

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE**  
**FABRICAÇÃO – MESTRADO PROFISSIONAL**

**Daniel Espig**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE DISPOSITIVO DE POLTRONA MÓVEL DE**  
**CARROCERIA DE ÔNIBUS**

Passo Fundo

2016

**Daniel Espig**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE DISPOSITIVO DE POLTRONA MÓVEL DE  
CARROCERIA DE ÔNIBUS**

Orientador: Prof. Dr. Márcio Walber

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2016

**Daniel Espig**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE DISPOSITIVO DE POLTRONA MÓVEL DE  
CARROCERIA DE ÔNIBUS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 27 / 10 / 2016.

Os componentes da Banca Examinadora aprovam a Dissertação:

Professor Doutor Márcio Walber  
Orientador

Professor Doutor Agenor Dias de Meira Junior  
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Gustavo Prates Mezzomo  
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Alexandre Aparecido Buenos  
Universidade Federal de Santa Maria

*À minha esposa, Adriana, pelo amor e compreensão nos momentos difíceis, cujo apoio foi essencial para a conclusão deste trabalho.*

*À nossa filha, Laura, que enche a casa de alegria, mesmo nos momentos mais difíceis.*

*Aos meus pais, Anselmo e Ione, que sempre estiveram presentes me dando força e coragem no meu aperfeiçoamento profissional e pessoal, sendo meus maiores exemplos de vida.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para realizar a minha pesquisa, tanto no momento de incentivo quanto no de colaboração. Em especial, meus sinceros agradecimentos:

A Deus, que me proporcionou forças necessárias para continuar na caminhada.

À Universidade de Passo Fundo, pela oportunidade de aprendizado e aperfeiçoamento profissional adquirido desde minha graduação até hoje e pela excelente estrutura oferecida à realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Márcio Walber, meu orientador, por expandir o horizonte da minha pesquisa, pela atenção exclusiva e pelos incentivos que moveram a realização do trabalho.

À banca examinadora, pelas discussões e sugestões que serviram para o crescimento e aprendizado, ajudando a qualificar este trabalho.

A todos os professores e colegas do PPGPPF.

À empresa Elevitta, na pessoa do meu irmão Dayton, pela parceria no desenvolvimento do estudo.

À minha esposa Adriana, companheira de todos os momentos, que me apoia em todas as minhas decisões, meu porto seguro durante toda a realização do trabalho, por compreender com muito amor os momentos de falta.

Aos meus pais Anselmo e Ione, exemplos de trabalho e perseverança. Que continuamente me apoiam, nem sempre com palavras, mas com atitudes de carinho e cuidado.

*Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá. (Ayrton Senna)*

## RESUMO

Este estudo busca analisar numericamente a estrutura de um conceito de dispositivo de poltrona móvel (DPM) a ser acoplado em ônibus que venha possibilitar o embarque de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida. O equipamento possui acionamento elétrico e capacidade de movimentar uma plataforma com uma poltrona do interior do ônibus, baixando-a até a altura da calçada/passeio, onde o passageiro com deficiência pode facilmente acomodar-se nesta poltrona e ser elevado ao interior do ônibus. A análise numérica visa à obtenção do comportamento mecânico estático da estrutura quando sujeita a três condições de carregamento, sendo duas previstas em legislação nacional na NBR 15.320 e na Resolução CONTRAN Nº 445:2013, e outra definida para projeto. O modelo numérico e respectiva análise são processados em *software* CAE pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), e a capacidade do modelo numérico representar a realidade é verificada com comparativo, em termos de deslocamentos, entre resultado numérico e ensaio de protótipo, realizado em laboratório sob as condições de ancoragem de uma poltrona, conforme Resolução CONTRAN Nº 445:2013. O protótipo ensaiado em laboratório acreditado pelo INMETRO obteve parecer, pelo atendimento às condições de segurança previstas para ancoragem da poltrona, e o respectivo modelo numérico, comportamento compatível com o ensaio. Na análise numérica, a estrutura do DPM, de forma geral, apresentou boa rigidez e conduz a futuros estudos com expectativa de redução de massa do equipamento.

Palavras chave: Comportamento mecânico. Análise Numérica. Método dos Elementos Finitos. Poltrona móvel.

## ABSTRACT

This study seeks to analyze numerically the structure of a concept mobile device armchair (DPM) to be coupled in the bus that will allow the embarkation of persons with disabilities or reduced mobility. The equipment has electric drive and ability to move a platform with the interior of the bus seat, lowering the same to the curb height/ride where passengers with disabilities can easily be accommodated in this chair and be elevated to the interior of the bus. Numerical analysis aims to obtain the static mechanical behavior of the structure when subjected to three loading conditions, two provided for in national legislation in NBR 15.320 and Resolução CONTRAN N° 445:2013, and another set for the project. The numerical model and its analysis are processed CAE *software* for Finite Element Method (FEM), and the ability of the numerical model to represent reality is verified by comparison, in terms of displacement, between numerical result and prototype test, carried out in the laboratory under anchoring conditions of a chair, according to Resolução CONTRAN N° 445:2013. The prototype tested in laboratory accredited by INMETRO obtained opinion by answering the security requirements for the seat anchorage, and its numerical model behavior compatible with the test. In numerical analysis, the structure of DPM, in general, showed good rigidity and lead to future studies with expected mass reduction equipment.

Keywords: Mechanical Behavior. Numerical Analysis. Finite Element Method. Mobile Armchair.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Equipamento dispositivo de poltrona móvel.....	12
Figura 2 – Elevador para trabalhadores de minas, 1561.....	17
Figura 3 – Desenhos baseados nas primeiras máquinas de elevação inventadas por Arquimedes.....	17
Figura 4 – Dramatização de Otis, 1854 .....	18
Figura 5 – Primeiro ônibus adaptado com elevador no Brasil .....	20
Figura 6 – Plataforma elevatória para ônibus de transporte coletivo urbano .....	21
Figura 7 – Plataforma elevatória para veículo tipo VAN escolar.....	21
Figura 8 – Plataforma elevatória para ônibus rodoviário .....	22
Figura 9 – Plataforma elevatória produção inglesa suspensa e recolhida .....	23
Figura 10 – Dispositivo de poltrona móvel em posição de embarque.....	23
Figura 11 – Dispositivo de poltrona móvel em suspensão .....	24
Figura 12 – Dispositivo de poltrona móvel em posição de viagem .....	24
Figura 13 – Símbolo internacional de acesso – Proporções .....	26
Figura 14 – Cadeira de transbordo – Exemplo ilustrativo.....	27
Figura 15 – Representação tridimensional e gabarito de conferência.....	31
Figura 16 – Aplicação de força conforme resolução CONTRAN N° 445:2013 .....	32
Figura 17 – Geometria e condições de contorno carro de elevador .....	33
Figura 18 – Estrutura do assento de força .....	34
Figura 19 – Movimentos do assento de força: (a) rotação; (b) deslocamento horizontal; (c) deslocamento vertical. ....	35
Figura 20 – Representação esquemática e protótipo do experimento de Ribeiro (1998).....	37
Figura 21 – Modelo sólido com posicionamento dos elementos de contato .....	38
Figura 22 – Curva de desaceleração conforme Meira Junior (2010) .....	39
Figura 23 – Curva de desaceleração conforme IRL. ....	40
Figura 24 – Arranjo estrutural de uma carroceria de ônibus sem elevador.....	41
Figura 25 – Arranjo estrutural de uma carroceria de ônibus com elevador (DPM).....	42
Figura 26 – Detalhe das regiões críticas para verificação de tensão .....	43
Figura 27 – Procedimentos para avaliar a estrutura .....	44
Figura 28 – Principais etapas de abordagem de um problema estrutural .....	45
Figura 29 – Discretização de modelo pelo MEF .....	47
Figura 30 – Estrutura reticulada x estrutura contínua.....	48
Figura 31 – Relação matricial de força, rigidez e deformação.....	49
Figura 32 – (a) estado triaxial de tensões (b) variação de volume (c) distorção .....	50
Figura 33 - Fluxograma do desenvolvimento dos modelos numéricos.....	54
Figura 34 – Modelo geométrico do DPM.....	56
Figura 35 – Modelo da estrutura do DPM dividida em 05 conjuntos .....	57
Figura 36 – Modelo da base da poltrona .....	58
Figura 37 – Elemento finito SOLID187 .....	59
Figura 38 – Elemento finito SHELL181 .....	59
Figura 39 – Elemento finito BEAM 188 .....	60
Figura 40 – Elemento MPC de revolução .....	60
Figura 41 – Elemento MPC de translação .....	61
Figura 42 – Elemento finito CONTA175 e TARGE170.....	61
Figura 43 – Modelo numérico DPM .....	62
Figura 44 – Malha no DPM.....	63
Figura 45 – Pontos de fixação DPM conforme Resolução.....	64
Figura 46 – Condição de contorno para roldanas .....	65

Figura 47 – Condição de contorno para translação .....	65
Figura 48 – Carregamento de 5000 N .....	66
Figura 49 – Pontos de fixação DPM conforme NBR .....	66
Figura 50 – Conexão elevador com estrutura de acoplamento.....	67
Figura 51 – Carregamento de 1850 N .....	67
Figura 52 – Carregamento 1100 N .....	68
Figura 53 – Modelo numérico base da poltrona .....	69
Figura 54 – Malha base da poltrona .....	69
Figura 55 – Condições de contorno da base da poltrona.....	71
Figura 56 – Aplicação de força remota na base da poltrona .....	72
Figura 57 – Carregamento de protensão.....	72
Figura 58 – Protensão em um parafuso .....	73
Figura 59 – Detalhe de poltrona instalada na base .....	73
Figura 60 – Configuração do ensaio.....	74
Figura 61 – Condições de fixação do DPM no ensaio .....	75
Figura 62 – Gráfico força (N) x deslocamento (mm) do ensaio em laboratório .....	77
Figura 63 – Foto estrutura deformada do ensaio em laboratório.....	78
Figura 64 – Deslocamentos no modelo numérico .....	79
Figura 65 – Deformação permanente da base da poltrona no ensaio em laboratório.....	81
Figura 66 – Distribuição de tensão de von Mises na base da poltrona em simulação isolada .	82
Figura 67 – Distribuição de tensão de von Mises na base da poltrona simulação acoplada ao DPM .....	83
Figura 68 – Tensão de von Mises próximo à aba na chapa 3 mm da base da poltrona.....	84
Figura 69 – Perfil deformado da chapa 3 mm da base da poltrona .....	85
Figura 70 – Análise global DPM conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013 .....	86
Figura 71 – Análise base da poltrona conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013.....	86
Figura 72 – Análise elevador conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013 .....	87
Figura 73 – Análise base móvel conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013.....	88
Figura 74 – Análise estrutura de acoplamento conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013 .....	88
Figura 75 – Análise global DPM conforme NBR .....	89
Figura 76 - Análise elevador conforme NBR 15.320.....	90
Figura 77 – Análise global DPM conforme projeto .....	91
Figura 78 – Análise elevador conforme projeto .....	91
Figura 79 – Imagem correções no protótipo .....	93
Figura 80 – Chapa 3 mm do elevador.....	93
Figura 81 – Análise global DPM com melhoria.....	94
Figura 82 – Análise do elevador com melhoria.....	94
Figura 83 - Análise base da poltrona conforme NBR 15.320 .....	105
Figura 84 - Análise base móvel conforme NBR 15.320 .....	105
Figura 85 - Análise estrutura de acoplamento conforme NBR 15.320 .....	106
Figura 86 - Análise da base da poltrona conforme projeto.....	107
Figura 87 – Análise da base móvel conforme projeto .....	107
Figura 88 - Análise da estrutura de acoplamento conforme projeto.....	108
Figura 89 – Diagrama de corpo livre da base da poltrona.....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Inclinação máxima da rampa .....	30
Tabela 2 – Resultados analíticos e do MEF .....	34
Tabela 3 – Comparação das tensões nas juntas .....	43
Tabela 4 – Propriedades mecânicas aço SAE 1020 e SAE 1045 .....	58
Tabela 5 – Relação de condições de carregamento .....	76
Tabela 6 – Comparativo de deslocamentos do protótipo e modelo numérico.....	80
Tabela 7 – Comparação de tensão de von Mises entre modelos numéricos da base da poltrona .....	84
Tabela 8 – Cargas no apoio das corredeiras.....	92
Tabela 9 – Tensões máximas na análise estática do DPM .....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADA	Americans with Disabilities Act
ANTT	Agência Nacional e Transporte Terrestre
ARBL	Aços de alta resistência e baixa liga
ASTM	American Society for Testing & Materials
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CMTC	Companhia Municipal de Transportes Coletivos
DPM	Dispositivo de Poltrona Móvel
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IRL	<i>Indy Racing League</i>
MEF	Método de elementos finitos
NBR	Norma Brasileira
SNPDO	Secretaria Nacional de Promoção dos Direitos da Pessoa com Deficiência

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área, m <sup>2</sup>
$A_t$	Área transversal, m <sup>2</sup>
$E$	Módulo de elasticidade, GPa
$F$	Força, Newton
$F_i$	Pré-carga nos parafusos, Newton
$F_p$	Carga de prova, Newton
$i$	Numero de assentos
$kgf$	Quilograma-força
$S_p$	Resistência à prova, MPa
$S_y$	Limite de escoamento, MPa
$\sigma$	Tensão normal, MPa
$\tau$	Tensão de cisalhamento, MPa
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensão normal perpendicular à determinada coordenada, MPa
$\sigma_x$	Tensão normal perpendicular ao eixo x, MPa
$\sigma_y$	Tensão normal perpendicular ao eixo y, MPa
$\sigma_z$	Tensão normal perpendicular ao eixo z, MPa
$\tau_{xy}$	Tensão de cisalhamento paralela ao eixo x na direção o eixo y, MPa
$\tau_{yz}$	Tensão de cisalhamento paralela ao eixo y na direção o eixo z, MPa
$\tau_{xz}$	Tensão de cisalhamento paralela ao eixo x na direção o eixo z, MPa
$\sigma_{méd}$	Tensão normal média, MPa
$\sigma_{VM}$	Tensão equivalente de von Mises, MPa
$\sigma_y$	Tensão limite para escoamento em tração, MPa
$U_0$	Energia de deformação, J/m <sup>3</sup>
$U_d$	Energia de distorção, J/m <sup>3</sup>
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$G$	Módulo de elasticidade transversal, GPa
$\varepsilon$	Alongamento relativo, m

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Justificativa .....	13
1.2 Objetivos .....	14
1.2.1 Objetivo geral .....	14
1.2.2 Objetivos específicos .....	14
1.3 Metodologia da pesquisa .....	14
1.4 Estrutura do documento .....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 Histórico de elevadores .....	16
2.1.1 Histórico de elevadores em ônibus .....	19
2.1.2 Elevadores existentes em ônibus .....	20
2.2 Histórico de legislações .....	24
2.2.1 Acessibilidade .....	24
2.2.2 Equipamento de embarque e desembarque .....	27
2.2.3 Segurança dos dispositivos de embarque e desembarque .....	29
2.2.4 Prescrições relativas à ancoragem de bancos .....	32
2.2.5 Prescrições relativas ao DPM .....	32
2.3 Estudos existentes com MEF aplicado a elevadores .....	33
2.4 Estudos existentes com MEF aplicado em análise de estruturas metálicas .....	36
2.5 Análise estrutural .....	44
2.5.1 Método dos elementos finitos .....	44
2.5.2 Planejamento do modelo .....	45
2.5.3 Discretização do modelo pelo MEF .....	46
2.5.4 Matriz de rigidez .....	48
2.5.5 Critério de Falha para materiais Dúcteis – Teoria de von Mises .....	50
2.6 Conclusões do capítulo .....	52
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>54</b>
3.1 Descrição geral do DPM .....	56
3.2 Descrição geral da base da poltrona .....	58
3.3 Definição das características dos materiais .....	58
3.4 Tipo de elementos finitos utilizados .....	59
3.5 Modelo numérico do equipamento dispositivo de poltrona móvel (DPM) .....	62
3.5.1 Preparação da malha no DPM .....	62
3.5.2 Condições de contorno DPM .....	63
3.5.2.1 Condição de carregamento DPM conforme resolução CONTRAN Nº 445:2013 64	
3.5.2.2 Condição de carregamento DPM conforme NBR 15.320 .....	66
3.5.2.3 Condição de carregamento DPM conforme projeto .....	68

3.6 Modelo numérico da base da poltrona tratada de forma isolada .....	68
3.6.1 Preparação da malha na base da poltrona .....	69
3.6.2 Condições de contorno base da poltrona .....	70
3.6.3 Aplicação do carregamento na base da poltrona .....	71
3.7 Descrição geral do ensaio .....	74
3.7.1 Condições de contorno do ensaio .....	74
3.8 Conclusões do capítulo .....	75
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>77</b>
4.1 Comparativo entre protótipo e modelo numérico do DPM .....	77
4.2 Comparativo entre protótipo e modelos numéricos da base da poltrona.....	80
4.3 Análise numérica DPM na condição conforme Resolução CONTRAN Nº 445:2013.....	85
4.4 Análise numérica DPM na condição conforme NBR 15.320.....	89
4.5 Análise numérica DPM na condição de Projeto .....	90
4.6 Análise de carga nas corredeiras .....	92
4.7 Sugestão de melhoria no DPM .....	93
4.8 Discussão dos resultados numéricos.....	95
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>97</b>
5.1 Atendimento dos objetivos .....	97
5.2 Contribuições.....	98
5.3 Trabalhos futuros .....	98
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente pessoas com deficiência motora têm seu embarque dificultado em veículos tipo ônibus rodoviário de transporte coletivo, em percursos de média e longa distância. Diante disso, conforme apresentado no capítulo 2, diversos dispositivos foram desenvolvidos ao longo do tempo com o objetivo de facilitar este embarque, dentre os quais existe atualmente o conceito de dispositivo de poltrona móvel (DPM), que é o objeto desta análise.

O DPM, ilustrado na Figura 1, é um sistema de elevação com acionamento elétrico, baseado no conceito de poltrona móvel, o que significa que a poltrona do interior do ônibus e sua respectiva base deslocam-se verticalmente do nível do interior do ônibus até sua parte inferior (nível do bagageiro), possibilitando, dessa forma, embarque/desembarque de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida no nível de acesso comum das estações rodoviárias e pontos de ônibus.

Figura 1 – Equipamento dispositivo de poltrona móvel



Fonte: Elevittá, 2015.

Considerando que o DPM é utilizado para movimentar e acomodar passageiros no interior de ônibus, condições legais e de segurança precisam ser atendidas para sua utilização. E, para atender essas condições, inúmeros esforços concentram-se na fase do projeto, pois, além de um bom modelo geométrico, se faz necessária uma avaliação da estrutura frente às condições de utilização que o equipamento estará sujeito.

Em função de sua complexidade geométrica e condições de contorno, a análise da estrutura do DPM torna-se inviável por métodos analíticos. Para tanto, se faz necessário utilizar métodos numéricos, capazes de representar de forma satisfatória a geometria bem como seu comportamento quando sujeita às cargas estáticas e de serviço.

O método numérico abordado neste estudo para analisar a estrutura do DPM é o Método dos Elementos Finitos, no qual, a análise numérica da estrutura visa obter o comportamento

mecânico estático do DPM, sob condições de carregamento previstas na legislação brasileira. A confiabilidade dos resultados relativos à estrutura deformada obtidos na análise numérica foi comparada com ensaio em laboratório acreditado pelo INMETRO.

### **1.1 Justificativa**

O censo demográfico realizado pelo IBGE no ano de 2010 já indicava que havia um percentual de 2,44% da população brasileira com deficiência motora severa. Aplicando esse índice à população atual, estima-se que o Brasil conta com cerca de 4,8 milhões de pessoas com deficiência motora severa.

Conforme informação do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), o Brasil, no ano de 2015, dispunha de uma frota de 587 mil ônibus destinados ao transporte de passageiros. Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), 350 mil desses veículos estão no transporte coletivo e desses, 39 mil são veículos tipo ônibus rodoviário com capacidade média de transportar 42 passageiros em cada viagem de média e longa distância.

Diante desses números é possível dimensionar o tamanho do desafio que é atender tal demanda. Se todas as pessoas nessas condições resolvessem viajar ao mesmo momento, a frota existente precisaria ser triplicada. No entanto, considerando que a frota disponível está dimensionada de forma adequada para transportar os 205 milhões de habitantes brasileiros, deveria existir em média dois passageiros portadores de deficiência em cada viagem.

Situação muito distante da realidade, em que, diante da inexistência de equipamento instalado de forma apropriada, o embarque de tais passageiros é seguidamente realizado pelos funcionários (motoristas) carregando as pessoas em dispositivos denominados cadeiras de transbordo ou até mesmo em seus braços ao interior do ônibus, condição questionável em relação ao constrangimento e a segurança.

No entanto, no ano de 2015, o INMETRO publicou a Portaria nº 269:2015, que proíbe a utilização da cadeira de transbordo para embarque e desembarque de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida a partir de março de 2016. Essa portaria também determina que todos os veículos acessíveis, de características rodoviárias, destinados ao transporte coletivo de passageiros, comercializados a partir desta data, deverão possuir como único meio de embarque e desembarque de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida a plataforma elevatória veicular, e a utilização de outros equipamentos e dispositivos para este fim ficam condicionadas à avaliação técnica pelo Inmetro.

O equipamento dispositivo de poltrona móvel, que é objeto deste estudo, não se enquadra como plataforma elevatória e, portanto, se faz necessário condicioná-lo a uma

avaliação técnica do INMETRO. Esse fato, associado a questões de segurança preconizadas em norma, justifica a análise numérica da estrutura metálica que compõe o DPM, uma vez que, em função da complexidade do equipamento, é necessário utilizar métodos numéricos já consagrados, como o Método dos Elementos Finitos.

## **1.2 Objetivos**

O estudo que constitui esta dissertação está organizado a partir de um objetivo geral e de quatro objetivos específicos, apresentados a seguir.

### **1.2.1 Objetivo geral**

Realizar, por método numérico e experimental, a análise estrutura estática do equipamento DPM na condição de ancoragem determinada por norma.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- a) Pesquisar e avaliar normas e resolução aplicadas à acessibilidade e segurança veicular para obter os procedimentos de ensaio necessários na homologação do equipamento;
- b) Validar o modelo numérico do DPM na condição de ancoragem, comparando o comportamento do modelo numérico com o ensaio experimental realizado em laboratório;
- c) Aplicar variações de carregamento no modelo numérico validado, a fim de obter mais informações acerca do comportamento mecânico do DPM;
- d) Analisar os resultados obtidos nos modelos numéricos e sugerir possíveis correções no DPM, visando garantir a segurança do equipamento.

## **1.3 Metodologia da pesquisa**

Este estudo inicia com a análise de equipamentos de elevação, com aplicação similar ao dispositivo de poltrona móvel (DPM), seguido de revisão aos requisitos de normas técnicas e de segurança, em especial os requisitos da ABNT NBR 15.320 (Acessibilidade aos Ônibus Rodoviários) e da Resolução CONTRAN Nº 445:2013 (Segurança Para Veículos da Classe Ônibus M3). Ainda nas revisões bibliográficas, consta a análise e o estudo do método dos elementos finitos aplicável nas simulações em *softwares* de engenharia.

Concluída a etapa de pesquisa, inicia-se o modelamento numérico da estrutura do DPM, que passa por análise estrutural estática. Para a análise, utiliza-se o método de elementos finitos (MEF), simulando os possíveis esforços e deslocamentos que acontecem na estrutura do equipamento.

Os deslocamentos obtidos a partir da estrutura deformada na análise estática do modelo numérico são comparados com a estrutura deformada no ensaio realizado em protótipo.

Na análise da estrutura do DPM, são atribuídas condições de contorno ao modelo numérico, de forma que representem as determinações de normas e resoluções, sendo análises estáticas em condições de carga vertical simulando equipamento em suspensão para embarque/desembarque de passageiro e travado no interior do ônibus em posição de viagem, bem como carga horizontal para analisar o equipamento em condição de ancoragem da poltrona.

Após a análise dos resultados numéricos e com objetivo de obter a melhoria da segurança do equipamento, inicia-se o processo de sugestão de melhorias no DPM.

#### **1.4 Estrutura do documento**

Esta dissertação está estruturada em 05 capítulos: o primeiro capítulo compreende a introdução da pesquisa, a qual inclui justificativa acerca da escolha do tema, bem como os objetivos e as metodologias utilizadas; o segundo dedica-se à revisão bibliográfica, em que são abordados os assuntos pertinentes e atuais pesquisas ligadas ao trabalho desenvolvido; o terceiro apresenta o desenvolvimento do estudo, o qual está disposto de acordo com a metodologia escolhida para obtenção do modelo numérico e as definições impostas por norma para realização do ensaio de ancoragem; o quarto corresponde à discussão dos resultados obtidos no desenvolvimento do estudo; e o quinto e último capítulo é reservado às considerações finais, bem como às sugestões de futuros estudos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O embasamento teórico do presente estudo é descrito na sequência, na qual são abordados aspectos relativos a equipamentos de elevação, relatando fatos históricos de sua aplicação e evolução, bem como apresentando os equipamentos com objetivo similar ao objeto deste estudo.

Considerando que o dispositivo de poltrona móvel (DPM) é um equipamento que deve ser instalado em veículos tipo ônibus, se fez necessário um estudo da legislação pertinente com enfoque na questão de acessibilidade e segurança veicular.

O estudo segue demonstrando sínteses de trabalhos similares na área de análise numérica de estruturas metálicas pelo Método dos Elementos Finitos. Na sequência é feita abordagem teórica de análise estrutural, Método dos Elementos Finitos (MEF) e critério de falha.

### **2.1 Histórico de elevadores**

Neste subcapítulo são apresentados fatos históricos relacionados ao surgimento dos equipamentos destinados a executar deslocamentos verticais de cargas ou passageiros, bem como aspectos da evolução de seus mecanismos. Esta parte do estudo também contempla a verificação dos equipamentos disponíveis destinados a embarque/desembarque de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida em veículos de transporte coletivo.

Os elevadores surgiram da necessidade de deslocamento vertical, sendo sua origem tão antiga quanto a civilização. A história dos elevadores (2008) relata que as primeiras informações são anteriores à terceira dinastia (2788 A.C) no Egito, com a construção da primeira pirâmide de pedra conhecida.

Diante das fontes de energia disponíveis e conhecidas da época, os mecanismos de elevação eram movidos pela força do homem, de animais e da água, sendo que esses padrões mais simples foram desenvolvidos engenhosamente pelo homem durante séculos, com o objetivo de erguer coisas, tendo sua principal aplicação nas sociedades agrícolas até o início da Revolução Industrial (1780). Dessa forma, pelo fato de os equipamentos de elevação já serem usados pelas civilizações mais remotas para transportar cargas, inclusive em minas, ele pode ser considerado o predecessor do elevador, conforme ilustrado na Figura 2 (SANTOS, 2007).

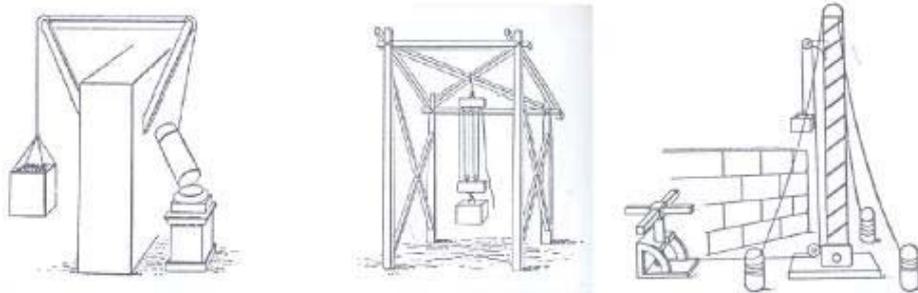
Figura 2 – Elevador para trabalhadores de minas, 1561



Fonte: Santos, 2007.

Conforme Santos (2007), são inúmeras as teorias sobre esses sistemas e, mesmo não informando a capacidade de carga e possível deslocamento, conforme consta na Figura 3, ainda antes de 300 A.C o filósofo Aristóteles ensina em suas escrituras como um sistema de roldanas de manivelas poderia ser utilizados para movimentar cargas pesadas.

Figura 3 – Desenhos baseados nas primeiras máquinas de elevação inventadas por Arquimedes



Fonte: Santos, 2007.

De acordo com a história dos elevadores (2008), o conhecimento de técnicas de elevação não evoluiu durante séculos. Os mecanismos utilizados até o início da Idade Média (século V) eram parecidos com os utilizados na construção de castelos e templos que remontam a 1000 A.C.

Somente em 1515 surgiu o antecessor do atual elevador, quando o Papa Leão X, por questões de dificuldade de locomoção, instalou uma “cadeira voadora” na sua residência.

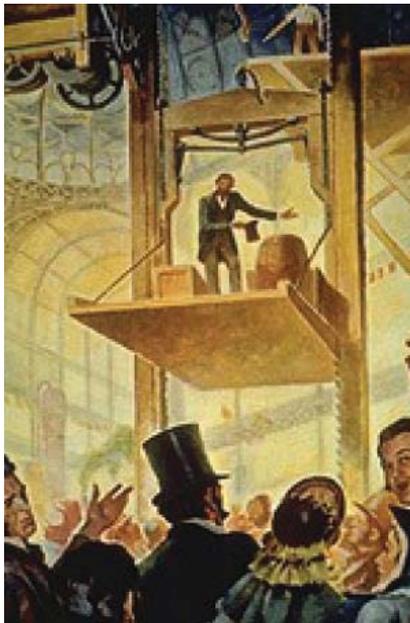
Com a chegada da revolução industrial e a invenção da máquina a vapor, ocorre a dispensa da força de tração humana e animal que predominava até então. Diante dessa fonte de tração alternativa, em 1800 iniciou-se a utilização de equipamentos de elevação para o transporte de carvão de áreas profundas em minas.

Em 1823, surge uma nova fonte de energia para a tração, denominada elevador hidráulico. Criado por Briquet, o conceito-base determina que um tanque móvel com água seja o contrapeso que faz subir e descer o equipamento. Após sete anos, o primeiro elevador com acionamento mecânico é construído em Derby, na Inglaterra.

A partir de 1835, com velocidade de 1 m/s, o elevador Teagle permaneceu durante décadas como um aparelho muito confiável para o transporte de provisões e cargas (principalmente) e pessoas.

Conforme relata a história dos elevadores (2008), a problemática no transporte por elevadores estava no fato de, em caso de ruptura das cordas que tracionavam as plataformas, a queda dos equipamentos construídos até 1852 era geralmente fatal para os usuários. No entanto, esse risco é sanado em 1853, quando Elisha Graves Otis idealiza e patenteia o dispositivo de segurança que evita a queda de plataformas, surgindo então o elevador de segurança, ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Dramatização de Otis, 1854



Fonte: Santos, 2007.

Em 1880, Werner Von Siemens e Hulstie apresentam, na Feira de Indústria de Mannheim na Alemanha, o primeiro elevador movido a motor elétrico, que levaria 11 segundos para subir até o topo da torre de 20 metros.

Em 1943 acontece a fabricação completa de elevadores no Brasil, iniciada pela Villares.

A instalação dos primeiros elevadores panorâmicos no Brasil ocorreu em 1971, em São Paulo, no Edifício Sir Wiston Churchil e no Eron Brasília Hotel.

No ano de 1989 é disponibilizado para o mercado o elevador linear, que dispensa a casa de máquinas pelo fato do motor estar incorporado ao contrapeso.

Ainda conforme o autor, em 1993 é instalado, na Torre Landmark, no Japão, o elevador mais rápido do mundo para a época, com capacidade de movimentar-se a 12,5 m/s em um percurso de 267 m.

Em 1997 é lançado na Alemanha o elevador que chega ao edifício pré-moldado e é instalado em 03 dias. O equipamento possui quadro de comando e motor sob a cabine e pode atender edifícios de até 07 andares.

Conforme anunciado por Cone Corporation (2013), importante conquista foi alcançada com o desenvolvimento de cabos mais leves compostos de núcleo em fibra de carbono e revestimento de alta fricção para sustentação de elevadores.

### **2.1.1 Histórico de elevadores em ônibus**

Os elevadores utilizados nos veículos de transporte coletivo ou rodoviário buscam primordialmente facilitar o deslocamento vertical necessário para vencer o desnível existente entre a plataforma de embarque e o piso interno do veículo durante as operações de embarque e desembarque de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida.

Conforme Shimosakai (2008), somente em 1981, por iniciativa da Companhia Municipal de Transportes Coletivos – São Paulo (CMTC), foi apresentado no Brasil o primeiro ônibus adaptado com elevador para cadeirantes e pessoas com mobilidade reduzida, conforme ilustrado na Figura 5. O veículo teria sido adaptado na oficina da própria CMTC, que desenvolveu o elevador e o fixou em uma porta localizada na região do entre-eixo da carroceria. O veículo também previa no seu interior um espaço reservado para fixar a cadeira de rodas durante a viagem.

Figura 5 – Primeiro ônibus adaptado com elevador no Brasil



Fonte: Shimosakai, 2008.

Segundo Paraná Online (2002), no ano de 2002, a empresa Marcopolo (fabricante de ônibus) produziu no Brasil um ônibus com elevador para o transporte de deficientes físicos. O veículo destinado à exportação foi totalmente desenvolvido a pedido do cliente costarriquenho para atender a legislação daquele país. O veículo trazia área reservada para quatro passageiros portadores de deficiência, sendo que suas cadeiras ficavam dentro do bagageiro. O elevador é instalado no meio do ônibus, entre o eixo dianteiro e traseiro do veículo.

Ainda de acordo com Shimosakai (2008), após o trabalho da CMTC, esta área se manteve estagnada durante as décadas de 80 e 90. Apenas em 2004, surgem ações do governo com intuito de instituir e regulamentar as questões relativas à acessibilidade nos veículos destinados ao transporte público coletivo e rodoviário.

### **2.1.2 Elevadores existentes em ônibus**

Atualmente, é possível encontrar diversos modelos de equipamentos destinados a facilitar o embarque e desembarque de pessoas em veículos de transporte de passageiros. Este subcapítulo apresenta alguns dos equipamentos existentes com sua aplicação e características básicas.

Os equipamentos com maior número de veículos instalados são os destinados ao transporte coletivo urbano de passageiros. Normalmente a plataforma é instalada entre o rodado dianteiro e traseiro no lado direito do veículo. O equipamento consiste em uma plataforma com deslocamento vertical capaz de transportar um cadeirante em sua respectiva cadeira de rodas ou pessoa com mobilidade reduzida, do nível da plataforma de embarque até o piso interno do veículo. O acesso à plataforma ocorre em uma porta semelhante às portas de entrada e saída convencionais do veículo, considerando que a plataforma, quando não está em

uso, assume o formato de uma escada, logo, este espaço pode ser usado para embarque e desembarque convencional conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Plataforma elevatória para ônibus de transporte coletivo urbano



Fonte: Mob Ceará, 2015.

A instalação de elevadores em veículos menores não é menos importante, porém ainda aparece de forma discreta em veículos com aplicações específicas, como transporte de escolares e pacientes, conforme mostra a Figura 7. Esse modelo de equipamento é instalado sobre o piso, na traseira de veículos tipo VAN, sendo que o acesso à plataforma ocorre pelas portas traseiras do veículo, as quais normalmente servem para carga e descarga de materiais.

Figura 7 – Plataforma elevatória para veículo tipo VAN escolar



Fonte: Greencar, 2016.

Ainda entre os fabricantes nacionais existem elevadores desenvolvidos para equipar veículos tipo ônibus utilizados no transporte rodoviário de passageiros em médias e longas distâncias. Este modelo de elevador, ilustrado na Figura 8, é instalado no bagageiro do ônibus e sua fixação com a carroceria ocorre nas extremidades da torre. Seu conceito construtivo demanda a instalação de portinholas com aberturas laterais na região do bagageiro e também uma porta na parte superior do assoalho da carroceria, região do interior do ônibus paralela ao mecanismo montado no bagageiro.

Essa plataforma, apesar de possuir mecanismos de articulação diferente dos modelos citados anteriormente, traz o mesmo conceito, em que a elevação vertical ocorre pela parte externa do veículo. O passageiro é embarcado em sua própria cadeira de rodas que lhe servirá de acento durante a viagem, visto que no interior do ônibus há um local exclusivo na região entre as poltronas dos passageiros para alojamento da cadeira de rodas.

Figura 8 – Plataforma elevatória para ônibus rodoviário



Fonte: SunFlowers Turismo, 2015.

Seguindo o conceito de elevação vertical externa, há o equipamento de fabricação inglesa, que pode ser visualizado na Figura 9. Esse equipamento, conforme catálogo do fabricante PLS - Passenger Lift Services (2014), quando não está em uso, possui como característica fundamental seu formato compacto de armazenamento tipo gaveta, podendo ser facilmente acomodado sob o piso ou a escada dos veículos. Essa plataforma é totalmente automatizada, com acionamento elétrico, podendo ser operada, pelo motorista, no painel de instrumentos do veículo. O fabricante relata que o produto foi desenvolvido em conjunto com os principais fabricantes de carrocerias e traz em seus catálogos modelos com o mesmo conceito, mas adaptados para instalação nos mais diversos tipos de veículos, desde ônibus tipo executivo para transportes de média e longa distância até micro-ônibus de uso escolar ou transporte de pacientes.

Figura 9 – Plataforma elevatória produção inglesa suspensa e recolhida



Fonte: PLS – Passenger Lift Services, 2014.

Retomando os produtos nacionais, existe o dispositivo de poltrona móvel, com desenvolvimento e produção brasileira. O equipamento, apresentado nas Figura 12, Figura 11 e Figura 12, busca atender especificamente veículos para transporte de passageiros do tipo ônibus rodoviário em deslocamentos de média e longa distância.

Essa plataforma normalmente é instalada entre o rodado dianteiro e traseiro no lado direito do veículo. O equipamento traz um conceito diferenciado em relação aos citados anteriormente, pois a poltrona do interior do ônibus juntamente com parte da sua base móvel é que se desloca para a parte inferior do ônibus, buscando o passageiro no nível de acesso comum conforme ilustrado na Figura 10, sendo que, este já parte do nível de embarque em sua poltrona e com cinto de segurança. Nesse modelo de equipamento, o acesso do passageiro ocorre por uma porta exclusiva, localizada abaixo da linha das janelas laterais, estendendo-se até o limite inferior do chapeamento lateral do veículo.

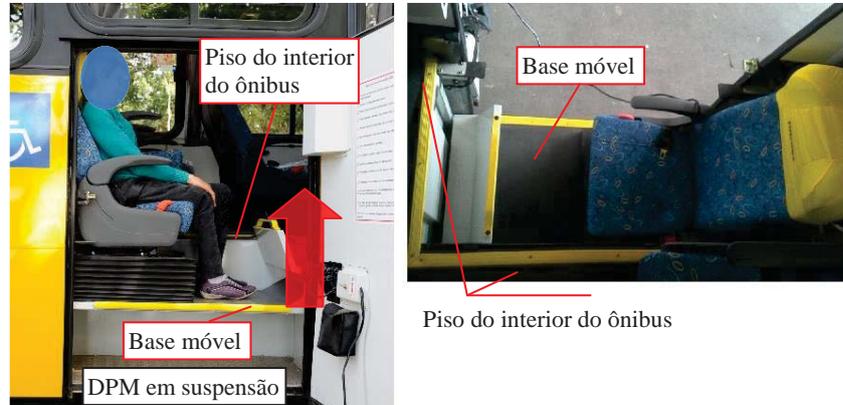
Figura 10 – Dispositivo de poltrona móvel em posição de embarque



Fonte: Elevittá, 2015.

Com o passageiro acomodado na poltrona e preso ao cinto de segurança, o DPM é suspenso conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Dispositivo de poltrona móvel em suspensão



Fonte: Elevittá, 2015.

Finalmente com a base móvel do DPM no mesmo nível do piso do interior do ônibus conforme ilustrado na Figura 12, o equipamento estabelece a condição de travado em condição de viagem.

Figura 12 – Dispositivo de poltrona móvel em posição de viagem



Fonte: Elevittá, 2015.

## 2.2 Histórico de legislações

A literatura brasileira apresenta uma ampla legislação relacionada à construção de veículos. No entanto, considerando que o dispositivo de poltrona móvel é um equipamento que deve ser instalado em veículos tipo ônibus, a pesquisa ficou em torno das legislações voltadas à acessibilidade e segurança no transporte coletivo de passageiros portadores de deficiência motora ou mobilidade reduzida.

### 2.2.1 Acessibilidade

As normas definem o termo acessibilidade como a possibilidade e condição de alcance, percepção e entendimento para a utilização com segurança e autonomia de edificações,

espaço, mobiliário, equipamento urbano e elementos por pessoa com deficiência ou mobilidade reduzida.

Conforme Moraes (2007), a partir da década de 80, várias ações em prol da acessibilidade, do ponto de vista jurídico e normativo, são visíveis no mundo todo. No Brasil é divulgada a primeira NBR 9050 em setembro de 1985.

A Lei Nº 7.853, de 1989, estabelece normas gerais que asseguram o pleno exercício dos direitos individuais e sociais das pessoas portadoras de deficiências. Para tanto, estabelece ações que devem ser seguidas nas áreas de educação, saúde, edificações, recursos humanos, formação profissional e trabalho.

Em 1999 é publicado o Decreto Nº 3.298, que trata da regulamentação da Lei Nº 7.853. Esse decreto reforça o compromisso dos órgãos e das entidades do Poder Público em assegurar à pessoa portadora de deficiência o pleno exercício de seus direitos básicos.

Publicada no ano de 2000, a Lei 10.098 traz em sua redação normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida.

Ainda no ano de 2000, ocorre a publicação da Lei 10.048, que trata, em seu Art. 3º, da questão referente à reserva de assentos no transporte coletivo: “As empresas públicas de transporte e as concessionárias de transporte coletivo reservarão assentos, devidamente identificados, aos idosos, gestantes, lactantes, pessoas portadoras de deficiência e pessoas acompanhadas por crianças de colo”.

Também no ano de 2000, para regulamentar a Lei nº 8.899, de 1994, a qual concedia passe livre às pessoas portadoras de deficiência no sistema de transporte coletivo interestadual, ocorre a publicação do Decreto nº 3.691, que limita em dois o número de assentos de cada veículo do serviço convencional destinado a atender essas pessoas.

No ano de 2003, o Ministério da Educação publicou a Portaria nº 3.284, que define instrumentos destinados a avaliar as condições de oferta de cursos superiores, tomando como referência a Norma Brasil 9050, da Associação Brasileira de Normas Técnicas, que trata da Acessibilidade de Pessoas Portadoras de Deficiências a Edificações, Espaço, Mobiliário e Equipamentos Urbanos.

No final do ano de 2004, foi publicado o Decreto nº 5.296, que regulamenta as Leis nº 10.048 e nº 10.098 de 2000. Esse decreto, em seu Art. 38, trata mais especificamente da acessibilidade no transporte coletivo rodoviário e determina prazo de até vinte e quatro meses a contar da data de edição das normas técnicas, para que todos os modelos e todas as marcas de veículos de transporte coletivo rodoviário para utilização no país sejam fabricados de

maneira a garantir acessibilidade. Logo em seu parágrafo primeiro, define que as normas devem ser elaboradas pelas instituições e entidades que compõem o Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, e estarão disponíveis no prazo de até doze meses a contar da data da publicação do Decreto.

Em 2005 surge a correção da segunda edição da norma ABNT NBR 9050, que traz em seu texto os critérios e parâmetros técnicos necessários para promover condições de acessibilidade a serem observados quando do projeto, da construção, instalação e adaptação de edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos.

A norma ABNT NBR 9050 contempla os parâmetros antropométricos com as dimensões necessárias para atender acessibilidade, considerando as medidas entre 5% a 95% da população brasileira, ou seja, os extremos correspondentes a mulheres de baixa estatura e homens de estatura elevada, isso associado aos aparelhos específicos que venham a complementar as necessidades individuais. Também traz em seu capítulo 5º as formas visuais (Figura 13), táteis e sonoras adequadas de comunicação e sinalização necessárias para viabilizar o acesso e a identificação dos ambientes adaptados às condições de acessibilidade.

Figura 13 – Símbolo internacional de acesso – Proporções



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9050, 2004.

No ano de 2005, também ocorreu a publicação da norma ABNT NBR 15.320, que estabelece os padrões e critérios que visam a proporcionar à pessoa com deficiência ou mobilidade reduzida a acessibilidade ao transporte rodoviário, tendo aplicação compulsória para os veículos novos e aplicação recomendada àqueles em circulação. Considera-se como veículo acessível aquele que permite acesso, acomodação e uso, com segurança, por pessoa com deficiência.

Na sua quarta edição, no ano de 2011, a norma ABNT NBR 14.022 estabelece os parâmetros e critérios técnicos de acessibilidade a serem observados em todos os elementos do sistema de transporte coletivo de passageiros de características urbanas, visando proporcionar acessibilidade com segurança à maior quantidade possível de pessoas, independentemente da idade, estatura e condição física ou sensorial.

Em seguida, no ano 2012, acontece a publicação da Resolução ANTT nº 3.871, que estabelece procedimentos a serem observados pelas empresas transportadoras, para assegurar condições de acessibilidade às pessoas com deficiência ou com mobilidade reduzida na utilização dos serviços de transporte rodoviário interestadual e internacional de passageiros.

### 2.2.2 Equipamento de embarque e desembarque

No ano 2004, com a publicação do Decreto nº 5.296, que regulamenta as Leis nº 10.048 e nº 10.098 de 2000, surge o conceito de sistema de transporte rodoviário acessível, do qual fazem parte os veículos, os terminais, as estações, os pontos de parada, as vias, os acessos e a operação.

Conforme definido no Decreto nº 5.296, a ABNT publicou a NBR 15.320, que estabelece os padrões e critérios que visam a proporcionar à pessoa com deficiência ou mobilidade reduzida a acessibilidade ao transporte rodoviário, tendo aplicação compulsória para os veículos novos e aplicação recomendada àqueles em circulação.

De acordo com o item 5 da NBR 15.320, uma das seguintes possibilidades deve ser usada para atender os requisitos de acessibilidade referidos na norma:

- a) Passagem em nível da plataforma de embarque/desembarque do terminal (ou ponto de parada) para o salão de passageiros;
- b) Dispositivo de acesso instalado no veículo, interligando-o com a plataforma;
- c) Dispositivo de acesso instalado na plataforma de embarque, interligando-a ao veículo;
- d) Rampa móvel colocada entre o veículo e a plataforma;
- e) Plataforma elevatória; e
- f) Cadeira de transbordo (Figura 14).

Figura 14 – Cadeira de transbordo – Exemplo ilustrativo



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9050, 2004.

Em 2011, a última versão da norma ABNT NBR 14.022 traz os parâmetros e critérios técnicos de acessibilidade a serem observados em todos os elementos do sistema de transporte coletivo de passageiros de características urbanas.

Na abordagem da NBR 14.022 deve-se adequar o local de embarque/desembarque do veículo ou ambos por meio de dispositivo para transposição de fronteira, na forma de:

- a) Rampa de acionamento motorizado ou manual;
- b) Plataforma elevatória veicular;
- c) Sistema de movimentação vertical da suspensão do veículo;
- d) Plataforma de embarque e desembarque;
- e) Combinação de um ou mais dispositivos.

Em complemento às normas NBR 14.022 e NBR 15.570, surge a ABNT NBR 15.646:2011, que aborda os critérios técnicos para a fabricação de plataformas elevatórias veiculares (elevadores) e rampas acessíveis, além dos requisitos de operação e manutenção desses equipamentos.

No ano de 2011 é republicada a norma ABNT NBR 15.570, iniciada em 2005, que estabelece as características construtivas e os equipamentos auxiliares aplicáveis aos veículos produzidos para operação no transporte coletivo urbano de passageiros, de forma a garantir as condições de segurança, conforto, acessibilidade e mobilidade aos seus condutores e usuários, independentemente da idade, estatura e condição física ou sensorial. Para o atendimento dos requisitos de acessibilidade, traz incorporado em seu texto os critérios existentes NBR 14.022, bem como requisitos de fabricação de determinados equipamentos (plataforma elevatória veicular) da ABNT NBR 15.646.

Na sequência, no ano de 2012, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) publica a Resolução 3.871, que expande a aplicação dos requisitos normativos aos serviços de transporte rodoviário interestadual e internacional de passageiros, de forma que mantém as mesmas possibilidades para equipamentos de embarque e desembarque constantes na NBR 15.320.

Recentemente o INMETRO publicou a Portaria nº 269:2015, que proíbe a utilização da cadeira de transbordo para embarque e desembarque de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida a partir de março de 2016. Essa portaria também determina, em seu Artigo 2º, que todos os veículos acessíveis, de características rodoviárias, destinados ao transporte coletivo de passageiros, comercializados a partir de março de 2016, deverão possuir como único meio de embarque e desembarque de pessoas com deficiência ou

mobilidade reduzida a plataforma elevatória veicular certificada por Organismo de Certificação de Produto (OCP), estabelecido no país e acreditado pelo Inmetro. E, no Artigo 5º, determina que a utilização de outros equipamentos e dispositivos para embarque e desembarque de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida, nos veículos acessíveis, de características rodoviárias, destinados ao transporte coletivo de passageiros, fica condicionada à avaliação técnica pelo Inmetro.

Finalmente, em consonância com a Portaria INMETRO nº 269:2015, a ABNT NBR 15.320 passa por processo de revisão e, em seu novo texto, exclui a cadeira de transbordo da lista de possibilidades para embarque e desembarque. A revisão da norma ABNT NBR 15320 apresenta como alternativas de embarque/desembarque de pessoas com deficiência os seguintes equipamentos:

- a) Plataforma elevatória veicular (PEV);
- b) Rampa de acesso veicular (RAV), manual ou motorizada, para acesso ao piso inferior dos ônibus de dois pisos;
- c) Dispositivo de poltrona móvel (DPM);
- d) Plataforma elevatória estacionária (PEE) fixa ou móvel;
- e) Passagem em nível da plataforma do terminal para o salão de passageiros;
- f) Dispositivo de interligação instalado no veículo ou na plataforma;
- g) Outros equipamentos ou a associação com novas opções de dispositivos.

O texto revisado da NBR 15.320 condiciona a aplicação desses dispositivos de transposição de fronteira a um processo de certificação compulsória do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). E as empresas fabricantes do chassi, da carroceria e do equipamento devem avaliar a interferência no peso bruto total, na estrutura veicular e na capacidade de transporte do veículo.

### **2.2.3 Segurança dos dispositivos de embarque e desembarque**

A norma ABNT NBR 15.320:2011, que dispõe sobre requisitos de acessibilidade para os serviços de transporte rodoviário, como já mencionado, traz seis possibilidades de dispositivos para embarque e desembarque de forma acessível, sendo que em todas as possibilidades os equipamentos podem ter uma declividade máxima de 10%.

As plataformas móveis com deslocamento no plano vertical devem ter dimensões mínimas de 0,90 m por 1,30 m, dispor de barras de proteção acionáveis manualmente pelo usuário, desnível de 2 cm e vão máximo de 3 cm entre plataforma e pavimento, bem como alarme sonoro e luminoso indicador de movimento.

Em relação à cadeira de transbordo, que visa a permitir o deslocamento da pessoa com deficiência até o assento a ela destinado, a norma NBR 15.320 determina que a cadeira de transbordo deve prever cintos de segurança de travamento nas áreas superiores (peitoral) e inferiores (cintura e pernas) para maior segurança do usuário durante o trâmite, bem como suportar um peso de no mínimo 120 kg ou 1.300 N (Newton).

Em relação aos veículos produzidos para operação no transporte coletivo urbano de passageiros, a NBR 15.570:2011, em seu item 36, traz características que visam à segurança desses equipamentos destinados à transposição de fronteira.

Os dispositivos de transposição de fronteira apresentam-se na forma de rampas, que devem ter como requisitos mínimos de concepção e operação, além dos previstos na ABNT NBR 15.646, largura livre mínima de 0,80 m e comprimento máximo de 1,80 m, sendo que destes, no máximo 0,90 m podem ser projetados para fora do veículo, podendo ser formado por um ou mais planos. A inclinação máxima em operação de qualquer desses planos em relação ao plano horizontal, obtida a partir da linha de contato da rampa com a calçada, deve estar dentro dos limites constantes na Tabela 1.

Tabela 1 – Inclinação máxima da rampa

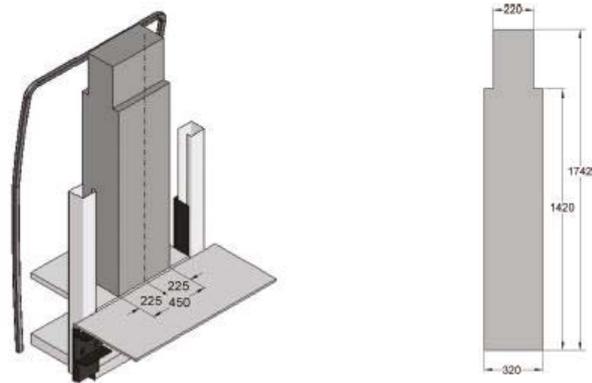
Rampa (r)	Inclinação (%)	Inclinação (°)
$\leq 900mm$	16,6	9,45
$900mm < r \leq 1800mm$	12,5	7,13

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15.570, 2011.

Outra possibilidade de dispositivo de transposição de fronteira, conforme NBR 15.570, é a plataforma elevatória veicular aplicável a veículos de piso alto, sendo que este dispositivo também deve atender o que prevê na ABNT NBR 15.646, e os seguintes requisitos mínimos de concepção e operação:

- a) Possibilitar a elevação de pessoa com deficiência em cadeira de rodas ou com mobilidade reduzida em pé, para acesso em nível ao interior do veículo;
- b) Prever vãos livres mínimos de 800 mm na largura para passagem livre de usuários e de 1000 mm para o comprimento em operação para cadeira de rodas;
- c) Contar com pega-mão instalado em ambos os lados da plataforma elevatória para o usuário que não utiliza cadeira de rodas para permitir o embarque seguro durante todo o curso vertical da plataforma;
- d) Dispor de piso antiderrapante e espaço livre para embarque de uma pessoa em pé que respeite as dimensões de volume conforme consta no gabarito da Figura 15.

Figura 15 – Representação tridimensional e gabarito de conferência



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15.570, 2011.

A Resolução CONTRAN N° 316 de 2009 estabelece os requisitos de segurança para veículos de transporte coletivo de passageiros M2 e M3 de fabricação nacional e estrangeira.

No entanto, em 2013, com a publicação da Resolução CONTRAN N° 445, ficam revogadas as resoluções CONTRAN 316:2009 e 811:1996. A resolução CONTRAN estabelece os requisitos de segurança para veículos de transporte público coletivo de passageiros e transporte de passageiros tipo micro-ônibus e ônibus categoria M3 de fabricação nacional e importado. E fica definida a categoria M3 como os veículos destinados ao transporte coletivo público de passageiros e de transporte de passageiros dotados de mais de oito lugares, além do condutor, com Peso Bruto Total superior a 5,0 toneladas. A Resolução CONTRAN N° 445 tem, em seu anexo IV, as obrigatoriedades relativas à ancoragem dos bancos nos veículos categoria M3 aplicáveis em todas as classes. E no anexo VI define os requisitos obrigatórios relativos à estabilidade e ao sistema de retenção da cadeira de rodas e seu usuário para veículos da categoria M3 destinados à aplicação urbana e escolar quando necessário.

A aplicação dos quatro primeiros equipamentos citados na norma ABNT NBR 15.320 não se efetivou no transporte rodoviário, mas apresenta grande aplicação no transporte coletivo urbano, em que, além de viabilizar o embarque das pessoas com mobilidade reduzida, também agiliza o processo de embarque e desembarque dos demais passageiros.

Por sua vez, a plataforma elevatória dispõe de produto desenvolvido e disponível no mercado nacional para atender veículos de transporte rodoviário, porém é mais onerosa que a cadeira de transbordo e precisa espaço exclusivo no interior do ônibus para manobrar e acomodar o cadeirante.

### 2.2.4 Prescrições relativas à ancoragem de bancos

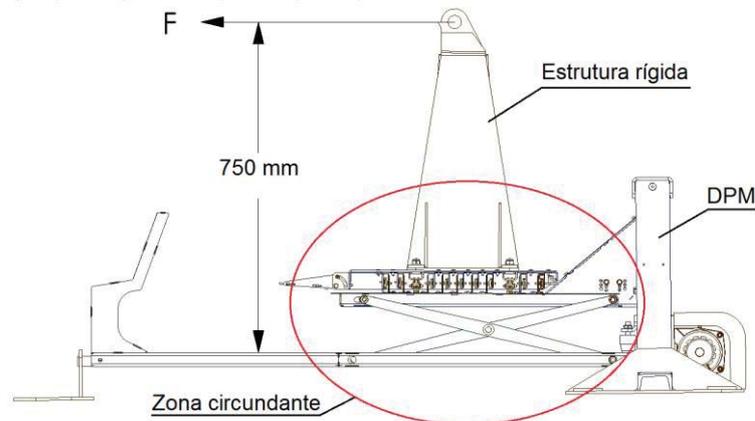
Conforme Resolução CONTRAN Nº 445:2013, a ancoragem dos bancos de um tipo de veículo devem ser capazes de resistir a uma força  $F$  aplicada em uma altura de 0,75 m acima do plano de referência e num plano vertical contendo o centro geométrico da superfície limitada pelo polígono cujos vértices constituem os pontos de ancoragem ou, se for o caso, pelas ancoragens extremas da poltrona, por intermédio da estrutura rígida suficientemente representativa do banco a ser montado no veículo.

A força aplicada deve ser de forma rápida por pelo menos 0,2 s na direção horizontal e no sentido de marcha do veículo. Essa força é determinada pela seguinte fórmula:

$$F = (5000 \pm 50) \times i \quad (1)$$

sendo a força “ $F$ ” expressa em Newton (N) e “ $i$ ” representando o número de assentos para os quais as ancoragens estão sendo ensaiadas. A Figura 16 ilustra a respectiva força aplicada em consonância com a resolução.

Figura 16 – Aplicação de força conforme resolução CONTRAN Nº 445:2013



Fonte: Adaptado da Resolução CONTRAN Nº 445, 2013.

A deformação permanente, incluída a ruptura, de uma ancoragem ou da zona circundante é permitida, desde que a força prescrita seja mantida por todo o período previsto.

### 2.2.5 Prescrições relativas ao DPM

Conforme texto revisado da NBR 15.320, informado no Anexo A, é atribuída a seguinte definição para o DPM: “Equipamento instalado no veículo para a transposição de fronteira que permite realizar o deslocamento vertical de uma ou mais poltronas do salão do veículo, possibilitando o embarque sentado de pessoa com deficiência ou mobilidade reduzida ao nível do piso interno do ônibus”.

O DPM deve atender as condições de ancoragem de poltrona conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013.

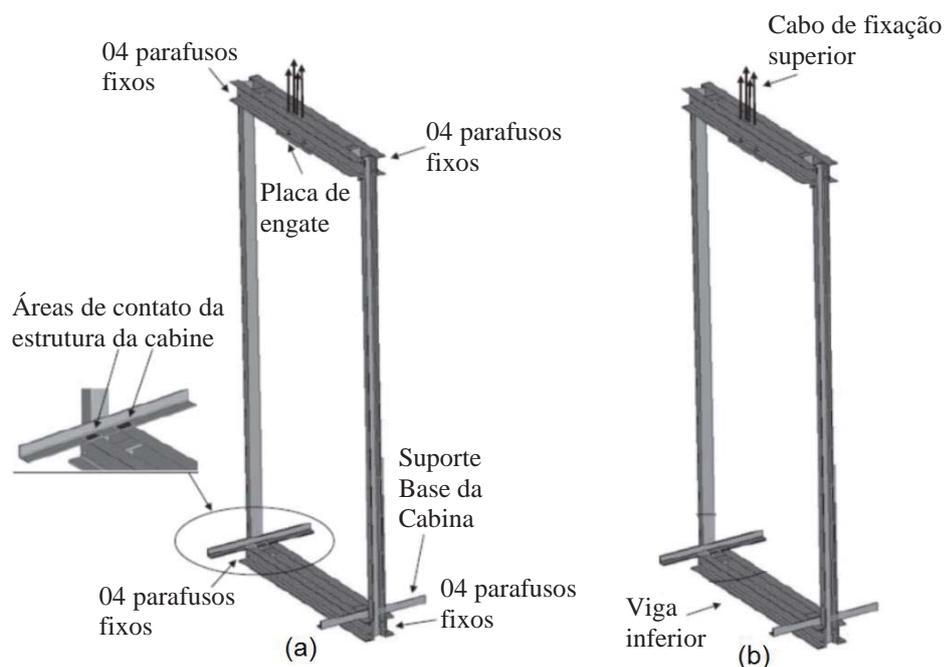
O dispositivo de poltrona móvel deve suportar, além de seu próprio peso, uma poltrona com seus componentes e uma carga estática de 1.500 N distribuída sobre a estrutura de fixação da poltrona. Caso o dispositivo movimente mais de uma poltrona, essa carga deve ser acrescida de 1000 N para cada lugar a mais.

### 2.3 Estudos existentes com MEF aplicado a elevadores

Este subcapítulo apresenta estudos aplicados a equipamentos similares, dos quais o estudo de Onur e Imrak (2012) pode ser utilizado para validar a aplicabilidade do MEF na simulação estática do DPM na condição de içamento do elevador e base móvel, e o estudo de Shi e Lee (2009), por tratar de análise de um equipamento com função similar ao DPM, apresenta expressiva influência na escolha do modelo numérico e suas condições de contorno de forma compatível com o MEF.

Onur e Imrak (2012) realizaram estudo para determinar os valores de tensão e deformação que ocorre nos componentes da estrutura do carro de um elevador pelo Método dos Elementos Finitos. Para a análise estática deste estudo, foi considerada uma cabina de elevador conforme ilustrado na Figura 17, com 525 kg de massa e capacidade de carga para cinco passageiros 400 kg, totalizando 925 kg. Na Figura 17(a) também é possível verificar a geometria estudada e as condições de contorno informadas pelos autores.

Figura 17 – Geometria e condições de contorno carro de elevador



Fonte: Adaptado de Onur e Imrak, 2012.

Abordagens analíticas foram usadas para obter dados e comparar com os resultados obtidos pelo MEF: uma abordagem considerada como simplificada, uma vez que as cargas são aplicadas de forma concentrada e simétrica no centro da viga inferior, e outra abordagem que considera as cargas distribuídas ao longo da viga inferior de forma simétrica em relação ao cabo de fixação superior do carro do elevador conforme ilustrado na Figura 17(b).

Parte dos resultados desse estudo está disposta na Tabela 2, sendo que, a maior diferença de 19,2% é nas conexões das vigas (região dos 04 parafusos) e a menor diferença 2,1% é nas vigas verticais. Conforme o autor, os valores confirmam a confiabilidade do MEF.

Tabela 2 – Resultados analíticos e do MEF

		Tensão máxima (MPa)		
		Conexão das vigas	Viga inferior	Viga vertical
Solução analítica	Primeira abordagem	34,52	13,34	14,03
	Segunda abordagem	32,02	16,40	9,82
Solução numérica MEF		28,95	19,49	13,74
Diferença entre analítico x MEF		19,2%	15,8%	2,1%

Fonte: Adaptado de Onur e Imrak, 2012.

Conforme o estudo de Shi e Lee (2009), para desenvolvimento e análise de um equipamento a fim de facilitar embarque e desembarque de pessoas com deficiência em veículos de passeio, a realização da análise estática é essencial para o desenvolvimento do projeto, pois simula as condições de uso do equipamento e o comportamento das tensões e deformações da estrutura.

A Figura 18 ilustra a estrutura do equipamento que os autores denominam “Power Seat” (assento de força).

Figura 18 – Estrutura do assento de força



Fonte: Shi e Lee, 2009.

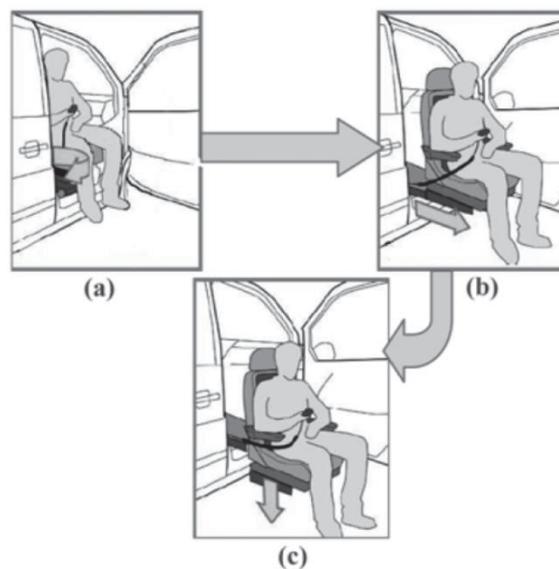
Com base nos resultados de análise estática, partes críticas da estrutura podem ser identificadas e podem ser modificadas para melhorar a segurança e estabilidade, sendo que, para fabricantes e usuários, durabilidade é uma grande preocupação.

Shi e Lee relatam que a análise numérica pode fornecer informações sobre o possível nível do perigo caso ocorra um acidente. No estudo, todos os testes mencionados foram realizados no assento de força, visando ao desenvolvimento do produto e à análise do seu desempenho.

Os autores consideram que testes em protótipos demandam tempo e recurso financeiro, o que justifica a análise estática realizada em *software* de elementos finitos.

Na Figura 19 pode ser verificada a posição do equipamento na situação de rotação no interior do veículo, Figura 19(a), o deslocamento horizontal para parte externa, Figura 19(b) e, na sequência, o deslocamento vertical, Figura 19(c).

Figura 19 – Movimentos do assento de força: (a) rotação; (b) deslocamento horizontal; (c) deslocamento vertical.



Fonte: Adaptado de Shi e Lee, 2009.

Ainda conforme Shi e Lee (2009), a segurança e estabilidade do assento de força são questões importantes para os passageiros. Neste estudo, a análise estática foi feita usando o MEF, que é uma abordagem eficaz e eficiente. A análise foi realizada com base nos seguintes requisitos, conforme orientação do órgão governamental norte americano “Americans with Disabilities Act” (ADA):

- a) O peso do banco é de aproximadamente 90 kg, assumindo que o peso máximo de um passageiro é 90 kg e o fator de segurança é 3. Assim, a carga aplicada utilizada na análise estática (além do peso do próprio banco) foi de 270 kg.
- b) A carga total é distribuída sobre a superfície da base do assento.

- c) A articulação que possibilita o movimento de rotação é capaz de suportar a carga total.
- d) Deflexão da plataforma menor que 3°.

A análise estática da estrutura foi realizada na posição do assento totalmente estendido, conforme Figura 19(c). A partir da análise, verificou-se que a tensão ficou abaixo do limite escoamento de 235 MPa e a deflexão satisfaz a especificação ADA.

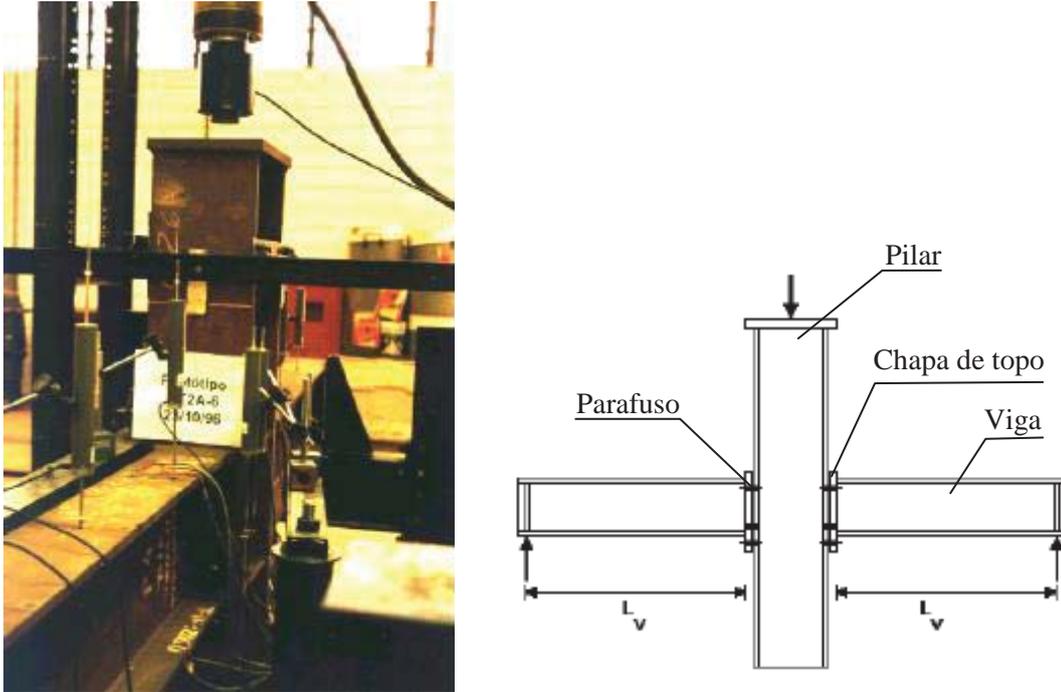
#### **2.4 Estudos existentes com MEF aplicado em análise de estruturas metálicas**

Outros quatro estudos foram explorados na área de análise numérica, sendo que: o estudo de Maggi (2000) traz metodologia para preparação de modelos numéricos e informações relativas às condições de contato em conexões aparafusadas que podem ser aplicadas no DPM; os estudos de Meira Junior (2010) e Alves Pereira (2012), de forma associada, resultam em uma força que é comparada aos 5.000 N de carregamentos previstos na Resolução CONTRAN N° 445:2013; e o estudo de Aderichn (2014) analisa o conjunto estrutural de uma carroceria de ônibus rodoviário com a previsão e espaço para aplicação do DPM.

Maggi (2000) apresenta análise numérica sobre comportamento estrutural de ligações parafusadas no contato viga-coluna com chapa de topo. O autor, buscando avaliar a representatividade da análise numérica, adota modelos numéricos com características de protótipos experimentais que possuíam resultados conhecidos, sendo que a análise experimental escolhida como base consta nos estudos realizados por Ribeiro (1998), no Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos.

A geometria analisada consiste em uma viga Perfil VS 250x37 com chapa soldada no topo onde ela é fixada no pilar tipo CVS 350x105. Na Figura 20 é apresentada a visão geral do protótipo experimental seguida da representação esquemática do mesmo.

Figura 20 – Representação esquemática e protótipo do experimento de Ribeiro (1998)



Fonte: Maggi, 2000.

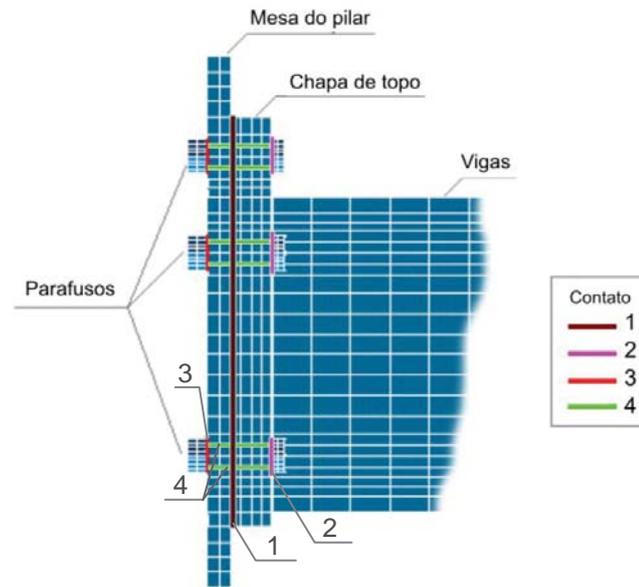
Na preparação dos modelos numéricos, Maggi seguiu seis fases distintas:

- 1) Montagem da geometria do modelo;
- 2) Escolha dos tipos de elementos finitos a serem utilizados;
- 3) Definição das características dos materiais utilizados;
- 4) Preparação da malha de elementos finitos no modelo;
- 5) Definição das condições de contorno no modelo;
- 6) Aplicação do carregamento.

Apesar de distintas, ressalta-se que existe uma relação entre as fases na medida em que interferem umas nas outras.

A geometria do estudo foi toda modelada com elementos sólidos, conforme mostra a Figura 21. Dessa forma, para a viga, o pilar e a chapa de topo não ocorreram grandes simplificações. O conjunto parafusos/porca, em função de sua complexidade geométrica, foi representado como um único componente, sem prejudicar a representatividade do modelo, conforme Maggi (2000). Ainda, visando melhor representatividade do modelo, além do carregamento da viga, foi utilizada uma protensão nos parafusos para simular o aperto deles.

Figura 21 – Modelo sólido com posicionamento dos elementos de contato



Fonte: Maggi, 2000.

Considerando que o estudo trata de uma junta parafusada, as possíveis interações entre os componentes do modelo numérico da ligação ilustrado na Figura 21 podem ser representadas por elementos de contato, que são apresentados de forma resumida:

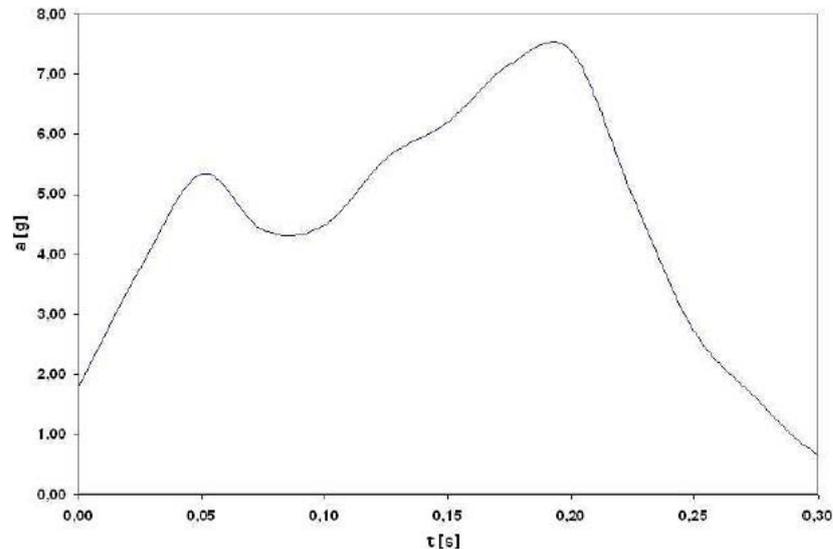
- 1) Contato entre a superfície posterior da chapa de topo e a superfície anterior do apoio;
- 2) Contato entre a superfície posterior da cabeça do parafuso com a superfície anterior da chapa de topo;
- 3) Contato entre a superfície anterior da porca com a superfície posterior da mesa do pilar;
- 4) Contato entre a superfície do fuste do parafuso com as superfícies exteriores dos furos na chapa de topo e mesa do pilar.

Maggi (2000) considerou que os resultados numéricos obtidos a partir de seus modelos ficaram próximos, em termos qualitativos, de representar o comportamento esperado das ligações existentes no estudo experimental de Ribeiro (1998).

Meira Junior (2010) realiza em 2010, estudo para avaliar comportamento de estrutura de ônibus rodoviário na condição de impacto frontal, sendo que parte do resultado de seu estudo traz avaliação do efeito produzido pelo impacto na estrutura da carroceria de um ônibus em circulação pelas estradas do Brasil na época. O estudo informa que, partindo de uma velocidade de 50 km/h, é necessário um tempo de 0,3 s após o impacto frontal contra uma superfície indeformável para que a velocidade chegue a zero e para que toda a energia cinética seja absorvida pela estrutura. A Figura 22 representa a curva de desaceleração obtida nesta parte do estudo de Meira Junior, segundo o qual a desaceleração média ficou em 6,15 g,

o que ele considera como um valor coerente, visto que pulsos abaixo de 18 g são considerados baixos.

Figura 22 – Curva de desaceleração conforme Meira Junior (2010)

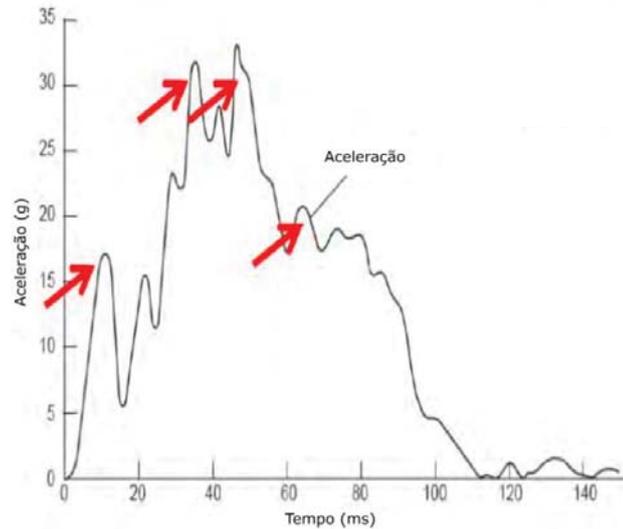


Fonte: Meira Junior, 2010.

O estudo de Alves Pereira (2012) analisa a parte estrutural de um veículo de Stock-Car com aplicação do método de elementos finitos. A atenção especial é dedicada à lateral do veículo próximo ao assento do piloto, onde ocorrem impactos mais perigosos para sua integridade física. O modelo geométrico utilizado no estudo em questão segue o conceito de chassi tubular. A resistência da estrutura tubular é estudada em termos de tensões mecânicas e deformações provocadas na estrutura tubular soldada. Os resultados permitem determinar níveis perigosos da intensidade de impacto em situações reais de corrida. Com base nos resultados obtidos, são sugeridas modificações de projeto de estrutura Stock-Car, focadas no aumento da segurança.

Alves Pereira analisa a estrutura tubular do veículo Stock-Car na condição de impacto lateral de forma estática, aplicando uma força (F) na lateral do veículo que corresponde à massa do objeto impactante multiplicada pela aceleração obtida a partir da curva ilustrada na Figura 23, que representa o gráfico de desaceleração usado para teste de impacto lateral de veículos fornecido pela empresa IRL.

Figura 23 – Curva de desaceleração conforme IRL.



Fonte: Adaptado de Alves Pereira, 2012.

A força calculada por Alves Pereira é obtida a partir da seguinte equação:

$$F = m.a \quad (2)$$

Onde:

$F$  = Força (N)

$m$  = massa (1310 kg)

$a$  = aceleração (35 g x 9,81 m/s<sup>2</sup>)

$F = 1310 \text{ kg} \times 35 \text{ g} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 458500 \text{ N}$

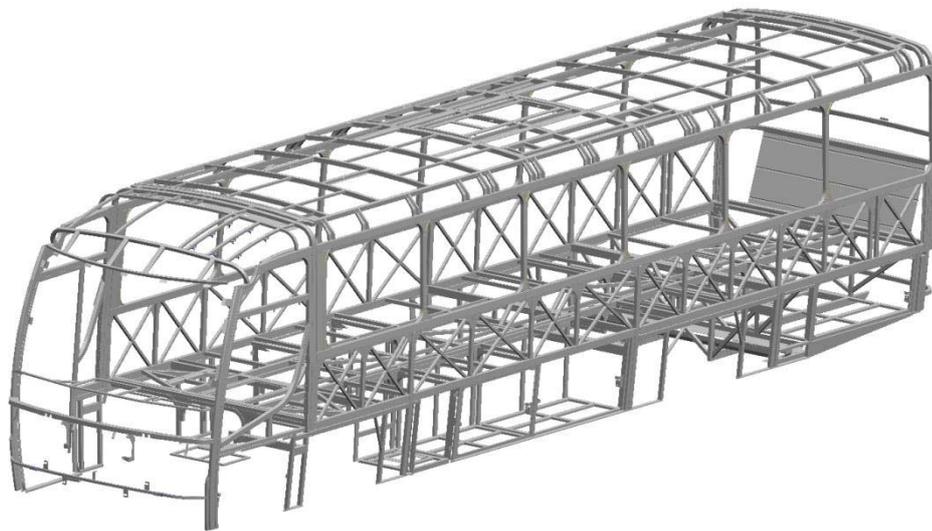
Alves Pereira conclui que, nesta condição de carregamento, a estrutura não resiste de forma adequada à carga do impacto. No entanto, a metodologia empregada na utilização do modelo tubular permite compreender e analisar o problema proposto, porque, com esse recurso, é possível verificar com precisão os pontos de tensões, uniões soldadas, e verificação total da estrutura.

Em 2014, Aderichn analisa o conjunto estrutural de uma carroceria de ônibus rodoviário com a aplicação de plataformas elevatórias para prover acessibilidade, verificando sua capacidade de resistência com base em resultados numéricos validados por dados experimentais. Entre os arranjos estruturais estudados, encontra-se o destinado a acomodar o dispositivo de poltrona móvel (DPM).

O autor relata que, a realização de análise de elementos finitos possibilita avaliar os valores de tensões que atuam nas carrocerias e a rigidez da estrutura, concluindo que as estruturas tendem a não falhar com a inclusão dos elevadores neste modelo de carroceria de ônibus.

A carroceria de ônibus escolhida por Aderichn como referência para analisar a colocação de elevadores, é de um veículo rodoviário com comprimento de 12,5 metros, largura de 2,6 metros e altura de 3,5 metros, encarroçado sobre um chassi Volkswagen 17230 EOD. Este modelo dispõe de uma configuração composta com os principais opcionais ofertados para a versão desta linha de produto, o qual possui somente uma porta considerada padrão na lateral direita da parte dianteira do veículo, ar condicionado de teto, tanque de combustível transversal, com bagageiros nas duas laterais em toda extensão dos entre-eixos e inteiriço na região atrás do rodado traseiro. A Figura 24 mostra o arranjo estrutural da referida carroceria.

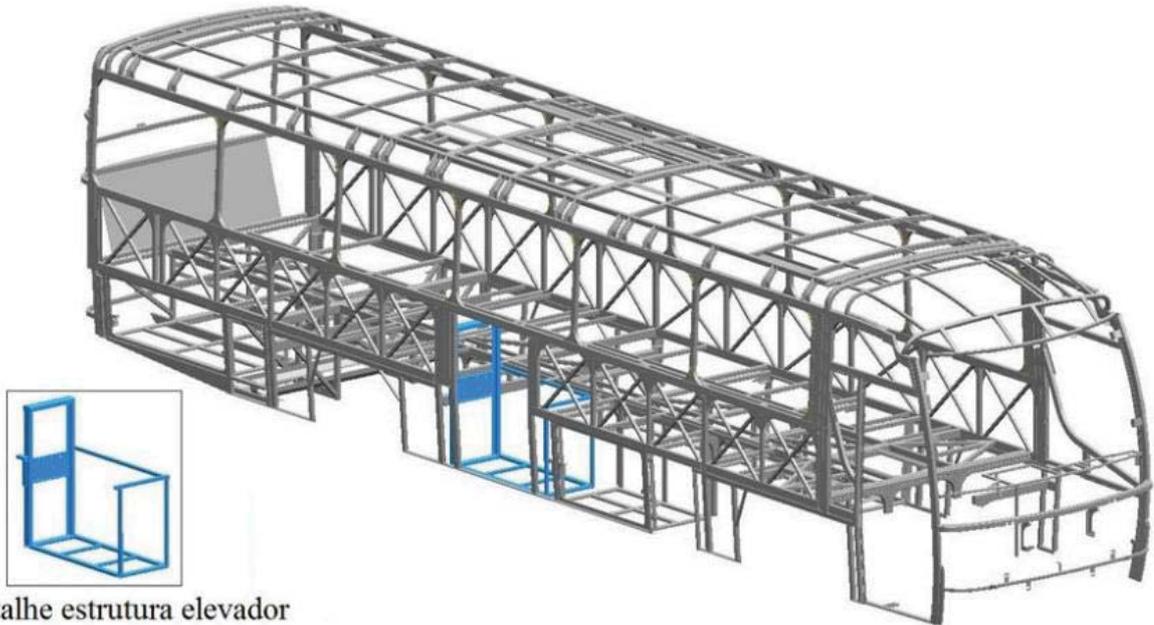
Figura 24 – Arranjo estrutural de uma carroceria de ônibus sem elevador



Fonte: Aderichn, 2014

Com base na estrutura de referência, Aderichn define o arranjo estrutural em que foi implantado o dispositivo de poltrona móvel (DPM) conforme ilustrado na Figura 25, sendo que, o modelo numérico segue o mesmo procedimento para a discretização das estruturas, geração da *midsurface* e malhas. Apenas foram adaptadas as regiões impactadas com o acréscimo do elevador, sendo eliminados alguns componentes e adicionado outros, mas mantendo as mesmas características do modelo referência.

Figura 25 – Arranjo estrutural de uma carroceria de ônibus com elevador (DPM)



Detalhe estrutura elevador

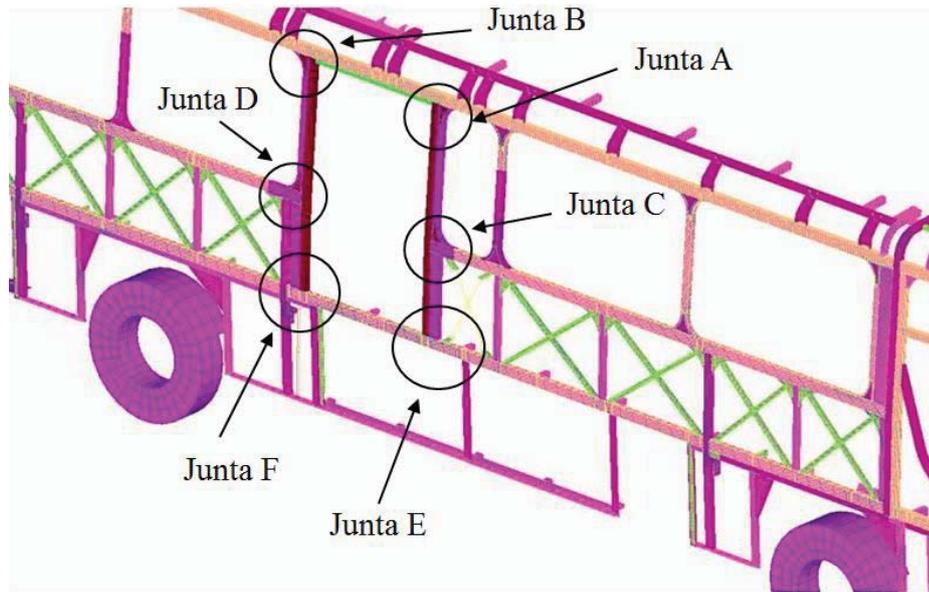
Fonte: Aderichn, 2014

A partir do modelo estrutural tridimensional da carroceria, Alderichn gera o modelo numérico no *software* comercial UGS NX 8.0 utilizando a interface *Advanced Simulation*, onde foram geradas as malhas e realizadas as análises de elementos finitos. Sendo que, a malha foi gerada a partir da superfície média (*midsurface*) da carroceria, ou seja, transformado os componentes de sólido para elementos de casca. Os elementos selecionados para representar a geometria foram do tipo casca com quatro (4) nós e seis (6) graus de liberdade cada nó. A discretização utilizou elementos com lados de dimensão máxima de 15 mm. Quanto às propriedades dos materiais, foram atribuídas a cada respectivo material as mesmas propriedades usadas nos projetos para a fabricação dos componentes da carroceria, sendo chapas zincadas a quente NBR 7008:2012 ZAR 230 com limite de escoamento mínimo de 230 MPa, chapas NBR 6655:2011 LN-28 com limite de escoamento mínimo de 280 Mpa e tubos NBR 6591:2008 ZAR 230 com limite de escoamento mínimo de 230 MPa.

No estudo Aderichn utiliza a tensão equivalente de von Mises proveniente da simulação em *software* associada à tensão limite para escoamento dos materiais, para assim, determinar a tendência de falha na estrutura. Sendo que, os resultados numéricos são validados a partir dos dados obtidos em procedimento experimental.

A partir de um modelo estrutural validado, foram separadas as regiões com tensões críticas do projeto, chamando-as de juntas estruturais, exatamente na posição em que é acrescentado o DPM. Neste caso, o elevadores é posicionados na lateral direita, logo à frente do rodado traseiro, regiões de instrumentação das juntas A a F, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 – Detalhe das regiões críticas para verificação de tensão



Fonte: Aderichn, 2014

Na Tabela 3 adaptada do estudo de Aderichn são apresentados os valores máximos de tensões nas regiões das juntas do modelo numérico com o DPM, comparados ao modelo sem instalação de elevadores e dados experimentais sem elevador.

Tabela 3 – Comparação das tensões nas juntas

Juntas	Valores Máximos de Tensões (MPa)						
	Dados experimentais sem DPM	Estrutura de referência sem DPM		Estrutura com DPM		Estrutura com DPM e melhorada	
		Valor	Diferença	Valor	Diferença	Valor	Diferença
A	224,5	214,8	-4,3	196	-8,8	-	-
B	226,4	218,3	-3,6	201	-7,9	-	-
C	216,8	208,6	-3,8	227	8,8	-	-
D	225,2	214,1	-4,9	256	19,6	219	2,3
E	162	156	-3,7	162	3,8	-	-
F	167	168	0,6	176	4,8	-	-

Fonte: Adaptado de Aderichn, 2014

A partir dos dados apresentados na Tabela 3, Aderichn conclui que a estrutura de referência é representativa, uma vez que obteve variação máxima de 4,9% em relação aos dados obtidos em experimento. Os valores de tensões encontrados nas juntas A, B, C, E e F apresentaram diferenças inferiores a 10%, estando dentro da tolerância admissível. Porém, a junta D, apresentou diferença de 19,6. Desta forma, foi necessário propor uma nova solução

de projeto em busca da diminuição destes valores nestas regiões, que, após nova análise, apresentou uma diferença de 2,3%. Com isso, os resultados de tensões apresentados nas análises indicam o correto dimensionamento do arranjo estrutural como solução de projeto para o acréscimo do DPM, permitindo a implantação neste modelo de carroceria de ônibus rodoviário, pois as juntas estruturais continuam tendendo a não falhar dentro do limite estabelecido pela legislação para a durabilidade da carroceria.

## 2.5 Análise estrutural

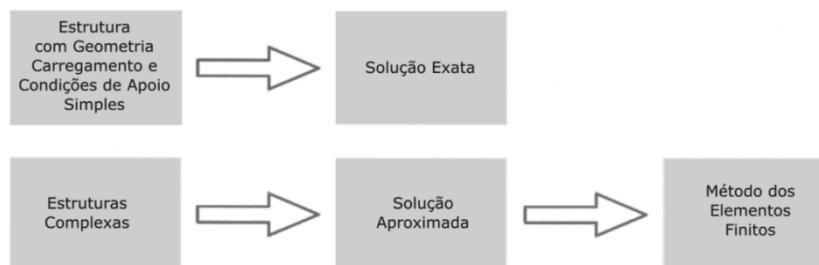
Conforme Alves Filho (2013) descreve, os engenheiros e projetistas se deparam constantemente com problemas técnicos, desde os mais simples até os mais complexos, sempre buscando uma solução satisfatória, associando o menor tempo ao padrão de qualidade.

Na área de Cálculo Estrutural, principalmente, o engenheiro deve garantir que a estrutura objeto de análise não estará sujeita a falhas sob as diversas condições de operação, independentemente da complexidade da estrutura.

### 2.5.1 Método dos elementos finitos

Considerando a complexidade, torna-se interessante dispor de procedimentos aproximados, conforme ilustrado na Figura 27, que podem ser aplicados em caráter geral, independentemente da forma da estrutura e condição de carregamento, dentro da precisão aceitável do problema de engenharia. Esse caminho alternativo aos procedimentos analíticos clássicos é a origem dos Métodos dos Elementos Finitos (ALVES FILHO, 2013).

Figura 27 – Procedimentos para avaliar a estrutura



Fonte: Alves Filho, 2013.

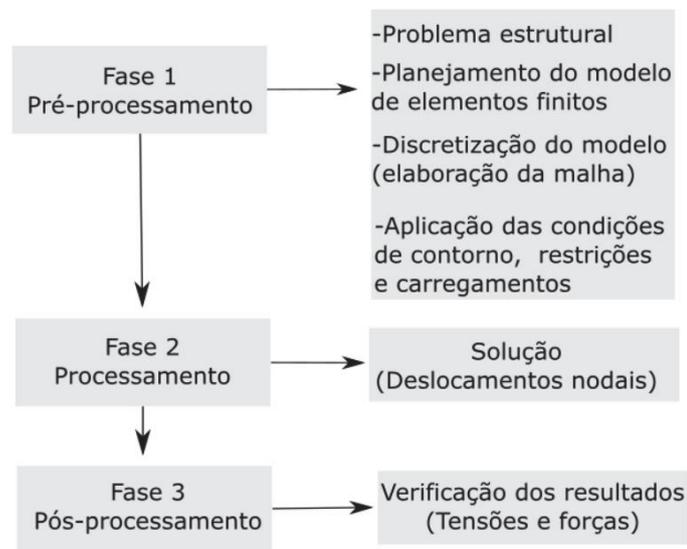
Diante da afirmação de Alves Filho (2013), que é próprio da mente humana querer subdividir o sistema complexo em seus componentes individuais, surge a concepção de que, a partir do entendimento de cada elemento, é possível entender o comportamento do conjunto.

Sob essa concepção, se estabelece o MEF, com a ideia de subdivisão do domínio do problema em partes separadas ou elementos, de modo que a estrutura inteira seja modelada

por um agregado de estruturas “simples”. Ou seja, a solução aproximada simula a estrutura como uma montagem de elementos.

O autor ressalta que a montagem dos elementos requer tarefas repetitivas, e, “por questões administrativas”, usa notação matricial para organizar os dados, que são processados com auxílio de computador. Contudo, o uso de ferramentas computacionais requer um claro entendimento do problema físico a ser resolvido e, para tanto, Alves Filho (2013) sugere a sequência básica ilustrada na Figura 28 para aplicação do MEF.

Figura 28 – Principais etapas de abordagem de um problema estrutural



Fonte: Adaptado de Alves Filho, 2013.

### 2.5.2 Planejamento do modelo

Segundo Azevedo (2003), quando surge um problema de análise de uma estrutura, inicialmente se estabelece sua classificação quanto à geometria, ao tipo do material constituinte e às cargas aplicadas. A formulação e aplicação do MEF tornam-se parcialmente dependentes das simplificações inerentes a cada tipo de problema.

Não distante disso, Azevedo relaciona alguns aspectos que são necessários considerar na fase que antecede a análise de uma estrutura.

#### 1) Análise dinâmica ou estática

O autor menciona que as cargas sobre as estruturas são geralmente dinâmicas, devendo considerar as forças de inércia associadas às acelerações a que os componentes ficam sujeitos. Isso leva a entender que toda a análise de uma estrutura teria obrigatoriamente que considerar os efeitos dinâmicos. No entanto, em muitas situações é razoável considerar que as cargas são

aplicadas de um modo lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nesses casos a análise designa-se estática. No estudo do DPM apenas são consideradas condições em que se supõem válidas as simplificações inerentes a uma análise estática.

## 2) Análise não linear ou linear

Ao analisar uma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas cargas exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nessas condições, admite-se que não existe influência da alteração na geometria da estrutura com a distribuição dos esforços e das tensões, isto é, todo o estudo é baseado na geometria inicial indeformada. Se essa hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica. É também frequente considerar que, ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear obedecendo à lei de Hooke (AZEVEDO, 2003).

Neste estudo, a estrutura do DPM é tratada de forma linear tanto para a geometria quanto para o material. No entanto, quando o conjunto base da poltrona for estudado de forma isolada do DPM, surgem condições não lineares associadas a descontinuidades geométricas, decorrentes da formulação dos contatos aplicados neste caso.

## 3) Tipo de estrutura

O tipo da estrutura, quando Azevedo (2003) leva em consideração sua geometria, pode ser classificada como reticulada, laminar ou sólida, em que as últimas são as mais genéricas, sendo classificadas como sólidas as que não apresentem características que as permitam enquadrar no grupo das laminares ou das reticuladas.

As estruturas laminares são as que se desenvolvem em uma superfície média. É o caso de uma lâmina cuja espessura é muito inferior às demais dimensões. Quando a superfície média é plana, a estrutura laminar pode ser classificada como placa, membrana ou casca. Uma membrana apenas se encontra sujeita a cargas paralelas ao seu plano médio. Uma placa pode ter aplicadas forças perpendiculares ao plano médio e momentos cujo vetor está contido no plano médio. Uma estrutura laminar curva é designada casca plana.

As estruturas reticuladas são as constituídas por barras prismáticas, cujas dimensões transversais são muito menores do que o comprimento do respectivo eixo.

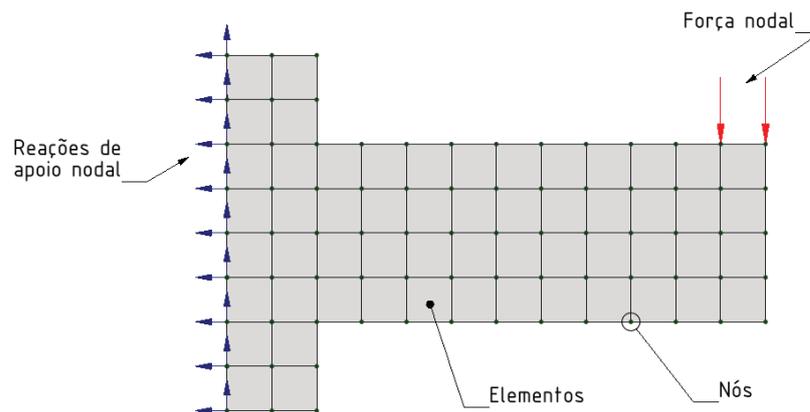
### **2.5.3 Discretização do modelo pelo MEF**

A representação aproximada de um sistema pelo MEF ocorre na forma de discretização, em que o modelo matemático contínuo é transformado em um modelo numérico discreto. O

processo de discretização do MEF divide o contínuo em um conjunto de elementos, conectados por um número finito de pontos nodais ou nós (AZEVEDO, 2003).

Segundo Alves Filho (2013), o conceito de discretização de um sistema contínuo considera a divisão da estrutura em partes separadas distintas denominadas “elementos”, conectados entre si em pontos discretos denominados “nós”. Assim, o sistema é subdividido em um número finito de partes ou elementos, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Discretização de modelo pelo MEF

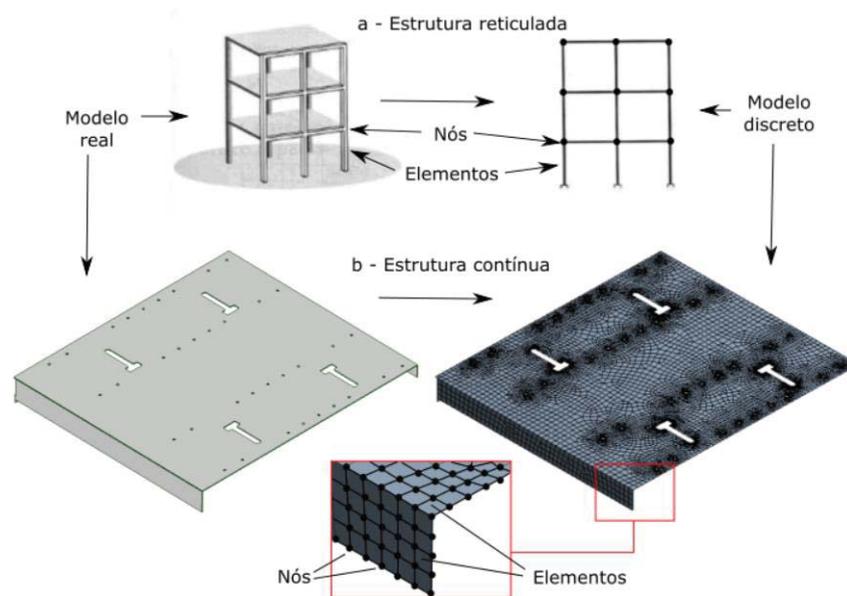


Fonte: Adaptado de Alves Filho, 2013.

A configuração deformada da estrutura explicitada na Figura 29 é determinada por intermédio dos deslocamentos dos nós, qualquer que seja a forma da estrutura e o tipo de carregamento. Assim, neste caso, os parâmetros que descrevem o comportamento do sistema são os deslocamentos nodais, e a partir dos deslocamentos interpolados pode-se determinar deformações e tensões, bem como os esforços internos. Em linguagem mais geral esses parâmetros são chamados também de variáveis de estado, pois governam e descrevem o estado de equilíbrio da estrutura (ALVES FILHO, 2013).

Ao analisar um sistema, o projetista deve ter uma visão clara do seu conjunto, bem como de seus componentes e suas conexões. Em uma estrutura reticulada, conforme ilustrado na Figura 30(a), é fácil identificar os elementos de barras que a constituem. É fácil também compreender que esses elementos estão conectados entre si através de juntas e/ou nós e que a interação entre as divisões (elementos finitos) ocorre somente nesses pontos (OLIVEIRA, 2007).

Figura 30 – Estrutura reticulada x estrutura contínua



Fonte: Adaptado de Alves Filho, 2013.

Na Figura 30(b) a subdivisão da estrutura em elementos que definem a malha de elementos finitos não parece tão óbvia. A discretização promove uma divisão artificial em um determinado número de elementos finitos conectados apenas nos nós. A escolha do elemento apropriado é sempre bastante importante e pode não ser tarefa simples quando comparada à escolha de um elemento para uma estrutura reticulada.

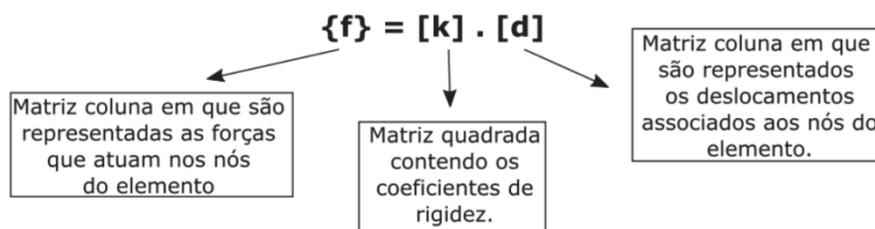
Oliveira (2007) considera que a representação do comportamento da estrutura é função também do tipo de elemento utilizado. A geometria dos elementos pode ser sólida, do tipo casca ou elementos de barras, além de outras possibilidades. As propriedades destes elementos também deverão estar bem definidas. Quanto maior a compatibilidade entre as características do elemento utilizado e o comportamento da estrutura real, mais precisa e confiável será a resposta do modelo.

#### 2.5.4 Matriz de rigidez

A principal característica da análise estática de um sistema discretizado é a relação entre as forças e os deslocamentos nodais para cada elemento individual. Essa relação é baseada no conceito de rigidez de um elemento elástico, porém em sentido mais amplo. Por exemplo, a diferença entre uma mola e uma viga está na quantidade de parâmetros de rigidez que devem ser considerados. No primeiro caso tem-se apenas a rigidez axial, já no segundo considera-se tanto a rigidez axial quanto à flexão, à torção, ao cisalhamento e seus acoplamentos (OLIVEIRA, 2007).

Alves Filho (2013) relata que, na prática, os *softwares* de elementos finitos oferecem uma biblioteca de elementos do programa, contendo diversos elementos, cada qual tentando representar um diferente comportamento físico conhecido da mecânica estrutural (placas, cascas, membranas, sólidos, vigas, etc.). Esse comportamento é descrito por meio de funções matemáticas que, em última análise, contabilizam a rigidez daquele elemento individual. A forma mais compacta de representar essas características dos elementos no computador é por meio da matriz de rigidez de um elemento, apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Relação matricial de força, rigidez e deformação.



Fonte: Alves Filho, 2013.

Com base na matriz de rigidez de cada elemento, o *software* monta a matriz de rigidez da estrutura, que, em última análise, contabiliza a rigidez da estrutura inteira, na qual, depois de calculados os deslocamentos nodais, são calculados os deslocamentos, as deformações e as tensões dentro dos elementos, permitindo avaliar a estrutura como um todo. Baseado nesta ideia, a estrutura em equilíbrio deve satisfazer a três leis fundamentais (ALVES FILHO, 2013):

- 1) Equilíbrio de forças, em que se considera em equilíbrio cada elemento, se a estrutura como um todo também se encontra neste estado;
- 2) Compatibilidade de deslocamentos, em que os elementos conectados a um determinado nó se mantêm conectados mesmo após a estrutura deformada;
- 3) Lei de comportamento do material, a qual garante que os esforços, ao longo da estrutura em que são transmitidos pelos elementos por intermédio de esforços internos, crescem de forma proporcional (linear) às deformações.

O uso do Método dos Elementos Finitos revela-se como um grande diferencial, reduzindo os prazos e enxugando os custos, desenvolvendo, assim, o poder competitivo das empresas (ALVES FILHO, 2013).

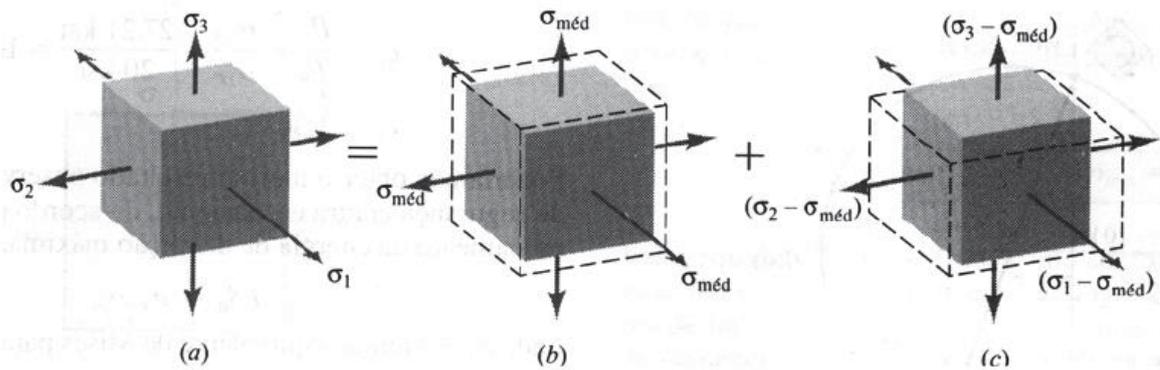
### 2.5.5 Critério de Falha para materiais Dúcteis – Teoria de von Mises

O critério foi desenvolvido com o intuito de prever o escoamento plástico em metais. Este estabelece que “o escoamento plástico se inicia quando a energia de distorção elástica alcança um valor crítico”. Admitindo que o comportamento do material na região elástica é linear e isotrópico.

Nesta teoria, considera-se que o escoamento ocorre quando a energia associada à distorção de um corpo sob carregamento multiaxial for igual à energia de distorção em um corpo de prova de tração, quando o escoamento ocorre na tensão de escoamento uniaxial,  $\sigma_y$ .

Considerando a energia de deformação armazenada em um elemento de volume, como mostra a Figura 32.

Figura 32 – (a) estado triaxial de tensões (b) variação de volume (c) distorção



Fonte: Ornelas de Lima, 2003.

A densidade de energia de deformação devida ao carregamento multiaxial é dada pela equação 3, que pode ser escrita, usando os três eixos principais, na forma,

$$U_0 = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (3)$$

Combinando-se esta equação com a Lei de Hooke, obtém-se,

$$U_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3)] \quad (4)$$

Uma parcela desta energia de deformação pode estar associada à variação de volume do elemento e o restante da energia de deformação está associado à variação de forma, ou seja, à distorção. A variação de volume é produzida pela tensão média

$\sigma_{média} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ , como ilustrado na Figura 32(b). As tensões resultantes mostradas na Figura 32(c) produzem distorção sem qualquer variação no volume.

Ensaio mostraram que materiais não escoam quando estão submetidos a pressões hidrostáticas (tensões iguais em todas as direções - estado de tensão hidrostático - Figura 32 b) de valores extremamente altos.

Quando as tensões da Figura 32(c), que causam distorção, são substituídas na equação (4), obtendo-se a seguinte expressão para a densidade de energia de distorção,

$$U_d = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (5)$$

A densidade de energia de distorção em um corpo de prova de tração na tensão limite de escoamento,  $\sigma_y$ , é

$$(U_d)_y = \frac{1}{6G} \sigma_y^2 \quad (6)$$

pois  $\sigma_1 = \sigma_y$  e  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ . Deste modo, o escoamento ocorre quando a energia de distorção para um carregamento geral, dado pela equação 5, iguala ou excede o valor de  $(U_d)_y$  na equação 6. Assim, o critério de falha da energia de distorção máxima pode ser enunciado em termos das três tensões principais como

$$\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] = \sigma_y^2 \quad (7)$$

Em termos das tensões normais e das tensões cisalhantes em três planos arbitrários mutuamente ortogonais, pode-se mostrar que o critério de falha da energia de distorção máxima tem a seguinte forma

$$\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] = \sigma_y^2 \quad (8)$$

Para o caso de tensão plana, as expressões correspondentes para o critério de falha da energia de distorção máxima podem ser facilmente obtidas das equações 7 e 8, colocando-se  $\sigma_3 = \sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ . Em termos das tensões principais tem-se, então,

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_y^2 \quad (9)$$

Um modo conveniente de aplicar a teoria da energia de distorção máxima é tirar a raiz quadrada dos termos do lado esquerdo da equação 7 ou 8 para obter uma quantidade equivalente de tensão que é chamada de tensão equivalente de von Mises. Ambas as equações a seguir pode ser usada para calcular a tensão equivalente de von Mises,  $(\sigma_{VM})$ .

$$\sigma_{VM} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$\sigma_{VM} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Para o caso de tensão plana, as expressões correspondentes para a tensão equivalente de von Mises podem ser facilmente obtidas das equações 10 e 11 colocando-se  $\sigma_3 = \sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ .

Comparando-se o valor da tensão de von Mises, em qualquer ponto, com o valor da tensão de escoamento em tração,  $\sigma_y$ , pode-se determinar se o escoamento ocorre de acordo com a teoria de falha da energia de distorção máxima. Desse modo, a tensão equivalente de von Mises é largamente utilizada quando tensões calculadas são apresentadas em tabelas ou na forma de gradientes coloridos de tensão (ORNELAS DE LIMA, 2003).

## 2.6 Conclusões do capítulo

É possível afirmar que a proposta de pesquisa desenvolvida até então se mostrou pertinente em relação à expectativa de desenvolvimento da análise do DPM.

A busca por fatos históricos relacionados à aplicação e evolução de equipamentos de elevação, bem como a verificação dos equipamentos com aplicação similar ao objeto deste estudo possibilitaram a verificação do estado da arte e como o DPM se enquadra nesse processo evolutivo. Constata-se que o DPM é uma nova aplicação de conceitos já existentes e consagrados, podendo ser tratado como inovação, considerando a inexistência, na atualidade, de equipamento com a mesma função e aplicação específica.

A abordagem do histórico de legislação nacional aplicada à acessibilidade e segurança em equipamentos destinados a facilitar o embarque e desembarque de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida torna-se de fundamental importância, visto que define as condições mínimas que o equipamento deve ter para ser considerado seguro para o uso dos passageiros.

Nas sínteses de estudos existentes do MEF aplicados a elevadores, o estudo de Onur e Imrak (2012) pode ser utilizado para validar a aplicabilidade do MEF na simulação estática do DPM na condição de içamento do elevador e base móvel. O estudo de Shi e Lee (2009), por tratar de análise de um equipamento com função similar ao DPM, apresenta expressiva influência na escolha do modelo numérico e suas condições de contorno de forma compatível com o MEF.

Outros estudos com MEF foram explorados em aplicação de análise estrutural, sendo que Maggi (2000) traz abordagem simplificada da geometria de conjuntos porca e parafuso e suas respectivas condições de contorno nos contatos de juntas aparafusadas. As informações

contidas neste estudo são pertinentes na medida em que podem ser aplicadas na análise da base da poltrona de forma isolada do DPM.

A associação dos dados obtidos do estudo de Meira Junior (2010) à metodologia de Alves Pereira (2012) mostrou-se positiva, pelo fato de resultar em uma força que pode ser usada como parâmetro de comparação para avaliar a condição de carregamento prevista na Resolução CONTRAN N° 445:2013.

O estudo de Aderichn (2014) tem relação direta com o equipamento dispositivo de poltrona móvel, pois trata da estrutura do ônibus preparada para receber o DPM. Em relação a análise estrutural, o estudo de Aderichn, oferece respaldo para utilizar a tensão de escoamento do material como limite para a tensão equivalente de von Mises resultante da análise numérica em *software* de engenharia, uma vez que, nos dados experimentais constam tensões de até 226,4 MPa e a tensão de escoamento de um dos materiais, informada pelo autor, é 230 MPa.

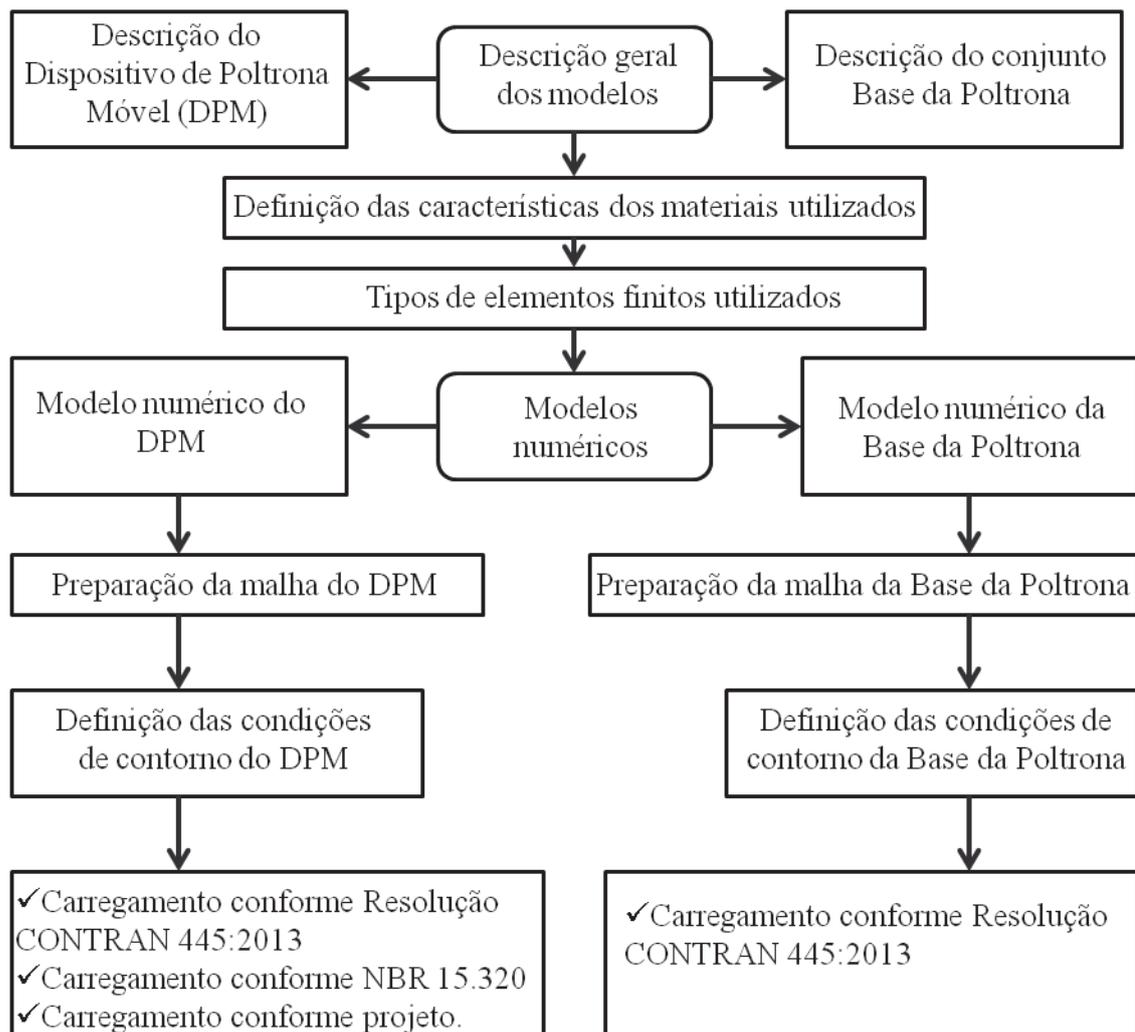
A pesquisa sobre MEF tornou-se imprescindível na medida em que foi desenvolvida, pois menciona as condições de contorno e discretização dos elementos possíveis de serem analisadas pelo MEF.

A abordagem do critério de falha no estudo se deve à importância de entender o comportamento do material construtivo do equipamento.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as etapas do desenvolvimento da análise numérica estática, em que ocorre a preparação dos modelos numéricos do dispositivo de poltrona móvel (DPM) e da base da poltrona, de acordo com a sequência ilustrada na Figura 33. Ainda, no subcapítulo 3.7, é apresentada a descrição geral do ensaio experimental.

Figura 33 - Fluxograma do desenvolvimento dos modelos numéricos



Fonte: Autor.

Seguindo a sequência do fluxograma ilustrado na Figura 33, os modelos do DPM e base da poltrona são descritos em termos gerais, apresentando sua forma geométrica e dimensões básicas. Para facilitar a análise, o DPM é dividido em cinco conjuntos: suporte rígido; base da poltrona; elevador; base da móvel e estrutura de acoplamento.

Considera-se que a base da poltrona é o local onde ocorre a fixação do assento do veículo no DPM, e, em consequência disso, a região de transferência das cargas oriundas do

passageiro. Por questões de segurança em termos de representatividade do modelo numérico, o conjunto base da poltrona, mesmo sendo parte do DPM, é tratado de forma separada, analisado sob duas condições, acoplado ao DPM e de forma isolada.

Na sequência estão descritas as propriedades mecânicas do material que compõem os elementos do DPM. Para isso, o *software Ansys Workbench® 15.0* de elementos finitos dispõe de biblioteca própria de materiais e suas respectivas propriedades. Porém, para este estudo, são criados dois novos materiais nesta biblioteca, com base nas propriedades do aço SAE 1020 e SAE 1045 encontradas em Shigley, Mischke e Budynas (2008).

Os elementos finitos aplicados na análise estão selecionados de forma que tenham capacidade de representar: peças com grande relação entre área superficial e espessura (elementos de casca); eixos e perfis com espessura variável (elementos sólidos); contatos livres para rotação ou translação relativos; bem como demais contatos com pouco ou nenhum movimento relativo, entre componentes.

Conforme descrição geral dos modelos, duas composições geométricas são analisadas. A malha utilizada para mapeá-las, além de representar a geometria de forma confiável, é desejável que os elementos tenham boa relação entre a qualidade de resultados e economia computacional decorrente do tempo de processamento, ou seja, número mínimo de elementos sem que ocorra distorção do elemento e na geometria.

As condições de contorno estão idealizadas para representar três condições de carregamento no DPM e uma condição na análise isolada da base da poltrona:

- 1) Condição de carregamento, conforme Resolução CONTRAN Nº 445:2013. A primeira condição de carregamento do DPM também é aplicada para analisar a base da poltrona de forma isolada, sendo que essa condição preconiza o carregamento horizontal de 5000 N estipulado na Resolução CONTRAN Nº 445:2013. Nessa condição, pretende-se simular as condições do ensaio de ancoragem do DPM realizado em laboratório. A condição supõe que o DPM esteja travado dentro do ônibus em condições de viagem para o passageiro.
- 2) Condição de carregamento conforme NBR 15.320. A próxima condição é aplicada somente no DPM e inclui o carregamento vertical de 1500 N constante no texto revisado da NBR 15.320. Essa condição busca representar o comportamento do DPM suspenso no ponto mais elevado e apoiado apenas nas guias verticais.
- 3) Condição de carregamento conforme projeto. A terceira condição, definida como de projeto para o DPM, considera o peso próprio de uma poltrona de 35 kg, conforme

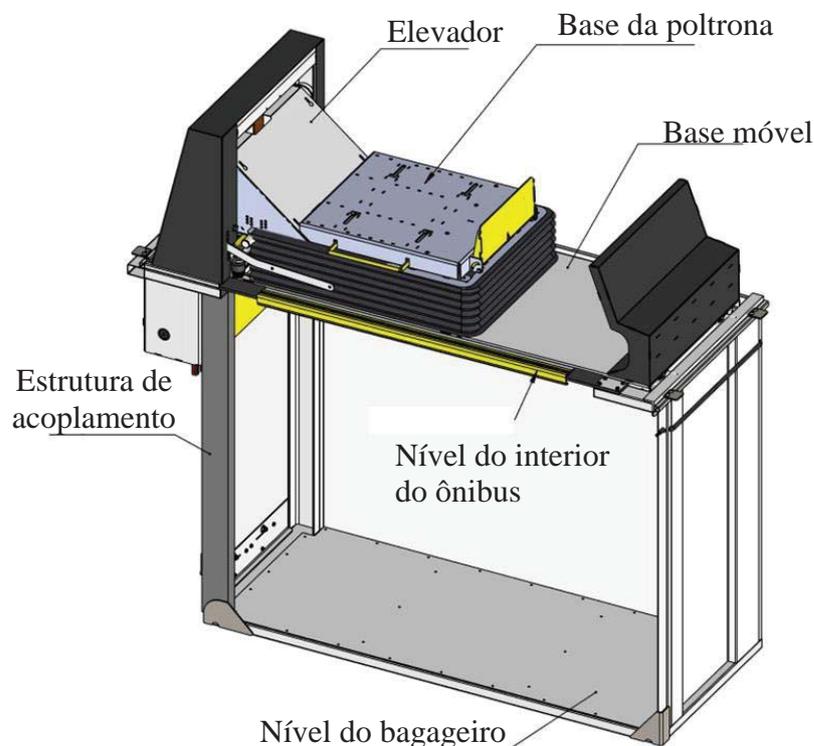
Walber (2009), associada a um passageiro com peso médio de 75 kg, de acordo com a média nacional IBGE (2008/2009). Essa condição busca representar o comportamento do DPM travado dentro do ônibus e com passageiro embarcado em condições de viagem.

Com o estudo desenvolvido neste capítulo pretende-se obter modelos numéricos representativos que possam fornecer resultados satisfatórios em relação à deformação total da estrutura e distribuição de tensão em seus componentes. Esses resultados, em primeiro momento, servirão para comparar o modelo numérico com ensaio experimental na condição de ancoragem da poltrona e, em seguida, analisar numericamente o comportamento mecânico estático do DPM, para, finalmente, sugerir possíveis adequações na estrutura do equipamento.

### 3.1 Descrição geral do DPM

Visando à elucidação da composição geométrica do dispositivo de poltrona móvel (DPM) em função de sua complexidade, sua estrutura é subdividida em base da poltrona, elevador, base móvel e estrutura de acoplamento, conforme apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Modelo geométrico do DPM



Fonte: Adaptado de Elevitta, 2015.

A estrutura de acoplamento é o conjunto de componentes estruturais onde ocorre o acoplamento do DPM na carroceria do ônibus.

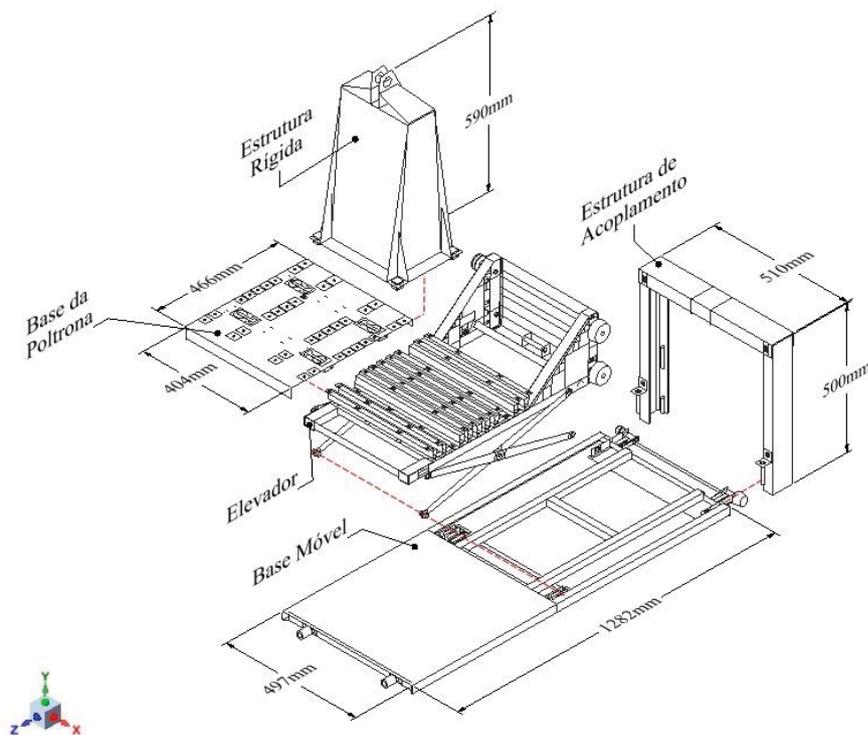
A base móvel é o conjunto composto basicamente de uma superfície plana, onde o passageiro descansa os pés, durante o deslocamento vertical do DPM. Quando em posição de viagem, a base móvel se torna um prolongamento do assoalho do interior do ônibus fechando o vão onde ocorre o deslocamento do DPM.

Acoplado por um conjunto de quatro roldanas à estrutura de acoplamento, o elevador representa o principal conjunto do DPM. Ele executa a função de elevar a base da poltrona da posição inferior (embarque) até a posição superior em que o passageiro fica no nível do interior do ônibus em condições de viagem.

A base da poltrona, que serve de ligação entre o elevador e o assento do veículo, é composta basicamente por uma base em chapa de aço SAE 1020 de 3 mm de espessura onde o assento do veículo é fixado no DPM por quatro parafusos M10 classe 8.8 (ELEVITTÁ, 2015).

Os quatro conjuntos também podem ser visualizados na Figura 35, que traz a geometria representativa do DPM utilizado na análise numérica e no ensaio em laboratório deste estudo. A geometria representativa é composta pelos elementos estruturais dos quatro conjuntos mais a estrutura rígida, incluída para atender as condições exigidas na resolução CONTRAN Nº 445:2013.

Figura 35 – Modelo da estrutura do DPM dividida em 05 conjuntos



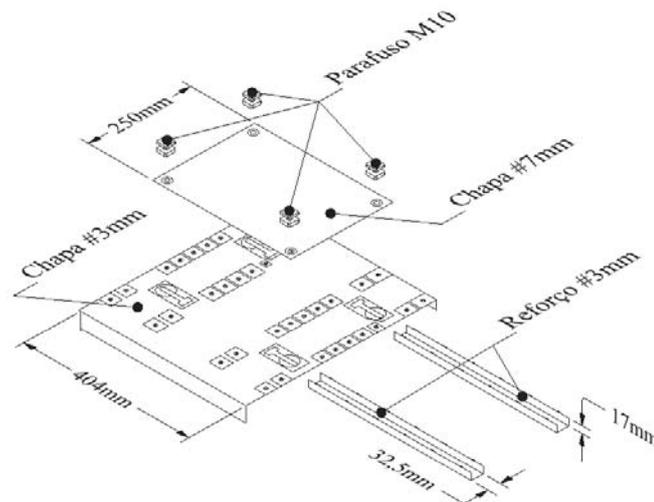
### 3.2 Descrição geral da base da poltrona

A base da poltrona, além de ser analisada acoplada ao DPM, também sofre tratamento individualizado em modelo separado. A Figura 36 apresenta a composição da estrutura parcial a ser estudada, sendo que os componentes que fazem parte do DPM são a chapa da base e seus dois respectivos reforços com 3 mm de espessura (ELEVITTÁ, 2015).

Os parafusos M10 e a chapa superior com 7 mm de espessura foram incluídos para melhorar a representação das condições reais do equipamento. Onde, a cabeça e porca dos parafusos delimitam a superfície de contato deste, com as chapas 7 mm e 3 mm, e, a fuste estabelece o contato interno com os furos. A função da chapa 7 mm é representar a área de contato entre base e sua respectiva poltrona.

Na imagem ilustrativa da Figura 36, os componentes em chapa 3 mm e 7 mm de espessura estão representados por suas superfícies médias.

Figura 36 – Modelo da base da poltrona



Fonte: Autor.

### 3.3 Definição das características dos materiais

O modelo numérico estudado é formado por chapas e perfis de aço SAE 1020 e pinos e eixos de aço SAE 1045, sendo que na Tabela 4 constam as principais propriedades mecânicas do respectivo material.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas aço SAE 1020 e SAE 1045

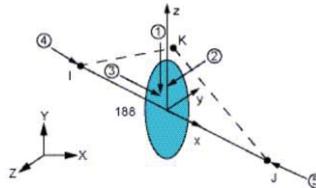
SAE	Processamento	Resistência a Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
1020	Laminado a quente	380	210	205	0,3
1045	Laminado a quente	570	310	205	0,3

Fonte: Adaptado de Shigley, Mischke e Budynas., 2008.



Esse elemento, ilustrado na Figura 39, possui dois nós e seis ou sete graus de liberdade em cada nó, os seis graus de liberdade padrão são translação em relação às direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  nodais e rotação em relação aos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , baseado na teoria de barras de Timoshenko para vigas curtas, na qual são consideradas as deformações da seção transversal causadas pelos esforços cortantes.

Figura 39 – Elemento finito BEAM 188

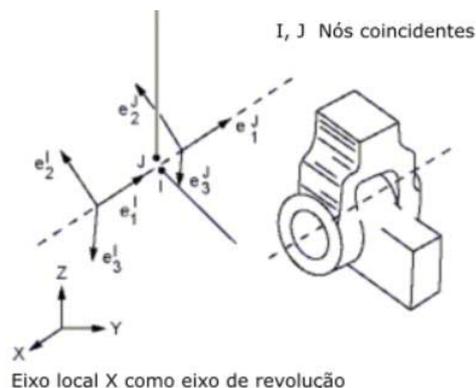


Fonte: Ansys help 15.0.

As conexões articuladas do DPM são tratadas no modelo numérico como elementos de formulação Multi-point Constraint (MPC), que compreende uma classe geral de elementos de restrição multiponto em que se aplicam restrições cinemáticas entre os nós, sendo que no DPM são usados dois desses elementos.

O primeiro elemento MPC, conforme ilustrado na Figura 40, apresenta apenas um grau primário de liberdade, a rotação relativa em torno do eixo de revolução (ou dobradiça). Esse elemento impõe restrições cinemáticas de tal modo que os nós que formam o elemento têm os mesmos deslocamentos. Além disso, apenas uma rotação relativa é permitida em torno do eixo de revolução, enquanto as rotações sobre as outras duas direções são iguais.

Figura 40 – Elemento MPC de revolução

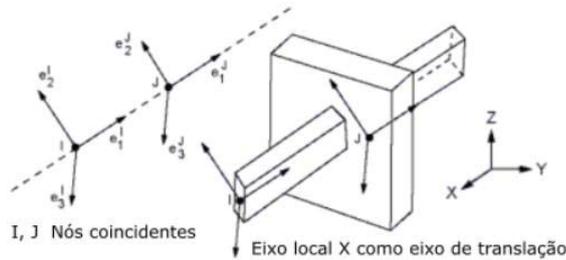


Fonte: Ansys help 15.0.

O próximo elemento, apresentado na Figura 41, destina-se a articulações com deslocamentos translacionais (deslocamento vertical das roldanas no interior do perfil U da estrutura de acoplamento). Esse elemento dispõe de dois nós e um grau de deslocamento

relativo de liberdade. Todos os outros graus de liberdade relativos são iguais entre os nós I e J.

Figura 41 – Elemento MPC de translação

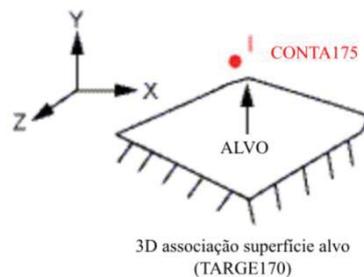


Fonte: Ansys help 15.0.

Na interação entre regiões de contato no DPM, são utilizadas duas associações de elementos: a dos elementos finitos CONTA175 e TARGE170 e a dos elementos CONTA174 e TARGE170.

A associação dos elementos finitos CONTA175 e TARGE170 é utilizada para representar o contato de nó-para-nó e nó-para-superfície em modelos 2D ou 3D, como ilustra a Figura 42. Sendo que, neste estudo é usado para estabelecer a relação de contato entre elementos com pouco ou nenhum movimento relativo.

Figura 42 – Elemento finito CONTA175 e TARGE170



Fonte: Ansys help 15.0.

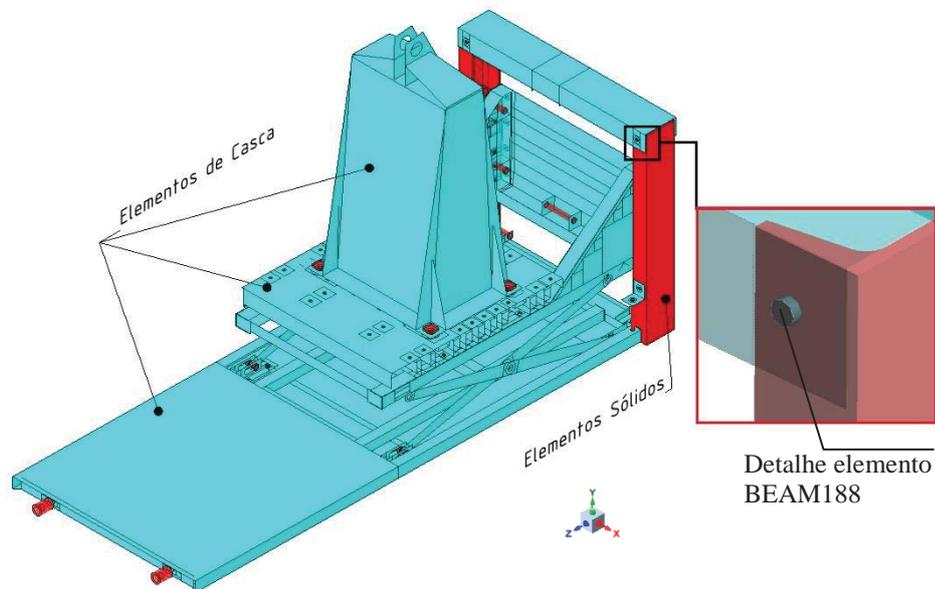
A outra associação, a dos elementos CONTA174 e TARGE170, é utilizada para representar o contato de superfície-para-superfície em modelos 2D ou 3D.

Nesse estudo, os contatos sujeitos a atrito entre superfícies também estão representados pelos elementos finitos CONTA175 e TARGE170, funcionando de forma que, quando um elemento de contato penetra na superfície-alvo, ocorre o contato, e, a partir do deslocamento referente à penetração, é calculada uma força de reação normal às superfícies. Uma força de atrito de Columb, que pode ser do tipo isotrópico ou ortotrópico, pode ser calculada tendo em vista os coeficientes de atrito informado pelo projetista e a força normal referente à reação do contato.

### 3.5 Modelo numérico do equipamento dispositivo de poltrona móvel (DPM)

O modelo numérico de forma geral está idealizado na Figura 43, sendo que, por tratar-se da avaliação do comportamento da estrutura do DPM, algumas simplificações são possíveis e necessárias por questões de processamento computacional. Nesse modelo as chapas estão representadas por elementos de casca, e os componentes que não possuem espessura uniforme, por elementos sólidos. Considerando que o DPM está sendo analisado de forma estática em determinada posição, as conexões parafusadas com pouco ou nenhum movimento relativo entre componentes estão representadas por elementos numéricos tipo BEAM188, ilustrado na Figura 39.

Figura 43 – Modelo numérico DPM



Fonte: Autor..

Nesse estudo, a maioria das peças possui uma grande relação entre área superficial e espessura e estão representadas por elementos de superfície tipo SHELL181. Os demais elementos ilustrados na cor vermelha na Figura 43 são representados por elementos sólidos tipo SOLID187.

#### 3.5.1 Preparação da malha no DPM

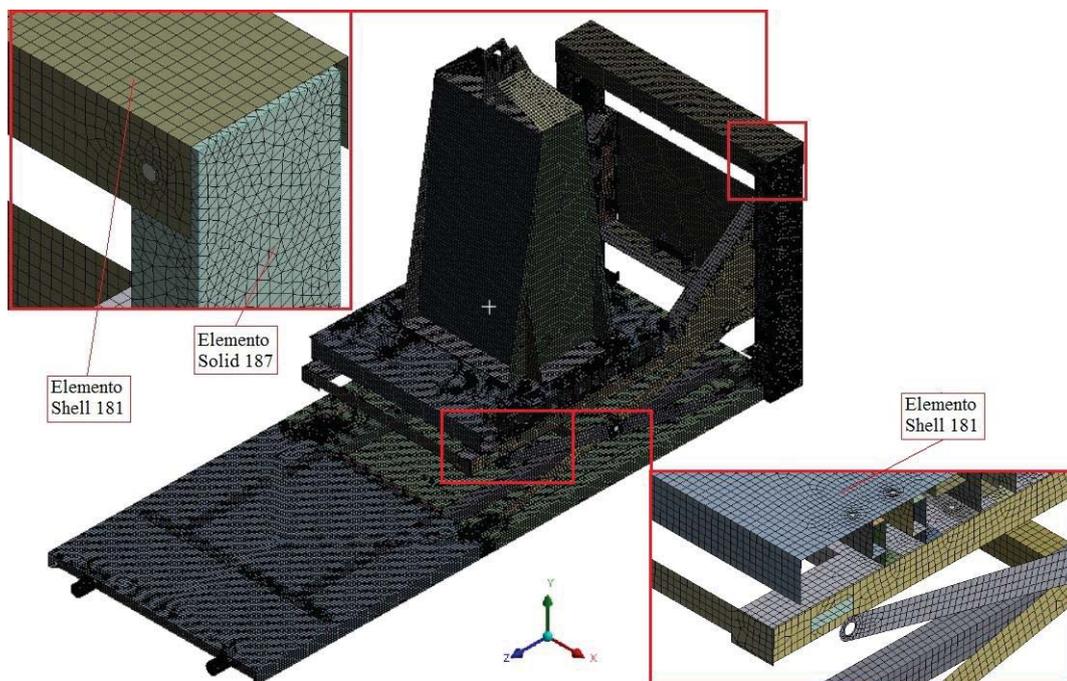
Na preparação da malha de elementos finitos, é necessária muita cautela, pois seu nível de refinamento deve ser controlado de forma que possa representar o contínuo a partir de seus pontos discretos; no entanto, grau de refinamento muito alto se torna oneroso em termos de processamento computacional, bem como pode gerar pontos de tensões muito elevadas

decorrentes de singularidades que se formam em função de descontinuidades existentes na geometria do modelo.

No presente estudo, buscou-se mapear as superfícies próximas dos furos em que, no modelo real, ocorre o contato da peça com o parafuso. Esse procedimento, além de facilitar a seleção dos pontos de contato das condições de contorno, também reduz a distorção da malha na região, pois suaviza a transição da malha nas proximidades de furos ou descontinuidades da geometria.

A malha usada para mapear o modelo numérico do DPM é composta por 264150 nós e 188442 elementos com tamanho máximo de 6 mm. O modelo mapeado está ilustrado na Figura 44.

Figura 44 – Malha no DPM



Fonte: Autor..

### 3.5.2 Condições de contorno DPM

A definição das condições de contorno do DPM está disposta de forma a representar as condições reais de operação do equipamento. Para tanto são estabelecidas três condições de contorno que se diferenciam entre si pela forma de carregamento: 1) condição de carregamento conforme Resolução CONTRAN Nº 445:2013; 2) condição de carregamento conforme NBR 15.320; 3) condição de carregamento conforme projeto.

### 3.5.2.1 Condição de carregamento DPM conforme resolução CONTRAN N° 445:2013

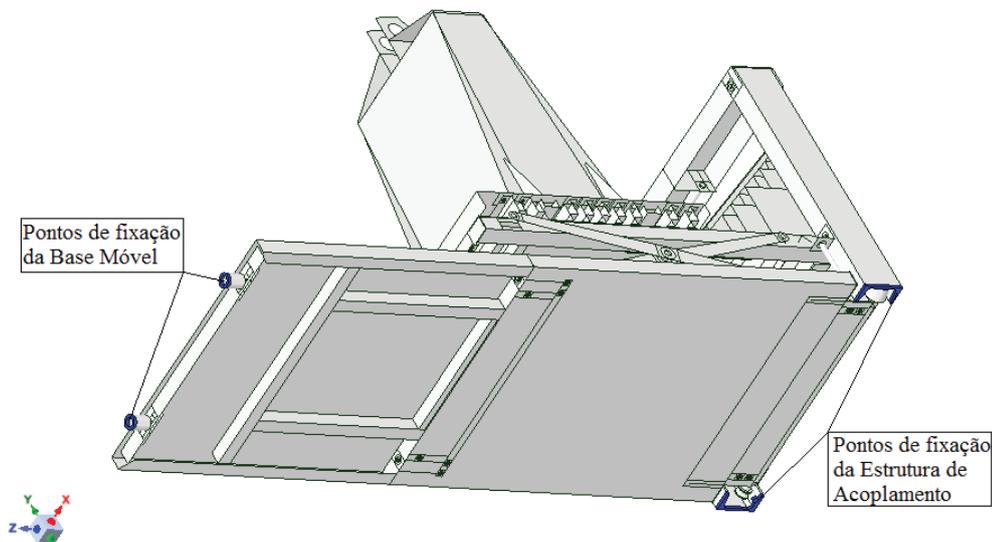
Nesta condição o equipamento é fixado em quatro regiões delimitadas pelas superfícies ilustradas na Figura 45, sendo duas na extremidade da base móvel e duas na estrutura de acoplamento. Nessas regiões, o modelo fica impedido de realizar deslocamento nos três eixos (X, Y e Z).

As superfícies sujeitas à restrição na base móvel correspondem aos locais, em que no modelo real, ocorre o travamento da Base no assoalho do ônibus. Essa condição define que o DPM está travado dentro do ônibus em condições de viagem para o passageiro.

Na estrutura de acoplamento, as duas superfícies onde ocorre a restrição correspondem à secção transversal dos dois perfis U que fixam o DPM a estrutura do ônibus.

A representatividade das restrições estabelecidas para o modelo numérico, sob esta condição de contorno, pode ser verificada, a partir da Figura 61, onde constam as condições de contorno aplicadas no ensaio em laboratório.

Figura 45 – Pontos de fixação DPM conforme Resolução

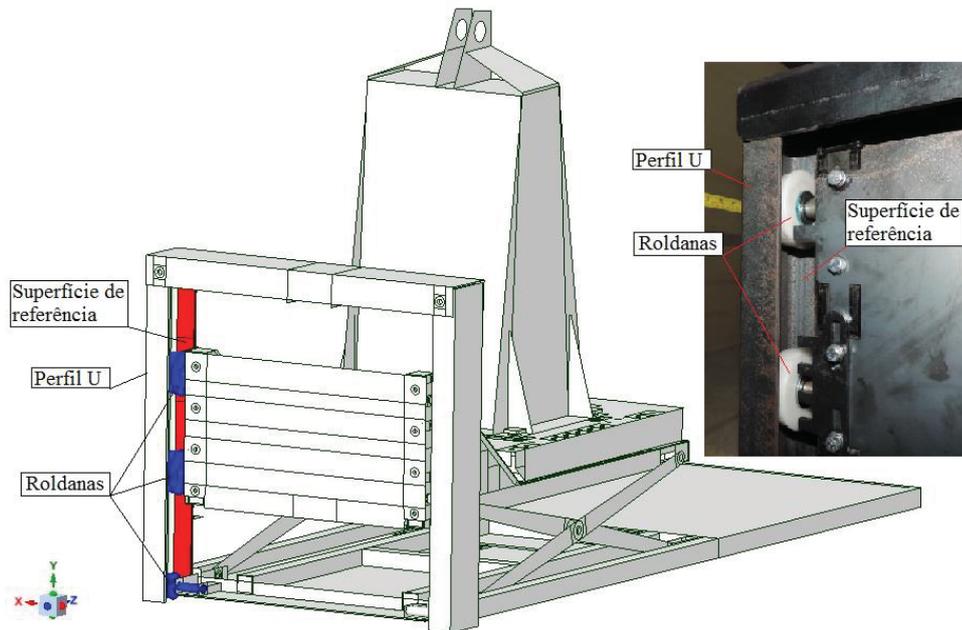


Fonte: Autor, 2016.

Considerando o comportamento real do equipamento, em que as roldanas, responsáveis por guiar o deslocamento vertical do elevador, não possuem restrição ao deslocamento nesta direção. As regiões de contato entre as roldanas e a estrutura de acoplamento são representadas por elementos MPC de translação, que permitem movimento de translação relativa em um determinado eixo. O deslocamento é considerado relativo porque toma como base uma coordenada local, que, neste caso, é designada pela superfície interna do perfil U da

estrutura de acoplamento. Conforme ilustrado na Figura 46, no modelo numérico, o conjunto elevador está livre para deslocamento na coordenada Y.

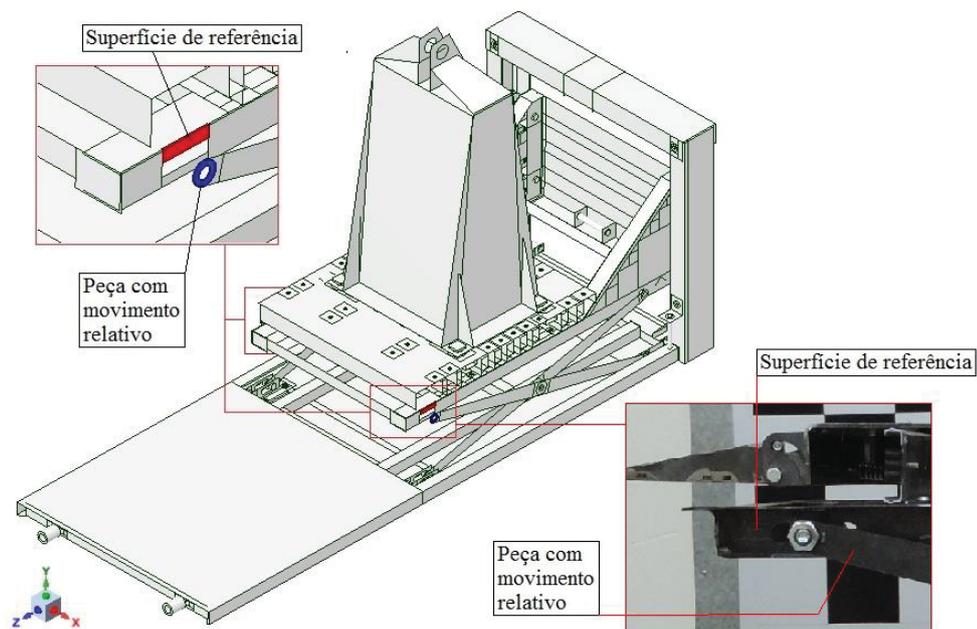
Figura 46 – Condição de contorno para roldanas



Fonte: Autor.

Outras duas regiões no elevador receberam o mesmo tratamento, nas quais, conforme ilustrado na Figura 47, é permitido deslocamento (horizontal) relativo entre as peças na coordenada Z.

Figura 47 – Condição de contorno para translação

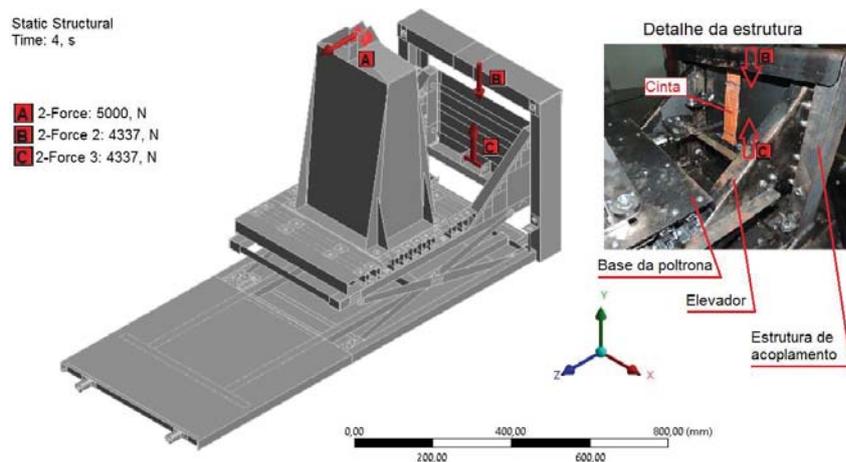


Fonte: Autor.

As demais conexões são tratadas numericamente, de forma que não permitam movimento relativo entre os componentes.

O modelo sob carregamento, conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013, sofre a ação de três forças, uma de 5000 N no sentido horizontal, conforme preconiza a Resolução, e outras duas de 4337 N na direção vertical, com sentidos opostos, sendo que essas, conforme Elevittá (2015) representam a capacidade de carga do motor elétrico que atua na cinta usada para suspender o elevador no movimento vertical do equipamento. A disposição das forças está ilustrada na Figura 48.

Figura 48 – Carregamento de 5000 N

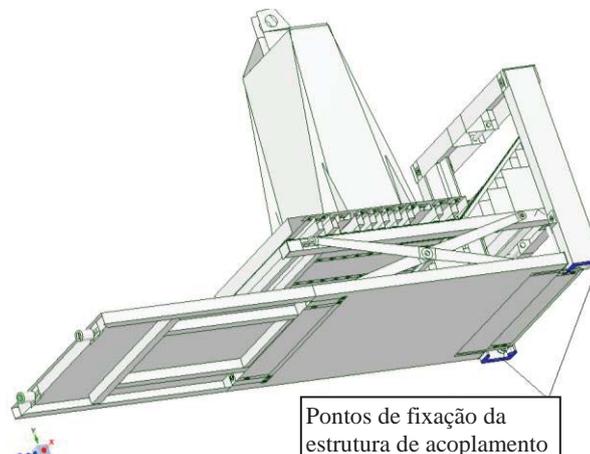


Fonte: Autor.

### 3.5.2.2 Condição de carregamento DPM conforme NBR 15.320

Nesta condição o equipamento é fixado em duas regiões, localizadas na estrutura de acoplamento, conforme ilustrado na Figura 49. Nessas regiões, o modelo fica impedido de realizar deslocamento nos três eixos (X, Y e Z).

Figura 49 – Pontos de fixação DPM conforme NBR

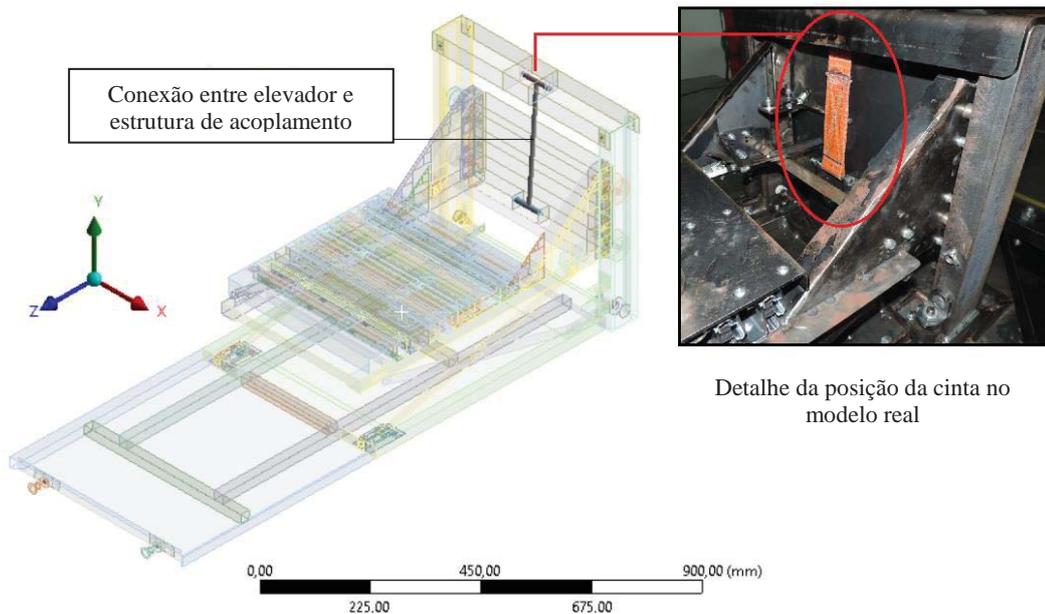


Fonte: Autor.

Com exceção da ligação realizada entre elevador e estrutura de acoplamento, que visa a representar a cinta que serve para ancorar o elevador na estrutura, e desta forma, impedir o deslocamento vertical do mesmo, conforme representado pelo elemento ilustrado na Figura 50, nas demais regiões de contatos entre componentes do DPM se aplicam as mesmas condições estabelecidas para carregamento, conforme a Resolução.

Figura 50 – Conexão elevador com estrutura de acoplamento

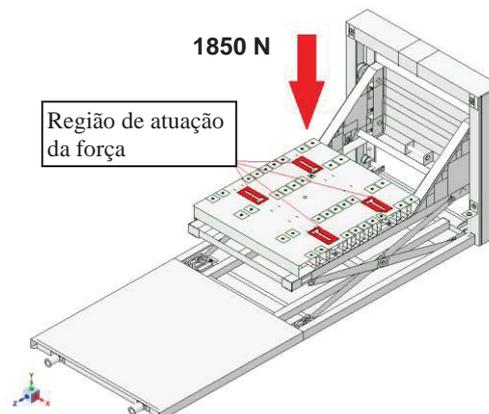
Circular - Sólido To Sólido



Fonte: Autor.

O modelo com carregamento, conforme texto revisado da NBR 15.320, sofre ação de 1500 N conforme norma, acrescido de 350 N, que representa a carga de uma poltrona. As duas forças estão representadas de forma concentrada com 1850 N e atuando sobre a base da poltrona na direção vertical, conforme ilustrado na Figura 51.

Figura 51 – Carregamento de 1850 N

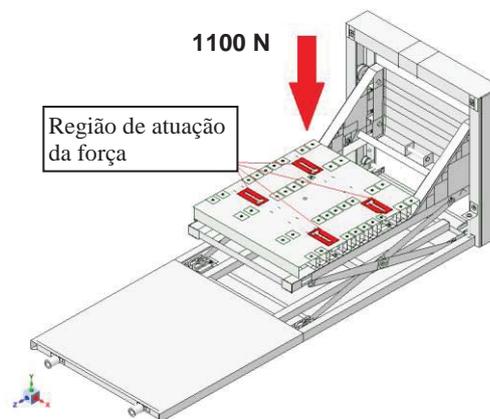


Fonte: Autor.

### 3.5.2.3 Condição de carregamento DPM conforme projeto

A condição conforme projeto diferencia-se da condição conforme Resolução somente em termos das forças externas que atuam no modelo. No projeto é considerado o peso próprio de uma poltrona – 35 kg, conforme Walber (2009), associada a um passageiro com peso médio de 75 kg, de acordo com a média nacional IBGE (2008/2009). Essas duas massas são representadas no modelo numérico na forma de força vertical de 1100 N, atuando na base da poltrona, conforme ilustrado na Figura 52. Conforme já mencionado, as forças B e C de 4337 N ilustradas na Figura 48 se mantêm.

Figura 52 – Carregamento 1100 N



Fonte: Autor.

### 3.6 Modelo numérico da base da poltrona tratada de forma isolada

O modelo numérico é formulado por elementos de casca SHELL181 de forma similar ao restante do DPM, e os quatro parafusos M10 são modelados com elementos sólidos SOLID187, sendo que a idealização dos parafusos levou em consideração os dois estudos que seguem.

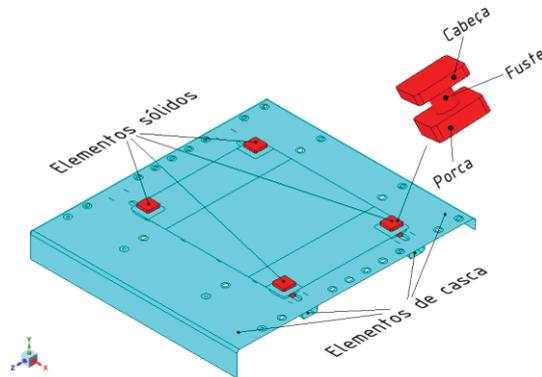
Conforme Maggi (2000), o conjunto parafuso/porca pode ser representado esquematicamente como sendo um único componente. Isso é possível em função da natureza do carregamento que se pretende aplicar e ao comportamento do conjunto parafuso/porca.

No entanto, Gasparin (2014) constatou que as arestas formadas pela forma sextavada da cabeça do parafuso e porca geram tensões localizadas muito elevadas, as quais foram desprezadas em sua análise.

Dessa forma, para esta análise foi utilizado o conjunto parafuso/porca como um componente único, o qual foi discretizado em elementos sólidos, e foi simplificado o formato sextavado da cabeça do parafuso e porca para a forma retangular, conforme mostra a Figura 53, com a finalidade de evitar as singularidades formadas pelas arestas e representar a área de

contato proporcionada pela arruela que fica entre o parafuso e o componente mecânico a ser fixado.

Figura 53 – Modelo numérico base da poltrona



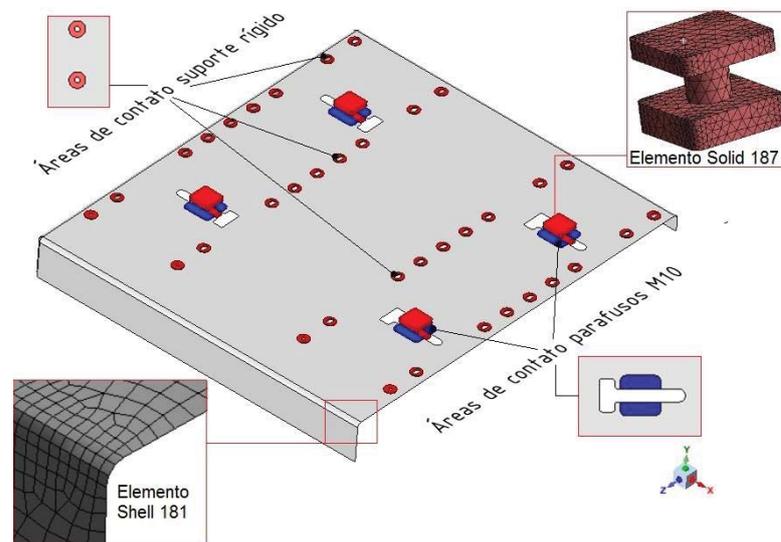
Fonte: Autor.

### 3.6.1 Preparação da malha na base da poltrona

O tratamento da malha na base da poltrona recebe os mesmos cuidados que no DPM. Conforme mencionado anteriormente, os componentes fabricados a partir de chapas estão representados pelo elemento SHELL181, sendo que a Figura 54 apresenta o exemplo de malha gerada com este elemento. A malha usada para mapear o modelo numérico da base da poltrona é composta por 74551 nós e 57311 elementos com tamanho máximo de 6,13 mm.

A parte destacada pelos círculos, denominada área de contato suporte rígido, visa a representar a superfície de contato dos 36 parafusos, existentes no modelo real, onde ocorre a fixação do conjunto base da poltrona no elevador. Para representar a fixação da base, os nós que compõem essas 36 superfícies sofrem restrição nos eixos X, Y e Z.

Figura 54 – Malha base da poltrona



Fonte: Autor.

Mesmo não sendo objeto de análise, os quatro parafusos M10 de ancoragem da poltrona estão modelados com elemento tetraédrico hiperbólico SOLID187. O objetivo de incluir os parafusos na análise esta baseado no estudo de Maggi (2000), que utiliza as superfícies dos parafusos conforme ilustrado na Figura 55, para estabelecer as regiões de contato entre os componentes da base da poltrona.

### **3.6.2 Condições de contorno base da poltrona**

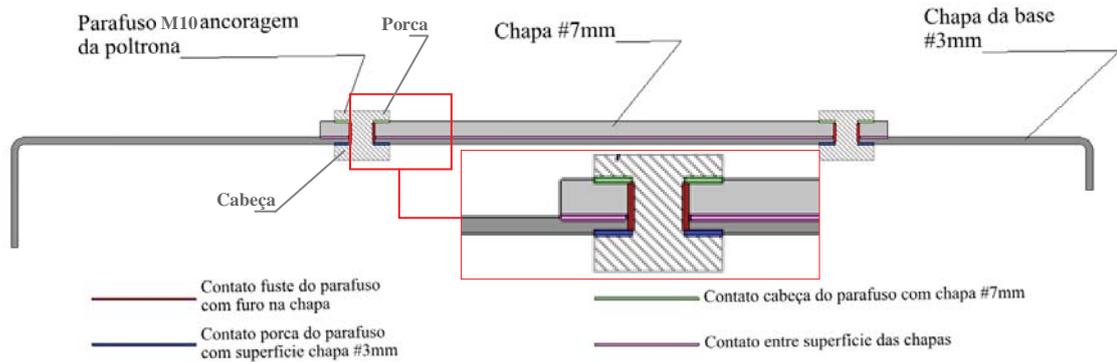
As condições de contorno atribuídas ao modelo numérico da base da poltrona, quando analisada de forma separada do DPM, buscam representar o comportamento real do conjunto na hipótese de carregamento, conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013.

No modelo numérico, de forma representativa, a fixação do conjunto base da poltrona ao elevador ocorre atribuindo restrição à rotação e translação nos eixos X, Y e Z, na superfície oposta das partes mapeadas como área de contato suporte rígido da ilustrado na Figura 54, sendo que a área representada pelos círculos destacados simula a superfície de contato da cabeça dos 36 parafusos que, no modelo real, conectam o conjunto base da poltrona no elevador. Essa condição foi adotada para melhorar a distribuição das cargas na superfície da chapa da base. As regiões mapeadas próximo aos quatro rasgos destinados à passagem dos parafusos M10 simulam a superfície de contato da porca com a chapa 3 mm de espessura.

As interações entre as peças que compõem o conjunto base da poltrona estão simuladas por quatro pares de contato que consideram a área entre as superfícies e um coeficiente de atrito de 0,2, de forma que tenha capacidade de representar numericamente o comportamento da junta aparafusada. (GASPARIN, 2014). A Figura 55 traz de forma exemplificada a posição dos contatos que estão descritos a seguir:

- 1) Contato entre a fuste do parafuso e as superfícies internas dos furos na chapa da base com 3 mm e 7 mm de espessura.
- 2) Contato entre a superfície superior da porca do parafuso com a superfície inferior da chapa da base com 3 mm de espessura.
- 3) Contato entre superfície inferior da cabeça do parafuso com a superfície superior da chapa com 7 mm de espessura.
- 4) Contato entre a superfície inferior da chapa com 7 mm de espessura com a superfície superior da chapa da base com 3 mm de espessura.

Figura 55 – Condições de contorno da base da poltrona



Fonte: Autor.

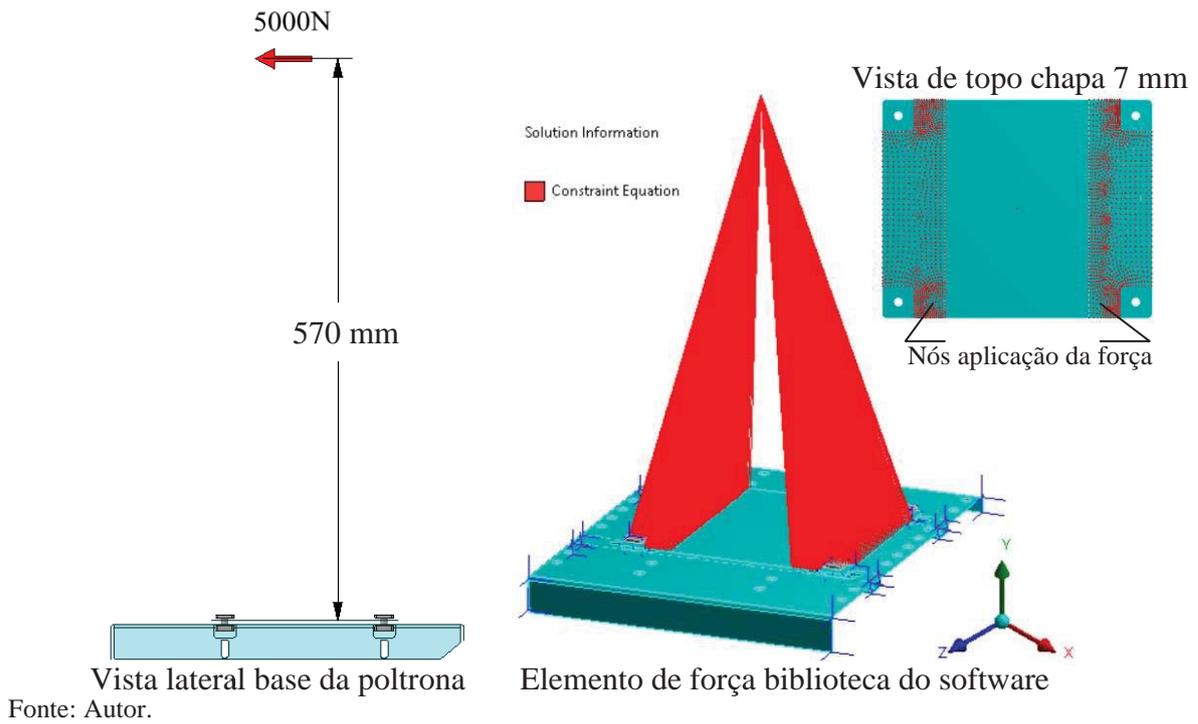
### 3.6.3 Aplicação do carregamento na base da poltrona

As condições de carregamento estão representadas de duas formas, sendo a primeira em função de carregamento imposto pela Resolução CONTRAN N° 445:2013, que estipula que deve ser aplicada uma força concentrada de 5000 N na direção horizontal e no sentido de deslocamento do veículo. De acordo com a norma, a força deve ser deslocada 750 mm da base na direção vertical ascendente; no entanto, considerando que no projeto da base da poltrona fornecido pela empresa Elevittá, a base já está afastada 180 mm da base móvel, restam 570 mm, conforme ilustrado na Figura 56, de afastamento entre o ponto de aplicação da força e a base da poltrona.

Para esta condição, a biblioteca do *software* dispõe de recurso que possibilita aplicar a força de forma remota, sendo que, neste caso o *software* gera elementos tipo Multi-point Constraint (MPC) que permitem deformação e distribuem a força nos nós que compõem a superfície escolhida na geometria. Na base da poltrona, a distribuição da força remota, ocorre em parte da superfície da chapa 7 mm, mais precisamente nos nós ilustrados na vista de topo da chapa 7 mm da Figura 56.

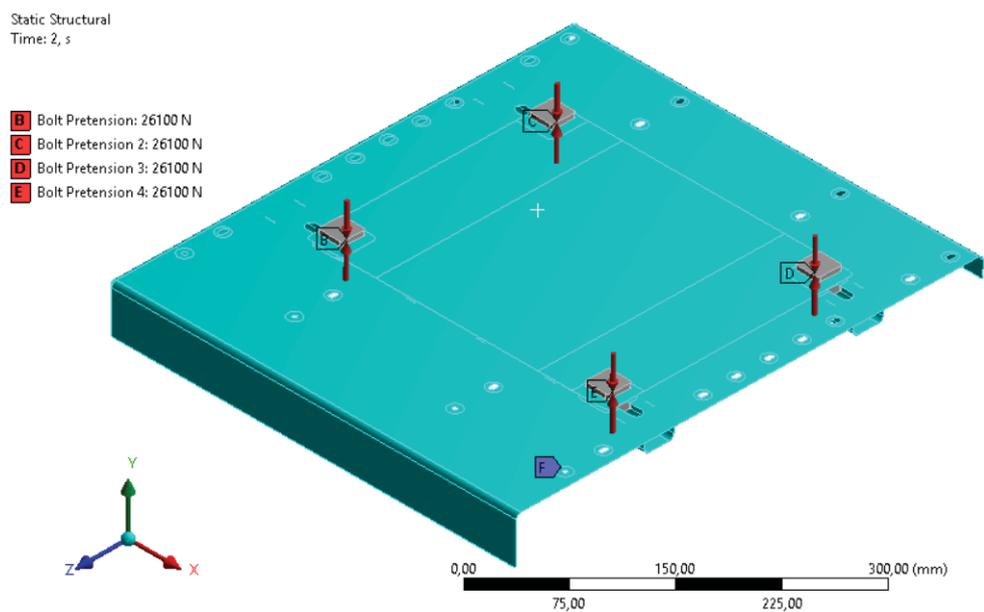
A Figura 56 traz em um segundo momento os elementos de força gerados pelo *software*, e sua formação piramidal se deve pela concentração da força formando um vértice superior e a forma retangular da base pela distribuição da mesma na parte da geometria que sofre a ação desta condição.

Figura 56 – Aplicação de força remota na base da poltrona



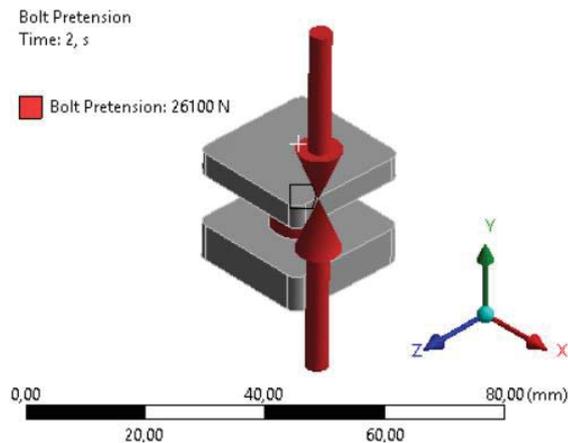
A segunda forma de carregamento se aplica somente aos quatro parafusos M10 destinados à ancoragem da poltrona. Sua representação no respectivo conjunto está ilustrada na Figura 57, sendo que a força corresponde ao aperto que pode ser dado nos parafusos de ancoragem da poltrona, e a sua magnitude de 26,1 kN foi obtida conforme cálculo que consta no Apêndice A.

Figura 57 – Carregamento de protensão



A Figura 58 ilustra com mais detalhes o elemento gerado pelo *software* que reproduz a condição de compressão no fuste dos quatro parafusos M10 da ancoragem da poltrona. Essa força é significativa na verificação do comportamento da junta aparafusada, visto que gera o contato de atrito entre as partes do parafuso e as peças adjacentes.

Figura 58 – Protensão em um parafuso

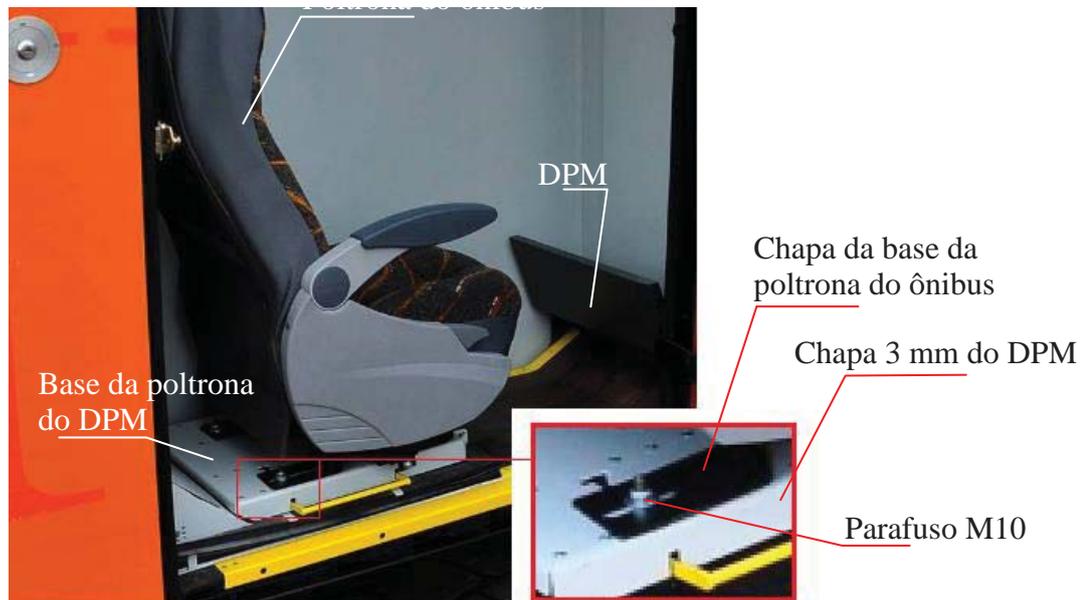


Fonte: Autor.

Na sequência é apresentada a Figura 59, que traz o DPM com sua respectiva poltrona de ônibus instalada. A imagem permite visualizar e estabelecer uma relação entre o modelo real e o numérico, da forma em que ocorre a ancoragem da poltrona no DPM.

A poltrona é fixada ao DPM pela peça denominada “chapa da base da poltrona do ônibus”, que no modelo numérico é representada pela chapa 7 mm conforme ilustrado na Figura 55 e Figura 56.

Figura 59 – Detalhe de poltrona instalada na base



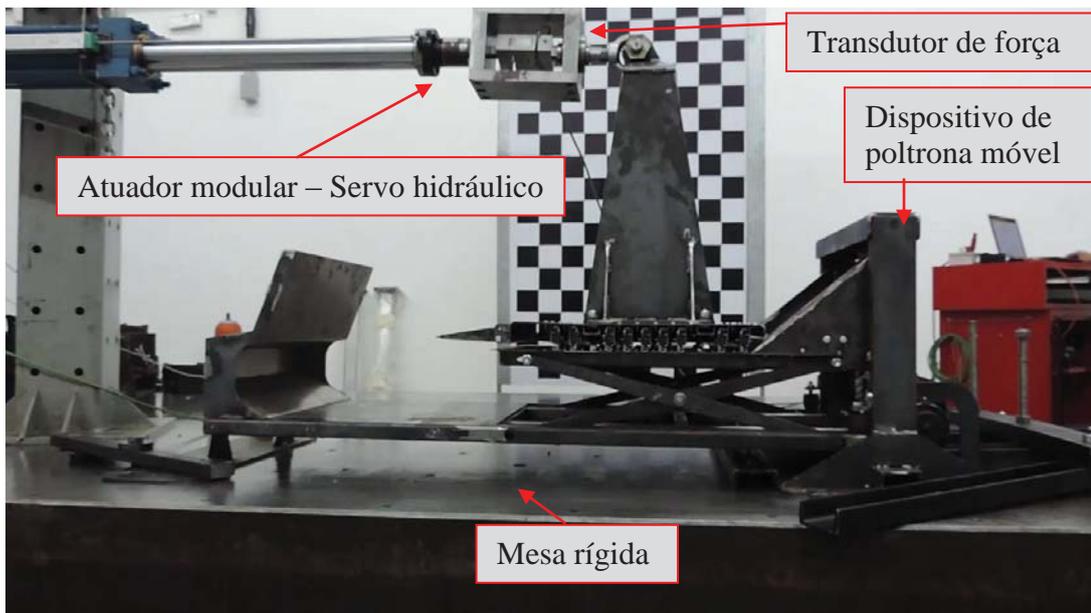
Fonte: Adaptado de Elevittá, 2016.

### 3.7 Descrição geral do ensaio

O ensaio busca avaliar o comportamento mecânico da estrutura do dispositivo de poltrona móvel (DPM), na condição de carregamento estabelecida na Resolução CONTRAN Nº 445:2013 – Anexo IV – Apêndice 2 – Ancoragem de um veículo. De posse dos dados, é possível verificar se a estrutura deformada atende à Resolução, bem como se fornece informações em termos de deslocamentos que são comparadas com o modelo numérico desenvolvido para avaliar o DPM.

O procedimento de ensaio apresentado na Figura 60 é realizado em laboratório acreditado pelo INMETRO, no qual o carregamento de 5000 N previsto em resolução é aplicado conforme ilustrado anteriormente na Figura 16. O carregamento é realizado com auxílio de atuador modular servo hidráulico associado a um transdutor de força.

Figura 60 – Configuração do ensaio

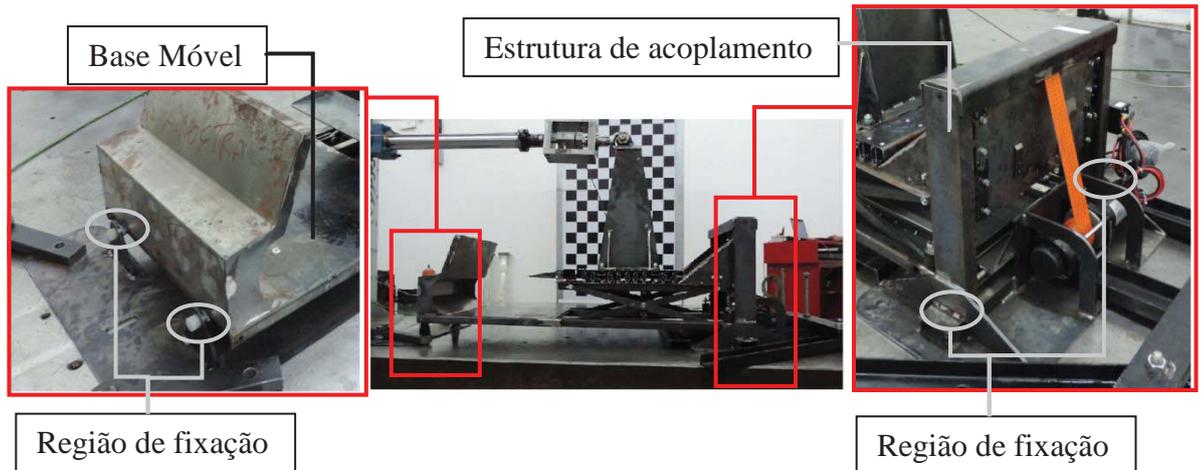


Fonte: Adaptado de Elevitta, 2015.

#### 3.7.1 Condições de contorno do ensaio

As condições de fixação do DPM na mesa rígida durante o ensaio estão dispostas de forma que representem a condição real, em que o equipamento está travado dentro do ônibus em condições de viagem para o passageiro. Nessa condição, a estrutura do DPM é fixada à mesa rígida em quatro regiões, sendo duas na extremidade da base móvel e duas na estrutura de acoplamento conforme representado na Figura 61.

Figura 61 – Condições de fixação do DPM no ensaio



Fonte: Adaptado de Elevitta, 2015.

### 3.8 Conclusões do capítulo

O desenvolvimento do capítulo 3 mostra-se adequado, uma vez que o modelo numérico estabelecido para a estrutura do DPM tem condições de representar o comportamento real do equipamento nas três condições de carregamento estabelecidas no estudo.

A descrição geral do DPM e base da poltrona possibilitam o entendimento mínimo da composição geométrica do equipamento e, com isso, selecionar os elementos finitos utilizados na análise numérica.

Na seleção dos elementos finitos que compõem o modelo numérico, as peças com grande relação entre área superficial e espessura estão representadas por elementos de casca SHELL181, e os eixos e perfis com espessura variável são representados por elementos sólidos SOLID187. Nos contatos livres para rotação ou translação relativos, são utilizados elementos com formulação *Multi-point Constraint* (MPC) e os demais contatos sem movimento relativo entre componentes são representados pela associação dos elementos CONTA175 ou CONTA174 com o elemento TARGE170.

Em relação às propriedades mecânicas dos materiais, as informações da Tabela 4 foram úteis à medida que fornecem dados que possibilitam conferir e editar a biblioteca de materiais do *software* de engenharia.

A solução de mapear regiões próximas de discontinuidades geométricas na preparação da malha de elementos finitos facilita o controle durante o processo de geração da malha. A possibilidade de controlar a geração da malha apresentou grande influência em termos de número de elementos e qualidade, pois na condição *default* do *software* são necessários em

torno de 400000 elementos e 500000 nós para compor o modelo numérico do DPM. No entanto, estabelecendo controle na geração da malha, esses números são reduzidos para 188442 elementos e 264150 nós.

Quanto às condições de contorno, o modelo numérico da base da poltrona, destinado à análise isolada do DPM, utiliza de forma compatível as condições de contato e protensão nos parafusos, sugeridos no estudo de juntas aparafusadas realizado por Maggi (2000). Todavia, o modelo numérico de DPM não recebe tal tratamento, tendo em vista que o objetivo, neste caso, é obter o comportamento da estrutura como um todo.

Ainda em relação às condições de contorno, os carregamentos representativos das três condições abordadas no estudo são tratados de forma distinta, conforme demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação de condições de carregamento

<b>Condição de carregamento</b>	<b>Força representativa (N)</b>	<b>Sentido</b>	<b>Direção</b>	<b>Ponto de atuação</b>
<b>Conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013</b>	5000	Marcha do veículo	Horizontal	Estrutura rígida
	4337	Ascendente	Vertical	Elevador
	4337	Descendente	Vertical	Estrutura de acoplamento
<b>Conforme NBR 15.320</b>	1100	Descendente	Vertical	Base da Poltrona
	1850	Descendente	Vertical	Base da Poltrona
<b>Conforme projeto</b>	4337	Ascendente	Vertical	Elevador
	4337	Descendente	Vertical	Estrutura de acoplamento

Fonte: Autor.

Finalmente, é apresentada a configuração do ensaio realizado em laboratório para avaliar o comportamento mecânico da estrutura do dispositivo de poltrona móvel (DPM), na condição de carregamento estabelecida na Resolução CONTRAN N° 445:2013 – Anexo IV – Apêndice 2 – Ancoragem de um veículo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentado o resultado da análise numérica objeto deste estudo. Inicialmente é realizada a análise sob a condição de contorno que inclui a carga prevista na Resolução CONTRAN N° 445:2013. O resultado do modelo numérico é comparado, em termos de deslocamento, com o comportamento do protótipo que passou por ensaio em laboratório.

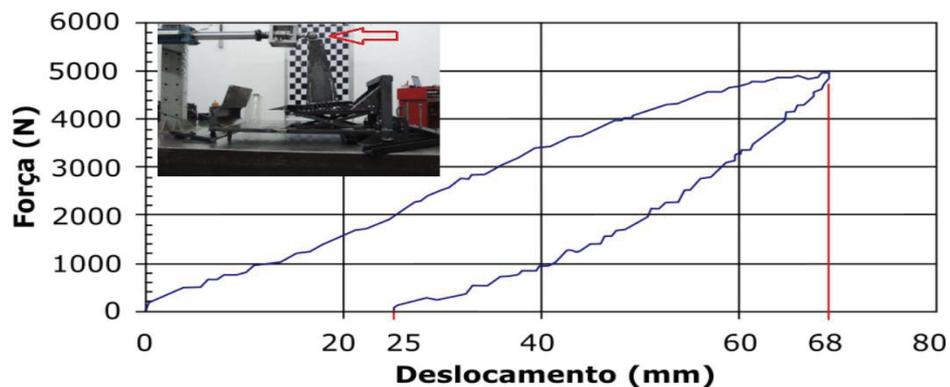
Considerando que no ensaio em laboratório acreditado pelo INMETRO, o protótipo do DPM recebe o seguinte parecer: “atende aos requisitos estabelecidos para o ensaio conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013 – Anexo IV – Apêndice 2 – Ancoragem de um veículo” (ELEVITTÀ, 2015). E o modelo numérico sujeito à avaliação comparativa também é formulado que represente as condições do ensaio.

O estudo assume que o modelo numérico é representativo e inicia a série de simulações sob três formas de carregamento distintas, das quais duas buscam analisar o DPM nas condições estabelecidas na legislação (Resolução CONTRAN N° 445:2013 e NBR 15.320) e uma terceira condição prevista para o projeto.

### 4.1 Comparativo entre protótipo e modelo numérico do DPM

O protótipo sujeito a ensaio em laboratório fornece quatro medidas de deslocamento, sendo uma de 68 mm obtida a partir do gráfico ilustrado na Figura 62, que corresponde ao deslocamento horizontal da extremidade superior do protótipo, exatamente no ponto de atuação da força de 5000 N conforme preconiza a Resolução CONTRAN N° 445:2013. A curva plotada no gráfico, parte da carga zero chegando a 5000 N e uma deformação elasto-plástica de 68 mm, e com alívio da carga ocorre o retorno elástico até 25 mm, que corresponde à deformação plástica (permanente) neste ponto.

Figura 62 – Gráfico força (N) x deslocamento (mm) do ensaio em laboratório



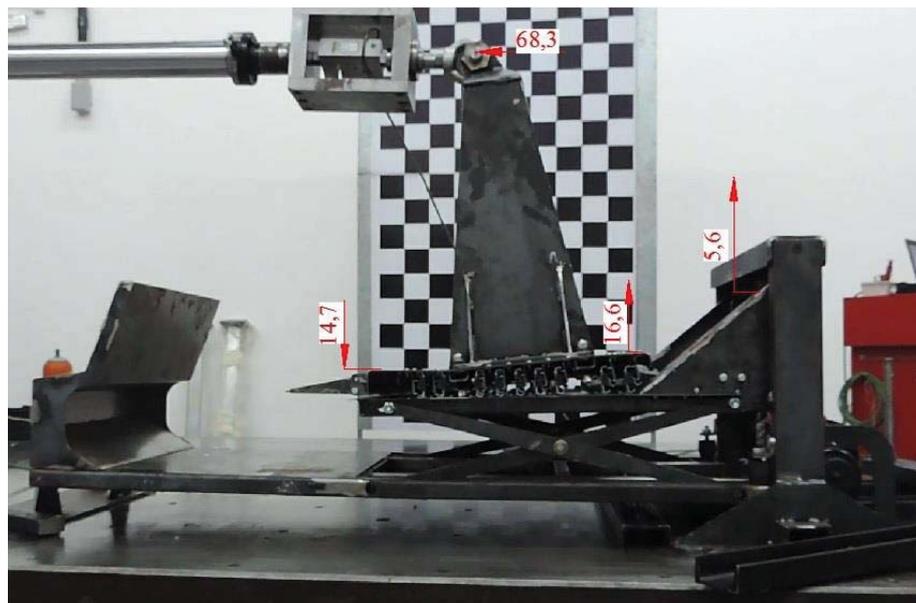
Fonte: Adaptado de Elevitta, 2015.

As outras três medidas obtidas no ensaio do protótipo em laboratório são dos deslocamentos verticais, sendo duas da base da poltrona e uma da estrutura do elevador.

A medida do deslocamento da base é tomada na extremidade dianteira e traseira da chapa com 3 mm de espessura, sendo que essas medidas correspondem respectivamente a 14,7 mm para baixo e 16,6 mm para cima, conforme pode ser visualizado na estrutura deformada da Figura 63. O deslocamento de 14,7 mm corresponde à parte da estrutura sujeita à força compressiva, e o deslocamento de 16,6 mm corresponde à parte onde atuam forças de tração.

O outro deslocamento vertical é tomado na extremidade superior do elevador e corresponde a 5,6 mm para cima. Apesar desse deslocamento não gerar forças que atuam diretamente na estrutura onde é tomada a medida, é de fundamental importância para comparar o comportamento da estrutura deformada em laboratório com o modelo numérico.

Figura 63 – Foto estrutura deformada do ensaio em laboratório



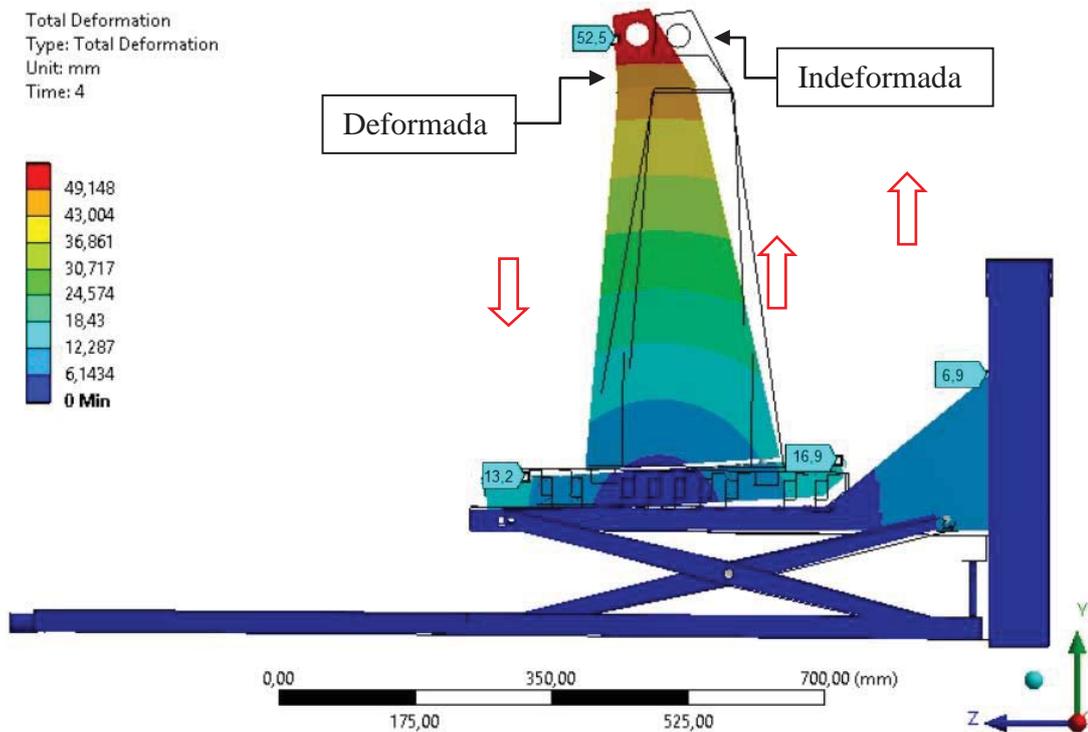
Fonte: Adaptado de Elevitta, 2015.

As outras três medidas verticais usadas para a comparação entre protótipo e modelo numérico são obtidas da estrutura deformada do modelo numérico do DPM – duas da base da poltrona e uma da estrutura do elevador.

A medida do deslocamento da base é tomada na extremidade dianteira e traseira da chapa com 3 mm de espessura, e essas medidas correspondem respectivamente a 13,2 mm para baixo e 16,9 mm para cima, conforme pode ser visualizado na estrutura deformada da Figura 64. O deslocamento de 13,2 mm corresponde à parte da estrutura sujeita à força compressiva, e o deslocamento de 16,9 mm corresponde à parte onde atuam forças de tração.

O outro deslocamento vertical é tomado na extremidade superior do elevador e corresponde a 6,9 mm para cima.

Figura 64 – Deslocamentos no modelo numérico



Fonte: Autor.

Considerando que a estrutura, objeto deste estudo, apresenta conceito pioneiro e a literatura não dispõe de estudos específicos acerca desse equipamento, são utilizados estudos similares para compor o modelo numérico analisado. Diante dessas condições, os valores apresentados na Tabela 6 tornam-se satisfatórios para um primeiro estudo comparativo do comportamento da estrutura deformada no ensaio e no modelo numérico. A maior diferença verificada é de 23%, fato este justificável, considerando-se que o ponto de tomada da medida está afastado 750 mm da base móvel e sofre a ação direta da força de 5000 N, simulando a condição prevista na Resolução CONTRAN N° 445:2013 ilustrada na Figura 16.

Tabela 6 – Comparativo de deslocamentos do protótipo e modelo numérico

Ponto de tomada de medida	Deslocamento protótipo (mm)	Deslocamento modelo numérico (mm)	Diferença (%)
Ponto de atuação força 5000N	68,3	52,5	23
Base da poltrona (frente)	14,7	13,2	10
Base da poltrona (traseira)	16,6	16,9	2
Extremidade superior elevador	5,6	6,9	23

Fonte: Adaptado de Elevitta, 2015.

Com a possibilidade de estabelecer comparativo entre o comportamento da estrutura deformada no protótipo e no modelo numérico, ocorre o fortalecimento da confiabilidade no modelo numérico a ser utilizado nas demais simulações.

#### 4.2 Comparativo entre protótipo e modelos numéricos da base da poltrona

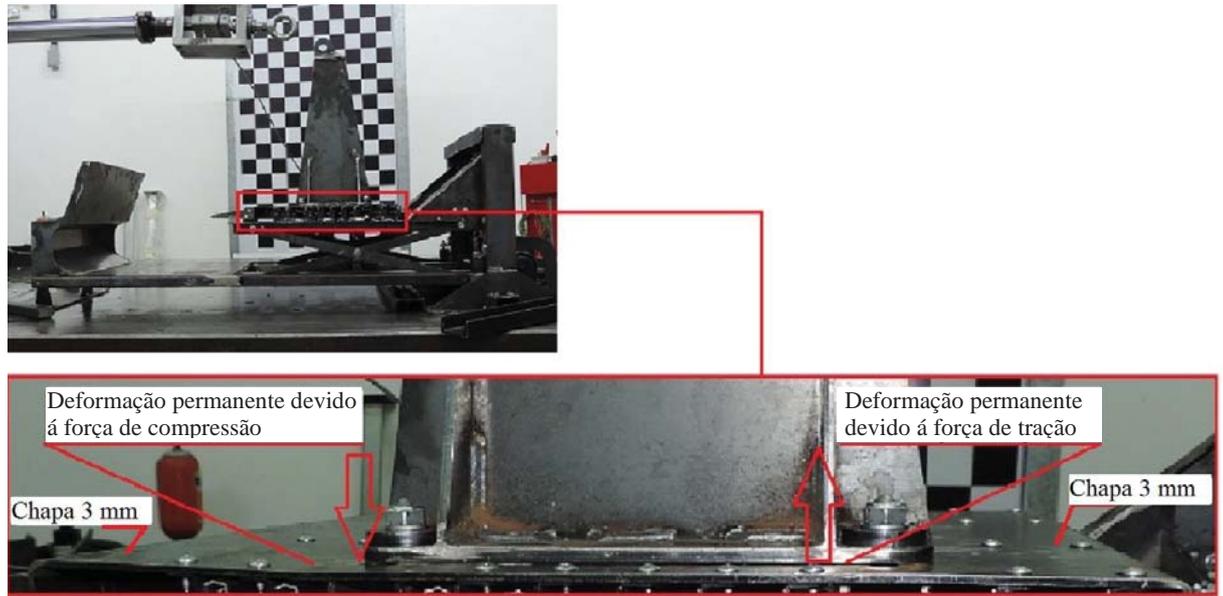
Esta etapa da análise busca avaliar o comportamento da base da poltrona com ênfase na condição de ancoragem exigida pela Resolução CONTRAN N° 445:2013.

A geometria que corresponde à base da poltrona (chapa com 3 mm de espessura) é analisada sob duas condições de forma numérica, sendo uma na base da poltrona de forma isolada com condições de contorno similares às adotadas por Maggi (2000) e outra com a base da poltrona acoplada ao DPM.

Em seguida o resultado das duas abordagens numéricas é comparado com a estrutura deformada no ensaio em laboratório do DPM.

Inicialmente é apresentada a Figura 65, com a estrutura deformada no ensaio em laboratório. Nessa condição é possível verificar que ocorreu deformação permanente na base da poltrona decorrente das forças de tração e compressão que atuam sobre a chapa com espessura de 3 mm da base.

Figura 65 – Deformação permanente da base da poltrona no ensaio em laboratório

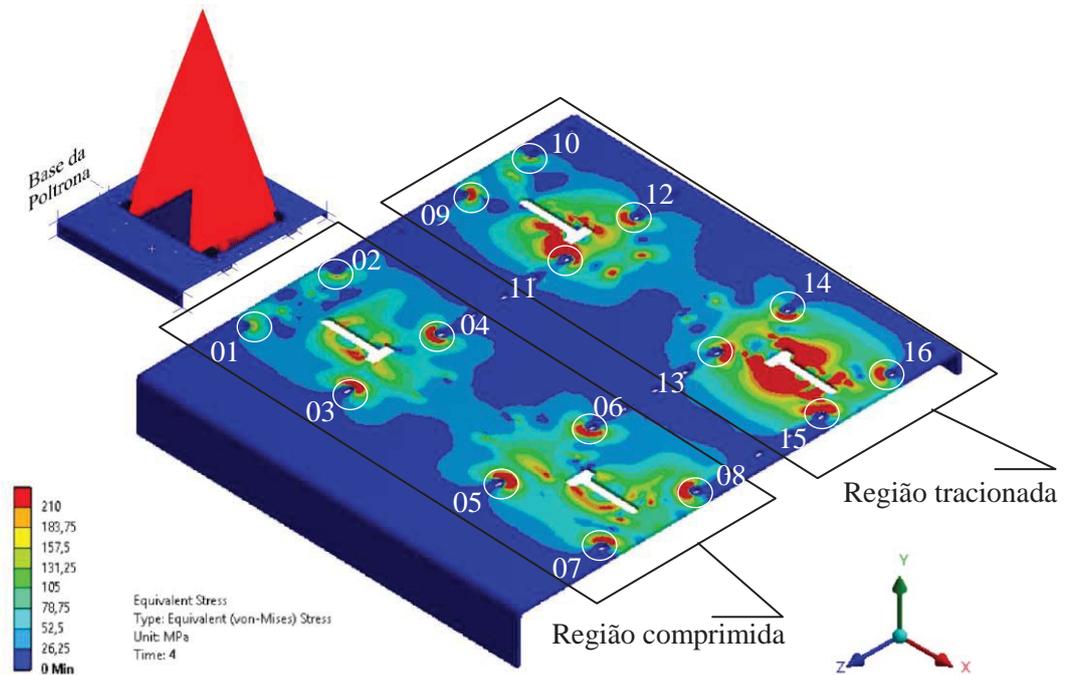


Fonte: Adaptado de Elevitta, 2015.

Considerando que a Resolução CONTRAN N° 445:2013 permite deformações na estrutura durante o ensaio de ancoragem. Nas simulações numéricas que seguem é utilizado como referência a tensão equivalente de von Mises associada a tensão limite para escoamento do material de 210 MPa, Shigley, Mischke e Budynas (2008). As regiões assinaladas na cor vermelha identificam os locais onde a tensão equivalente de von Mises excede o limite de escoamento estabelecido para o material, indicando a ocorrência de deformação permanente na peça (escoamento plástico do material).

A Figura 66 ilustra a distribuição da tensão de von Mises na chapa com espessura de 3 mm da base da poltrona, analisada de forma isolada, na qual a numeração de 01 a 16 representa regiões próximas da fixação da peça, conforme ilustrado na Figura 54. Em função dessa proximidade, o modelo numérico apresenta uma variação de 401 MPa, tendo a região 15 como máxima de 593 MPa e a região 01 como mínima de 192 MPa.

Figura 66 – Distribuição de tensão de von Mises na base da poltrona em simulação isolada



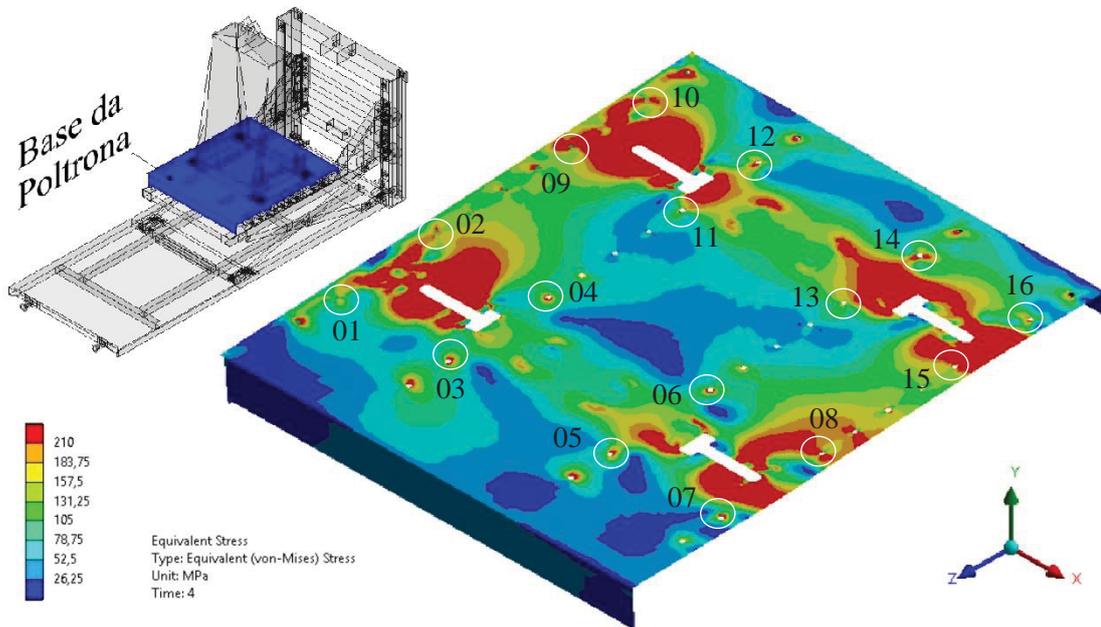
Fonte: Autor.

Na região tracionada ilustrada na Figura 66 também surgiram tensões de von Mises próximas a 300 MPa no entorno do rasgo onde passa o parafuso da ancoragem da poltrona.

A próxima condição ilustrada na Figura 67 trata a base da poltrona analisada de forma acoplada ao DPM. Para critério de comparação, é usada a tensão de von Mises próxima das 16 regiões, conforme anotado na Figura 66.

A distribuição da tensão de von Mises próxima das regiões enumeradas na Figura 67 apresenta variação de 226 MPa, tendo a região 15 como máxima de 353 MPa e a região 01 como mínima de 127 MPa. Comparando a variação entre os dois modelos numéricos, verifica-se uma redução de 175 MPa no modelo acoplado em relação ao tratado de forma isolada.

Figura 67 – Distribuição de tensão de von Mises na base da poltrona simulação acoplada ao DPM



Fonte: Autor.

As regiões sujeitas a forças de tração e compressão na condição da Figura 67 não se apresentam de forma distinta, conforme a condição da Figura 66, mas as tensões se mantêm próximas a 300 MPa .

Na condição da Figura 67, ocorre maior distribuição de tensões ao longo da peça.

Ao comparar a tensão de von Mises verificada nas 16 regiões anotadas nas Figura 66 e Figura 67, com auxílio da Tabela 7 é possível identificar que nas regiões 2, 9 e 10 a tensão de von Mises varia até 8% entre os dois modelos numéricos da base da poltrona. Para os demais pontos, a tensão de von Mises entre os dois modelos numéricos fica entre 17 % e 72% abaixo no modelo acoplado ao DPM quando comparado ao modelo analisado de forma isolada.

A redução da tensão de von Mises nessas regiões se deve, principalmente, ao fato da melhor distribuição das cargas no modelo numérico da Base, quando analisada em conjunto com o DPM.

Ainda, ao analisar a base da poltrona de forma isolada, se atribui restrição a translação e rotação nos três eixos (X, Y e Z) para as 36 áreas ilustrada na Figura 54, o que ocasiona falsa rigidez nessas regiões de fixação da peça, uma vez que não ocorre deslocamento relativo entre as 36 áreas, o que consequente, ocasiona absorção de carga e elevação de tensão de von Mises, nas regiões entorno dos parafusos M10 de ancoragem da poltrona . Dessa forma, entende-se que a rigidez do conjunto (base da poltrona) é melhor representada, quando analisada de forma acoplada ao DPM.

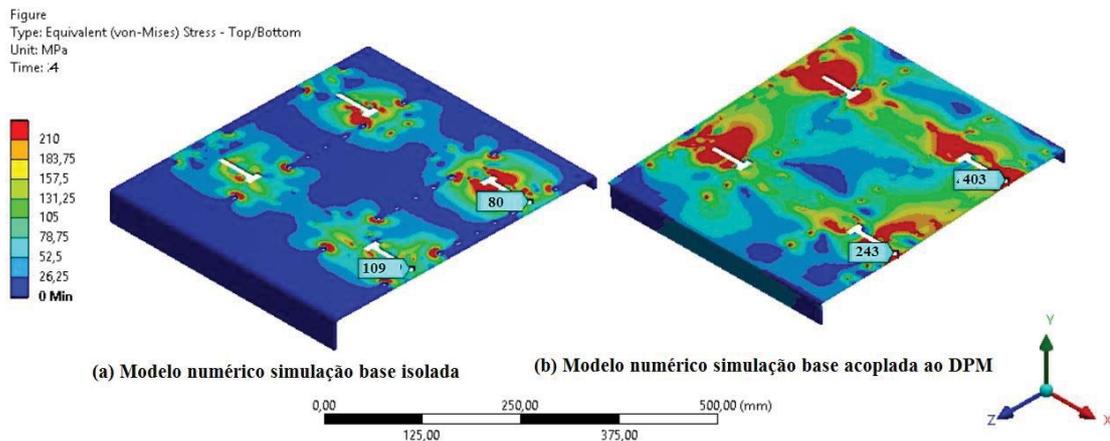
Tabela 7 – Comparação de tensão de von Mises entre modelos numéricos da base da poltrona

Pontos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Condição	Base isolada (MPa)	192	193	353	448	354	289	301	336	340	198	393	236	439	318	593	288
	Base acoplada ao DPM (MPa)	127	194	170	127	173	137	105	231	353	216	173	197	220	194	403	133
Diferença de tensão		34%	1%	52%	72%	51%	53%	65%	31%	4%	8%	56%	17%	50%	39%	32%	54%

Fonte: Autor.

Ainda como critério de comparação, na Figura 68 é verificada a tensão de von Mises em dois pontos próximos da extremidade lateral da chapa da base. Na Figura 68(a), que representa a análise da Base de forma isolada, a tensão de von Mises ficou abaixo do limite de escoamento do material, e na Figura 68(b), que representa a análise da Base acoplada ao DPM, este limite foi ultrapassado. Mesmo indesejável em termos de projeto, já era esperado que a tensão de von Mises nesta região excedesse o limite de escoamento, visto que o protótipo apresentou deformação permanente no ensaio. Nesse caso, com a indicativa de escoamento plástico do material na Figura 68(b), o estudo sugere que o modelo numérico da Base acoplada ao DPM apresentou comportamento mais próximo do ensaio em laboratório.

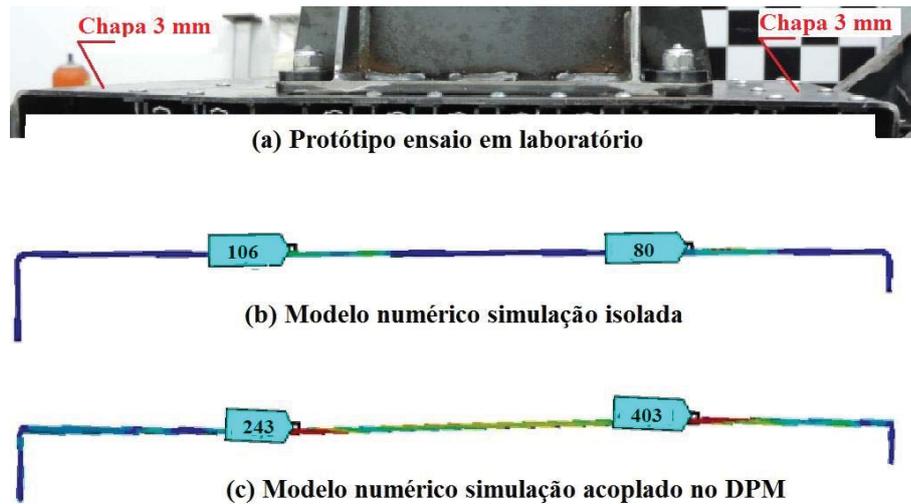
Figura 68 – Tensão de von Mises próximo à aba na chapa 3 mm da base da poltrona



Fonte: Autor.

O comportamento mais realista da base acoplada ao DPM pode ser reforçado em uma abordagem qualitativa do exposto na Figura 69, que traz a vista do perfil deformado da chapa com 3 mm de espessura. No item (a) está ilustrado o perfil deformado (permanente) mesmo após alívio da carga de ensaio e nos itens (b) e (c) os perfis resultantes dos modelos numéricos da base da poltrona a plena carga.

Figura 69 – Perfil deformado da chapa 3 mm da base da poltrona



Fonte: Autor.

Considerando o exposto até esta etapa da análise, entende-se que o modelo da base acoplada ao DPM apresenta melhor distribuição da tensão de von Mises ao longo da peça, bem como, regiões onde a tensão de von Mises excede o limite de escoamento do material de forma compatível com a deformação permanente apresentada no ensaio em laboratório. Isso, associado à compatibilidade dos deslocamentos entre o modelo numérico do DPM com o protótipo ensaiado em laboratório, conduz este estudo na utilização do modelo numérico do DPM apresentado na Figura 43 nas demais análises que seguem.

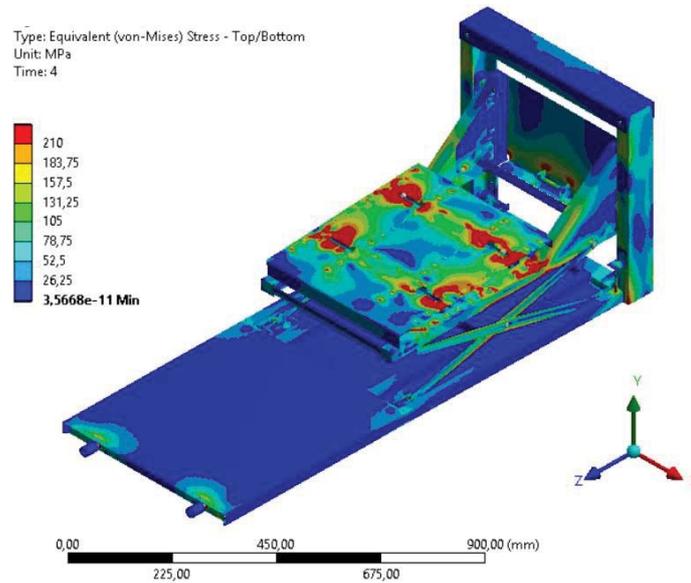
#### 4.3 Análise numérica DPM na condição conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013

A Resolução CONTRAN N° 445:2013 determina que, para este caso, seja aplicada uma força de 5000 N a uma altura de 0,75 m acima do plano de referência por intermédio de estrutura rígida suficientemente representativa do banco a ser montado no veículo. A deformação permanente, incluída a ruptura na zona circundante, é permitida, desde que a força prescrita seja mantida por todo o período previsto.

O resultado global do comportamento do DPM sob essas condições pode ser visualizado na Figura 70. A estrutura rígida e as correições não estão contempladas, sendo que a primeira representa a poltrona, que não é objeto deste estudo, e a segunda é abordada em capítulo posterior, sob o aspecto de carga suportada conforme especificação do fabricante.

Conforme ilustrado na Figura 70, confirma-se a expectativa de regiões apresentarem tensões acima do limite de 210 MPa que representa escoamento do material predominante. Esse comportamento é esperado em função do protótipo deformar-se de forma permanente no ensaio em laboratório. Na sequência é apresentada a análise dos conjuntos que compõem o DPM.

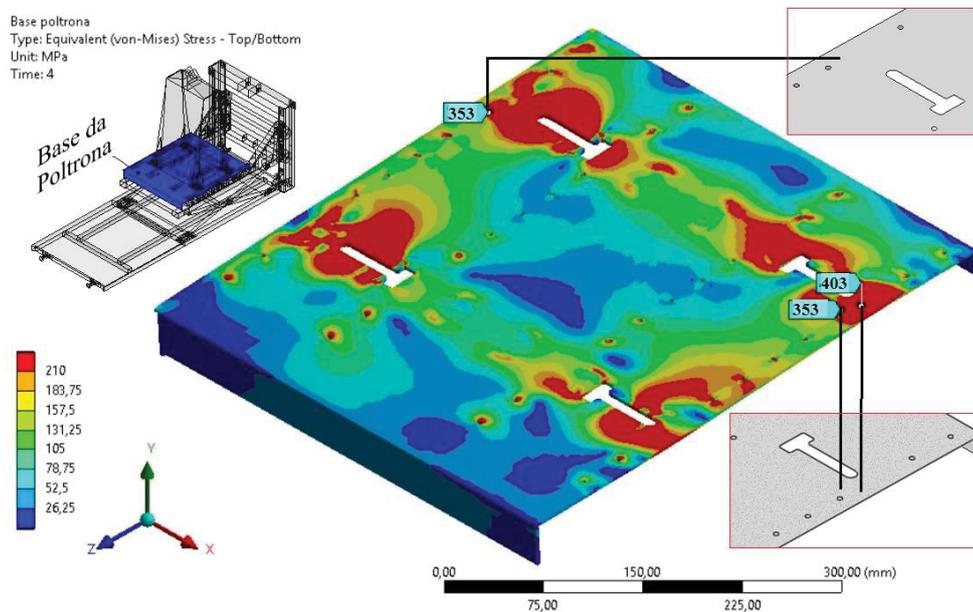
Figura 70 – Análise global DPM conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013



Fonte: Autor.

O primeiro conjunto analisado é a base da poltrona. Com auxílio da Figura 71, podem ser observadas várias regiões onde a tensão de von Mises excedeu o limite de 210 MPa, sendo que a máxima tensão registrada é 403 MPa.

Figura 71 – Análise base da poltrona conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013

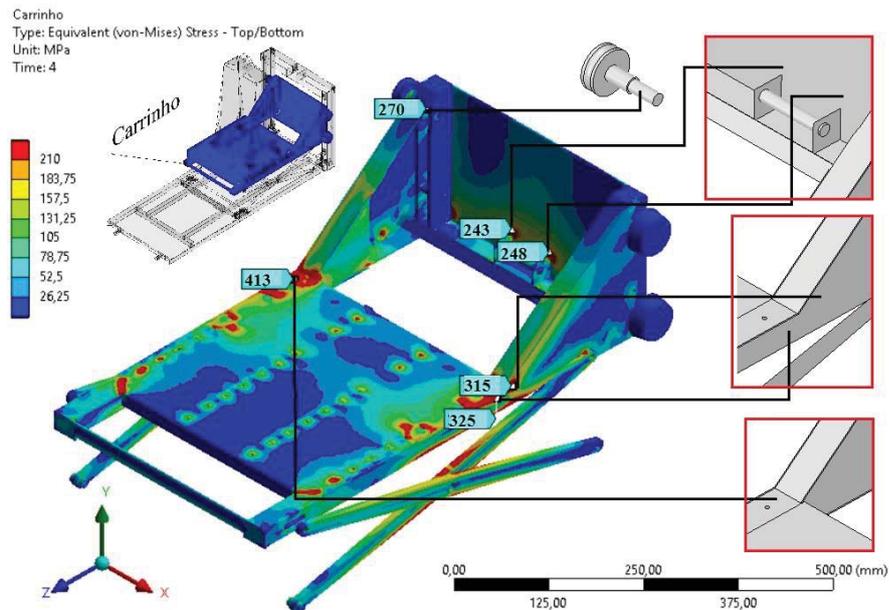


Fonte: Autor.

Seguindo a sequência lógica de montagem, aparece o conjunto denominado elevador. Seu comportamento permaneceu semelhante ao conjunto anterior, com regiões de tensão de von Mises acima de 210 MPa, conforme ilustrado na Figura 72. A máxima tensão de von Mises registrada é 413 MPa e está próxima de ponto de ancoragem (parafuso) da base da

poltrona com o elevador. Os registros de 243 e 248 MPa se justificam por estarem na região próxima ao ponto onde acontece a sustentação vertical do DPM. O registro de 270 MPa, apesar da maior tensão de von Mises, é menos significativo pelo fato de tratar-se de um eixo fabricado em aço SAE 1045 com 310 MPa de limite de escoamento.

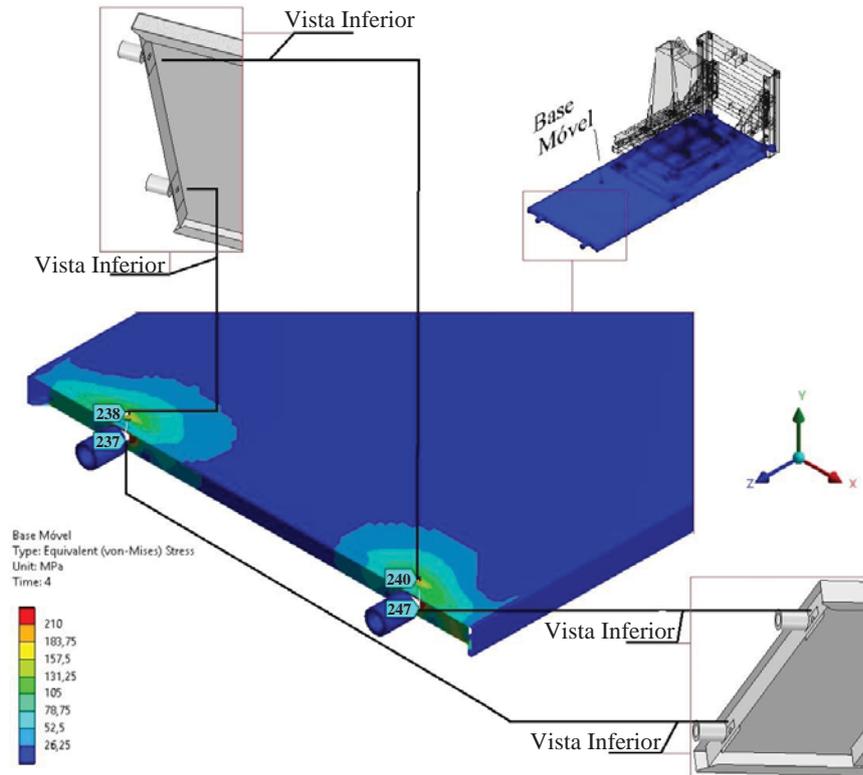
Figura 72 – Análise elevador conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013



Fonte: Autor.

O próximo conjunto analisado é a base móvel que apresentou comportamento diferenciado em relação aos conjuntos anteriores. Conforme pode ser observado na Figura 73, predominam tensões abaixo de 210 MPa. As poucas regiões que apresentaram tensões próximas de 240 MPa são bem pontuais e localizam-se próximas ao ponto de apoio do DPM na carroceria no veículo.

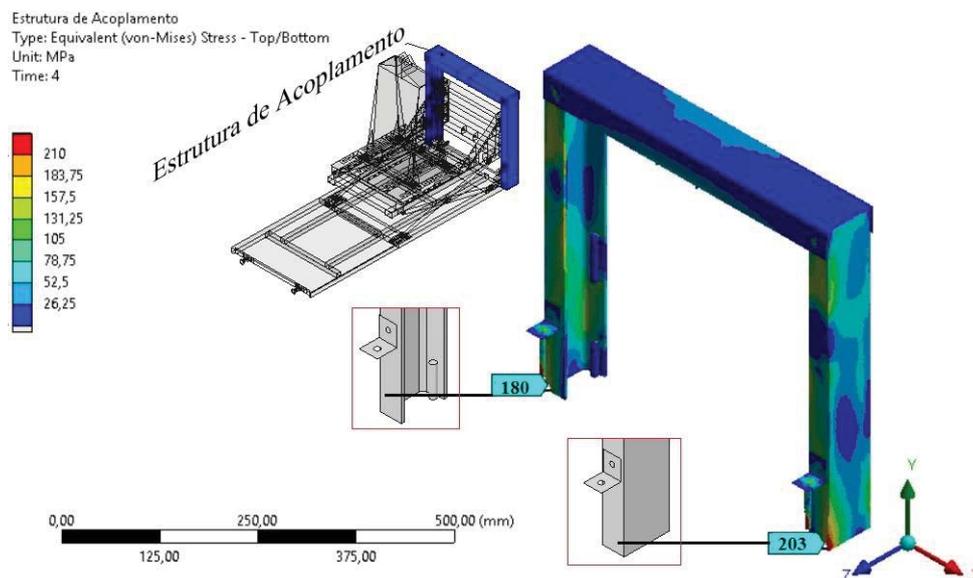
Figura 73 – Análise base móvel conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013



Fonte: Autor.

O último conjunto analisado sob essa condição é o denominado estrutura de acoplamento. Com o auxílio da Figura 74, pode ser observado que não houve regiões significativas com ocorrência de tensão de von Mises acima de 210 MPa, tendo como ponto de máxima a tensão de von Mises registrada de 203 MPa.

Figura 74 – Análise estrutura de acoplamento conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013



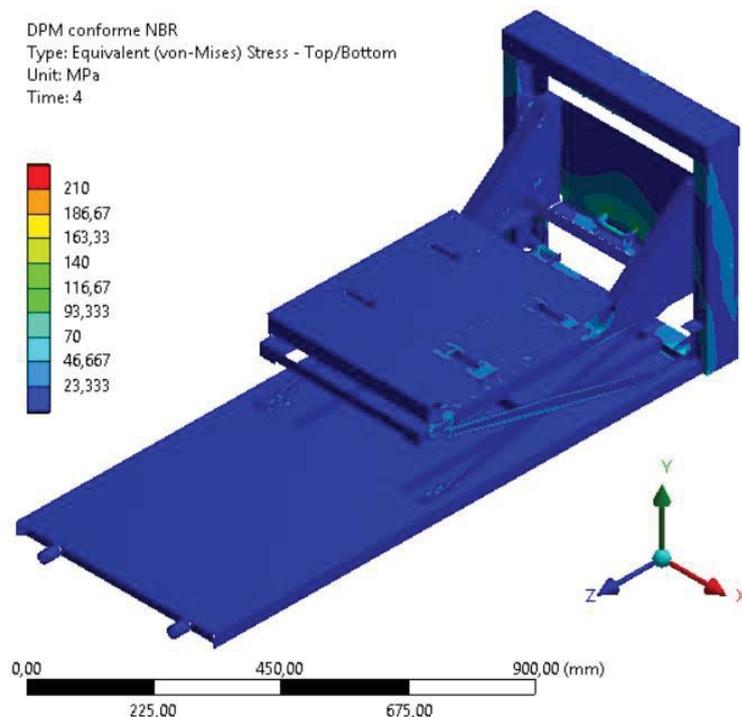
Fonte: Autor.

#### 4.4 Análise numérica DPM na condição conforme NBR 15.320

A próxima condição analisada leva em consideração a revisão no texto da NBR 15.320, que em sua redação prévia determina que o DPM deva suportar, além de seu próprio peso, uma poltrona com seus componentes e uma carga estática de 1.500 N distribuída sobre a estrutura de fixação da poltrona.

Nessa condição, o DPM comportou-se de forma satisfatória, visto que o modelo numérico ilustrado na Figura 75 não apresentou regiões onde a tensão de von Mises tenha excedido 210 MPa, que representa o limite de escoamento do material predominante.

Figura 75 – Análise global DPM conforme NBR

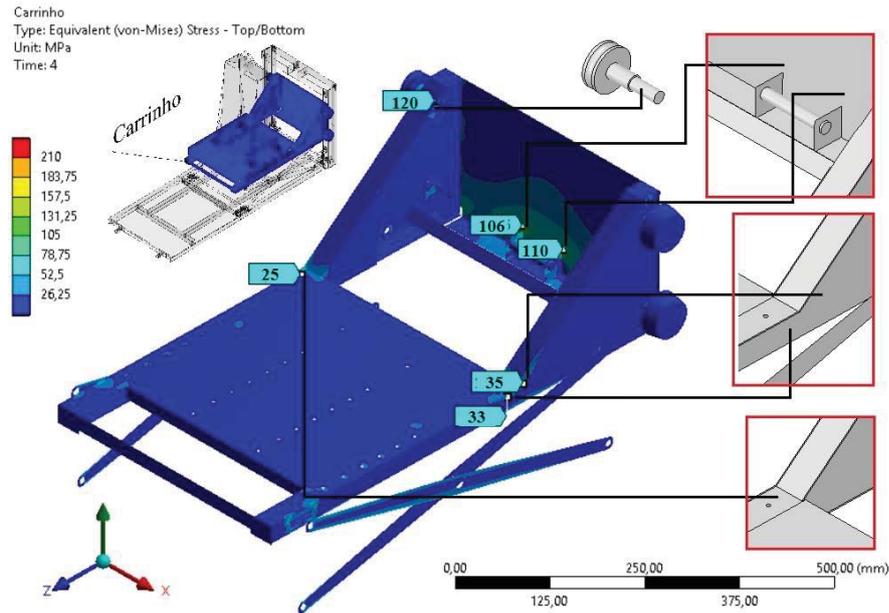


Fonte: Autor.

Considerando que todo o modelo numérico do DPM comportou-se de forma adequada sob essa condição, não coube apresentar a análise de forma individual para todos os conjuntos que o compõem. Apenas o conjunto no qual ocorrem as tensões máximas está disposto nos textos que seguem; no entanto, as imagens da análise individualizada dos demais conjuntos estão no Apêndice C.

As máximas tensões registradas estão próximas de 110 MPa e ocorreram no elevador, conforme ilustrado na Figura 76. Os registros de 106 e 110 MPa se justificam por estarem na região próxima ao ponto onde acontece a sustentação vertical do DPM. O registro de 120 MPa, apesar da maior tensão de von Mises, é menos significativo pelo fato de tratar-se de um eixo fabricado em aço SAE 1045 com 310 MPa de limite de escoamento.

Figura 76 - Análise elevador conforme NBR 15.320



Fonte: Autor.

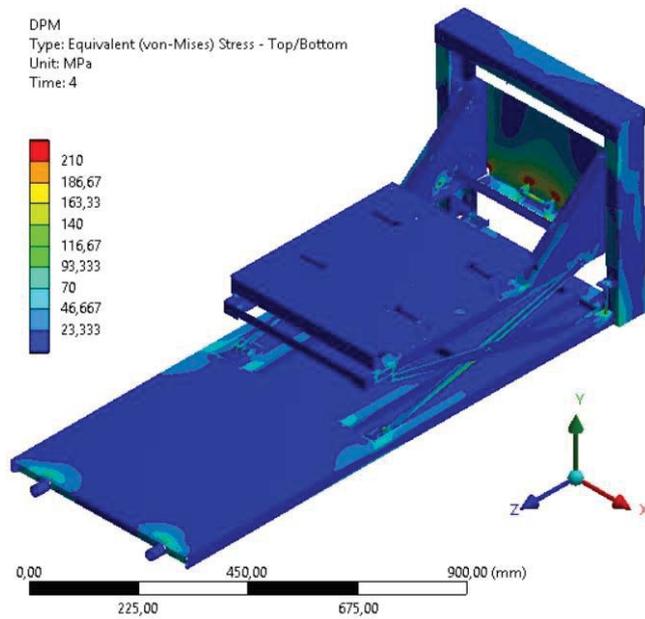
#### 4.5 Análise numérica DPM na condição de Projeto

A condição considerada para projeto, como já mencionado, traz o carregamento referente ao peso próprio de uma poltrona – 35 kg, conforme Walber (2009) – associada a um passageiro com peso médio de 75 kg de acordo com a média nacional IBGE (2008/2009). Essas duas massas são representadas no modelo numérico na forma de força vertical de 1100 N atuando na base da poltrona, conforme ilustrado na Figura 52.

Considerando que o motor usado para suspender o DPM é especificado para uma carga de 4337 N, conforme informação de Elevitta (2015), o modelo numérico traz essa carga atuando em dois pontos de forma vertical e oposta, sendo um no ponto de sustentação do elevador e o outro, na estrutura de acoplamento conforme disposto na Figura 48.

Sob essas condições, o DPM comportou-se de forma satisfatória, visto que o modelo numérico ilustrado na Figura 77 apresentou poucas e bem localizadas regiões onde a tensão de von Mises excedeu 210 MPa, que representa o limite de escoamento do material predominante.

Figura 77 – Análise global DPM conforme projeto

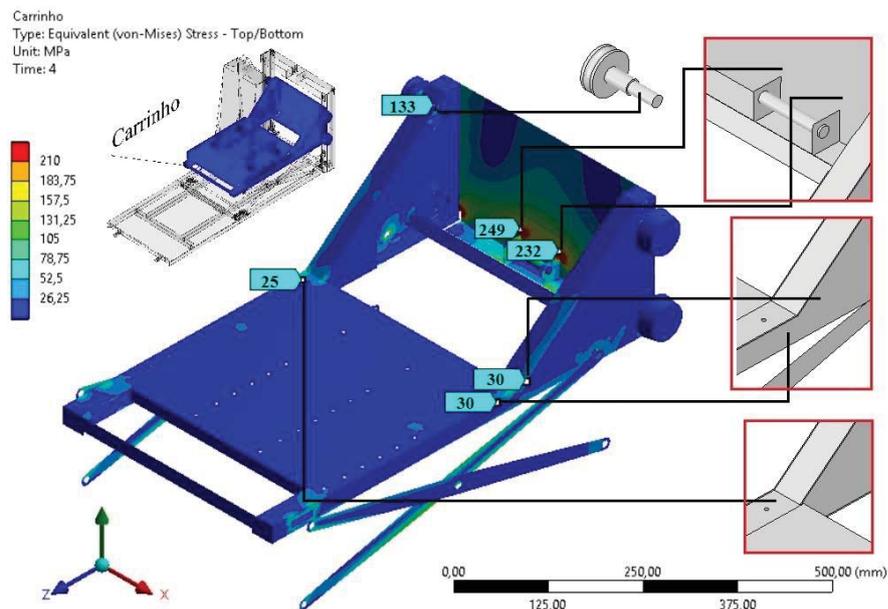


Fonte: Autor.

Considerando que as regiões onde a tensão de von Mises excedeu o limite de escoamento do material estão localizadas no elevador, apenas esse conjunto é abordado nos textos que seguem. No entanto, as imagens da análise individualizada dos demais conjuntos estão ilustradas no Apêndice D.

As máximas tensões registradas estão próximas de 240 MPa, conforme ilustrado na Figura 78. Os registros de 249 e 232 MPa se justificam por estarem na região próxima ao ponto onde acontece a sustentação vertical do DPM.

Figura 78 – Análise elevador conforme projeto



Fonte: Autor.

#### 4.6 Análise de carga nas corredeças

As corredeças são representadas no modelo numérico do DPM como um elemento de ligação entre a base da poltrona e o elevador, sendo que seu modelo numérico não foi desenvolvido para avaliar a forma construtiva da corredeça.

Isso se deve ao fato de tratar-se de um produto comercial que no processo de fabricação do DPM é selecionado em termos de sua capacidade de carga, informada pelo fabricante da corredeça, considerando-se, conforme Elevitta (2015), que a capacidade de carga das corredeças usadas no DPM é 343 N.

No entanto, considerando que as corredeças apresentaram deformação permanente no protótipo ensaiado em laboratório, torna-se interessante incluir no estudo a carga registrada nos pontos de apoio das corredeças durante as simulações dos modelos numéricos do DPM.

Dessa forma, são apresentadas na Tabela 8 as cargas registradas nas simulações dos modelos numéricos sob três condições de carregamento. A tabela também traz os carregamentos totais obtidos por método analítico apresentado no Apêndice E.

Em consonância com o comportamento do protótipo ensaiado em laboratório, a carga registra, na condição conforme Resolução do CONTRAN N° 445:2013, que excedeu a capacidade estabelecida pelo fabricante das corredeças.

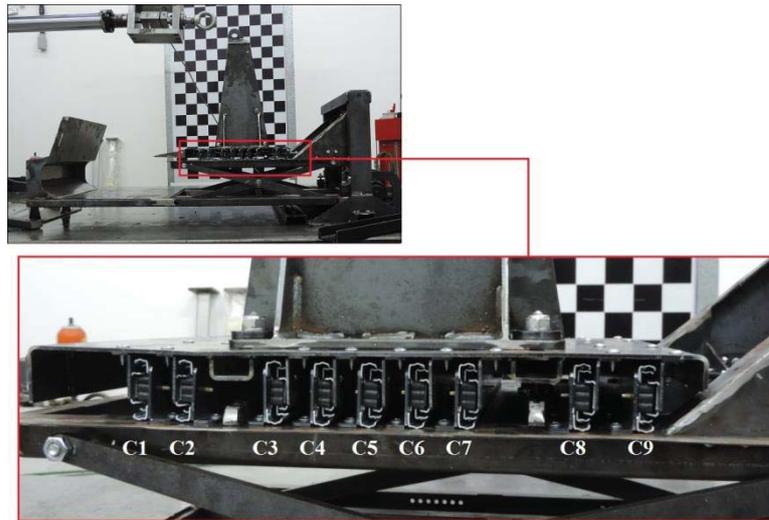
Tabela 8 – Cargas no apoio das corredeças

		Cargas no apoio das corredeças (N)									Total pelo método numérico	Total pelo método analítico
Corredeça		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9		
Condição de carregamento	Res. CONTRAN N° 445:2013	3924	3382	2824	1789	994	994	1834	3522	4090	23353	27222
	NBR 15.320	209	245	227	206	200	209	231	234	213	1973	1973
	Projeto	131	152	141	128	124	130	142	145	132	1223	1223

Fonte: Autor.

Em compensação, as cargas sob a condição de Projeto e NBR 15.320 permaneceram dentro do limite previsto pelo fabricante. Com auxílio da Figura 79, que dispõe a posição das corredeças no DPM, pode ser observado que as cargas constantes na Tabela 8 para as corredeças C2, C3, C7 e C8 são maiores, e isso se deve ao fato de estarem próximas dos parafusos de ancoragem da poltrona que geram regiões de tração e compressão, conforme já ilustrado na Figura 65.

Figura 79 – Imagem correções no protótipo



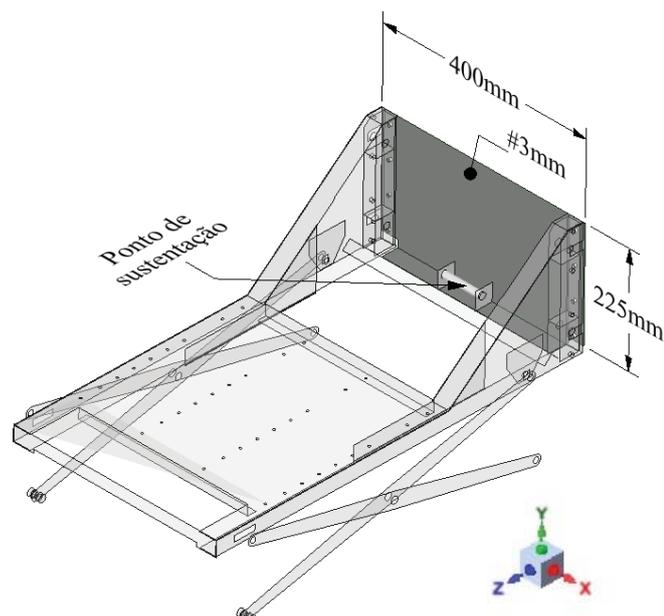
Fonte: Adaptado de Elevitta, 2015.

#### 4.7 Sugestão de melhoria no DPM

Considerando a manutenção da segurança do equipamento, frente às condições de carregamento analisadas, este estudo, em função da combinação de carregamentos, assume a condição de projeto como modelo adequado para testar a melhoria sugerida.

A peça selecionada para receber melhoria está localizada no conjunto denominado elevador, conforme ilustrado na Figura 80. Trata-se de peça fabricada em chapa de aço SAE 1020 com dimensões de 400 x 22 x 3 mm. Essa peça serve para sustentação vertical do DPM durante o deslocamento para embarque/desembarque do passageiro.

Figura 80 – Chapa 3 mm do elevador

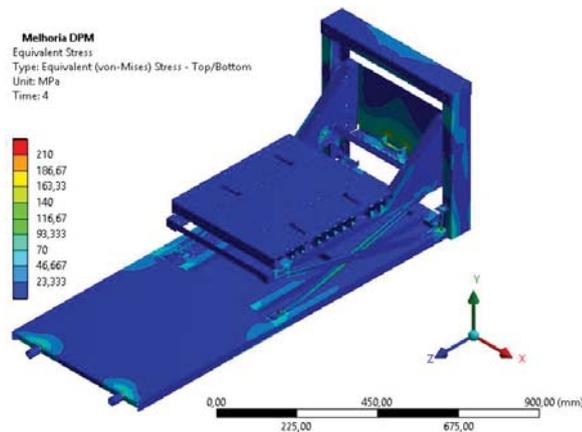


Fonte: Autor.

A proposta de melhoria mantém a mesma forma geométrica da peça, alterando somente a espessura, que passa de 3 mm para 3,75 mm.

O modelo numérico alterado é analisado novamente, sendo que as condições de carregamento usadas na simulação são as de projeto. A alteração teve resultado positivo em termos de tensões, visto que o modelo numérico ilustrado na Figura 81 não apresentou regiões onde a tensão de von Mises excedeu 210 MPa, que representa o limite de escoamento do material predominante.

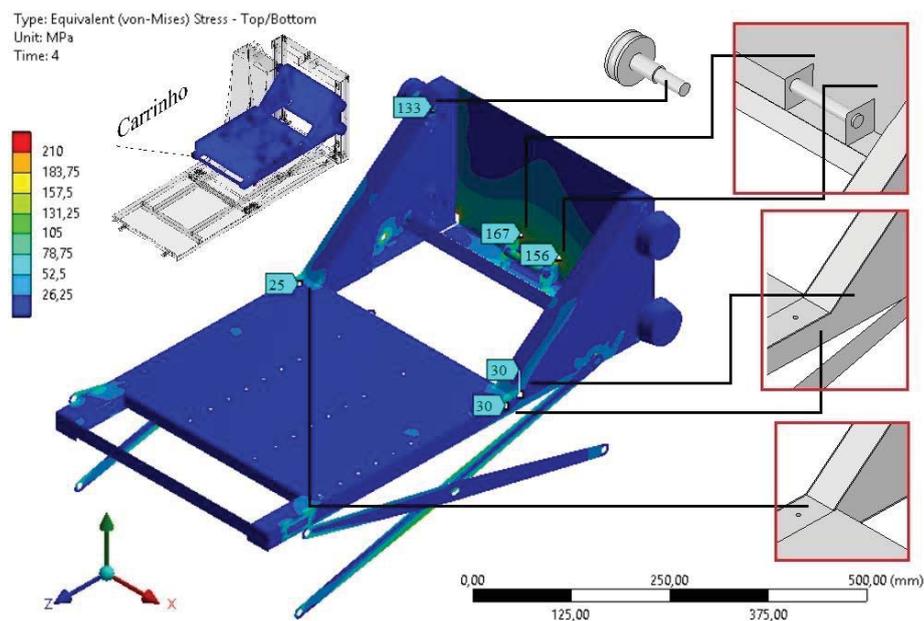
Figura 81 – Análise global DPM com melhoria



Fonte: Autor.

As tensões máximas continuam ocorrendo no elevador, no entanto, conforme ilustrado na Figura 82, as regiões com maior tensão de von Mises não excedem 167 MPa.

Figura 82 – Análise do elevador com melhoria



Fonte: Autor.

#### 4.8 Discussão dos resultados numéricos

O resultado da análise estática do DPM sob as três condições de carregamento apresentou variações nas tensões máximas apresentadas nas diferentes condições. Conforme ilustrado na Tabela 9, a condição conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013 apresentou as maiores tensões em relação às outras duas. Esse comportamento já era esperado, pela intensidade do carregamento exigido para o teste de ancoragem e também pelo comportamento do protótipo ensaiado em laboratório apresentar escoamento plástico com ausência de ruptura perceptível.

Tabela 9 – Tensões máximas na análise estática do DPM

Tensões máximas na análise estática do DPM (MPa)					
Conjunto		Base da Poltrona	Elevador	Base Móvel	Estrutura de Acoplamento
Condição de Carregamento	Resolução 445:2013	403	413	240	203
	NBR 15.320	28	110	0	46
	Projeto	16	249	148	74

Fonte: Autor.

No entanto, o fato da tensão de von Mises ter excedido o limite de escoamento do material não significa que a estrutura ofereça risco, por tratar-se de uma condição extrema, em que a carga de 5000 N exigida por norma supera o valor de 4524 N, estimado para uma condição de impacto frontal com base nos estudos de Meira Junior (2010) e Alves Pereira (2012), apresentados no Apêndice B.

Na condição de carregamento, conforme NBR 15.320, o comportamento do DPM não apresentou regiões onde a tensão de von Mises tenha excedido o limite de escoamento do material. A tensão de von Mises máxima, nesse caso, localizou-se no elevador (110 MPa), justamente na chapa que é objeto da melhoria deste estudo. Em relação à base móvel não apresentar tensões significativas sob essa condição, isso se deve ao fato de o DPM estar suspenso, diferente das outras duas condições, em que o DPM é considerado travado no interior do ônibus.

A condição de carregamento definida para projeto mostrou-se eficiente, em termos de representatividade, visto que apresentou tensão de von Mises mais elevada (249 MPa) na mesma região do elevador, sob a condição conforme NBR 15.320. Em decorrência dessa sobreposição de resultados é sugerida a melhoria, e na análise após a melhoria a tensão de von Mises na região não excedeu 167 MPa.

Em relação à análise de carga nas corredeiras, considerando os dados da Tabela 8, conclui-se que, sob condição conforme Resolução CONTRAN N° 445:2013, a carga de 23353 N obtida de forma numérica excede a capacidade máxima do conjunto de corredeiras (3087 N). Porém, esse fato não compromete em termos práticos o equipamento, uma vez que a norma permite deformação na estrutura e no ensaio em laboratório o DPM recebeu parecer pelo atendimento do requisito para ancoragem. Em compensação, para as outras duas condições de carregamento os valores numéricos de 1973 e 1223 N são compatíveis com a capacidade das corredeiras.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo aborda a conclusão do trabalho sobre os seguintes aspectos: atendimento aos objetivos, contribuição e propostas futuras para pesquisas.

### 5.1 Atendimento dos objetivos

O objetivo geral de realizar, por método numérico e experimental, a análise estática da estrutura do dispositivo de poltrona móvel (DPM) na condição de ancoragem determinada pela Resolução CONTRAN N° 445:2013 foi alcançado, pois o estudo obteve um modelo numérico com comportamento próximo ao real, em termos de deslocamentos, quando comparado ao protótipo ensaiado em laboratório.

O objetivo de pesquisar e avaliar normas e resolução aplicadas à acessibilidade e segurança veicular para obter os procedimentos de ensaio necessários na homologação do equipamento foi atendido. O estudo elucidou as condições de ancoragem contidas na Resolução CONTRAN N° 445:2013, bem como possibilitou o conhecimento acerca da revisão na NBR 15.320, que traz o DPM como condição de acessibilidade para embarque/desembarque de passageiros. Com o estudo, também é possível verificar que já se passaram 31 anos desde as primeiras normativas relacionadas a questões de acessibilidade e as adequações da legislação estão em constante evolução.

O objetivo de validar o modelo numérico do DPM na condição de ancoragem da estrutura utilizando protótipo foi atendido. O estudo possibilitou comparar, em termos de deslocamentos, o comportamento do modelo numérico com o protótipo ensaiado em laboratório, sendo que o modelo numérico comportou-se de forma compatível em relação ao protótipo. Conforme apresentado na Tabela 6, as duas maiores diferenças são de 23%, e ocorrem no ponto de atuação da força de 5000 N (no sentido horizontal) e na extremidade superior do elevador (no sentido vertical), e as duas menores diferenças de 10 % e 2% ocorrem na base da poltrona (no sentido vertical).

Com o modelo numérico expressando, de forma compatível, o comportamento próximo ao real do DPM, foi possível atingir o próximo objetivo, em que foram aplicadas mais duas condições de carregamento no DPM. Uma condição que incluiu o carregamento exigido no texto revisado da NBR 15.320 e outra considerada de projeto. Na condição de carregamento que atende a carga prevista no texto da NBR 15.320 a tensão de von Mises não excedeu 110 MPa, indicando que não deve ocorrer deformações plásticas na estrutura sob esta condição, visto que, o limite de escoamento dos materiais são 210 MPa e 310 MPa. Na condição

estabelecida para projeto, a análise numérica evidenciou que pode ocorrer deformação plástica (permanente) na estrutura do elevador, pois a tensão de von Mises chegou a 249 MPa.

O resultado da análise numérica do DPM sob as condições consideradas de projeto trouxe a oportunidade de melhoria que era esperada no estudo. Conforme descrito no capítulo 4.7, a sugestão visa a melhorar a segurança do equipamento sem gerar grande impacto na geometria, visto que é sugerida a alteração na espessura de 3 mm para 3,75 mm em uma chapa de 400 x 225 mm do DPM.

Em relação às condições de carregamento previstas para a legislação nacional, a carga de 5000 N da Resolução CONTRAN N° 445:2013 demonstra-se adequada, à medida que o modelo numérico validado a partir dos deslocamentos obtidos em ensaio de protótipo sob esta carga, quando sujeito a carregamento de projeto, não apresenta tensões superiores ao limite de escoamento dos materiais que compõem a estrutura do DPM, bem como a intensidade da carga é 10 % superior ao valor de 4524 N obtido com base nos estudos de Meira Junior (2010) e Alves Pereira (2012).

Considerando que o carregamento de 1500 N previsto para o novo texto da NBR 15320 produziu tensões máximas próximas de 110 MPa, o estudo sugere que seja aplicado um coeficiente de segurança de dois quando este carregamento for analisado de forma isolada.

## **5.2 Contribuições**

A principal contribuição deste trabalho foi a obtenção de um modelo numérico do DPM com comportamento compatível em termos de deslocamentos, quando comparado ao protótipo utilizado no ensaio de ancoragem.

Outra contribuição, que só não é mais importante porque é dependente da anterior, é a possibilidade de sugerir melhorias no equipamento visando à sua segurança.

## **5.3 Trabalhos futuros**

Na sequência, apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

- 1) Verificar texto definitivo após revisão da NBR 15.320 e aplicar as condições de carregamento no modelo numérico;
- 2) Realizar estudo, visando à redução de massa no equipamento;
- 3) Avaliar o comportamento mecânico do DPM na condição de impacto frontal do veículo.
- 4) Instrumentar protótipo e verificar tensões.
- 5) Realizar análise de fadiga no DPM.
- 6) Realizar análise transiente com a carga e intervalo de tempo previsto na Resolução CONTRAN 445:2013.

## REFERÊNCIAS

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo 2010**. Disponível em: < <http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 24 ago. 2015.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008-2009**. Disponível em: < <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45419.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2015.

Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). **Frota 2015**. Disponível em: < <http://www.denatran.gov.br/frota2015.htm>>. Acesso em: 24 ago. 2015.

Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). **Frota ativa**. Disponível em: < <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/46097.html>>. Acesso em: 25 ago. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9050**. Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro, 2004. p. 94.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.646**. Acessibilidade – Plataforma elevatória veicular e rampa de acesso veicular para acessibilidade em veículos com características urbanas para o transporte coletivo de passageiros - Requisitos de desempenho, projeto, instalação e manutenção. Rio de Janeiro, 2011. p. 28.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.570**. Transporte – Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros. Rio de Janeiro, 2011. p. 15.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.320**. Acessibilidade à pessoa com deficiência no transporte rodoviário. Rio de Janeiro, 2005. p. 8.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 14.022**. Acessibilidade em veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros. Rio de Janeiro, 2011. p. 20.

BRASIL. **Lei 7.853**, de 24 de outubro de 1989. Dispõe sobre o apoio às pessoas portadoras de deficiência, sua integração social, institui a tutela jurisdicional de interesses coletivos ou difusos dessas pessoas, disciplina a atuação do Ministério Público, define crimes, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República.

\_\_\_\_\_. **Decreto 3.298**, de 20 de dezembro de 1999. Regulamenta a Lei no 7.853, de 24 de outubro de 1989, dispõe sobre a Política Nacional para a Integração da Pessoa Portadora de Deficiência, consolida as normas de proteção, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República.

\_\_\_\_\_. **Lei 8.899**, de 29 de junho de 1994. Concede passe livre às pessoas portadoras de deficiência no sistema de transporte coletivo interestadual. Brasília: Presidência da República.

\_\_\_\_\_. **Lei 10.098**, de 19 de dezembro de 2000. Estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República.

\_\_\_\_\_. **Lei 10.048**, de 08 de novembro de 2000. Dá prioridade de atendimento às pessoas que especifica, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República.

\_\_\_\_\_. **Decreto 3.691**, de 19 de dezembro de 2000. Regulamenta a Lei nº 8.899, de 29 de junho de 1994, que dispõe sobre o transporte de pessoas portadoras de deficiência no sistema de transporte coletivo interestadual. Brasília: Presidência da República.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação. **Portaria 3.284**, de 07 de novembro de 2003. Dispõe sobre requisitos de acessibilidade de pessoas portadoras de deficiências, para instruir os processos de autorização e de reconhecimento de cursos, e de credenciamento de instituições. Brasília: Ministro de Estado da Educação, interino.

\_\_\_\_\_. **Decreto 5.296**, de 02 de dezembro de 2004. Regulamenta as Leis nº 10.048, de 8 de novembro de 2000, que dá prioridade de atendimento às pessoas que especifica, e 10.098, de 19 de dezembro de 2000, que estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida, e dá outras providências.. Brasília: Presidência da República.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Resolução n. 3871**, de 01 de agosto de 2012. Estabelece procedimentos a serem observados pelas empresas transportadoras, para assegurar condições de acessibilidade às pessoas com deficiência ou com mobilidade reduzida na utilização dos serviços de transporte rodoviário interestadual e internacional de passageiros e, dá outras providências.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Resolução nº 316**, de 08 de maio de 2009. Estabelece os requisitos de segurança para veículos de transporte coletivo de passageiros M2 e M3 (tipos micro-ônibus e ônibus) de fabricação nacional e estrangeira.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 445**, de 25 de junho de 2013. Estabelece os requisitos de segurança para veículos de transporte público coletivo de passageiros e transporte de passageiros tipos micro-ônibus e ônibus, categoria M3 de fabricação nacional e importado.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. **Portaria nº 269**, de 02 de junho de 2015.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. São Paulo: Bookman, 2008.

MORAES, Miguel Correia de. **Acessibilidade no Brasil: análise da NBR 9050**. Florianópolis, 26 de junho de 2007, 166 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação, UFSC, 2007.

MAGGI, Y. I. **Análise Numérica, via M.E.F., do Comportamento de Ligações Parafusadas Viga-Coluna com Chapa de Topo**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

RIBEIRO, L. F. L. **Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-coluna com chapa de topo: análise teórico-experimental**. 1998. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

GASPARIN, D. **Desenvolvimento Conceitual de uma Máquina de Ensaio Mecânico Tipo Portico**. 2014. Dissertação (Mestrado em Projetos e Processos de Fabricação) – Programa de Pós-graduação em Projeto de Processos de Fabricação, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

SANTOS, Agnaldo Bizzarita dos. **A interface do elevador na arquitetura. Aspectos projetuais, éticos e sociais.** 2007. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

ELEVITTÁ. **Dispositivo de Poltrona Móvel.** Disponível em: <elevitta.com.br>. Acesso em: 24 ago. 2015.

História dos Elevadores. **Portal Bibliografias.** Disponível em: <<http://portalbiografias.blogspot.com.br/2008/03/histria-as-primeiras-informaes-de.html>>. Acesso em: 24 ago. 2015.

CONE Corporation. **NEW KONE UltraRope(TM) elevator hoisting technology enables the next big leap in high-rise building design.** Disponível em: <http://www.kone.com/en/press/press/new-kone-ultrarope-tm-elevator-hoisting-technology-enables-the-next-big-leap-in-high-rise-building-design-2013-06-10.aspx>. Publicado em 2013. Acesso em: 04 set. 2015.

SHIMOSAKAI, Ricardo. **A história do primeiro ônibus acessível do Brasil.** Disponível em: <<http://www.turismoadaptado.com.br/a-historia-do-primeiro-onibus-acessivel-do-brasil/>>. Publicado em 2008. Acesso em: 04 set. 2015.

MOB CEARÁ. **Matérias em Destaque.** Disponível em :<[www.mobceara.com/2015/10/os-unicos-of-1722-da-maraponga.html](http://www.mobceara.com/2015/10/os-unicos-of-1722-da-maraponga.html)>. Acesso em: 05 set. 2015.

Ônibus com elevador para transporte de deficientes. **Parana Online.** Curitiba, 23 nov. 2002. Disponível em: <<http://www.parana-online.com.br/editoria/policia/news/32125/>>. Acesso em: 04 set. 2015.

SUNFLOWER TURISMO. **Homepage.** Disponível em: <[http://www.sunflowerturismo.com.br/?page\\_id=10](http://www.sunflowerturismo.com.br/?page_id=10)>. Acesso em: 04 set. 2015.

GREENCAR. **Mobilidade Reduzida.** Disponível em: <<http://www.greencar.com.br/veiculos-especiais/transporte-de-passageiros/>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

PLS – Passenger Lift Services. **Our Lifts.** Abril de 2014. Disponível em: <<https://www.passengerliftservices.co.uk/>>. Acesso em: 05 set. 2015.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE.** 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.

ORNELAS DE LIMA, Liciano Rodrigues. **Critérios de Resistência.** Disponível em: <[http://www.labciv.eng.uerj.br/rm4/Cap\\_2\\_criterios.pdf](http://www.labciv.eng.uerj.br/rm4/Cap_2_criterios.pdf)>. Publicado em 2003. Acesso em: 18 set. 2015.

ALVES PEREIRA, B. V. **Análise de Estrutura de Carro de Corrida (Stock-Car) pelo Método dos Elementos Finitos.** 2012. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté. Taubaté, 2012.

MEIRA JUNIOR, A. D. **Avaliação do comportamento da estrutura de ônibus rodoviário solicitado a impacto frontal.** 2010. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

WALBER M. **Avaliação do nível de vibração existente em passageiros de ônibus rodoviários intermunicipais, análise e modificações projetuais.** 2009. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

ONUR, Y. A.; IMRAK, C. E. Reliability analysis of elevator car frame using analytical and finite element methods. **Building Services Engineering Research & Technology**, v. 33, p. 293-305, 2012.

SHI, Y; LEE, I. Development and performance analysis of an automotive Power seat for disabled persons. **International Journal of Automotive Technology**, v. 10, p. 481-488, 2009.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos.** Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2003.

OLIVEIRA, F. C. G. **Contribuição ao Desenvolvimento de uma Estrutura Veicular Tipo Spaceframe Usando o Método dos Elementos Finitos e Métodos Heurísticos de Otimização Numérica.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2007.

Ansys Help 15.0. **ANSYS Inc. PDF Documentation for Release 15.0.** Novembro de 2014. Disponível em: < <http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>>. Acesso em: 18 set. 2015.

## APÊNDICE A – Pré-tensão dos parafusos

**Condição de Montagem segundo Shigley, Mischke e Budyna (2008) :**

$$F_i = \begin{cases} 0,75 F_p & \text{- para conexões não permanentes, fixadores reutilizados;} \\ 0,90 F_p & \text{- para conexões permanentes.} \end{cases}$$

Portanto, para a aplicação de máquina, é considerada a primeira condição.

***Características do Parafuso M10 – Categoria 8.8 para junta parafuso/porca:***

$$\text{Área líquida } (A_t) = 58 \text{ mm}^2$$

$$\text{Resistência à prova } (S_p) = 600 \text{ MPa.}$$

1.1. Cálculo Carga de Prova:

$$F_p = A_t \times S_p \Rightarrow F_p = 600 \frac{N}{\text{mm}^2} \times 58 \text{ mm}^2 \Rightarrow F_p = 34800 N$$

1.2. Condição de Montagem:

$$F_i = 0,75 \times F_p \Rightarrow F_i = 0,75 \times 34800 \Rightarrow F_i = 26100 N$$

**APÊNDICE B – Cálculo de força de ancoragem na situação de impacto**

Para o cálculo da força é aplicada a massa de uma pessoa (75 kg) e a aceleração de 6,15g do estudo de Meira Junior (2010) na equação sugerida por Alves Pereira (2012), tendo como resultado a força estimada que um corpo pode gerar sob esta condição de impacto.

$$F = \text{Força (N)}$$

$$m = \text{massa pessoa (75 kg)}$$

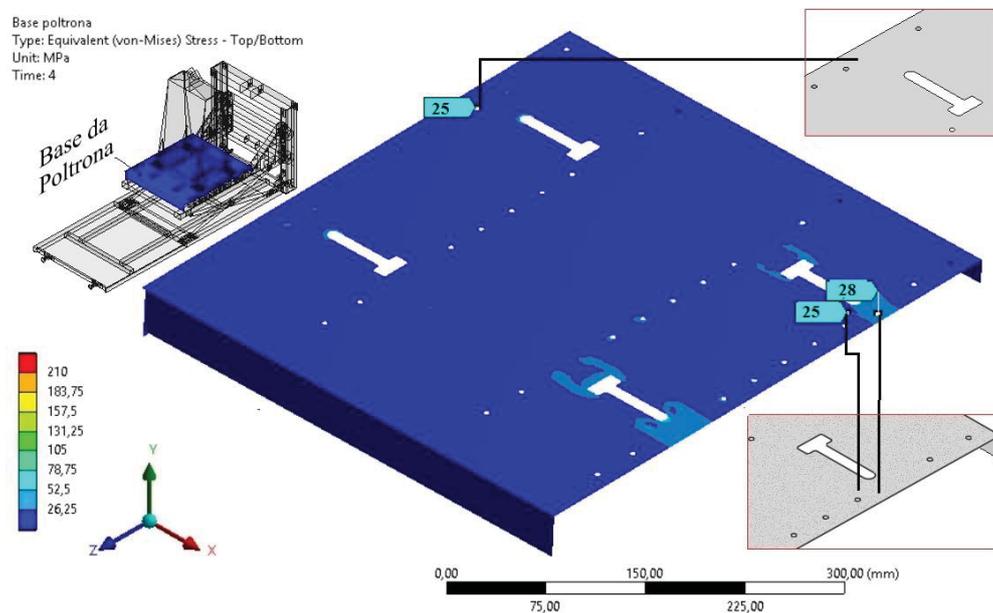
$$a = \text{aceleração (6,15 g x 9,81 m/s}^2\text{)}$$

$$F = 75 \text{ kg x } 6,15 \text{ g x } 9,81 \text{ m/s}^2 = 4.524 \text{ N}$$

Ao comparar a força de 4.524 N calculada com os 5.000 N determinados pela resolução CONTRAN N° 445:2013, verifica-se que os valores estão com 10% de diferença.

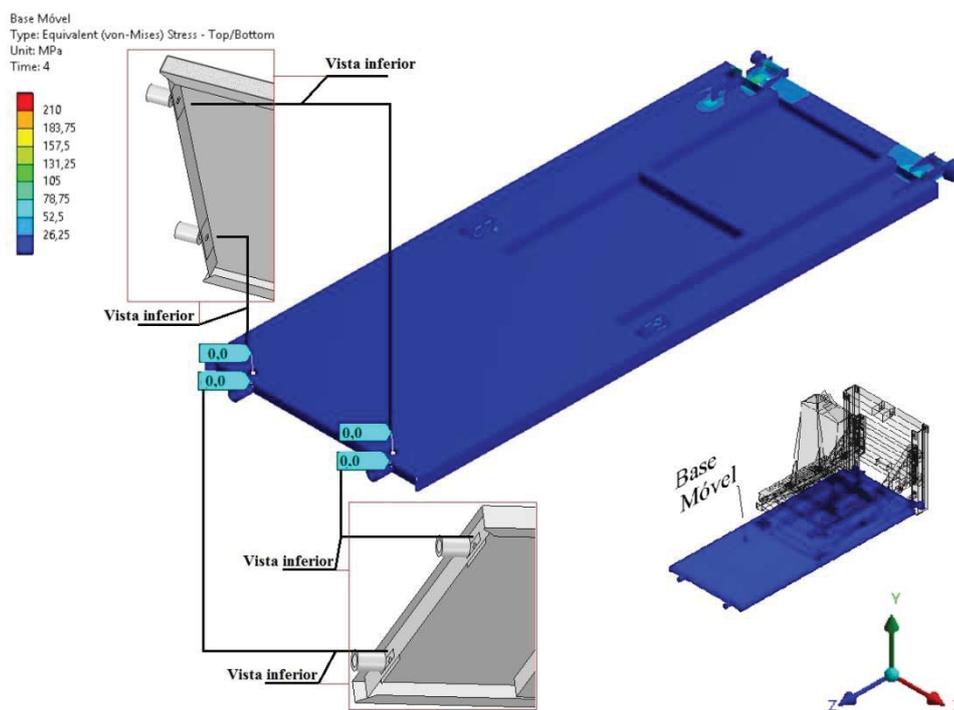
## APÊNDICE C – Imagens análise DPM conforme NBR 15.320

Figura 83 - Análise base da poltrona conforme NBR 15.320



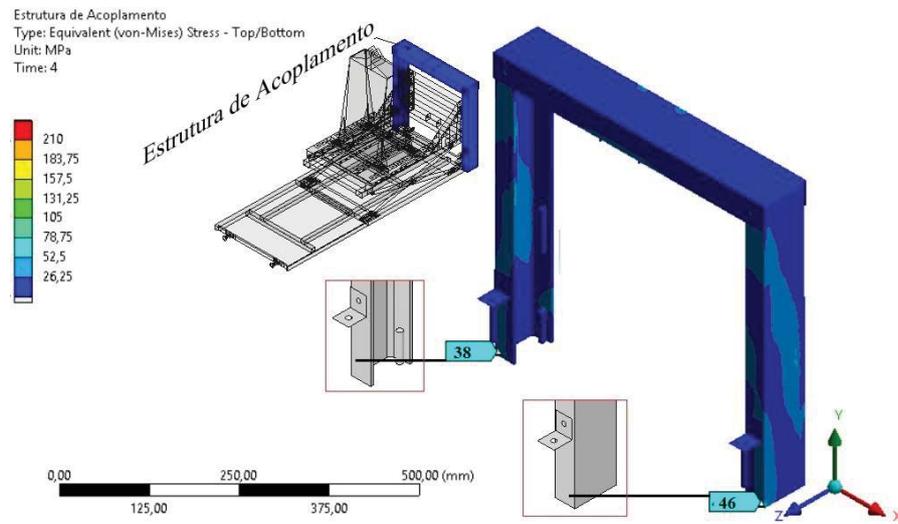
Fonte: Autor.

Figura 84 - Análise base móvel conforme NBR 15.320



Fonte: Autor.

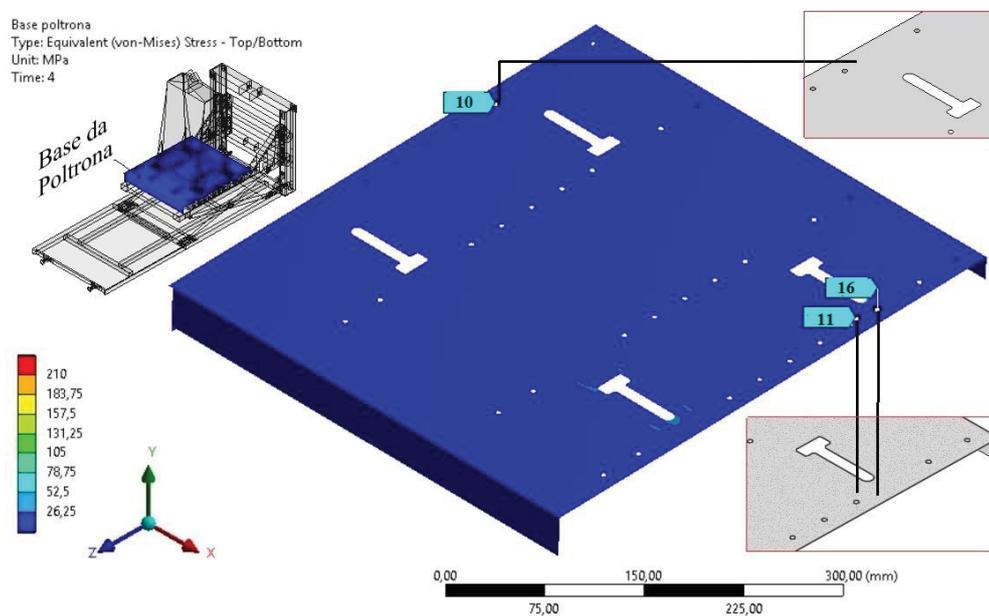
Figura 85 - Análise estrutura de acoplamento conforme NBR 15.320



Fonte: Autor, 2016

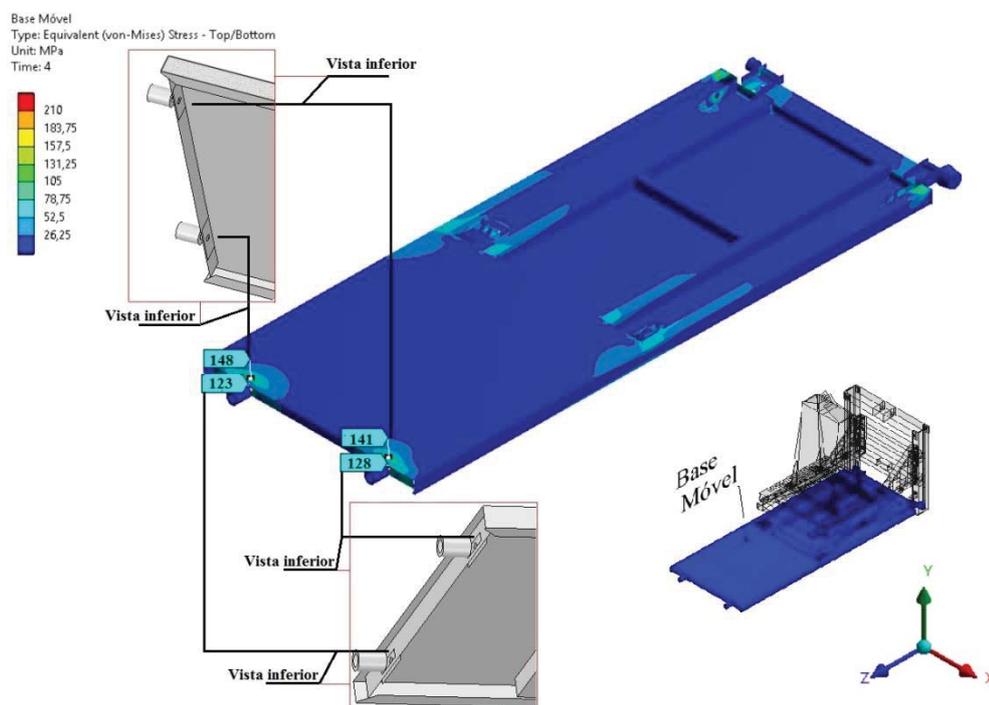
## APÊNDICE D – Imagens análise DPM conforme projeto

Figura 86 - Análise da base da poltrona conforme projeto



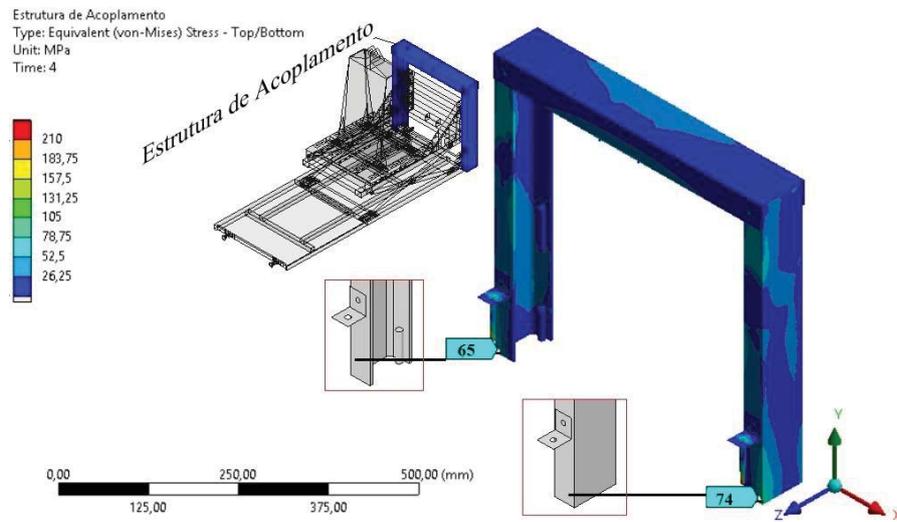
Fonte: Autor.

Figura 87 – Análise da base móvel conforme projeto



Fonte: Autor.

Figura 88 - Análise da estrutura de acoplamento conforme projeto



Fonte: Autor.

### APÊNDICE E – Verificação das cargas no apoio das Corrediças

A verificação das cargas para a condição de Projeto e NBR 15.320 é realizada pelo comparativo da somatória das reações nas corrediças com os carregamentos informados no modelo numérico.

$$PROJETO = 1.500N + POLTRONA + BASE + CORREDIÇAS$$

$$PROJETO = 1.500N + 350N + 64,8N + 58,5N$$

$$PROJETO = 1.973,3N$$

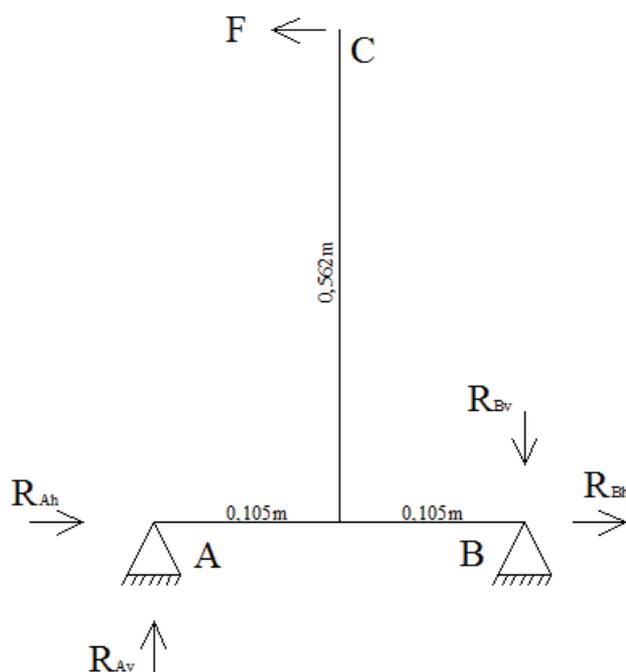
$$NBR15.320 = PASSAGEIRO + POLTRONA + BASE + CORREDIÇAS$$

$$NBR15.320 = 750N + 350N + 64,8N + 58,5N$$

$$NBR15.320 = 1.223,3N$$

Na condição conforme resolução CONTRAN N° 445:2013 a somatória das reações nas corrediças do modelo numérico é comparada com o valor obtido pelo diagrama de corpo livre. (Figura 89).

Figura 89 – Diagrama de corpo livre da base da poltrona



Fonte: Autor, 2016

$$\sum_{MA} = F * 0,562m - R_{Bv} * 0,21m = 0$$

$$\sum_{MA} = 5.000n * 0,562m - R_{Bv} * 0,21m = 0$$

$$R_{Bv} = 13380N$$

$$R_{Bv} = R_{Av} = 13380N \rightarrow \text{Binários}$$

$$\sum_{Fh} = R_{Ah} + R_{Bh} - 5000N = 0$$

$$\text{Sendo } R_{Ah} = R_{Bh}$$

$$\text{Logo } R_{Ah} = R_{Bh} = 2500N$$

$$R_A - R_B = \sqrt{13380^2 + 2500^2} = 13.611N$$

$$R_A + R_B = 2 \times 13.611N = 27.222N$$

## ANEXO A – Texto revisão norma NBR 15320

### *Dispositivo de poltrona móvel (DPM)*

- 1.3. A transferência do passageiro de sua cadeira de rodas para a poltrona instalada no dispositivo de poltrona móvel (DPM) deve ser realizada de forma segura.
- 1.4. As características técnicas e de segurança do dispositivo de poltrona móvel (DPM) devem estar estabelecidas em norma específica.
- 1.5. A poltrona do dispositivo de poltrona móvel (DPM) deve atender aos requisitos gerais às poltronas de uso preferencial do veículo. (ver Seção específica – Poltrona preferencial).
- 1.6. A legislação específica à segurança veicular, em especial, à ancoragem da poltrona e ao cinto de segurança deve ser plenamente atendida.
- 1.7. As instruções de uso e informações importantes a serem observadas nos procedimentos de embarque/desembarque devem estar em local de fácil visualização ao operador e aos usuários.
- 1.8. Para maior segurança dos passageiros, o dispositivo de poltrona móvel (DPM) deve movimentar verticalmente a poltrona de passageiros, o assoalho na área de influência da poltrona, incluindo o apoio dos pés e o anteparo de proteção frontal (ver Figura xx).

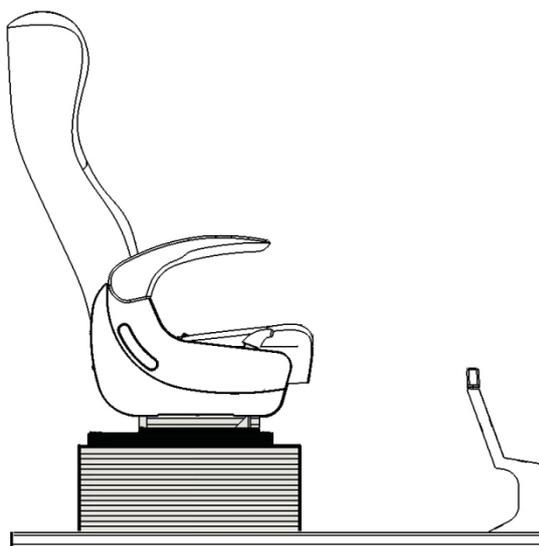
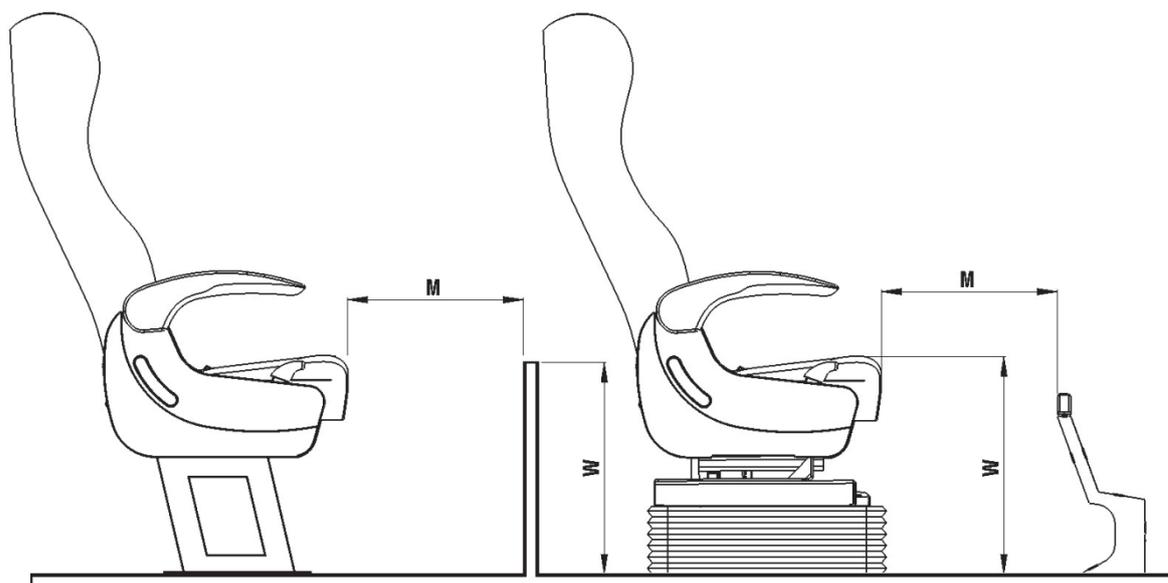


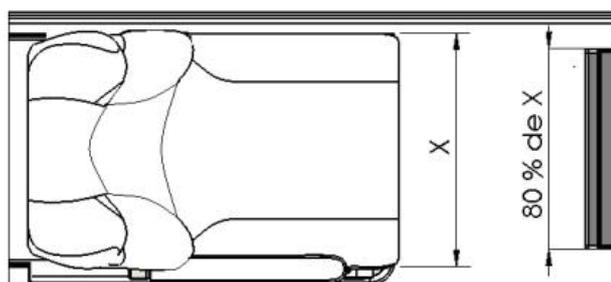
Figura xx: Exemplo de DPM

- 1.9. O anteparo de proteção frontal deve estender-se em pelo menos 80% da largura do assento da poltrona (Medida X) e assegurar a mesma distância livre (medida M) das demais poltronas do salão, na posição de transporte, para acomodação das pernas do passageiro (ver Figura xy).
- 1.10. Entre o dispositivo de poltrona móvel (DPM) e a poltrona imediatamente atrás deve haver um anteparo de proteção para os pés dos passageiros.

1.11. A altura do anteparo de proteção para os pés deve ser no máximo, equivalente à altura do assento em relação ao piso.



Vista Lateral em Posição de Transporte



Vista Superior

Figura xy: Exemplo de posição do anteparo frontal junto ao DPM

1.12. O dispositivo de poltrona móvel (DPM) deve possibilitar uma condição favorável à transferência do usuário de sua cadeira de rodas para o assento da poltrona do dispositivo.

1.13. A superfície do assento da poltrona deve ter altura máxima de 650 mm em relação ao nível do local de embarque e desembarque, considerando que o mesmo tenha altura de 150 mm em relação ao plano de rolamento (ver Figura xx).

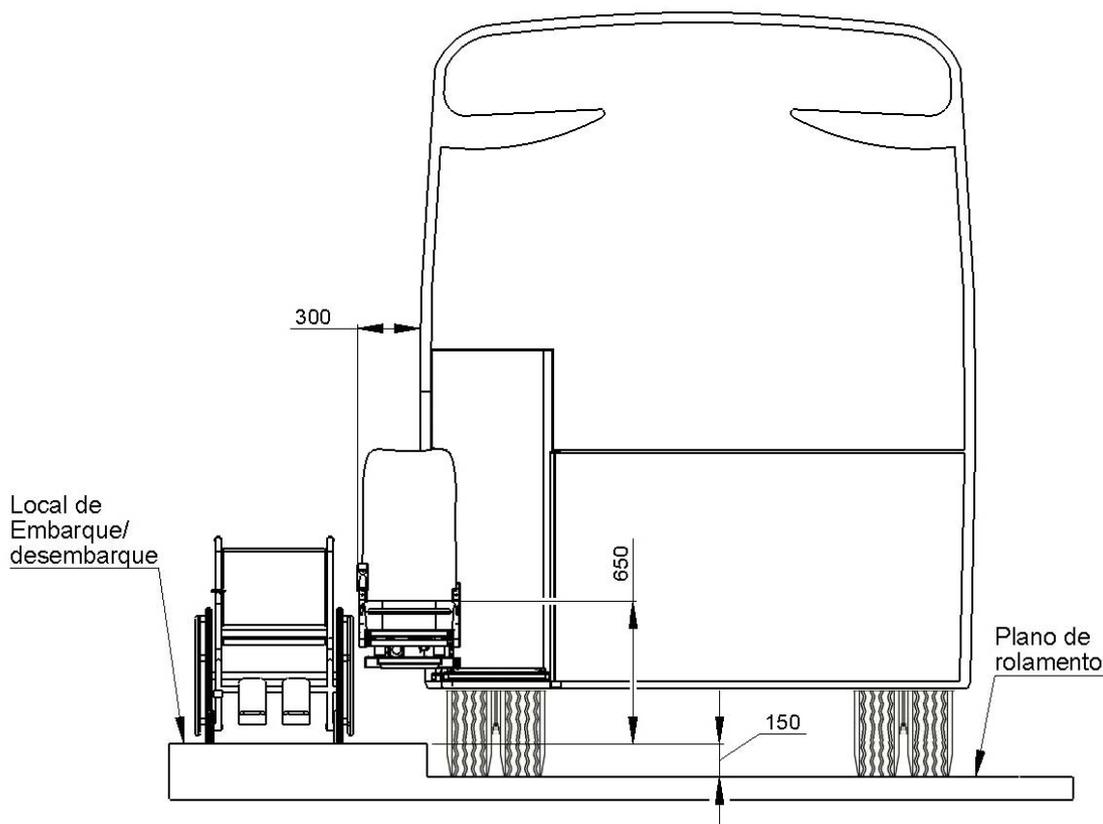


Figura yy: Transposição de fronteira (dimensões)

- 1.14. A poltrona do dispositivo de poltrona móvel (DPM) deve dispor dos mesmos níveis de reclinção das demais poltronas do veículo.
- 1.15. Para facilitar a transferência, o dispositivo de poltrona móvel (DPM) deve possibilitar a projeção da poltrona em pelo menos 300mm para fora da carroceria, de modo a favorecer o embarque de pessoas com deficiência ou com mobilidade reduzida (ver Figura yy).
- 1.16. Excetua-se desta obrigatoriedade o veículo que possuir poltronas do tipo Leito (configuração “2x1”).
- 1.17. O sistema que realiza o deslocamento da poltrona para fora da carroceria poderá ser manual ou automático.
- 1.18. Deve existir dispositivo para apoio dos pés do passageiro durante o deslocamento.
- 1.19. No projeto da carroceria deve estar prevista uma altura livre mínima de 900mm entre a face superior do assento da poltrona do dispositivo de poltrona móvel (DPM) e o marco superior da porta, além de um vão livre mínimo de 250mm desde a face frontal do assento do dispositivo de poltrona móvel (DPM) até o marco vertical da porta (ver Figura yx).

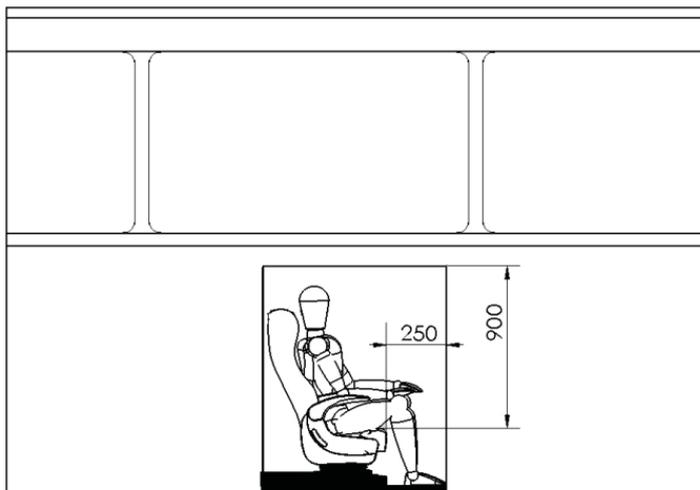


Figura yx –

- 1.20. Quando em posição de transporte, o dispositivo de poltrona móvel (DPM) deve possuir sistema que mantenha sua base (assoalho) alinhada com o piso interno do veículo, de forma a evitar o risco de deslocamento involuntário e vibrações com o veículo em movimento.
- 1.21. Deve haver um dispositivo de final de curso de subida, para o alinhamento automático quando o dispositivo de poltrona móvel (DPM) atingir a altura do piso interno do veículo.
- 1.22. O dispositivo de poltrona móvel (DPM) deve possuir sistema de segurança que impeça sua queda em caso de falhas durante a operação de embarque e desembarque ou com o veículo em movimento.

