e foram realizados no Departamento de Engenharia Experimental da empresa. Foram disponibilizados os seguintes materiais e equipamentos para o ensaio:

- a) 01 poltrona modelo Escolar 1000;
- b) 01 módulo para fixação da poltrona;
- c) 02 barras de carregamento;
- d) equipamento para aplicação das cargas;
- e) *software* interligado ao equipamento de teste, para medir a deflexão do encosto.

O *software* de simulação numérica ANSYS, largamente aplicado na indústria, foi utilizado pelo autor na etapa de análise MEF, por sua compatibilidade com a plataforma CAD *SolidWorks*, utilizada na modelagem dos componentes da poltrona avaliada.

### 3.1 A POLTRONA ESCOLAR

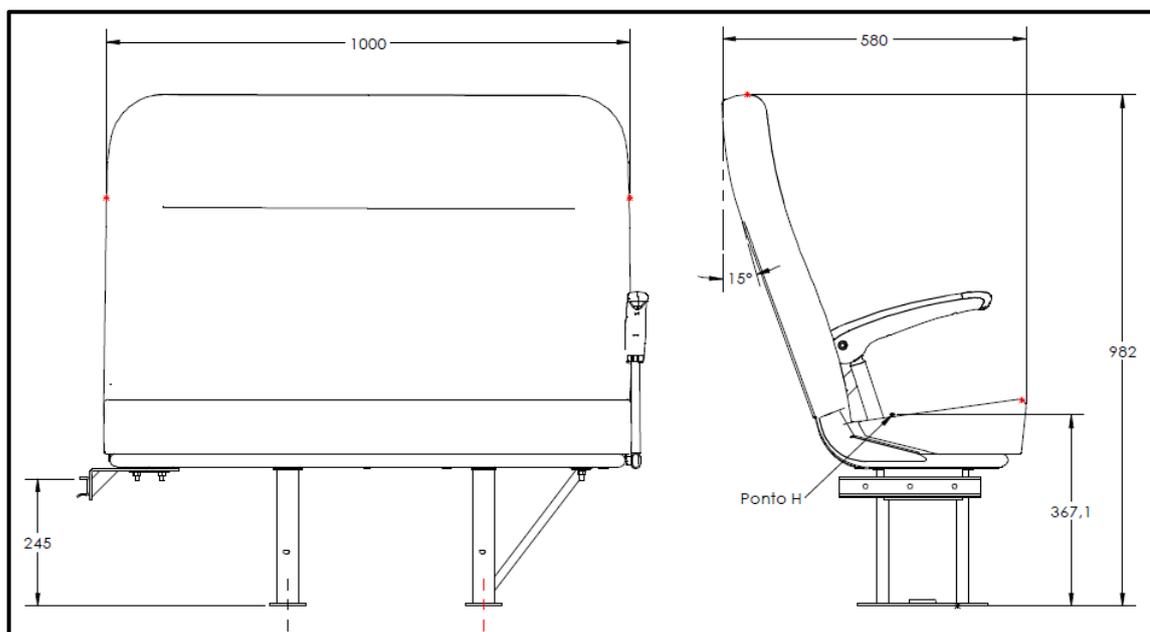
O modelo de poltrona escolhido para o desenvolvimento deste trabalho é um produto consolidado pela empresa Volare Indústria de Veículos, uma das unidades de negócio da Marcopolo S.A., especializada na produção de micro-ônibus. A poltrona escolar é utilizada para atender às demandas por conforto, segurança e maior capacidade de passageiros em veículos do tipo escolar. Tais veículos podem ser equipados com poltronas com largura nominal de 800 e 1000 mm, e com capacidade para 2 e 3 crianças, respectivamente. São fornecidos principalmente para programas do Governo Federal<sup>2</sup>, mas também para pessoas físicas ou empresas de transporte escolar no Brasil.

A poltrona analisada possui largura nominal do encosto de 1000 mm. Decidiu-se pelo uso da mesma pois, seguindo a Tabela 1, a capacidade máxima de crianças que podem viajar sentadas é maior. Além do mais, a carga aplicada correspondeu à energia individual de cada ocupante, especificada na normativa (452 J), que é exercida no encosto em uma possível colisão, multiplicada por 3, tornando esta configuração a mais crítica para a análise. A Figura 14 detalha as principais medidas de interesse para o protótipo. Com uma pesquisa entre as poltronas do modelo escolar, foi escolhida aquela aplicada na carroceria Senior Midi, que apresenta a maior altura do assento em relação ao piso de fixação (pé da poltrona), à qual ocasiona um momento da força maior, tornando-a mais crítica em termos estruturais.

---

<sup>2</sup> O Programa Caminho da Escola é um exemplo de programa de renovação, padronização e ampliação da frota de veículos escolares da rede de ensino pública básica.

Figura 14 – Principais dimensões da poltrona utilizada



Fonte: O autor (2020).

Segundo Corral (2008 apud PAREDES et al., 2016), os assentos são aprimorados tanto em uso quanto em manufatura, com o intuito de atender as necessidades do usuário. A demanda por poltronas de qualidade refere-se a necessidades como segurança, altos coeficientes de amortecimento, alto desempenho e segurança passiva. Além da resistência estrutural desejada para qualquer projeto de poltrona cumprir seu papel sem causar ferimentos ao usuário, a normativa estabelece dimensões mínimas, já contempladas no projeto indicado.

“A estrutura da base do assento é tipicamente feita de aço AISI 1018. Isso se deve às suas excelentes características mecânicas em cargas não muito severas, com um alto grau de tenacidade” (AILLON, 2011 apud PARADES et al., 2016, p. 2). Já a poltrona que foi utilizada é constituída por uma estrutura tubular de aço ZSTE 380 e ZAR 230, além de chapas de aço LN 280 com espessura entre 2,25 e 4,25 mm, para reforço da estrutura do assento e encosto. Além disso, para construção dos pés do conjunto, foram utilizadas chapas de aço LNE 380. A espuma e o estofado que revestem o assento não estavam instalados na poltrona durante o ensaio.

Por fim, o módulo (parte representativa da estrutura do veículo) foi fabricado com os mesmos materiais e dimensões correspondentes ao local de fixação no veículo, com o intuito de simular, da maneira mais fiel possível, o comportamento da poltrona. O mesmo é fabricado com perfis em aço AISI 1020 e ZAR 230, além de tubos e perfis também de aço ZAR 230, garantindo resistência mecânica adequada para a fixação da poltrona à base da carroceria.

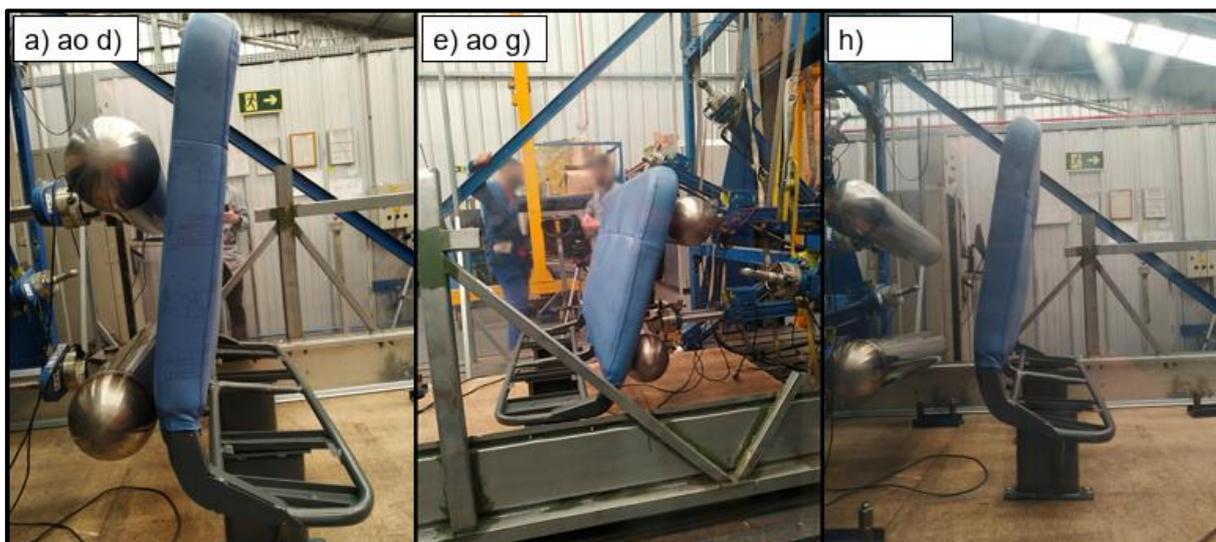
### 3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DO ENCOSTO

Os passos descritos a seguir foram utilizados no ensaio experimental de resistência do encosto. Os valores e condições para aplicação de carga, tempo e demais critérios seguiram o procedimento descrito na normativa FMVSS 222, e buscaram atender ou superar os valores mínimos exigidos para aceitação do referido documento. Por escolha do autor, a poltrona foi submetida às cargas descritas no item (a) do subitem 2.1.2 do presente trabalho. Seguiu-se o seguinte procedimento:

- a) colocou-se a barra de carregamento centralizada atrás do encosto, em relação ao plano transversal da poltrona;
- b) posicionou-se o dispositivo em um plano compreendido 102 mm acima ou abaixo do ponto de referência do assento (ponto H), previamente definido;
- c) aplicou-se uma força de 9.342 N, horizontal para frente, através da barra inferior, atingindo a carga máxima no intervalo entre 5 e 30 segundos;
- d) próximo de 1 segundo após atingir a força total descrita, reduziu-se pela metade (ou seja, 4.671 N) o valor do carregamento;
- e) mantendo a primeira barra na mesma posição (e com a carga de 4.671 N aplicada), inseriu-se a segunda, novamente centralizada atrás do encosto da poltrona, agora à 406 mm verticalmente, acima do ponto de referência do assento;
- f) aplicou-se uma carga de 44 N no ponto determinado, também horizontal com relação ao plano de fixação da poltrona;
- g) acrescentou-se também na mesma barra uma força adicional para que pelo menos 1.356 J de energia fossem absorvidos na deflexão do encosto, em um período entre 5 e 30 segundos;
- h) manteve-se a carga total aplicada na posição máxima de deflexão do encosto entre 5 e 10 segundos e liberou-se ambas as barras entre 5 e 30 segundos.

A Figura 15 ilustra as etapas do ensaio.

Figura 15 – Principais etapas do ensaio



Fonte: O autor (2020).

### 3.3 PROJETO DA BARRA DE CARGAS

Por ser uma metodologia de ensaio até então inexistente na empresa Marcopolo S.A., o primeiro passo foi projetar e determinar se as barras utilizadas no ensaio seriam adequadas para a aplicação das cargas. Para isso, um projeto foi desenvolvido, seguindo as dimensões especificadas, permitindo também que a barra pudesse rotacionar pelo menos 30° no seu eixo longitudinal, prevendo deslocamentos assimétricos quando estivesse aplicando carga na poltrona.

Visando a fabricação de uma barra com menor massa possível, escolheu-se um tubo de 6" de diâmetro e 2 mm de espessura, após verificação dos tamanhos disponíveis no mercado. Tal tubo atende a normativa quanto ao diâmetro externo necessário. Para evitar que o mesmo fosse deformado ao realizar-se o ensaio, foram implementadas chapas internas circulares (no mesmo diâmetro interno do tubo) em aço Inox 304 nas laterais da barra (após os domos laterais) e no centro do tubo, onde foi fixado também o apoio para conexão ao dispositivo de aplicação de cargas.

Após o projeto conceitual finalizado, foi enviado à ferramentaria da empresa Marcopolo S.A. o modelo CAD para avaliação da sua fabricação. Para atendimento à rugosidade máxima exigida, o material escolhido para o tubo foi o aço Inox 304. A Figura 16 ilustra as barras de carga fabricadas para o ensaio.

Figura 16 – Barras de carga



Fonte: O autor (2020).

### 3.4 MATERIAIS

Os materiais utilizados no projeto são considerados isotrópicos, ou seja, as propriedades mecânicas são iguais em diferentes direções. Assim, dentro das diversas propriedades mecânicas que estes aços apresentam, para análises estáticas não lineares, o MEF utiliza principalmente o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, além de outras características intrínsecas, para estabelecer as relações entre tensões e deformações. A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas de interesse dos materiais utilizados. Estes valores são típicos para cada material, e foram obtidos em testes experimentais realizados na empresa.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados

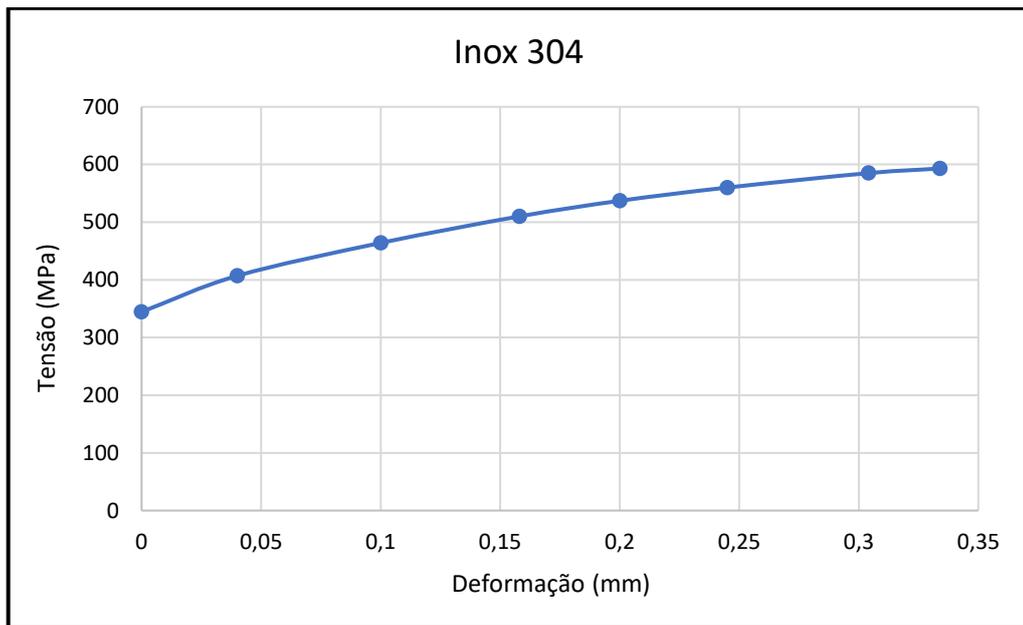
Propriedade	Inox 304	LN 280	ZAR 230	ZSTE 380
Módulo de Elasticidade [GPa]	200,0	200,0	200,0	200,0
Limite de Escoamento [MPa]	344,5	344,0	245,0	450,0
Limite de Resistência à Tração [MPa]	593,0	551,0	380,0	586,2
Coeficiente de Poisson	0,30	0,30	0,30	0,30

Fonte: Marcopolo (2020).

Para a análise numérica, a partir do início da região plástica, foram utilizadas as

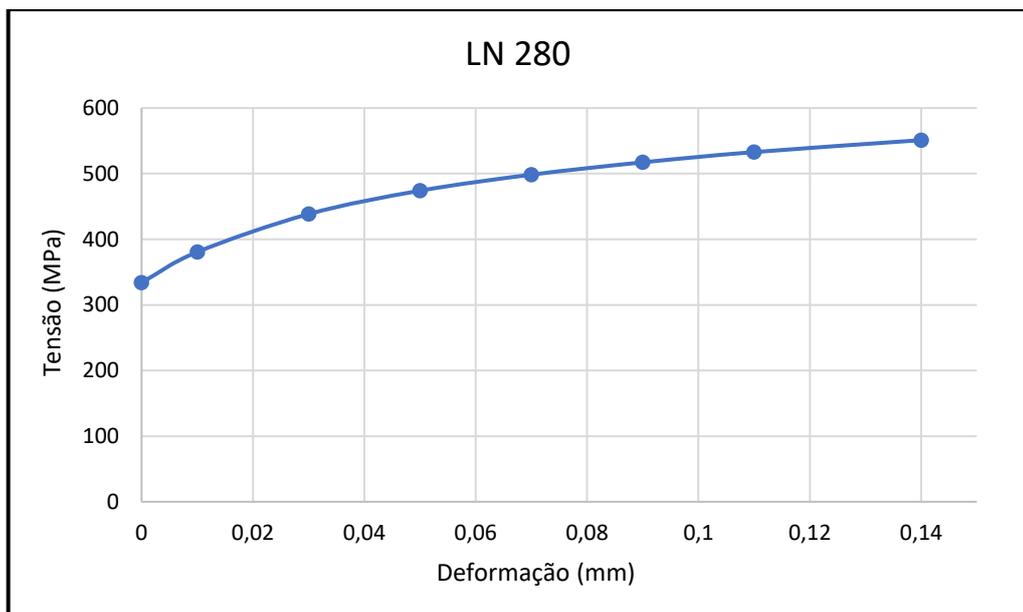
curvas de engenharia de cada material, fornecidas pela Marcopolo S.A., e obtidas por meio dos valores de limite de escoamento, resistência a tração, alongamento, redução da área da seção transversal e limite de resistência tração, sendo ajustadas com auxílio de uma equação polinomial. Tais curvas são utilizadas tipicamente para os materiais, e expostas nas Figura 17 a 20, que mostram o intervalo entre o início do escoamento e o limite de resistência a tração, valores estes dentro da zona plástica dos materiais de interesse.

Figura 17 – Curva Tensão x Deformação real para o aço Inox 304



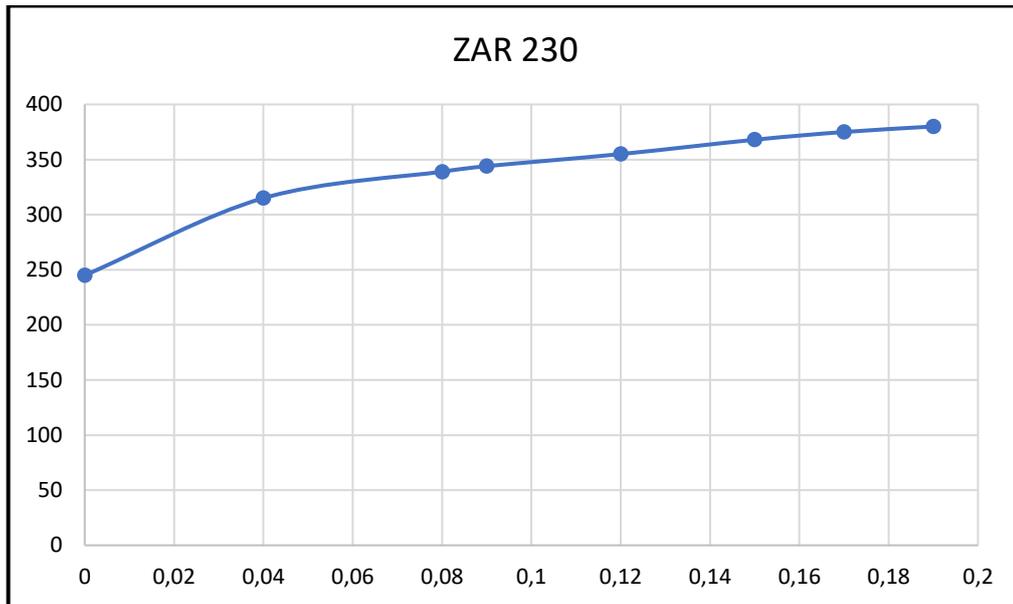
Fonte: O autor (2020).

Figura 18 – Curva Tensão x Deformação real para o aço LN 280



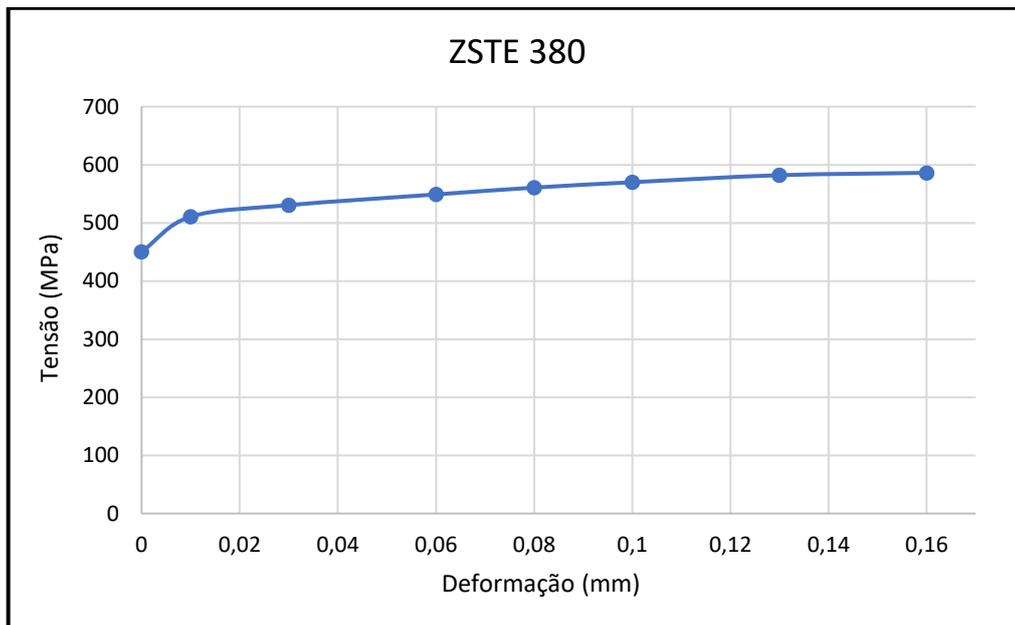
Fonte: O autor (2020).

Figura 19 – Curva Tensão x Deformação real para o aço ZAR 230



Fonte: O autor (2020).

Figura 20 – Curva Tensão x Deformação real para o Aço ZSTE 380



Fonte: O autor (2020).

### 3.5 PRÉ PROCESSAMENTO

#### 3.5.1 Barra de carga

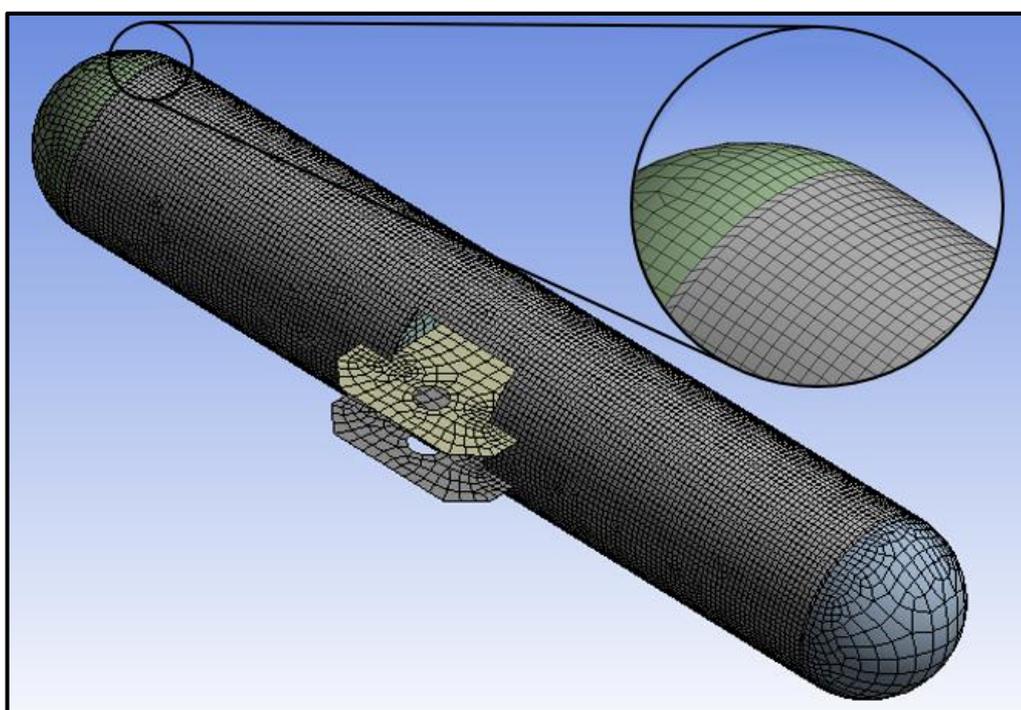
Com o projeto definido e revisado, o modelo CAD foi aberto no *software* ANSYS *Workbench* para validação estrutural. Utilizou-se o recurso de superfície média (*midsurface*)

para simplificar o modelo, já que todas as peças da barra são finas, podendo ser consideradas de geometria laminar. A geometria foi preparada no ANSYS *Space Claim* (plataforma do ANSYS utilizada para edição e preparação de geometrias) para ter seu modelo representado pelo modelo de superfície, além da correção de alguns erros de construção provindos do *SolidWorks*, como arestas extras, duplicadas e interferências entre os componentes.

Por fim, a malha foi gerada no ANSYS, totalizando 42.247 nós e 42.961 elementos, estes últimos em casca. Estes valores foram obtidos após refino da mesma, utilizando a função *sizing*, com tamanho de elemento igual à 5 mm. A escolha por tal tamanho deve-se ao fato dos valores de tensão e deformação, mensurados na fase de pós processamento, não terem apresentado variação significativa com um maior refino dos elementos. Ou seja, o problema convergiu para valores em que o aumento na acuracidade do *software* pouco impactava no resultado final. A carga foi aplicada em apenas um passo (o *software* denomina *load step*).

Vale ressaltar que o modelo foi dividido por meio de planos horizontais, para que a força aplicada na barra pudesse ser distribuída em uma área equivalente à da barra na prática, ou seja, no contato exato com a poltrona. A carga aplicada correspondeu ao valor máximo que será aplicado à poltrona. O material utilizado no programa foi o próprio aço inox 304, com propriedades mecânicas conforme a Tabela 2. O modelo discretizado é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Modelo discretizado da barra de cargas



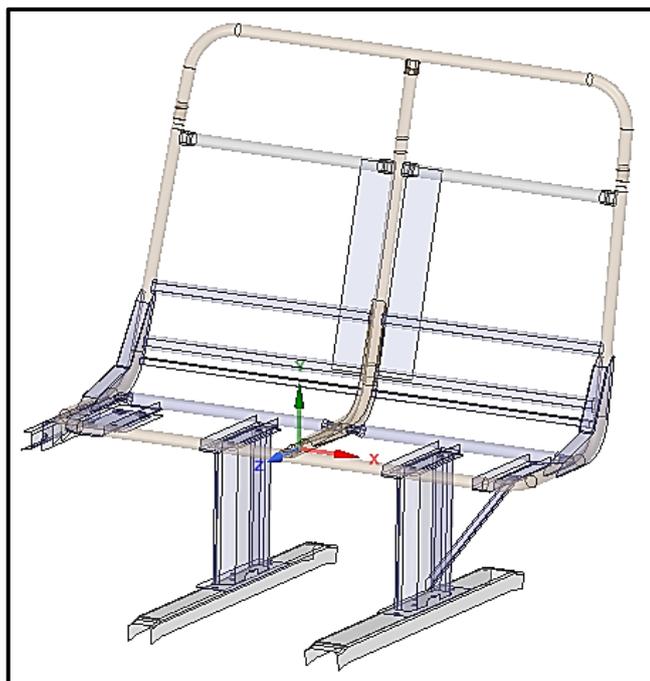
Fonte: O autor (2020).

### 3.5.2 Poltrona

O modelo tridimensional da poltrona teve sua geometria preparada no *software Space Claim*, após ser desenvolvida e importada do *SolidWorks*. Neste último, também foi encontrado o ponto de referência do assento (ponto H), com valor de 367,10 mm, medido verticalmente a partir da base de fixação até este ponto determinado. Utilizando-se o recurso de superfície média (*midsurface*), representando superfícies (e não mais sólidos, como no conjunto importado do *SolidWorks*), o modelo sólido foi convertido em superfícies. Assim como a barra de cargas, a poltrona também teve de ser corrigida utilizando-se os recursos fornecidos pelo *Space Claim*, principalmente devido à erros de construção da geometria (originados do *SolidWorks*).

Optou-se por representar na análise numérica somente os elementos estruturais, desconsiderando espuma e revestimento da poltrona, além da simplificação do assento, pois estes pouco interferem no resultado final, além de suas propriedades mecânicas variarem consideravelmente. Os cordões de solda foram representados nos locais onde não havia contato direto entre os tubos ou chapas, sendo os contatos verificados por meio de recurso próprio do *software*. Tais informações de solda foram obtidas do desenho técnico da poltrona, fazendo-se assim a equivalência entre os modelos numérico e experimental. A Figura 22 mostra a geometria da poltrona já preparada com modelo em superfícies.

Figura 22 – Poltrona preparada em superfícies médias



Fonte: O autor (2020).

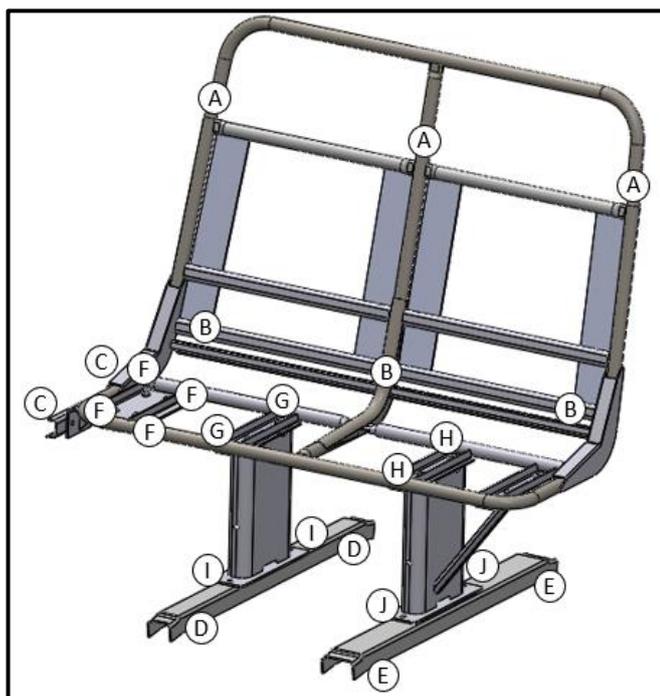
Após simplificada, a geometria foi enviada ao ANSYS *Workbench* para geração da malha de elementos finitos, definição das condições de contorno e carregamento. Para a primeira etapa da análise, elementos retangulares e triangulares foram utilizados. A geração e refino da malha foram realizados com auxílio do recurso *Face Sizing*, dentro da aba *Mesh* do ANSYS. Obteve-se 156.420 nós e 156.253 elementos, com tamanho de 3 mm.

Logo após, definiram-se os apoios fixos, para garantir o equilíbrio estático da estrutura. Nesta etapa, a fixação lateral da poltrona e os perfis do módulo foram considerados apoios fixos (*fixed supports*). As uniões parafusadas entre o módulo e os pés da poltrona, bem como a união dos pés à estrutura foram unidas por meio de juntas rígidas (*joints*), já que impedem o movimento relativo entre os corpos.

As condições de contorno e carregamento aplicadas ao modelo são representadas na Figura 23, com a seguinte disposição:

- a) ponto A: carga aplicada por meio da barra superior, na extensão transversal da poltrona, 406 mm acima do ponto de referência do assento, com valores de 44 N e máximo de 5.900 N;
- b) ponto B: carga aplicada por meio da barra inferior, na extensão transversal da poltrona, 5 mm abaixo do ponto de referência do assento, com valores de 4.671 até 9.342 N;
- c) pontos C ao E: apoios fixos na lateral e base dos perfis do módulo;
- d) pontos F ao J: juntas parafusadas.

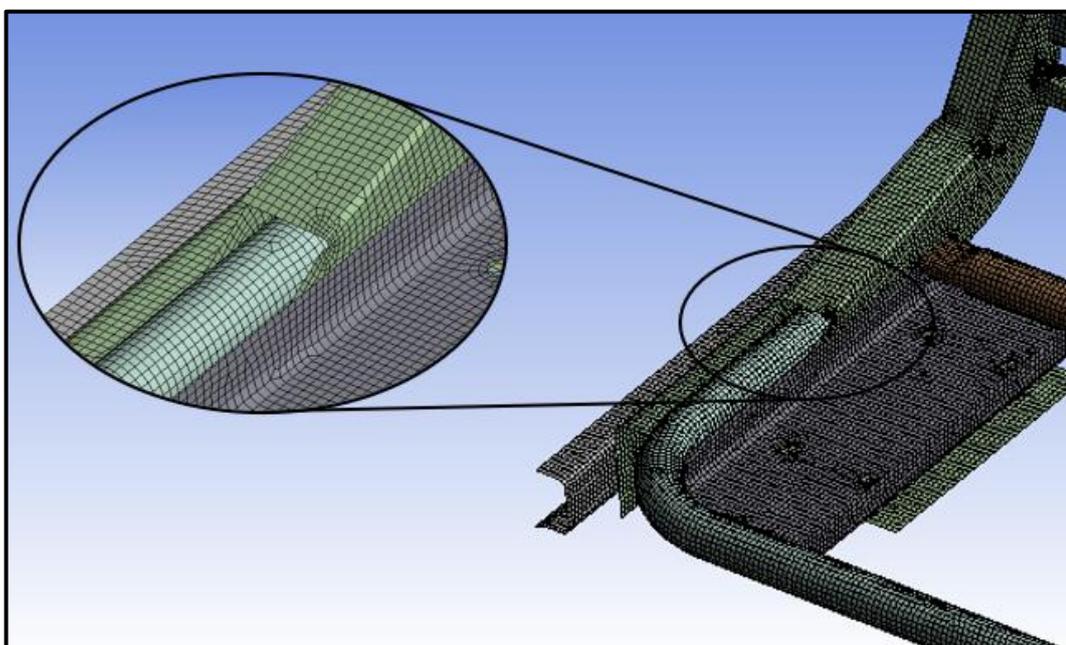
Figura 23 – Condições de contorno e carregamento



Fonte: O autor (2020).

Apesar da normativa FMVSS 222 indicar que as forças devam ser aplicadas com um intervalo entre seus máximos valores, para fins da análise numérica, estas foram aplicadas desconsiderando esta variável pois, como a carga é aplicada gradualmente, não há influência do tempo no modelo, podendo ser representada como uma análise estática. As cargas foram aplicadas em apenas uma iteração, com exceção da carga máxima na parte superior, que foi dividida inicialmente em 30 partes menores, com subdivisão mínima de 15 e máxima de 100. Com isso, buscou-se a convergência em um resultado, utilizando-se de incrementos de carga. Um detalhe da poltrona discretizada é apresentado na Figura 24, mostrando os elementos bidimensionais retangulares e triangulares.

Figura 24 – Poltrona discretizada representada por elementos bidimensionais



Fonte: O autor (2020).

### 3.6 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ABSORVIDA

Para determinação da quantidade de energia absorvida, utilizou-se a área abaixo da curva, obtida em ambas as análises. Por meio da dispersão dos pontos de força *versus* deflexão obtidos, e com auxílio de uma planilha eletrônica, foram determinadas as equações polinomiais que descrevem tais curvas. Após, os polinômios foram integrados e as equações foram resolvidas, tomando como limites de integração o intervalo onde o encosto sofreu deflexão sob ação da carga superior. O valor encontrado como resultado da integração é a energia que o mesmo absorveu.

### 3.7 PREPARAÇÃO DA POLTRONA PARA O ENSAIO EXPERIMENTAL

O ensaio experimental ocorreu no Departamento de Engenharia Experimental da Marcopolo.S.A. O módulo foi preso à uma estrutura rígida utilizada em ensaios de poltrona, apropriada para esta finalidade. Após, a poltrona foi fixada aos perfis de fixação do módulo, tanto na base quanto lateral, com o auxílio de parafusos M8 e M10. As barras de carga foram fixadas aos cilindros pneumáticos e dispostas logo atrás da poltrona, montadas conforme a Figura 5.

As dimensões da poltrona, cordões de solda, fixação ao módulo e ao gabarito de fixação foram conferidas pelo autor, para garantir a máxima fidelidade entre a análise numérica e experimental. Para distribuir a carga por toda extensão longitudinal da poltrona, o revestimento do encosto foi mantido durante a realização do ensaio. Os dispositivos de medição foram aferidos antes de se iniciar o ensaio. A Figura 25 mostra a poltrona e os aparatos montados antes de iniciar-se a análise experimental.

Figura 25 – Poltrona preparada para ensaio experimental



Fonte: O autor (2020).

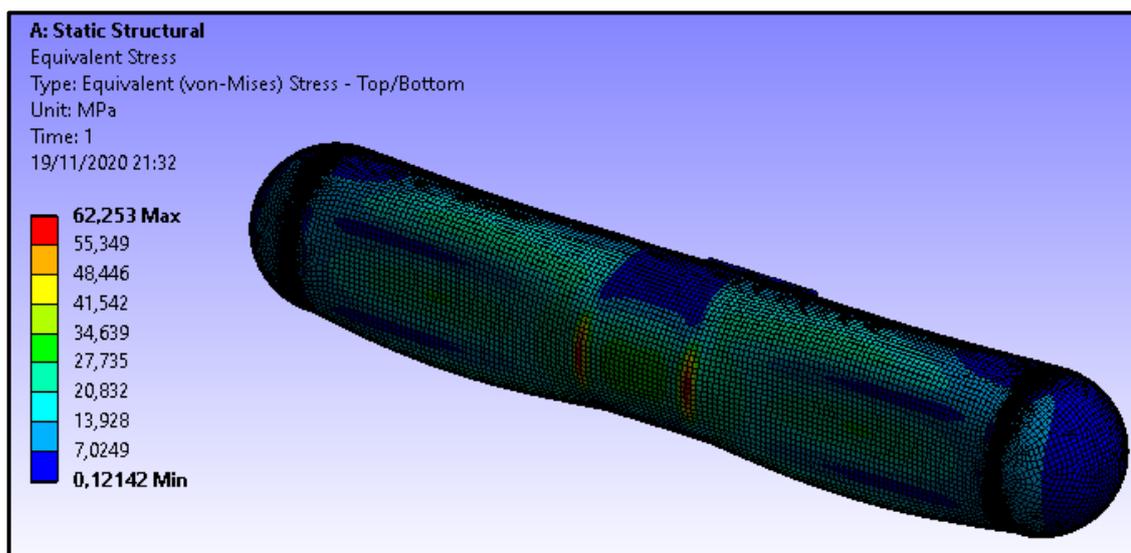
## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos e experimentais obtidos para a barra de carga e a poltrona analisada. Os valores de tensão, deformação e deslocamento foram os principais valores que desejou-se encontrar na análise pelo MEF. Já para o modelo experimental, além da integridade física e o atendimento aos requisitos exigidos na normativa americana, a comparação com o método numérico foi de suma importância para validar os resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos. Vale ressaltar que foram realizadas análises não lineares para as barras de carga e a poltrona, baseando-se nas curvas reais de engenharia apresentadas no capítulo 3.

### 4.1 BARRA DE CARGAS

A Figura 26 expõe os valores de tensões pelo critério de von Mises na barra, após aplicação de 9.342 N, correspondente à carga máxima exigida pela norma, distribuída por todo o comprimento do modelo, na área correspondente à parte em contato com a poltrona. Com os resultados da etapa de processamento, foi possível verificar que a barra não entrou em regime plástico, já que a tensão de von Mises apresentada, de 62,25 MPa, corresponde à 18,07% da tensão necessário para iniciar o escoamento do material. Têm-se um coeficiente de segurança contra o escoamento de 5,53 para a barra de cargas.

Figura 26 – Distribuição de tensões de von Mises na barra

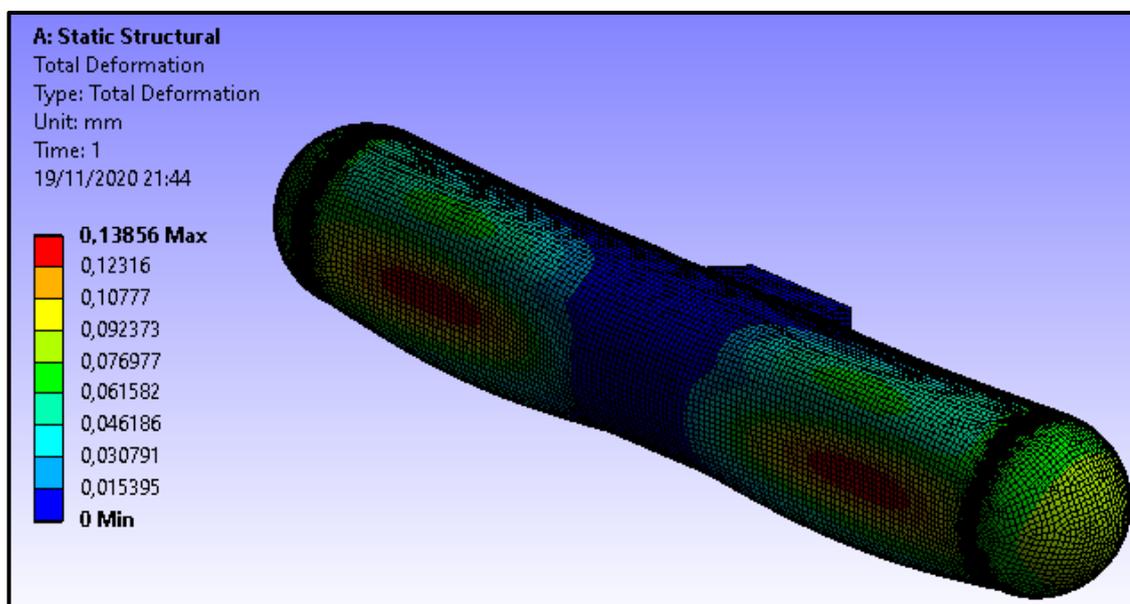


Fonte: O autor (2020).

Já a Figura 27 ilustra os deslocamentos da barra. O valor máximo de 0,138 mm, na parcela em contato com o encosto, não foi um fator que influencia no resultado da análise

estrutural da poltrona, ou mesmo na redução ou desvio da carga aplicada no protótipo a ser testado. Para melhor visualização, utilizou-se uma escala de ampliação de 170 vezes para a tensão e deslocamento.

Figura 27 – Deslocamentos apresentados



Fonte: O autor (2020).

#### 4.2 POLTRONA ANALISADA PELO MEF

Após realizada a etapa de processamento na poltrona, pôde-se observar os resultados de interesse. Neste caso, os valores de deflexão máxima, tensões no modelo e possíveis valores acima do limite de resistência mecânica do material foram mensurados.

As cargas aplicadas seguiram a disposição da Figura 23, com o valor superior máximo de 5.900 N, força esta onde conseguiu-se um deslocamento no ponto de aplicação de 163 mm. Tal deslocamento teve desconto de 6 mm (deslocamento verificado onde iniciou-se a aplicação da carga, após os 44 N da pré-carga terem sido inseridos). Com isso, após o final da aplicação de carga máxima, o deslocamento foi de 157 mm. Como a normativa indica uma deflexão máxima de 356 mm no ponto superior, a carga supracitada não ultrapassou tal valor.

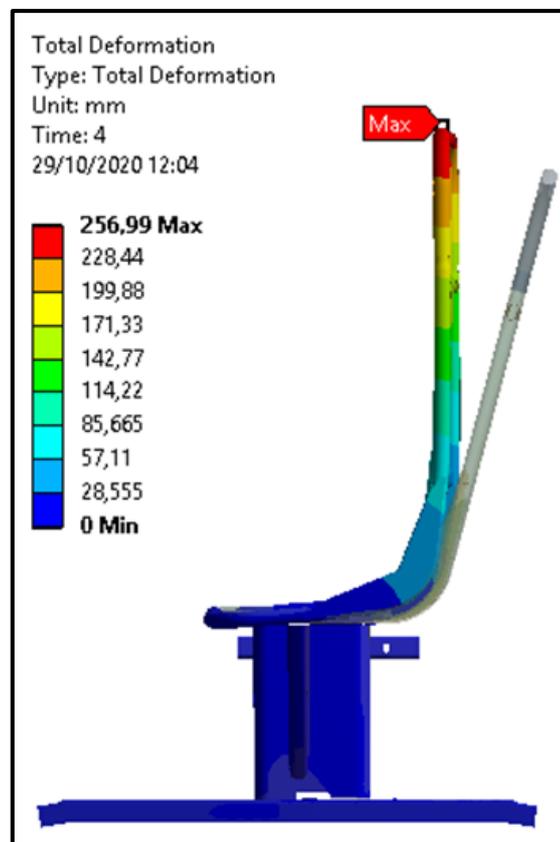
Os valores de carga aplicada versus deflexão do encosto no ponto de aplicação estão representados na Tabela 3. Já a Figura 28 ilustra a deflexão máxima da poltrona, com os mesmos esforços expostos na tabela abaixo. A deflexão máxima foi de 256,99 mm.

Tabela 3 – Deflexão do encosto no ponto de aplicação da carga superior

Carga aplicada [N]	Deflexão no ponto de aplicação [mm]
0	0
196,5	1,66
393,5	3,33
688,5	5,84
1081	9,24
1475	12,8
1868	16,6
2261	20,7
2655	25,2
3049	30,0
3441	35,4
3835	41,6
4229	49,5
4621	60,2
5015	75,7
540	99,4
5654	123
5900	157

Fonte: O autor (2020).

Figura 28 – Deflexão máxima resultante na poltrona

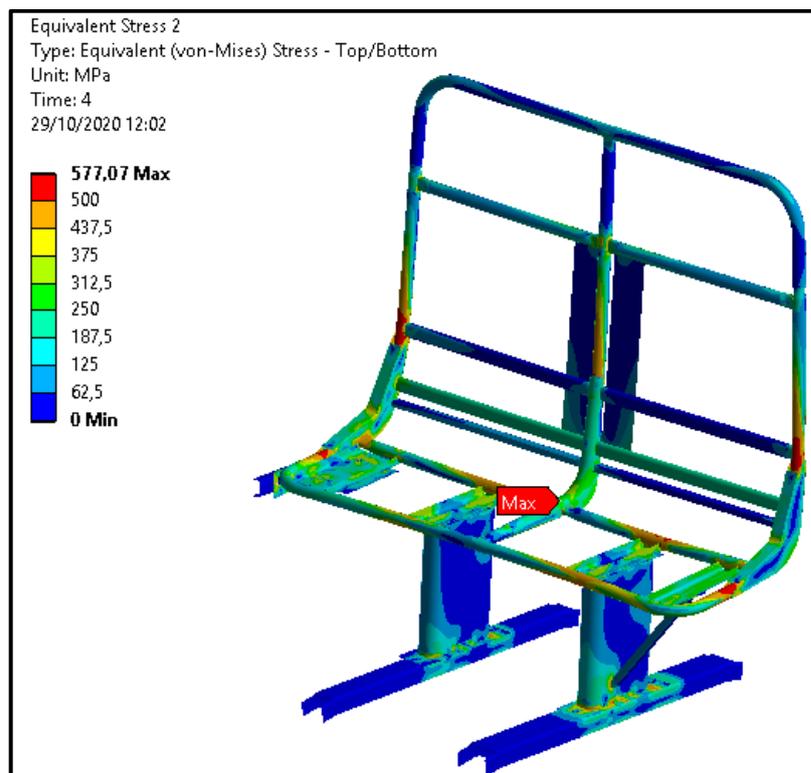


Fonte: O autor (2020).

As tensões de von Mises, avaliadas e expostas na Figura 29, demonstram que o valor máximo se deu no tubo central da poltrona, próximo ao cordão de solda. Ainda, o valor encontrado neste (577,07 MPa) ficou próximo do limite de resistência mecânica do material para este tubo (586,20 MPa, para o aço ZSTE 380). Por este motivo, a aplicação das cargas cessou no valor acima mencionado, já que um aumento nesta provocaria ruptura deste componente. Já na Figura 30, o valor máximo de tensão de von Mises apresentado para o conjunto é mostrado com maior detalhe. Com isso, obteve-se um coeficiente de segurança contra ruptura de 1,015 para o componente crítico.

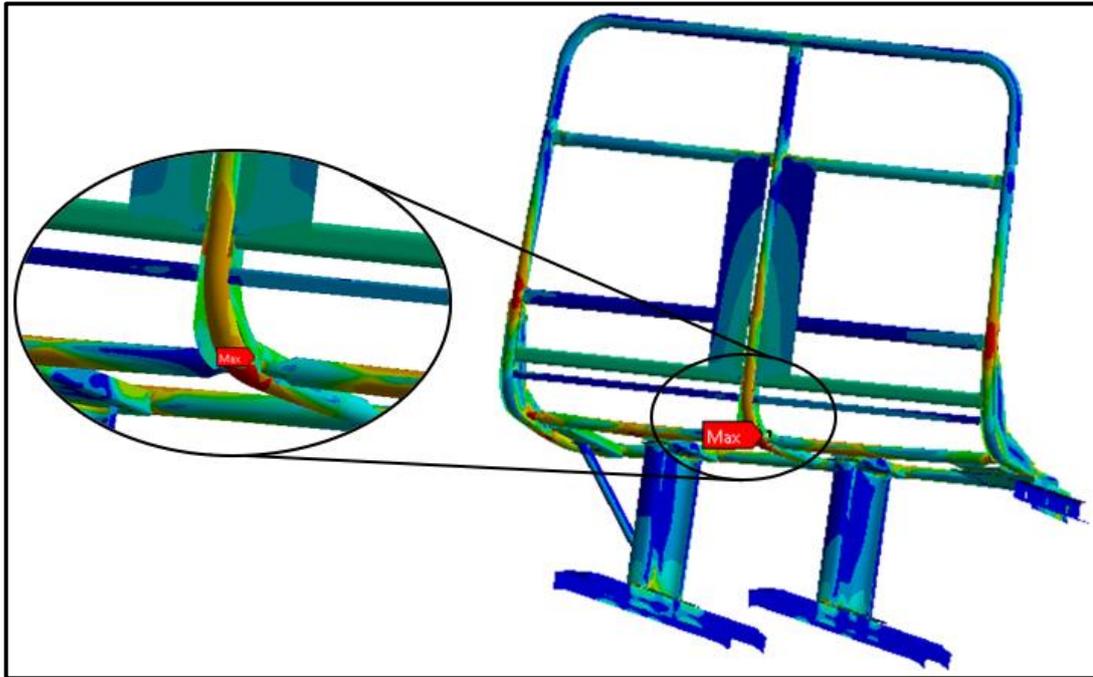
Além da deflexão máxima no encosto, a energia absorvida durante a aplicação da carga superior foi calculada por meio da área abaixo da curva, exposta na Figura 31. A equação polinomial de grau 3, junto à referida figura, foi obtida utilizando como dados de entrada as coordenadas de força e deflexão extraídas do ANSYS. Após, a equação foi integrada e resolvida, utilizando-se os pontos extremos como limites de integração. Com isto, a absorção de energia foi de 693 J, abaixo do exigido pela normativa.

Figura 29 – Resultados da tensão para a poltrona



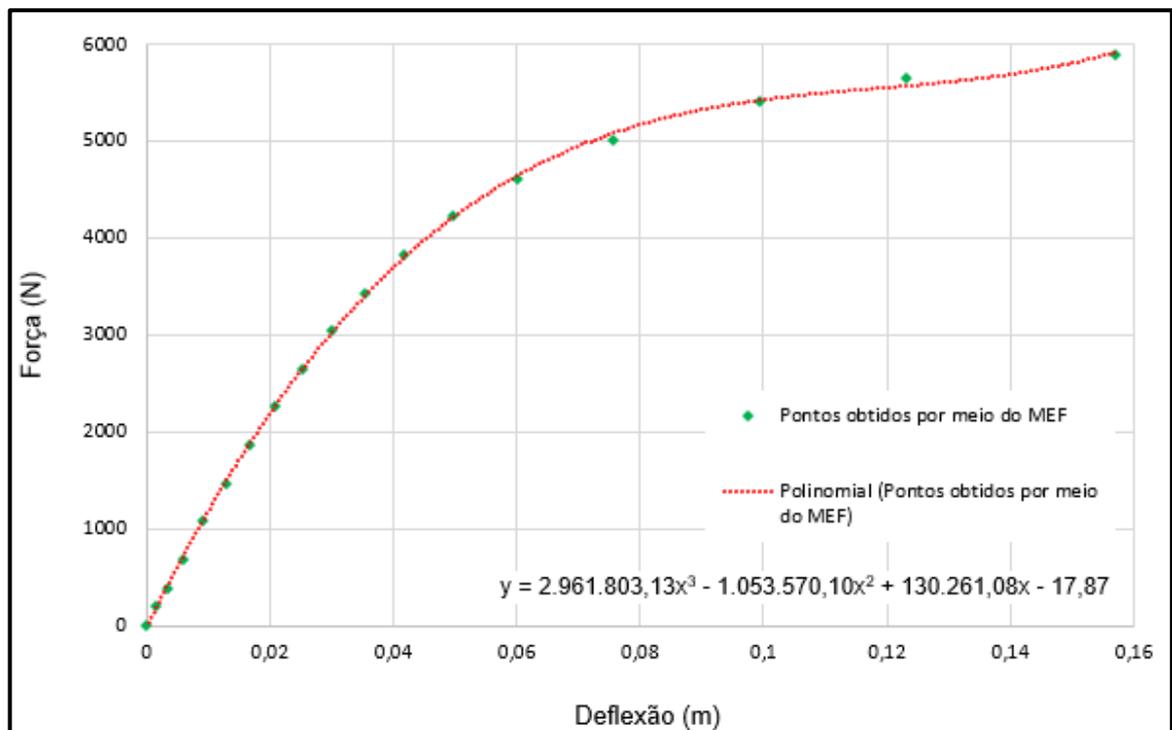
Fonte: O autor (2020).

Figura 30 – Tensão máxima verificada



Fonte: O autor (2020).

Figura 31 – Curva de força versus deflexão do encosto para a análise MEF

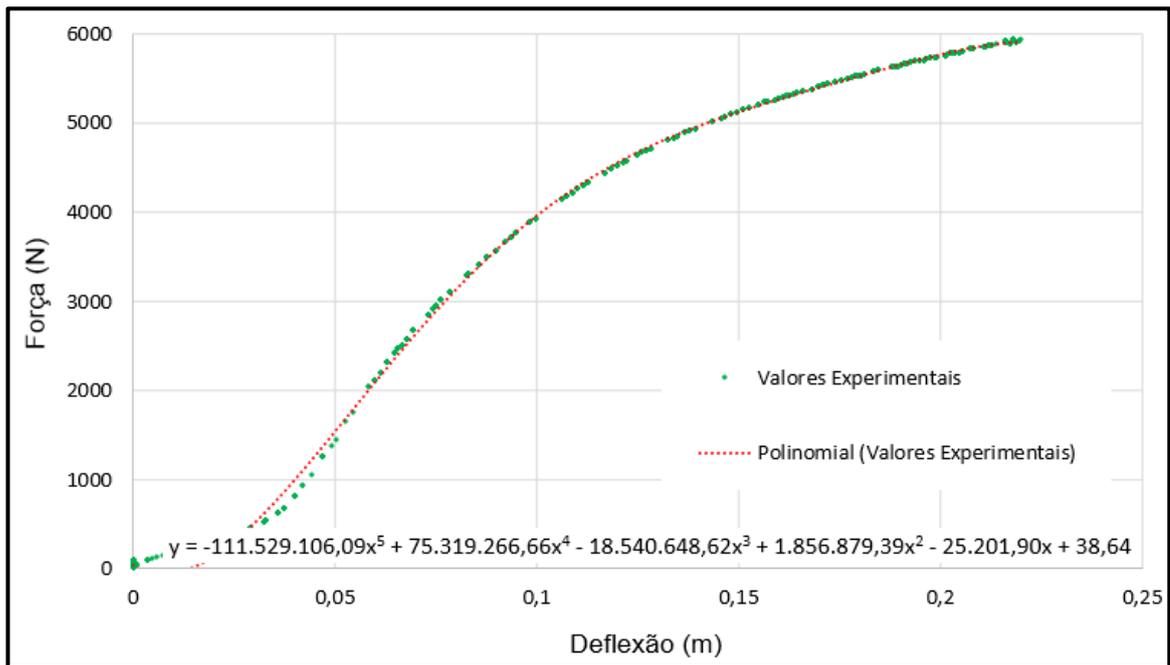


Fonte: O autor (2020).

### 4.3 POLTRONA AVALIADA EXPERIMENTALMENTE

Com a aplicação de carga de 5.900 N na parte superior, a deflexão foi de 214 mm. A energia absorvida, utilizando os mesmos critérios da avaliação anterior, foi de 751 J, também abaixo do valor exigido. A Figura 32 exibe a curva utilizada na obtenção da energia absorvida na condição de carga até 5.900 N, bem como o polinômio de grau 5 obtido pela linha de tendência dos pontos de força e deflexão.

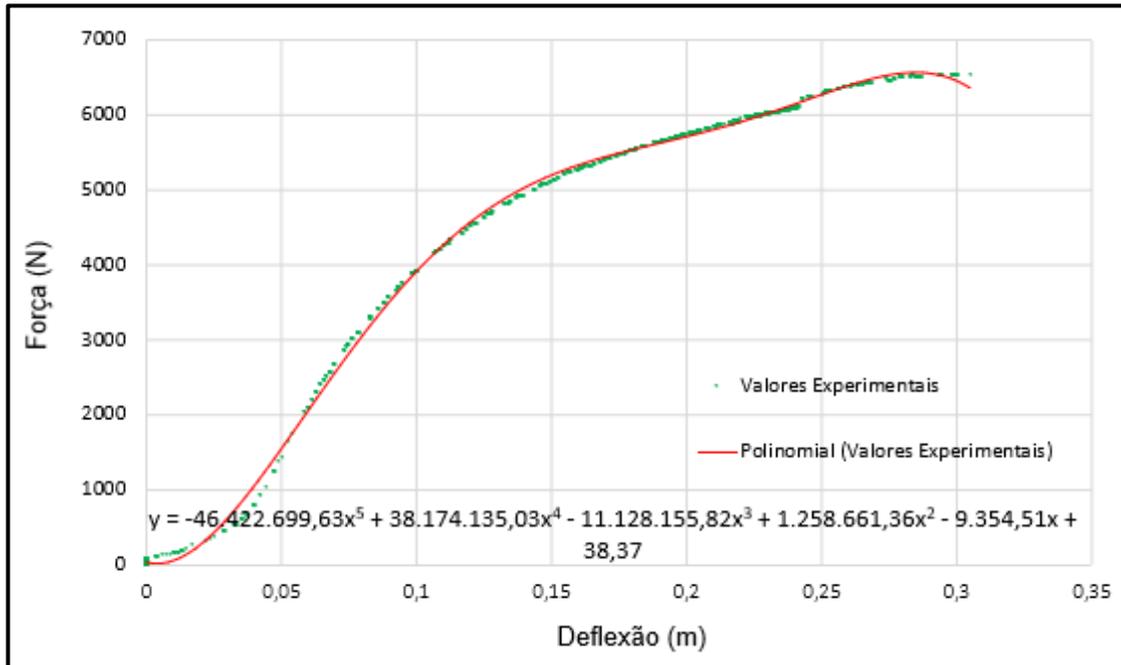
Figura 32 – Curva de força versus deflexão do encosto na condição até 5.900 N



Fonte: O autor (2020).

Verificando que a poltrona não havia falhado em nenhum ponto, aplicou-se carga até que ocorresse o escorregamento da barra superior, fazendo com que a força gerasse uma componente no eixo vertical, não permitida pela norma. Assim, aumentou-se até 6.546 N a carga, obtendo 305 mm de deslocamento. A energia absorvida, neste caso, foi de 1.327 J, ainda assim não atendendo ao exigido. Na Figura 33 é mostrada a curva com carga máxima, além do polinômio de grau 5, levando em conta o intervalo de deflexão entre 0 e 305 mm.

Figura 33 – Curva de força versus deflexão na condição acima de 5.900 N



Fonte: O autor (2020).

Comparando e equivalendo a deflexão do encosto da análise numérica, agora para o ensaio experimental, teve de ser aplicado em torno de 5.240 N de carga, ou seja, 660 N a menos, para chegar-se à mesma deflexão. A poltrona não apresentou ruptura em qualquer ponto, mesmo após aplicação da carga crítica, seja nos cordões de solda, juntas parafusadas ou nos tubos e chapas. Houve deformação plástica na chapa de fixação do pé da poltrona, tubos de ligação do assento com o encosto, fixação da lateral com o módulo e na chapa central da poltrona. A Figura 34 mostra o protótipo ao final do ensaio experimental.

Figura 34 – Poltrona ao final do ensaio

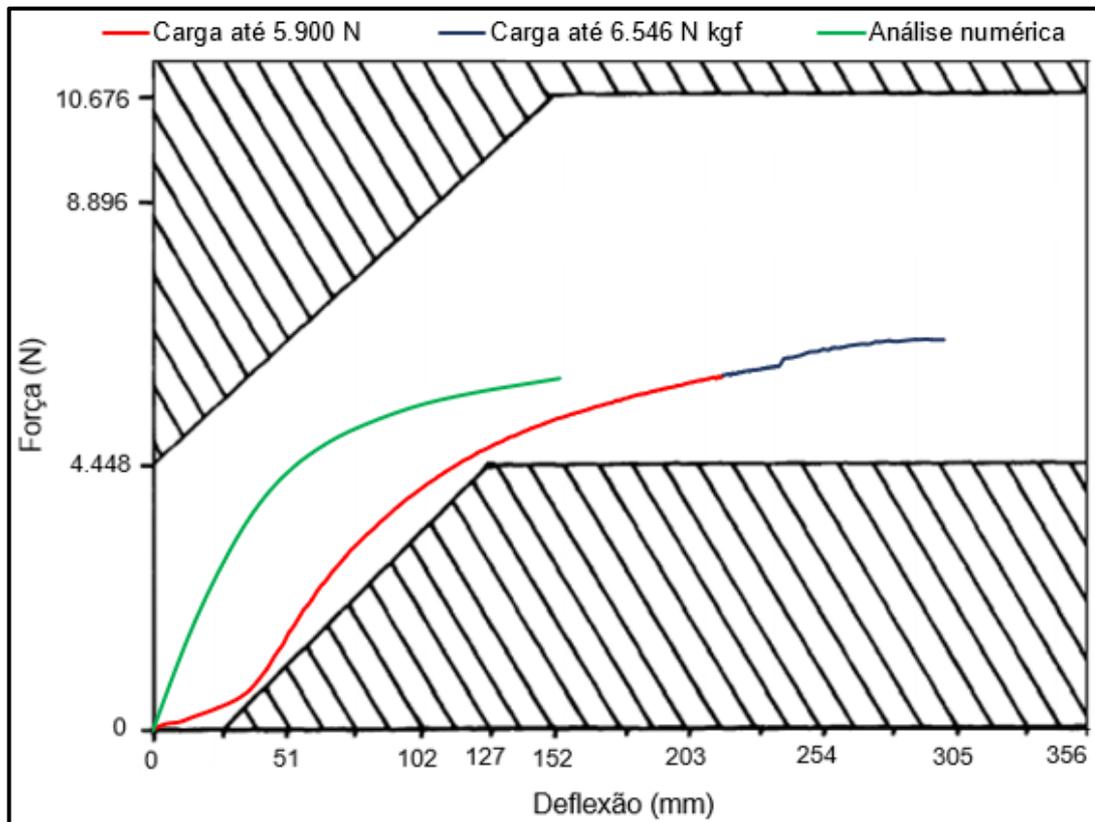


Fonte: O autor (2020).

#### 4.4 COMPARATIVO DE RESULTADOS

A Figura 35 compara as curvas força *versus* deflexão do encosto para a análise numérica e experimental, além da sobreposição com o gráfico da Figura 6, exigidas para aprovação do protótipo perante a normativa FMVSS 222. Nota-se que a curva experimental obtida tem, em seu início, um trecho onde há uma maior deflexão (e menor rigidez) com um pequeno acréscimo de carga. Isso se deve ao fato de haver assentamento do modelo físico que, após a aplicação da carga inicial, se torna mais rígido, já que as folgas nas uniões entre os componentes e a fixação do módulo são eliminadas.

Figura 35 – Comparativo entre as análises



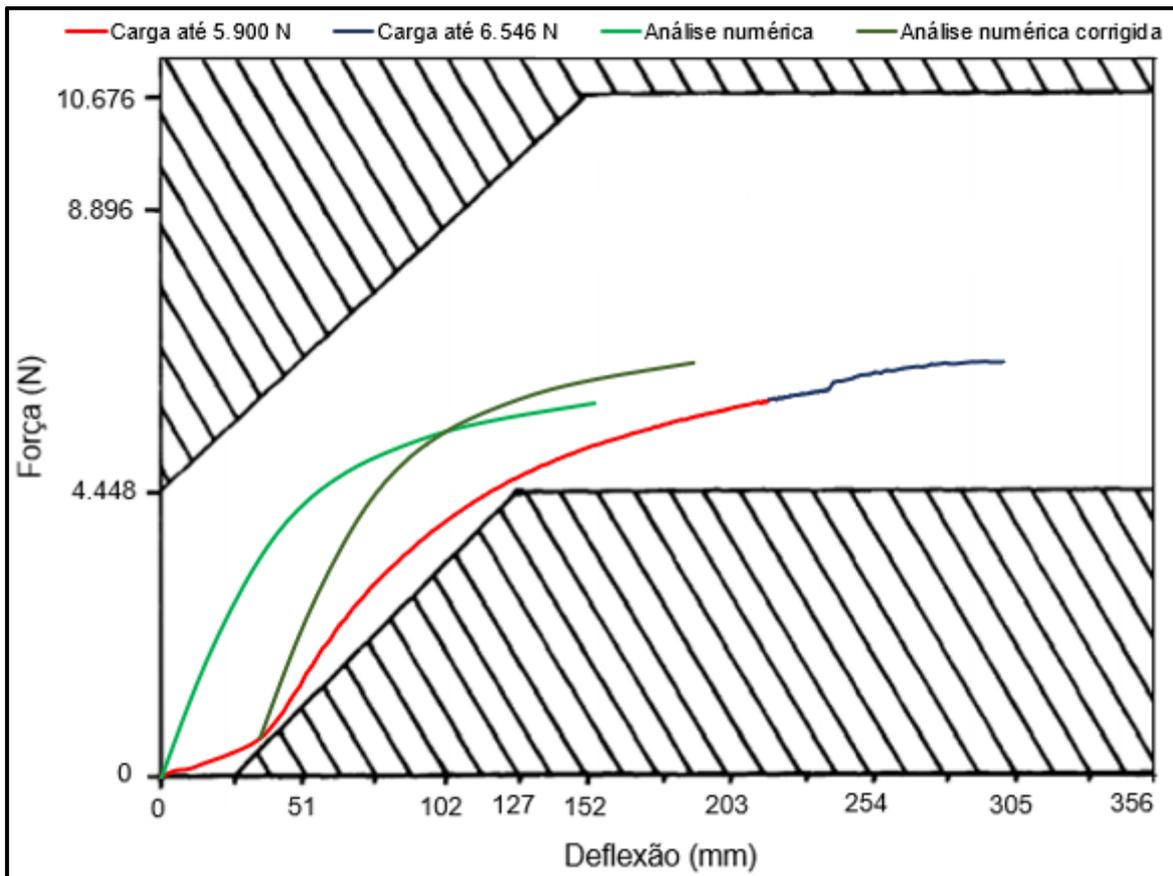
Fonte: O autor (2020).

Com isso, foi necessário um ajuste na curva numérica, visando a equivalência entre os modelos e a eliminação da área de assentamento da poltrona, já que o MEF considera as uniões como ideais, sendo que na prática isto não ocorre. O ponto próximo a inflexão da curva experimental foi obtido por meio da planilha eletrônica onde os pontos haviam sido plotados. Assim, usou-se como ponto inicial para a curva numérica a deflexão de 32 mm e a força de 534 N, ponto esse onde inicia-se de fato a deflexão da poltrona, após o assentamento.

A Figura 36 mostra novamente o comparativo dos resultados, com a curva

representando a análise numérica devidamente corrigida, após ser ignorado o ajuste inicial da poltrona, obtendo-se uma deflexão do encosto de 193 mm e força máxima de 6.535 N. Também, a energia absorvida foi de 794 J, valor este 5,72% maior que da análise experimental com o mesmo intervalo de carga aplicada. Na avaliação do valor de energia absorvida, considerou-se o intervalo entre o início da curva após assentamento (32 mm) e o valor final de 193 mm.

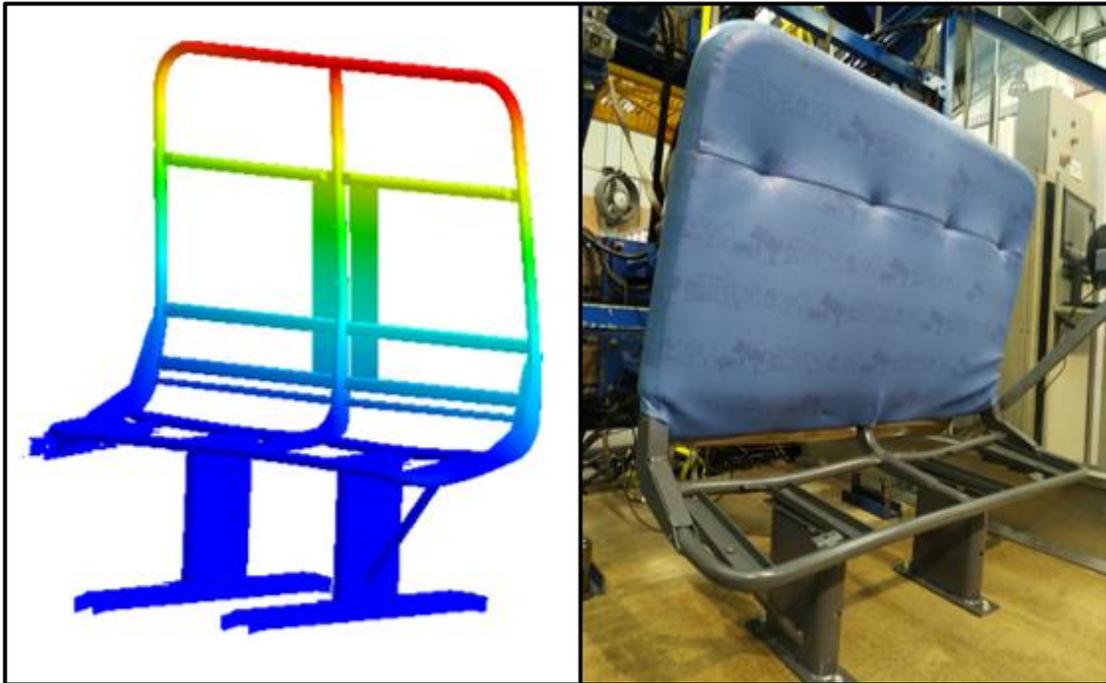
Figura 36 – Comparativo entre as análises com curva numérica ajustada



Fonte: O autor (2020).

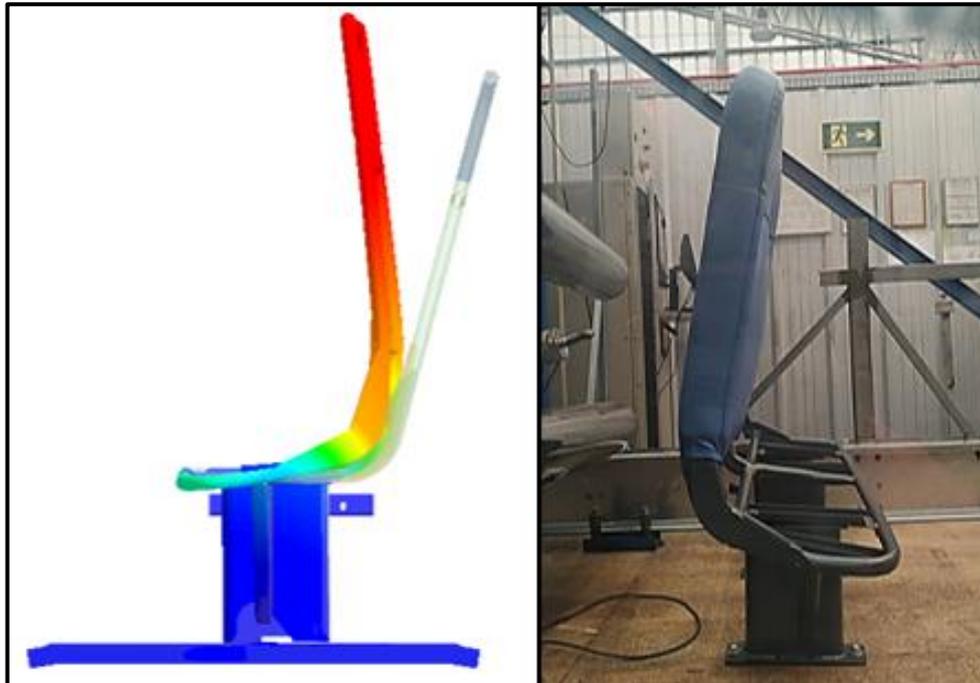
As Figuras 37, 38 e 39 comparam o modelo numérico com a real deformação da poltrona avaliada. Nota-se que a poltrona apresentou similaridade em ambas as análises, no que diz respeito à deformação do encosto, assento, fixação com os pés, além do formato das curvas geradas.

Figura 37 – Comparativo entre as deformações em vista isométrica



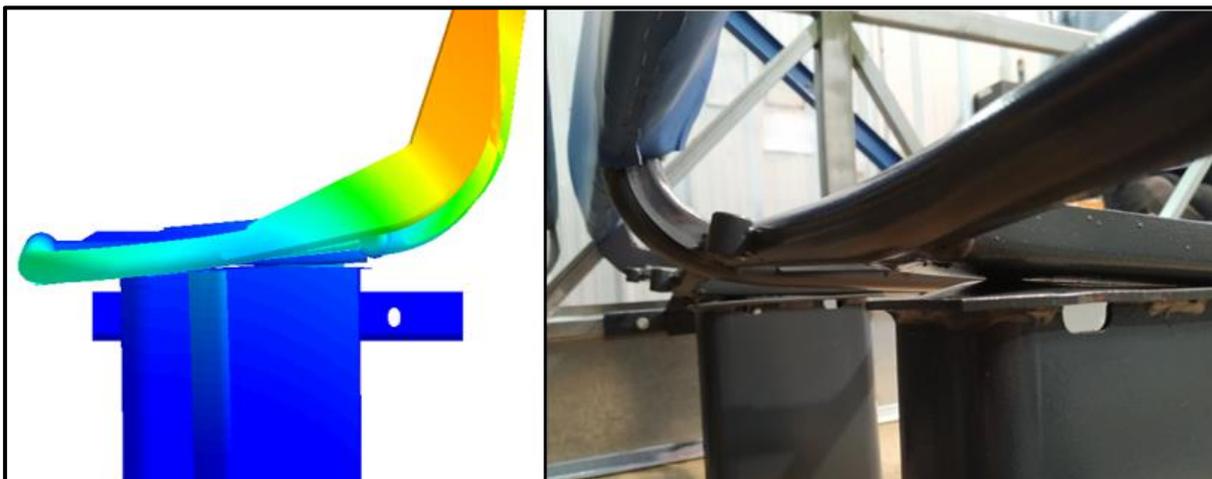
Fonte: O autor (2020).

Figura 38 – Comparativo entre as deformações laterais



Fonte: O autor (2020).

Figura 39 – Comparativo entre as deformações da fixação ao assento



Fonte: O autor (2020).

Como principais fontes de variação entre as análises, pode-se citar:

- a) ajuste do protótipo na análise experimental, ao se iniciar a aplicação das cargas, para a eliminação de folgas na montagem;
- b) madeira do módulo de ancoragem, utilizada no assoalho do veículo e ausente na análise numérica (já que estas propriedades são variáveis com o lote da madeira e até mesmo com as condições climáticas locais, optou-se por não considerar a mesma, mantendo somente no modelo experimental, realizando o ensaio na condição de utilização do veículo);
- c) modelagem do cordão de solda difere entre as análises, sendo que na poltrona física o cordão é maior e, conseqüentemente, mais resistente;
- d) as amostras utilizadas para mensurar as propriedades mecânicas dos aços empregados no projeto foram ensaiadas sob tração. Porém, há também o efeito de encruamento, em alguns componentes da poltrona, variando assim a resistência mecânica;
- e) o revestimento no encosto da poltrona não foi considerado na análise numérica, somente na parte experimental. Este melhora a distribuição da carga no espaldar;
- f) resolução da máquina utilizada no ensaio;
- g) erros intrínsecos do sistema de aplicação das cargas e instrumentos de medição que foram utilizados no método experimental.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo geral a análise numérica e experimental de uma poltrona de ônibus escolar, seguindo a metodologia de aplicação de cargas, a fim de verificar se a mesma pode ser utilizada no mercado norte-americano. Para atender tal objetivo, algumas etapas específicas foram propostas. Estabeleceu-se as condições de ensaio mais críticas e os critérios de aprovação para a poltrona proposta, com base na normativa FMVSS 222, com os aparatos e equipamentos necessários, avaliando numericamente novos dispositivos que seriam utilizados, a exemplo das barras de carga, e a influência destas no resultado da poltrona.

Com o uso de *software* de análise numérica ANSYS, avaliou-se a resistência mecânica do protótipo, de acordo com os carregamentos propostos na normativa, atentando-se as condições de aprovação exigidas. Apesar da aprovação numérica não ter sido atingida totalmente nesta etapa, fabricou-se tanto a poltrona quanto a estrutura à qual é ancorada na prática, além das barras de carga para ensaio experimental, já que algumas variações no material utilizado e na própria metodologia do ensaio poderiam provocar uma variação entre os modelos numérico e experimental, este último podendo ser aprovado totalmente perante a normativa.

Na avaliação experimental inicial, utilizaram-se os mesmos valores da análise numérica, novamente não atendendo à mínima energia absorvida. O modelo físico estava mais íntegro que na avaliação MEF, apresentando maior deflexão do encosto, sem falhar. Buscando atender a normativa, foi aplicada uma quantidade adicional de carga, que infelizmente resultou em um não-atendimento da energia mínima absorvida, já que o sistema de aplicação de cargas apresentava dois graus de liberdade, ocasionando o escorregamento da barra superior antes do atingimento da energia mínima requerida.

Ao comparar ambas as curvas de tensão *versus* deformação das análises realizadas, verificou-se que houve um ajuste inicial no modelo físico, este resultando em uma baixa rigidez inicial. Encontrou-se então o valor onde a rigidez voltara a aumentar, tratando este ponto como o valor inicial da análise numérica, assim equivalendo ambos os modelos. Neste comparativo notou-se que o método numérico foi mais conservador em termos de tensão, porém menos em termos de deflexão.

O modelo numérico ajustado apresentou deflexão máxima de 192 mm com carga aplicada de 5.900 N, frente à 214 mm da análise experimental (cerca de 10,28% de variação). Com relação à deflexão medida do encosto, houve uma variação de 856 N entre as cargas que foram aplicadas para atingir-se o valor de 192 mm da análise numérica, utilizando-se a curva ajustada. Assim, o modelo experimental exigiu 15,07% menos de força aplicada para resultar na mesma deflexão numérica. Com o aumento na carga na barra superior, acima do

valor aplicado na análise numérica, o encosto foi exposto a 6.546 N, superando em 0,17% o método numérico corrigido, sem apresentar fratura. Por fim, a poltrona absorveu cerca de 1.327 J de energia, valor 2,18% abaixo do mínimo exigido, devido ao cilindro apresentar escorregamento com a carga máxima supracitada. Conclui-se que a poltrona escolar 1000 atendeu parcialmente à norma nesta condição, devendo ser novamente testada (em caso de sua futura comercialização) com um equipamento que possua somente um grau de liberdade, não permitindo deslocamentos no eixo vertical.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O autor elenca alguns tópicos que podem ser abordados em trabalhos futuros sobre o assunto:

- a) utilizar um equipamento para aplicação das cargas que possua travamento vertical, ou ainda, avaliar a possibilidade de fixar o equipamento utilizado para que transfira carga somente na direção de interesse;
- b) discretizar a poltrona utilizando elementos de viga ao invés de elementos de casca, em locais com menores tensões e valores abaixo do limite de escoamento, visando a diminuição no tempo de convergência do *software*;
- c) instrumentar a poltrona com *strain gauges*, avaliando também as tensões reais às quais foi exposta;
- d) após instrumentação, verificar o coeficiente de segurança contra ruptura, já que pelo menos um dos tubos da poltrona esteve próximo do limite de ruptura na análise numérica;
- e) avaliar, por meio de simulação e validação experimental, o retorno elástico do protótipo avaliado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos**: A Base da Tecnologia CAE. 6. ed. São Paulo: Érica, 2009.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos**: A Base da Tecnologia CAE - Análise Dinâmica. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos**: A Base da Tecnologia CAE - Análise Não Linear. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

Aventura Americana.

Disponível em: <<http://eua-adventure.blogspot.com/2015/04/onibus-escolar-nos-eua.html>>. Acesso em: 25 mai. 2020.

Business Insider. **Why do school buses still look the same?** Ago. 2020

Disponível em: < [https://www.businessinsider.com/why-yellow-school-buses-still-look-same-2020-](https://www.businessinsider.com/why-yellow-school-buses-still-look-same-2020-2#:~:text=The%20color%2C%20flashing%20lights%2C%20and,color%2C%20could%20modernize%20the%20look.>)

2#:~:text=The%20color%2C%20flashing%20lights%2C%20and,color%2C%20could%20modernize%20the%20look.>.

Acesso em: 02 nov. 2020.

AZEVEDO, Álvaro Ferreira Marques. **Método dos Elementos Finitos**: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Portugal, 2003.

CHANDRUPATLA, Tirupathi R.; BELEGUNDU, Ashok D. **Elementos Finitos**.4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARD. **FMVSS No. 210: Seat belt assembly anchorages**. Washington, DC. United States. 1967. 7 p.

FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARD. **FMVSS No. 222: School bus passenger seating and crash protection**. Washington, DC. United States. 1976. 11 p.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **Um primeiro curso em elementos finitos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

Freedman Seating Company.

Disponível em < <https://www.freedmanseating.com/fstl/tests/fmvss-222/>>.

Acesso em: 09 ago. 2020.

MARCOPOLO S.A. **Parâmetros para análise pelo Método dos Elementos Finitos**. Caxias do Sul, 2020.

HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

National Highway Traffic Safety Administration. Disponível em:

<<https://www.nhtsa.gov/road-safety/school-bus-safety>>. Acesso em: 05 mai. 2020.

OLIVEIRA AZEVEDO, Domingos Flávio de. **CAE – Computer aided engineering**. Universidade de Mogi das Cruzes. 1 ed. 2015.

PAREDES, C.; GUARNIZO, J.; GUERRERO, V. H.; CAMPAÑA, O. Diseño y construcción de un banco de pruebas de durabilidad para asientos de vehículo. **Escuela Politécnica Nacional**, Quito, Equador, v. 37, n. 2, mar. 2016

Disponível em:

<[https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/446/pdf](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/446/pdf)>. Acesso em: 6 mai. 2020.

SafeGuard Seat.

Disponível em <<https://www.safeguardseat.com/resources/faqs/>>. Acesso em: 15 ago. 2020.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **J1100: Motor vehicle dimensions**. 9. ed. Nov. 2009.

SOUTO FILHO, Marcello Varella. **Modelagem numérica de reforço estrutural em vigas de concreto armado**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2003.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

SOUZA, Remo Magalhães. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Laboratory Test Procedure for FMVSS 222**. 1993. Disponível em: < <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/tp222-03.pdf> > Acesso em: 13. abr. 2020.

Volare Comércio de Veículos Ltda. **Veículos Escolares**. Disponível em:

<<https://www.volare.com.br/veiculos/escolar/fly-9-3/poltronas/>>. Acesso em: 06 mai. 2020.