

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

VINÍCIUS DA COSTA FIGUEIRÓ

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CHAPAS METÁLICAS SEMELHANTES
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

**CASCADEL - PR
2019**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

VINÍCIUS DA COSTA FIGUEIRÓ

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CHAPAS METÁLICAS SEMELHANTES
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professora Orientadora: Me. Fabiane Sorbar Fontana

**CASCADEL - PR
2019**

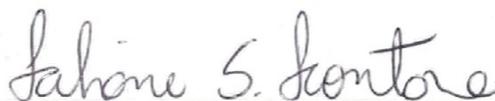
CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

VINÍCIUS DA COSTA FIGUEIRÓ

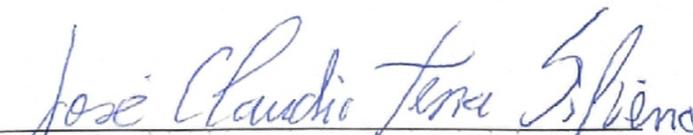
**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CHAPAS METÁLICAS SEMELHANTES
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação da Profa. Me. Fabiane Sorbar Fontana.

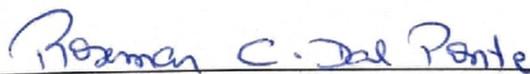
BANCA EXAMINADORA



Orientadora Me. Fabiane Sorbar Fontana
Centro Universitário Assis Gurgacz
Cientista da Computação



Prof. Esp. José Claudio Terra Silveira
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Prof. Me. Rosemar Cristiane Dal Ponte
Centro Universitário Assis Gurgacz
Bacharel em Informática

Cascavel, 28 de novembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus avós,
por sempre me guiarem pelo caminho da justiça.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me acompanhar em todos os momentos da minha vida.

Aos meus mestres, Fabiane Sorbar Fontana e Sérgio Henrique Rodrigues Mota, que tiveram papel fundamental na realização deste trabalho. Agradeço ao tempo e à paciência destinados à orientação deste estudo.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, Felipe Ludvichak e Rodrigo Spohn Godinho, por me auxiliarem em diversos momentos da vida acadêmica, e ao engenheiro, Gabriel dos Reis, pelos seus ensinamentos sobre o Método dos Elementos Finitos.

Aos meus colegas acadêmicos, e agora amigos, Carina Borges dos Santos e Lucas Almeida Carlos de Moura, agradeço pelas informações e ensinamentos compartilhados.

Aos meus amigos, Gustavo Vanzo Litwin, Jean de Oliveira Valenga e Letícia Torres que, de maneira indireta, foram de extrema importância para a conclusão deste projeto. Espero, um dia, retribuir toda a força cedida em momentos difíceis.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a construção deste trabalho, meu muito obrigado!

RESUMO

FIGUEIRÓ, Vinícius da Costa. **Análise comparativa entre chapas metálicas semelhantes utilizando o Método dos Elementos Finitos**. 2019. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) - Centro Universitário Assis Gurgacz, 2019.

A pesquisa tem como objetivo central analisar estruturalmente o efeito da carga exercida pelo componente porta pacote sobre as chapas metálicas, soldadas na estrutura do teto dos ônibus, de modo a estabelecer uma comparação entre as duas versões de chapas A e B contidas ao longo do teto. A análise, por sua vez, foi realizada após a obtenção de dados, por meio de uma simulação computacional, utilizando software de análise estrutural FEMAP, que tem como base o Método dos Elementos Finitos. Em seguida, foram confrontados os dados das duas versões de chapas metálicas A e B, de modo a verificar a viabilidade de exclusão de uma das variantes, no intuito de tornar mais simples a fabricação da estrutura do teto. Ao final do estudo, constata-se que o Método dos Elementos Finitos é uma forte ferramenta para análises estruturais com foco em melhoria nos projetos e redução de custo. Através de sua aplicação, pôde-se identificar, durante as comparações, que a padronização, utilizando apenas a chapa B é admissível, sem prejuízo ao processo de fabricação das estruturas de teto dos ônibus em estudo.

Palavras-chave: Elementos finitos. Chapa metálica. Simulação.

ABSTRACT

FIGUEIRÓ, Vinícius da Costa. **Comparative analysis between similar sheet metal using the Finite Element Method**. 2019. 54 f. Undergraduate thesis (Mechanical Engineering Course) – Assis Gurgacz University Center, Cascavel, PR, 2019.

The research has as its main objective to analyze structurally the effect of the load exerted by the package carrier component on the metal sheets, welded to the roof structure of the buses, to make a comparison between the two versions of plates A and B contained along the ceiling. The analysis, in its turn, was made after data obtaining, through a computer simulation using FEMAP structural analysis software, which has a Method of Finite Elements as base. Following up, the data from the two versions of sheet metal A and B were compared, in order to verify the feasibility of excluding one of the variants, in order to simplify the fabrication of the ceiling structure. By the end of the study, it is shown that the Finite Element Method is a strong tool for structural analysis which focuses on project improvement and cost reduction. Through its application, it can be identified, during the comparison, that the standardization using only plate B is admissible, without prejudice to the manufacturing process of the roof structures of the buses under study.

Keywords: Finite elements. Metal sheet. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1:	Defeitos da solda.....	18
FIGURA 2:	Viga na condição deformada.....	21
FIGURA 3:	Viga I discretizada a partir de elementos sólidos hexaédricos.....	21
FIGURA 4:	Método geral para análise de sistemas discretos.....	23
FIGURA 5:	Representação da condição de equilíbrio em uma montagem de elementos.....	24
FIGURA 6:	Compatibilidade de deslocamentos.....	25
FIGURA 7:	Processo de obtenção de deformações e tensões através da função de interpolação.....	27
FIGURA 8:	Elemento de casca retangular linear.....	28
FIGURA 9:	Modelo em Elementos Finitos para análise de região de bloco de motor.....	29
FIGURA 10:	Estrutura sobre ação de carregamento externo estático.....	30
FIGURA 11:	Informações do componente porta-pacote.....	32
FIGURA 12:	Região da solda na chapa A.....	33
FIGURA 13:	Região da solda na chapa B.....	33
FIGURA 14:	Demonstração referente ao posicionamento das chapas.....	34
FIGURA 15:	Vista isométrica das chapas A e B.....	34
FIGURA 16:	Vista isométrica do tubo central do teto.....	35
FIGURA 17:	Vista isométrica de uma seção do tubo lateral do teto.....	35
FIGURA 18:	Propriedades mecânicas do aço fornecidas pelo software.....	35
FIGURA 19:	Conjunto A modelado no software SolidWorks.....	36
FIGURA 20:	Conjunto B modelado no software SolidWorks.....	36
FIGURA 21:	Chapas A e B posicionadas antes da pintura.....	37
FIGURA 22:	Chapas A e B após pintura.....	37
FIGURA 23:	Conjunto das Chapas A e B importadas no software FEMAP.....	39
FIGURA 24:	Definição do material utilizado nos componentes da análise.....	39
FIGURA 25:	Definição dos elementos utilizados para formar a malha.....	40
FIGURA 26:	Conjunto das chapas A e B discretizado em vários elementos de casca.....	40
FIGURA 27:	Elementos de transição no conjunto da chapa A.....	41

FIGURA 28:	Elementos de transição no conjunto da chapa B.....	41
FIGURA 29:	Região fixada no tubo lateral.....	42
FIGURA 30:	Definição da carga a ser aplicada.....	44
FIGURA 31:	Região onde a carga é aplicada em ambas as chapas.....	45
FIGURA 32:	Concentração de tensão no conjunto das chapas A e B.....	45
FIGURA 33:	Valores das tensões.....	46
FIGURA 34:	Região onde a tensão é dissipada no conjunto da chapa B.....	47

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 –	Lei de Hooke.....	20
EQUAÇÃO 2 –	Notação matricial.....	26
EQUAÇÃO 3 –	Carga do porta-pacotes.....	43
EQUAÇÃO 4 –	Peso médio da bagagem no porta-pacotes.....	43
EQUAÇÃO 5 –	Conversão da carga.....	43
EQUAÇÃO 6 –	Chapas de fixação.....	44
EQUAÇÃO 7 –	Comparação entre as regiões.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AWS** – American Welding Society
- Cb** – Carga de bagagem
- FEMAP** – Finite Element Modeling And Postprocessing
- GMAW** – Gas Metal Arc Welding
- Kg** – quilograma
- MAG** – Metal Active Gas
- MEF** – Método dos Elementos Finitos
- MIG** – Metal Inert Gas
- Pp** – Peso médio
- UNECE** – Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	OBJETIVOS.....	14
1.1.1.	Objetivo Geral.....	14
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	14
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	14
1.3.	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.4.	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1.	DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM.....	16
2.2.	SOLDAGEM MIG/MAG.....	16
2.2.1.	Fundamentos.....	17
2.2.2.	Características.....	17
2.2.3.	Defeitos da solda.....	18
2.2.4.	Gás de proteção.....	19
2.3.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO.....	19
2.4.	MATERIAIS ELÁSTICOS LINEARES.....	20
2.5.	SISTEMAS CONTÍNUOS.....	20
2.6.	SISTEMAS DISCRETOS.....	21
2.7.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	21
2.7.1.	Introdução ao MEF.....	22
2.7.2.	Discretização.....	22
2.7.3.	Método dos Elementos Finitos - Sistema Discreto Padrão.....	23
2.7.4.	Leis fundamentais.....	24
2.7.5.	Equilíbrio de forças.....	24
2.7.6.	Compatibilidade de deslocamentos.....	25
2.7.7.	Lei de comportamento do material.....	25
2.7.8.	Matriz de rigidez de uma estrutura.....	26
2.7.9.	Comportamento interno do elemento.....	26
2.7.10.	Elemento de casca.....	27
2.7.11.	Funcionamento do método.....	28
2.8.	FEMAP.....	29

2.9.	ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA.....	30
3.	METODOLOGIA.....	31
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	32
3.2.	MODELAMENTO DAS CHAPAS.....	34
3.3.	ACOMPANHAMENTO NA LINHA DE PRODUÇÃO.....	36
3.4.	SIMULAÇÃO NO SOFTWARE FEMAP.....	38
3.4.1.	Importação dos modelos.....	38
3.4.2.	Configuração dos materiais.....	39
3.4.3.	Definição dos elementos que compõem a malha.....	40
3.4.4.	Elementos de transição.....	41
3.4.5.	Definição das regiões de restrição.....	42
3.4.6.	Fornecimento das forças atuantes no modelo.....	42
3.4.7.	Realização da análise estática.....	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente competitividade no mercado de trabalho, ano após ano, atualmente, tem-se a oportunidade de realizar estudos científicos direcionados a indústria, que comprovam melhorias ou apontam erros que podem ser evitados. Com a vasta informação acumulada pela humanidade, intensificada após o surgimento da Internet, é possível, inclusive, a realização de estudos complexos, inviáveis décadas atrás.

Tendo isso em mente, o estudo proposto visa analisar dois modelos de chapas metálicas semelhantes, utilizadas na estrutura do teto dos ônibus rodoviários de uma empresa do ramo, verificando e comparando as diferenças e vantagens que uma tem em relação à outra quando soldadas com a finalidade de suporte de carga.

Sob essa ótica, o estudo tem por finalidade comparar duas chapas metálicas semelhantes, denominadas A e B no decorrer deste estudo, soldadas pelo processo MIG/MAG, isto é, MIG Metal Inert Gas (MIG) e Metal Active Gas (MAG), demonstrando vantagens e limitações do referido processo de maneira focada. Convém destacar que, apesar do estudo ter sido realizado em um lugar específico, os resultados podem ser utilizados em situações semelhantes, contanto que algumas variáveis sejam alteradas.

Para alcançar o respectivo propósito, foi necessário o cumprimento de etapas, guiadas por um objetivo geral o qual colocou em evidência a comparação dos dados entre os modelos de chapas metálicas A e B supracitados, com a necessidade de modelar, fazendo uso de software Solidworks a conjuntos simulados e, em seguida, avaliar in loco a montagem física das chapas em ônibus que se encontram em processo de produção. Com isso, pôde-se verificar a fidelidade do conjunto físico com o virtual, levantando informações relevantes, a fim de gerar alterações no modelo criado no software. Por fim, simulou-se carga semelhante ao peso real do componente porta-pacote, utilizando o software Finite Element Modeling And Postprocessing (FEMAP), gerando, assim, dados confiáveis sobre a comparação.

Com o término das simulações e comparações, resultados significativos foram obtidos os quais justificam a padronização de uso de apenas um modelo de chapa metálica. Nesse processo de análise, a chapa B sobressaiu-se. Desse modo, a padronização simplifica a montagem da estrutura do teto do ônibus, minimizando erros cometidos pelo setor da engenharia da empresa na qual o trabalho é realizado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar estruturalmente dois modelos de chapas metálicas, A e B, semelhantes, unidas à estrutura do teto de ônibus, modelo rodoviário, pelo processo de soldagem MIG/MAG, verificando as necessidades de utilização de ambas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Modelar as chapas metálicas A e B, juntamente com o conjunto onde são soldadas, utilizando o software SolidWorks.

Verificar in loco a união das chapas metálicas A e B junto à estrutura do teto, com o intuito de examinar as semelhanças e divergências entre modelo virtual e físico.

Simular, no software FEMAP, a carga exercida nas chapas metálicas A e B pelo componente porta-pacote.

Analisar os resultados obtidos com a simulação, verificando a viabilidade de exclusão de um dos modelos após comparação.

1.2 JUSTIFICATIVA

A competitividade dentro da indústria brasileira nunca foi tão alta. Sendo assim, o foco de manter o produto com qualidade e com custo menor que os concorrentes tem se tornado, cada vez mais, competitivo, o que pode ser considerado o aspecto suprasumo das empresas. À vista disso, os estudos feitos para melhoria de um determinado produto deixam de ser generalistas e passam a ser mais detalhistas, pois o que era, de certa forma, “grosseiro”, não está mais sendo aceito no mercado globalizado, e a diferença do melhor no ramo para os demais, na maioria das vezes, é justamente a diferença dos detalhes.

Em conformidade com Neto, Scarmínio e Bruns (1995), muitas vezes, o insucesso de uma investigação provém da falta de planejamento por parte dos pesquisadores, pois são raros os que utilizam a estatística antes de realizar seus experimentos. De modo habitual, eles costumam achar que a análise dos dados, independente da maneira que tenham sido obtidos,

possivelmente, levará a pesquisa a um bom termo. E, se porventura problemas surgirem, basta recorrer a uma pessoa entendida no assunto que a dificuldade será eliminada.

Nesse sentido, o trabalho visa detalhar uma região específica na complexa estrutura de um ônibus rodoviário, mais notadamente na parte estrutural do teto, a partir da análise de dois modelos de chapa metálica, responsáveis pelo suporte do porta-pacote, componente típico do modelo de ônibus rodoviário, o que justifica a importância do dimensionamento correto na estrutura de um item em um conjunto fundamental como o teto.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Há a necessidade de dois modelos de chapas metálicas A e B para suporte do componente porta-pacote?

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada na cidade de Cascavel, situada no estado do Paraná, com estudos teóricos e práticos em uma empresa particular da região, dando ênfase à parte estrutural de um ônibus modelo rodoviário.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM

Segundo Brandi, Wainer e Mello (1992, p. 1), a “utilização de uma fonte de calor como processo de unir duas partes metálicas, com ou sem pressão, é denominado soldagem, e a solda é o resultado desse processo.”

Complementarmente, Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 18) esclarece que existem várias quantidades de processos que recebem a denominação “soldagem” e podem ser utilizados para “recuperação e fabricação de equipamentos, peças, conjuntos e estruturas.” Tradicionalmente, a soldagem é classificada como um processo de união, todavia, nesta contemporaneidade, existem processos de soldagem ou variações destes que são utilizados para formar um revestimento com características especiais, ou então, para realizar cortes em componentes metálicos, utilizando processos semelhantes à soldagem. Desse modo, não existe nada concreto sobre a definição da soldagem, porém há algumas tentativas de definição como, por exemplo,

- processo de união de metais por fusão: embora não somente metais são soldáveis e, ao mesmo tempo, pode haver outros processos de soldagem além da solda por fusão;
- operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas: nessa definição, é utilizado o termo “continuidade” com significado semelhante ao utilizado nos meios matemáticos, ou seja, embora as propriedades ao longo da junta soldada possam variar, não ocorre quebras drásticas como, por exemplo, na união por rebite;
- processo de união de materiais, usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição: essa é a definição adotada pela Associação Americana de Soldagem (American Welding Society - AWS), contudo, ela não contribui com aspecto conceitual, sendo somente operacional;
- processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos: uma última definição, que se baseia pelo tipo de forças responsáveis pela união das peças, sendo uma definição mais técnica, que pode englobar também a brasagem, que neste contexto, pode ser considerada como um processo de soldagem. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009, p. 18, grifo dos autores).

2.2 SOLDAGEM MIG/MAG

A soldagem a arco com proteção gasosa Gas Metal Arc Welding (GMAW), como defendem Marques, Modenesi e Bracarense (2009), é conhecido, no Brasil, como MIG, quando

o gás usado para proteção é um gás inerte, e MAG quando utilizado, como proteção, um gás ativo. Esse processo de soldagem visa unir peças metálicas através do aquecimento via arco elétrico, estabelecido entre a peça de trabalho e o eletrodo nu consumível.

2.2.1 Fundamentos

Conforme descrito por Brandi, Wainer e Mello (1992), os processos de soldagem MIG e soldagem MAG têm como fonte de calor o arco elétrico, que se mantém entre o eletrodo e a peça a soldar. Os dois processos são praticamente idênticos, uma vez que realizam soldagem automática ou semiautomática, diferenciando-se apenas no gás utilizado, podendo ser um gás ativo ou inerte, e também no material adequado no qual será realizada a solda.

Ao se referirem a esses processos, Scotti e Ponomarev (2008) enfatizam que os mesmos se baseiam na união de um arame nu consumível com uma peça por meio da fusão que tem como fonte de calor o arco elétrico. A proteção da região soldada se deve a uma atmosfera de gás inerte ou ativo, podendo também ser uma mistura dos dois.

2.2.2 Características

Como os demais processos de soldagem, a solda MIG/MAG tem suas peculiaridades. De acordo com Brandi, Wainer e Mello (1992), algumas das vantagens desta soldagem são: a) processo semiautomático, podendo facilmente ser adaptado para automatizar; b) alta velocidade de soldagem, por ter uma densidade de corrente alta; c) elevada taxa de deposição; d) boa penetração de raiz; e) soldagem com boa facilidade de execução.

Todavia, há limitações nesse processo de soldagem, tais como: a) necessidade de proteção de correntes de ar; b) grande emissão de raios ultravioleta; c) equipamentos caros, complexos e de menor portabilidade se comparados com o processo de eletrodo revestido. Outro ponto importante é que não há escória, tornando sua velocidade de resfriamento maior, o que provoca um aumento na ocorrência de trincas, principalmente quando o material a ser soldado são aços temperáveis.

2.2.3 Defeitos da solda

De acordo com Pfeil W. e Pfeil M. (2009), existem diversos tipos de defeitos nas soldas. Sendo assim, as deformações e falhas no processo de soldagem devem ser previstas, a fim de medidas serem adotadas para evitá-las. Os principais tipos de defeitos desse processo são os listados na sequência e ilustrados na Figura 1, a saber:

- a) inclusões de escória: ocorrem com maior frequência quando é realizado várias camadas de solda em um local; a escória, então, não é removida totalmente após a soldagem em cada passe, desencadeando neste defeito;
- b) mordeduras: são reentrâncias agudas formadas pelo arco elétrico e pela ação de sua fonte de calor; a formação da mordedura gera concentradores de tensão;
- c) fusão incompleta ou penetração inadequada: as causas da penetração incompleta na junta são a preparação imprópria da junta, a técnica e a corrente de soldagem inadequada;
- d) porosidade: são pequenas bolhas de gás que se apresentam durante o resfriamento; essas bolhas são causadas pela distância excessiva entre o eletrodo e a chapa ou por uma quantidade excessiva de corrente elétrica;
- e) fissuras: acontece quando há um resfriamento muito rápido do material, mas podem ser controladas através do controle da velocidade de resfriamento, porém, caso aconteça uma fissura por um descuido, esse defeito pode ser minimizado com um preaquecimento do metal de base.

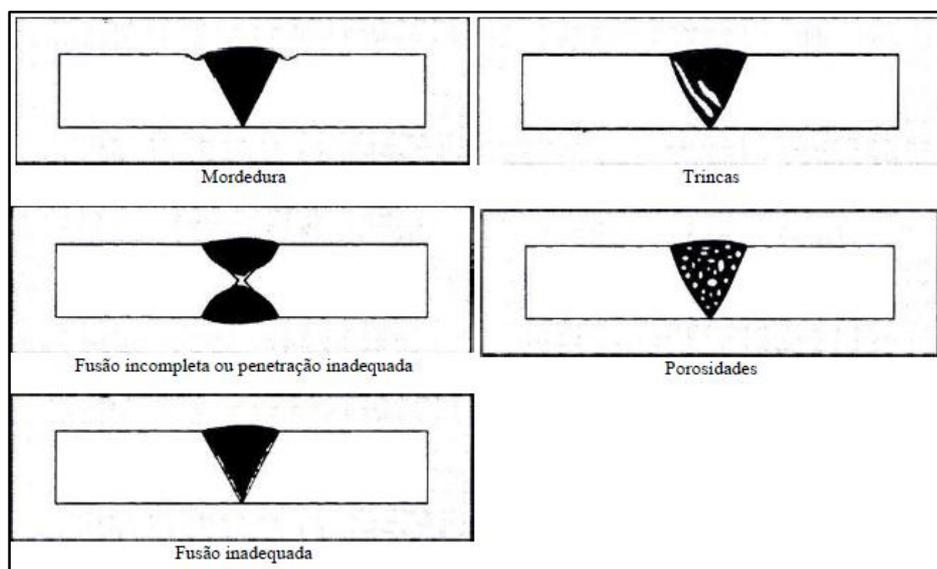


Figura 1: Defeitos da solda

(Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 2005)

2.2.4 Gás de proteção

Para se evitar a contaminação das gotas de metal fundido em transferência, do arame e da poça de fusão pelos gases da atmosfera, é utilizado um gás de proteção. Este gás tem a finalidade de ser o meio ionizante, possibilitando o controle de transferência metálica, o consumo do eletrodo e a fusão do metal-base, juntamente com a estabilidade do arco elétrico.

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO

Gonçalves e Martins (2005) esclarecem que, quando o material se sujeita a esforços de natureza mecânica, apresenta suas propriedades mecânicas, sendo estas determinantes para demonstrar uma maior ou menor capacidade do material em resistir ou transmitir algo aos esforços que lhe são aplicados.

Segundo Gerda (2013), os aços carbonos são ligas metálicas constituídas basicamente de ferro, carbono, silício e manganês, apresentando também outros elementos inerentes ao processo de fabricação em percentuais controlados. Ainda, segundo o mesmo autor, o aço carbono SAE 1020 é um dos aços mais utilizado, devido à sua baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade. A microestrutura presente neste aço, no seu estado normalizado, é perlita, fina e ferrita.

Na representação a seguir, encontram-se as principais propriedades mecânicas do aço SAE 1020 (SUBSTECH, 2012), objeto foco deste estudo.

Material	Tensão de escoamento		Tensão de ruptura		
	σ tração (MPa)	τ cisalh. (MPa)	σ tração (MPa)	τ compressão (MPa)	τ cisalh. (MPa)
Aço SAE 1020	350	210	420	420	250

A partir das informações expostas no Quadro 1, foi possível conferir junto ao software FEMAP todas as propriedades do aço SAE 1020 laminado a frio, como tensão de escoamento e cisalhamento.

Tendo conhecimento das propriedades mecânicas do respectivo aço, pode-se relacionar a Teoria da Elasticidade a qual tem suporte na fundamental Lei de Hooke, por estudar o comportamento mecânico de um material, ao receber solicitação de força externa ou carga, iniciando na deformação elástica reversível e com término na ruptura (SCHÖN, 2013).

2.4 MATERIAIS ELÁSTICOS LINEARES

Ao aplicar uma carga em uma peça, o material é deformado e se a força aplicada for pequena o bastante, os deslocamentos dos vários pontos do material são proporcionais à força. Isso estabelece o conceito de comportamento elástico. De certa forma, todos os corpos sólidos detêm essa propriedade, restaurando sua forma e tamanho, ao removerem as forças que produzem deformação (SCHÖN, 2013).

A Equação 1 apresenta a Lei de Hooke para o regime elástico.

$$F = k \Delta l \quad (1)$$

onde:

F = força elástica aplicada ao material;

k = constante elástica do material;

Δl = deformação ou alongamento do meio elástico.

2.5 SISTEMAS CONTÍNUOS

Em sistemas contínuos, como acontece na teoria da flexão de uma viga, a solução analítica permite determinar o deslocamento vertical y para todos valores de x . Ou seja, a solução é obtida para os infinitos pontos da viga por intermédio de uma função matemática. Portanto, a viga, objeto de análise (Figura 2), é tratada como um sistema contínuo, pois sua solução é obtida para os infinitos pontos que constituem seu corpo contínuo (ALVES FILHO, 2013).

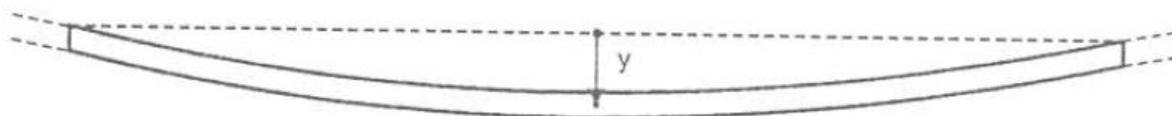


Figura 2: Viga na condição deformada

(Fonte: adaptado de ALVES FILHO, 2013)

2.6 SISTEMAS DISCRETOS

Nos sistemas discretos, a solução aproximada simula o modelo estrutural como uma montagem de elementos com comprimento finito (Figura 3). Portanto, todo o sistema é subdividido em partes ou elementos finitos, de modo que o modelo inteiro seja um agregado de estruturas “simples”, nas quais seus pontos de união são denominados de nós do modelo (ALVES FILHO, 2013).

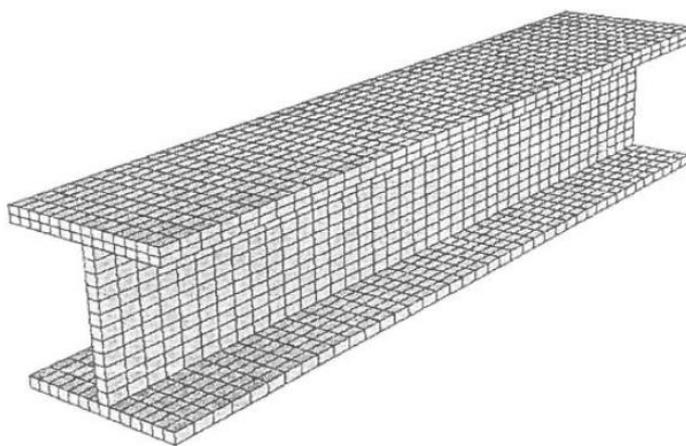


Figura 3: Viga I discretizada a partir de elementos sólidos hexaédricos

(Fonte: ALVES FILHO, 2013)

2.7 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta poderosa e sua essencialidade na análise da engenharia estrutural, em praticamente qualquer aplicação, é indiscutível (SORIANO, 2009).

O MEF é um procedimento numérico muito propagado na análise de estruturas e meios contínuos. Baseando-se no conceito de discretização da estrutura e meios contínuos, há obtenção aproximada nas soluções numéricas. Assim, com esta técnica, procura-se dividir o meio contínuo em subdomínios, referidos como elementos, que são interligados através dos pontos nodais, nos quais são definidos os graus de liberdade a serem determinados. Dessa forma, a ideia básica consiste em transformar um problema complexo na soma de diversos problemas simples (MIRLISENNA, 2016).

2.7.1 Introdução ao MEF

Por intermédio dos métodos analíticos clássicos, é possível a realização de cálculos, obtendo-se, através deles, a resposta exata das tensões, dos deslocamentos e das deformações em todos os pontos de uma estrutura estudada. Ou seja, nos infinitos pontos do objeto de estudo, soluções como esta são somente conhecidas para um determinado número de casos que, em sua maioria, fogem das aplicações rotineiras.

Com o surgimento do MEF, amplia-se a possibilidade de cálculos em estruturas com geometria complexas, haja vista que o método tem o intuito de aplicação em caráter geral, independente da geometria da estrutura e dos carregamentos aplicados na mesma, dentro da precisão aceitável do problema de engenharia (ALVES FILHO, 2013).

2.7.2 Discretização

A discretização surge como contraponto das análises feitas com um número infinito de variáveis, como as realizadas pela Teoria da Elasticidade, pois utilizam funções contínuas, isto é, com infinitas incógnitas como solução. Logo, o que torna possível a contraposição é o fato de, ao discretizar um modelo, torná-lo com um número finito de incógnitas (deslocamentos ocorridos nos nós do modelo) para análise de meios contínuos (VAZ, 2011).

2.7.3 Método dos Elementos Finitos - Sistema Discreto Padrão

O MEF é um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos, de modo que o componente mecânico estrutura, de modo geral, o corpo contínuo, decomposto em um número finito de partes conectadas pelos nós. A configuração deformada da estrutura é determinada pelos deslocamentos dos nós para qualquer que seja sua geometria ou tipo de carregamento aplicado. Sendo assim, os parâmetros que descrevem o comportamento do sistema são os deslocamentos nodais e, a partir destes, torna-se viável a determinação dos esforços internos, as tensões, bem como avaliar a resistência da estrutura, objeto de análise (ALVES FILHO, 2013).

A Figura 4 apresenta o método geral utilizado para análise de sistemas discretos.

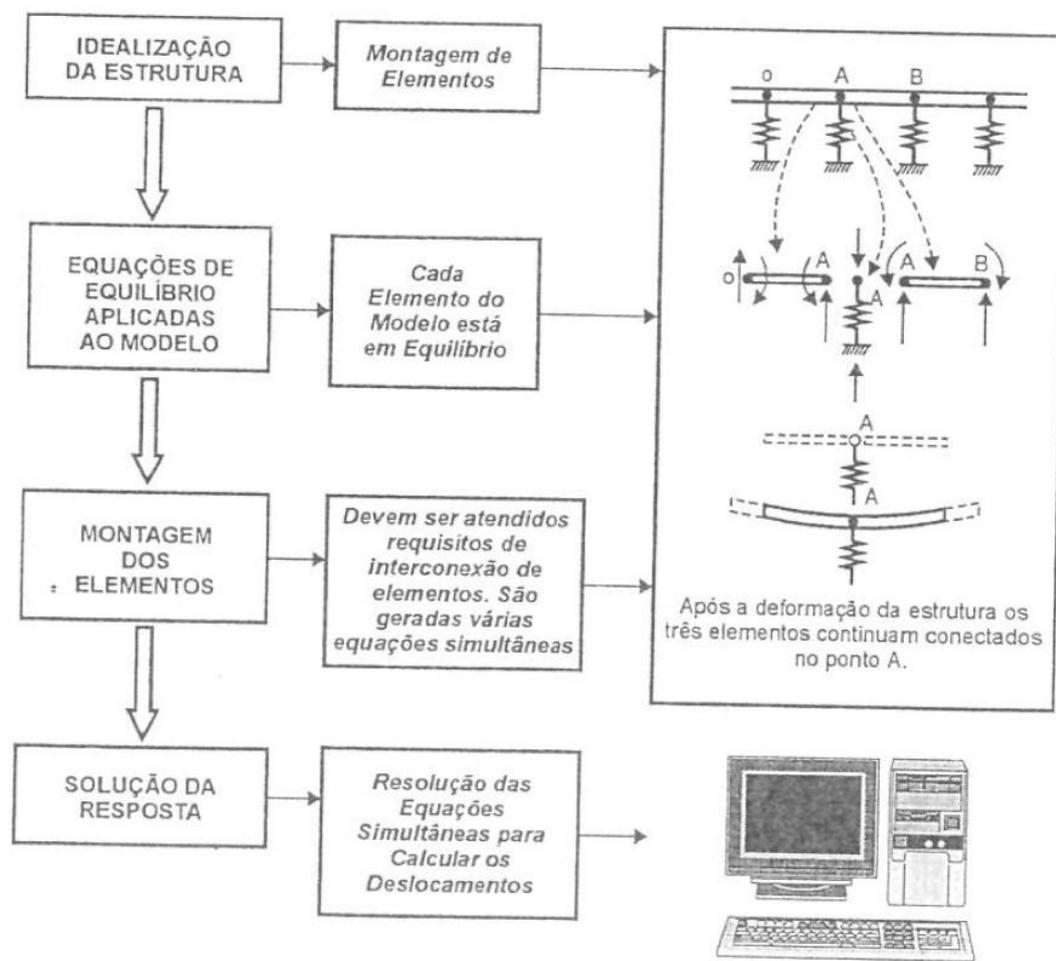


Figura 4: Método geral para análise de sistemas discretos

(Fonte: ALVES FILHO, 2013)

2.7.4 Leis fundamentais

O interesse pela análise através do MEF, no âmbito das aplicações estruturais, diz respeito à determinação da configuração deformada da estrutura, partindo do cálculo dos deslocamentos nodais. Desse modo, as forças atuantes em um dado elemento e os correspondentes deslocamentos estão relacionados entre si por intermédio das diversas rigidezes associadas ao elemento. Essas relações matemáticas que permitem a resolução do problema fundamentam-se em algumas leis fundamentais (ALVES FILHO, 2013).

2.7.5 Equilíbrio de forças

Assumindo que a estrutura se encontra em condição de equilíbrio, pode-se aplicar as equações de equilíbrio (Figura 5), reconhecidas no estudo da mecânica como cada um dos elementos de forma isolada (ALVES FILHO, 2013).

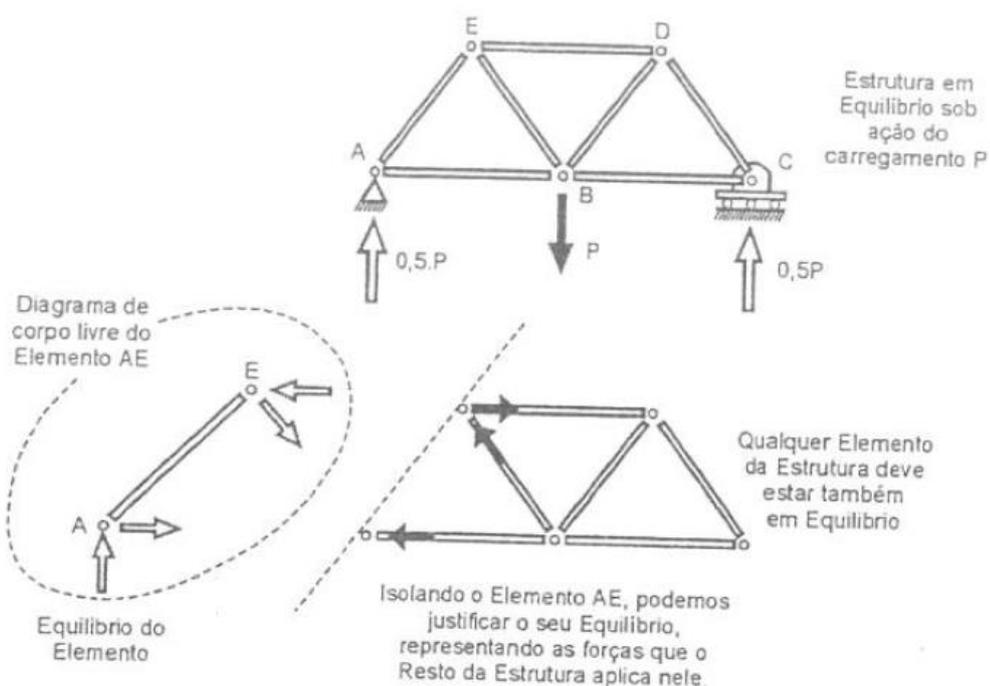


Figura 5: Representação da condição de equilíbrio em uma montagem de elementos

(Fonte: adaptado de ALVES FILHO, 2013)

2.7.6 Compatibilidade de deslocamentos

A compatibilidade corresponde à condição geométrica que deve ser satisfeita para garantir que a estrutura, ao se deformar, permaneça contínua, isto é, sem vazios ou sobreposição de pontos (Figura 6). De forma geral, os elementos conectados inicialmente a um determinado nó devem permanecer conectados após a deformação (ALVES FILHO, 2013).

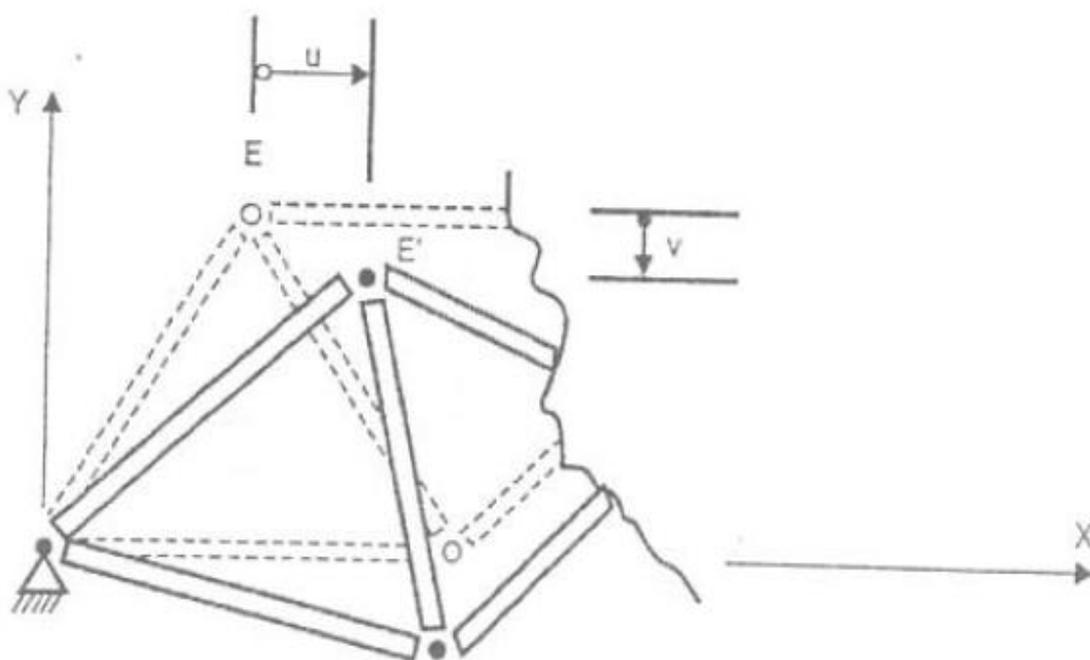


Figura 6: Compatibilidade de deslocamentos

(Fonte: adaptado de ALVES FILHO, 2013)

2.7.7 Lei de comportamento do material

Através da transmissão dos esforços ao longo da estrutura, ocorre a deformação desta em virtude das forças internas. Na maioria das aplicações, quando os esforços não são muito elevados, as forças internas crescem proporcionalmente às deformações. Essa relação linear constitui a conhecida Lei de Hooke e, no estudo do MEF, admite-se que os elementos respeitem essa condição (ALVES FILHO, 2013).

2.7.8 Matriz de rigidez de uma estrutura

A determinação da relação entre as cargas atuantes nos nós da estrutura inteira e os deslocamentos da estrutura em sua totalidade é o grande objetivo por trás da análise estrutural. Tornando fundamental o conhecimento da rigidez da estrutura, após conhecida, possibilita a definição da relação Força X Deslocamento da estrutura (ALVES FILHO, 2013).

Na prática, a quantidade de elementos e os nós neles presentes é alta. Por esse motivo, conforme argumenta Alves Filho (2013), a relação entre as cargas atuantes na estrutura e os seus respectivos deslocamentos nodais é melhor expressa em notação matricial (Equação 2).

$$\{F\} = [K].\{U\} \quad (2)$$

onde:

$\{F\}$ corresponde à matriz coluna com todas as cargas nodais;

$[K]$ corresponde à Matriz de Rigidez da Estrutura, com coeficientes de rigidez da estrutura inteira que relacionam todas as forças e deslocamentos nodais;

$\{U\}$ corresponde à matriz coluna com todos os deslocamentos nodais.

Dentro das análises efetuadas pelo MEF, há uma vasta gama de tipos de elementos que podem ser utilizados, sendo eles unidimensionais, como: a) elementos de mola e viga; b) elementos bidimensionais, a exemplo do elemento de estado plano de tensões triangular linear; c) elementos tridimensionais, como o elemento sólido tetraédrico linear. Mediante tais tipos, cabe ao analista entender fisicamente o problema, de modo a utilizar o elemento com as propriedades que melhor representam a situação, pois esta é fundamental característica do método (ALVES FILHO, 2013).

2.7.9 Comportamento interno do elemento

Cada elemento tem seu comportamento interno, descrito por uma função de interpolação (Figura 7). Essas funções são especialmente selecionadas, com o objetivo de representarem os deslocamentos dentro do elemento. Nessa perspectiva, embora haja elementos com geometria

semelhante, as funções que determinam seus deslocamentos internos são diferentes (ALVES FILHO, 2013).

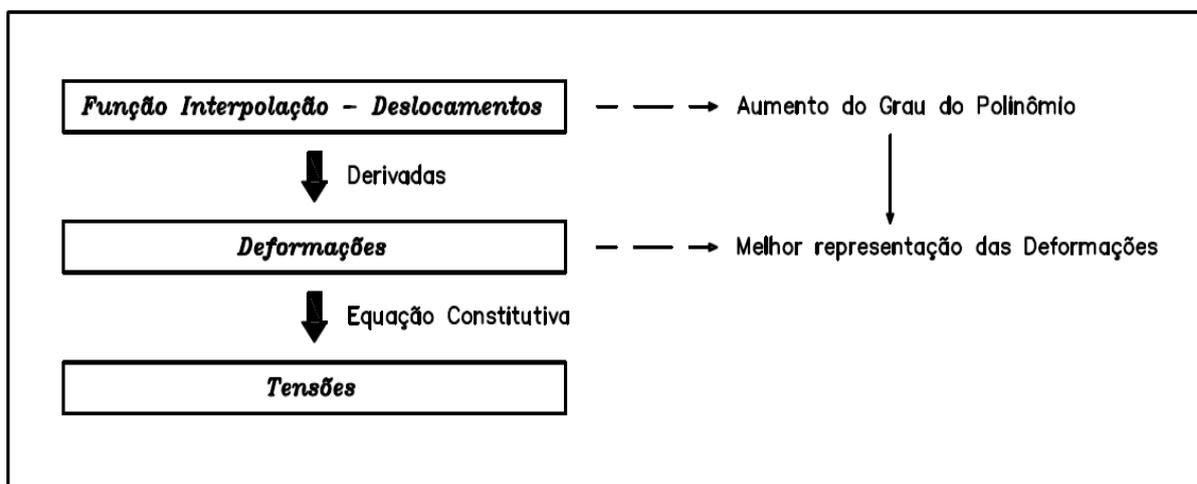


Figura 7: Processo de obtenção de deformações e tensões através da função de interpolação
(Fonte: ALVES FILHO, 2013)

A partir das funções que regem os deslocamentos, torna-se possível o cálculo das deformações, relacionadas à primeira derivada das funções quando equivalem a casos de Estado Plano de Tensões e Estado Triaxial de Tensões. Quando a função é relacionada a problemas aos quais a deformação está associada à curvatura, sua deformação é obtida pela segunda derivada da função. Nesse sentido, as tensões decorrem imediatamente do cálculo das deformações, através das relações da Teoria da Elasticidade (ALVES FILHO, 2013).

2.7.10 Elemento de casca

O elemento mais simples de casca plano pode ser obtido pela superposição do comportamento de Flexão da Placa e do comportamento de Estado Plano de Tensões, considerados como comportamentos independentes (Figura 8).

Os comportamentos simultâneos de ações de flexão e de forças no plano da chapa ou Plane Stress sugerem a utilização dos elementos de casca em diversas aplicações práticas, como em análises detalhadas de chassis e travessa, para-choques e caixa estrutural completa de ônibus (ALVES FILHO, 2013).

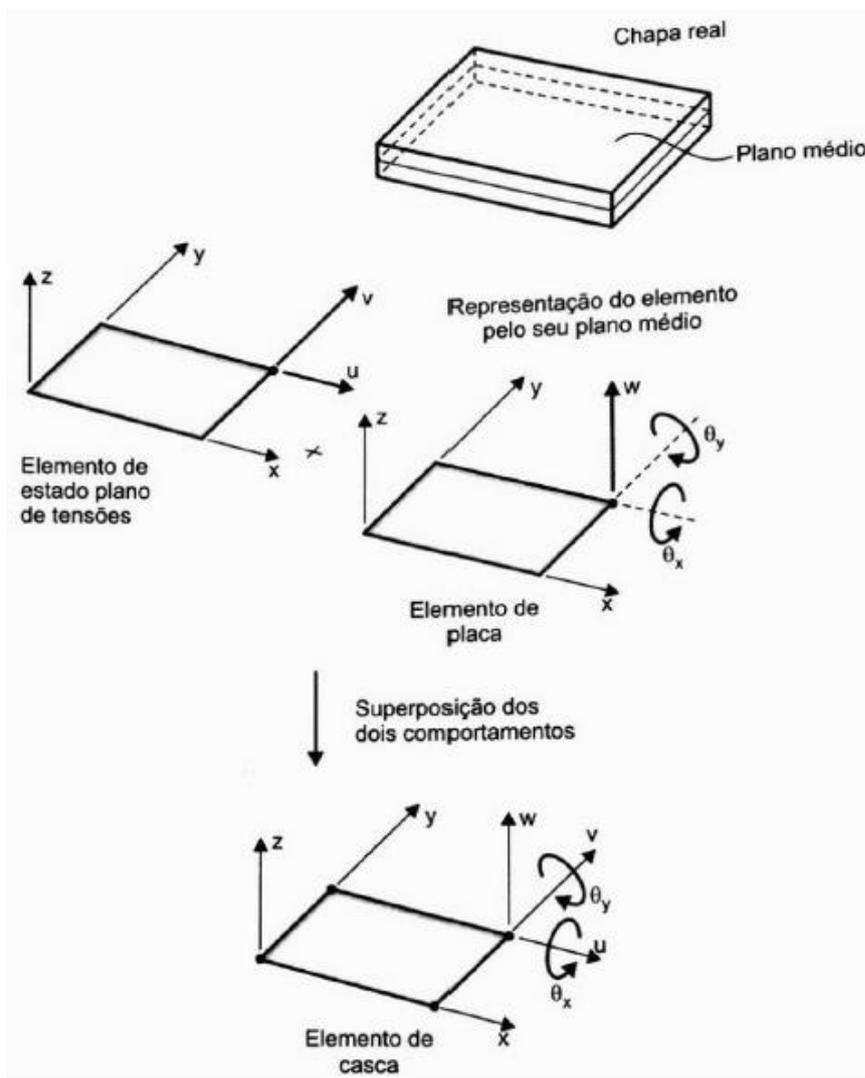


Figura 8: Elemento de casca retangular linear

(Fonte: adaptado de ALVES FILHO, 2013)

2.7.11 Funcionamento do método

De acordo com Alves Filho (2013), a geometria submetida aos carregamentos e às restrições é subdividida em pequenas partes, denominadas elementos, os quais passam a representar o domínio contínuo do problema. Sob essa lógica, a divisão da geometria em pequenos elementos permite resolver um problema complexo, subdividindo-o em problemas mais simples, o que possibilita ao computador realizar, com eficiência, tais tarefas.

O método propõe que o número infinito de variáveis desconhecidas seja substituído por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Essas divisões podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do

tipo e da dimensão do problema. Como são elementos de dimensões finitas, são chamados de elementos finitos – termo que nomeia o método.

Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, denominados nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses itens – elementos e nós – dá-se o nome de malha. Em função dessas subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem os comportamentos físicos não são resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico.

A precisão do MEF depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise (ALVES FILHO, 2013).

A Figura 9 apresenta um modelo em elementos finitos utilizado para a análise de região de um bloco de motor.



Figura 9: Modelo em Elementos Finitos para análise de região de bloco de motor

(Fonte: ALVES FILHO, 2013)

2.8 FEMAP

FEMAP é um software de simulação avançada de engenharia, com enfoque nos modelos de análise de elementos finitos, centrados em malha, de sistemas ou produtos complexos. Com

sua utilização, torna-se possível o modelamento de componentes, conjuntos ou sistemas, tendo em vista a análise da atuação de um determinado ambiente operacional (SIEMENS, 2019).

2.9 ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA

A análise estrutural estática pode ser classificada como uma verificação prévia da estrutura a carregamentos constantes que se fazem presentes na utilização diária dessa estrutura, desconsiderando os efeitos das forças de inércia e de amortecimento (PEREIRA, 2016). A estrutura analisada é carregada lentamente até atingir a máxima carga, de forma que a deformação e a tensão possam ser calculadas através das equações do equilíbrio estático de uma estrutura.

A deformação e a tensão na estrutura em foco neste estudo atingem seus valores máximos quando o carregamento externo também atinge (Figura 10). É importante salientar que, embora o carregamento externo varie com o tempo até atingir o seu valor máximo, a resposta da estrutura em cada instante ainda pode ser calculada pelas equações de análise estática. As cargas externas aplicadas na estrutura são absorvidas internamente pelas forças elásticas do elemento que se manifestam através da deformação da estrutura. Essa deformação da estrutura representa, em termos de energia, a absorção dos carregamentos externos pela mesma (ALVES FILHO, 2013).

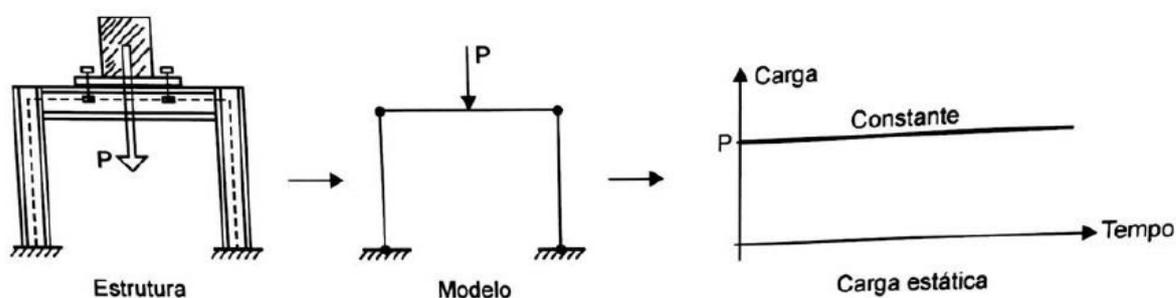


Figura 10: Estrutura sobre ação de carregamento externo estático

(Fonte: adaptado de ALVES FILHO, 2013)

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do projeto de pesquisa, utilizou-se o software Solidworks para a modelagem das peças e conjuntos alvo do estudo, e o software FEMAP para a análise estrutural com enfoque no MEF.

O conjunto de dados utilizados foi obtido por intermédio dos estudos realizados nas fontes primárias, através da prototipagem via software Solidworks e das análises e montagens das estruturas estudadas in loco.

O referencial teórico foi utilizado como fonte secundária de informação para embasamento e estabelecimento de conceitos relativos aos processos de soldagem e aos elementos finitos, sob o viés da pesquisa bibliográfica.

A metodologia de pesquisa de campo também foi utilizada, tendo em vista o processo de acompanhamento presencial da montagem das chapas A e B no teto do ônibus, para fins de inspeção.

Considerando que a pesquisa descritiva exige do investigador uma série de dados sobre o que deseja pesquisar, associou-se esta às demais, visando à descrição dos fatos e fenômenos de determinada realidade (TRIVIÑOS, 1987). Para o autor, os estudos descritivos “podem ser criticados devido ao fato de existir uma descrição exata dos fatos e dos fenômenos. Estes fogem da possibilidade de verificação através da observação.” Ainda para o referido autor, “às vezes não existe por parte do investigador um exame crítico das informações, e os resultados podem ser equivocados” (TRIVIÑOS, 1987, p. 112).

O método quantitativo igualmente foi utilizado, com o intuito de se buscar dados exatos, a exemplo da carga exercida sobre as chapas A e B, associando a este o método qualitativo, em virtude da necessidade de interpretação dos resultados após a simulação, o que refletiu no resultado final. De acordo com os estudos de Kirschbaum (2013, p. 180),

as pesquisas quali são comumente associadas a interesses de pesquisa tipicamente subjetivistas, pois cabe interpretação das informações. Em contraponto, pesquisas quanti geralmente respondem às exigências do paradigma positivista, cujo interesse de pesquisa é centrado no estabelecimento de leis causais, ou seja, buscando compreender e entender os significados por trás das respostas, isso leva a dados exatos, que inibem a interpretação das informações.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o objetivo de comportar volumes, como mochilas e pequenas malas, o porta-pacote é um componente típico do modelo de ônibus rodoviário.

A Figura 11 demonstra algumas etapas do porta-pacote, evidenciando seu suporte na primeira parte; logo ao lado, exibe seu posicionamento dentro do ônibus, por fim, fica explícita a estrutura onde é fixado.



Figura 11: Informações do componente porta-pacote

(Fonte: O autor, 2019)

O projeto de pesquisa teve como objeto de estudo duas chapas metálicas semelhantes, sendo que a principal diferença entre elas é um furo, localizado no centro de uma das versões. Para facilitar o entendimento, a chapa A é compreendida como versão sem furo, e a chapa B a versão que corresponde ao modelo de chapa com furo central.

A chapa A é utilizada ao longo do teto do ônibus rodoviário, soldada na região que entra em contato com o tubo principal do teto, conforme Figura 12.

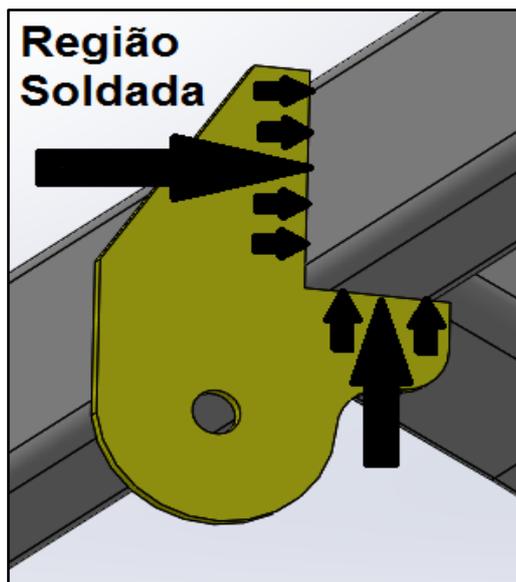


Figura 12: Região da solda na chapa A

(Fonte: O autor, 2019)

Já a chapa B é menos utilizada nos projetos do teto, pois somente é necessária quando seu posicionamento coincide com os tubos verticais. Consequentemente, deve ser soldada tanto no tubo principal do teto quanto no tubo vertical onde é posicionada. A Figura 13 demonstra esse posicionamento.

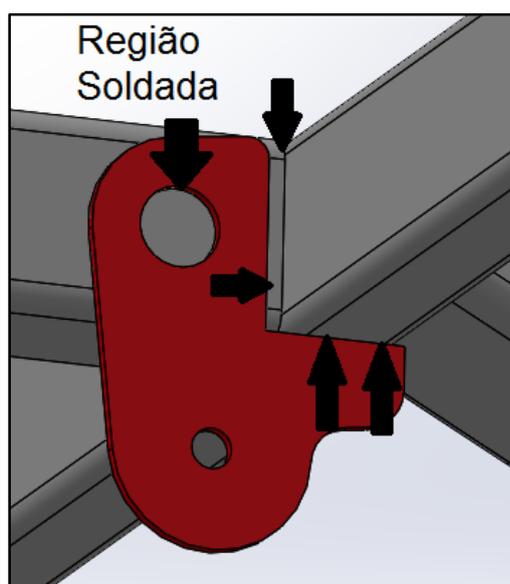


Figura 13: Região da solda na chapa B

(Fonte: O autor, 2019)

Devido ao fato de o suporte do porta-pacote precisar de duas fixações, as chapas utilizadas para o respectivo suporte sempre são soldadas em duplas, ou melhor, para cada suporte há duas chapas, conforme ilustra a Figura 14.

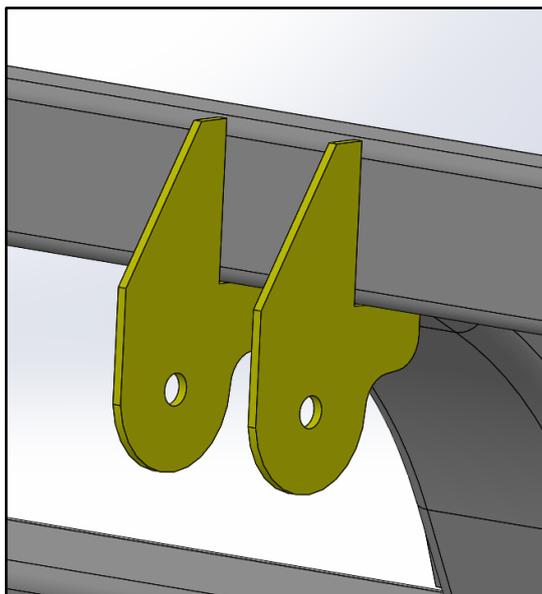


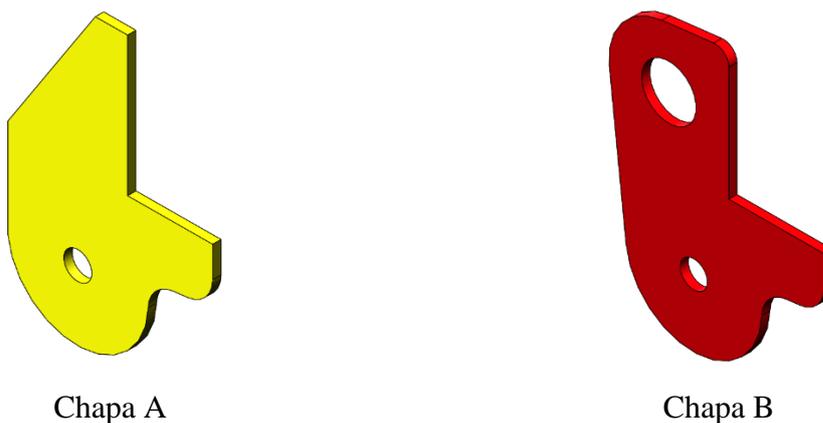
Figura 14: Demonstração referente ao posicionamento das chapas

(Fonte: O autor, 2019)

3.2 MODELAMENTO DAS CHAPAS

Para modelagem do experimento, fez-se uso do software SolidWorks, versão 2018, tomando como referência as medidas contidas nos projetos das chapas, localizados no Banco de Dados da empresa.

Inicialmente, foram modeladas as duas versões de chapas metálicas A e B, utilizadas na estrutura do teto e os tubos de aço que influenciam seus posicionamentos, conforme Figuras 15, 16 e 17. Para todos os componentes, foi atribuído o material Aço AISI 1020, disponibilizado na biblioteca do software SolidWorks 2018 (Figura 18).



Chapa A

Chapa B

Figura 15: Vista isométrica das chapas A e B

(Fonte: O autor, 2019)

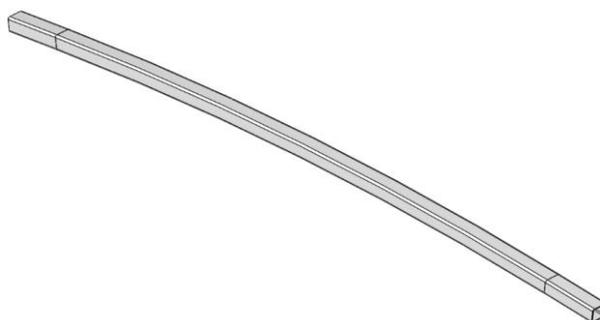


Figura 16: Vista isométrica do tubo central do teto

(Fonte: O autor, 2019)

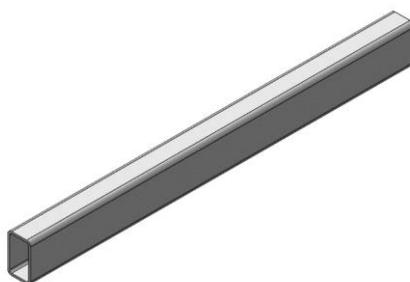


Figura 17: Vista isométrica de uma seção do tubo lateral do teto

(Fonte: O autor, 2019)

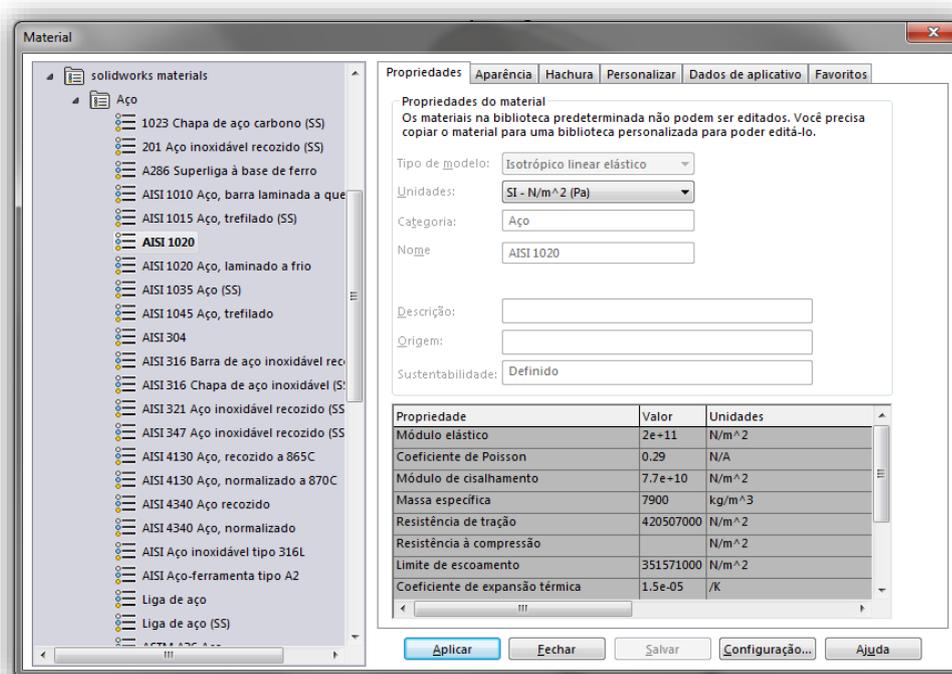


Figura 18: Propriedades mecânicas do aço fornecidas pelo software

(Fonte: O autor, 2019)

Após o modelamento individual de cada componente, foram criadas duas montagens que correspondem ao conjunto das estruturas (Figuras 19 e 20), uma para cada versão das chapas metálicas A e B.

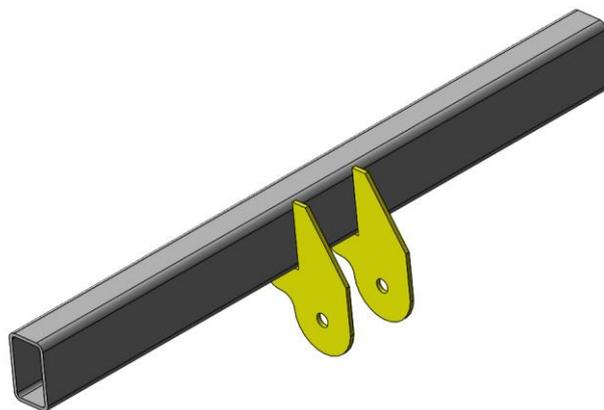


Figura 19: Conjunto A modelado no software SolidWorks

(Fonte: O autor, 2019)

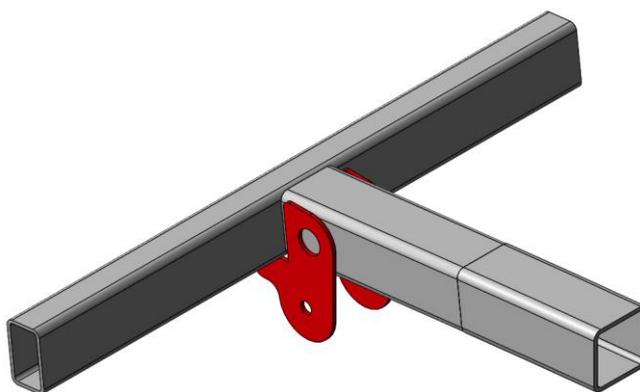


Figura 20: Conjunto B modelado no software SolidWorks

(Fonte: O autor, 2019)

3.3 ACOMPANHAMENTO NA LINHA DE PRODUÇÃO

Nessa etapa, acompanhou-se in loco o processo de soldagem das chapas A e B na estrutura do teto de um ônibus (Figura 21). É conveniente salientar que a união dos componentes ocorre pelo processo de soldagem MIG, utilizando-se, no intento de proteger a região soldada dos gases da atmosfera, o Argônio como gás de proteção.



Chapa A



Chapa B

Figura 21: Chapas A e B posicionadas antes da pintura

(Fonte: O autor, 2019)

Na Figura 21, é possível verificar as regiões onde é realizada a união dos componentes, o que é altamente relevante. Isso porque, para realizar a simulação na etapa seguinte, foi necessário primeiramente avaliar as regiões nas quais ocorreram a solda, para, então, criar no software os elementos de transição na malha do conjunto.

Após a solda de todos componentes da estrutura do teto, realizou-se uma pintura (Figura 22) em todo conjunto, visando revestir e fornecer proteção contra oxidação das regiões soldadas. Por fim, foram inspecionadas as demais regiões onde ocorrem as soldas.



Chapa A



Chapa B

Figura 22: Chapas A e B após pintura

(Fonte: O autor, 2019)

Ao se observar a Chapa A, fica visível que a solda é realizada em todo o contado entre chapas e o tubo lateral. Já na chapa B, ocorre da mesma maneira, só com a adição da solda na região do furo da chapa. Em ambos os casos, foi replicada essa união no software FEMAP através dos elementos de transição.

3.4 SIMULAÇÃO NO SOFTWARE FEMAP

Após a coleta de dados a respeito da região onde há a solda, o passo seguinte foi a simulação via software FEMAP, software este focado em análise estrutural por elementos finitos.

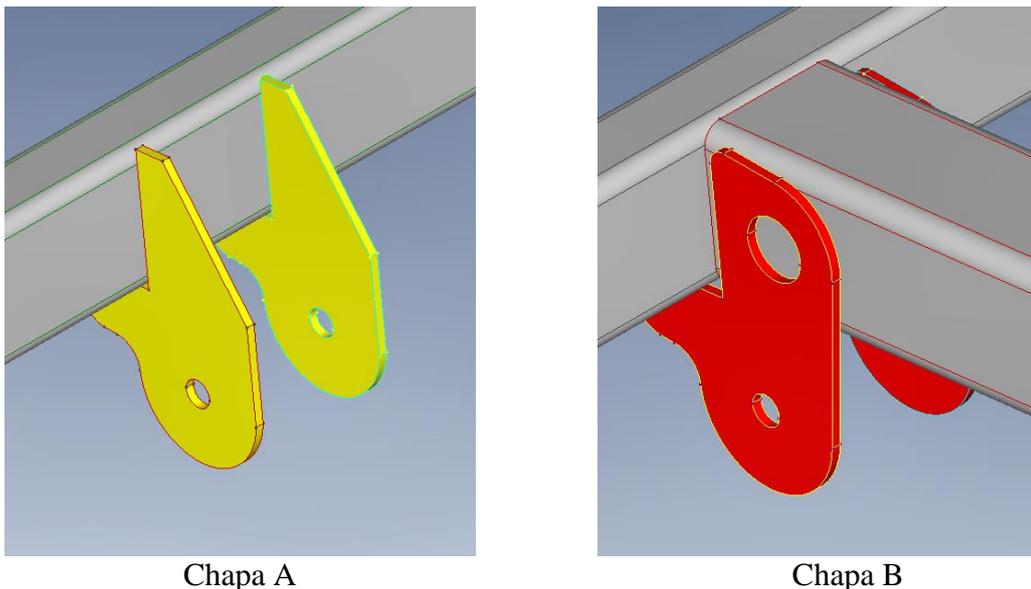
Ressalta-se que, para realizar uma análise estrutural correta pelo MEF, é fundamental a sequência de passo a passo, como o descrito a seguir:

- a) importação/criação do modelo a ser analisado;
- b) registro dos materiais que compõem cada componente da análise;
- c) definição dos elementos que compõem a malha;
- d) criação dos elementos de transição;
- e) definição das regiões de restrição;
- f) fornecimento das forças atuantes no modelo;
- g) realização da análise.

Definido o breve roteiro, este foi seguido para os conjuntos das chapas A e B, para que ao final das observações, descrições e análises, fosse possível estabelecer uma comparação entre os dois conjuntos.

3.4.1 Importação dos modelos

Como passo inicial, a importação dos modelos criados no software Solidworks foram transportados para o software FEMAP (Figura 23). Com isso, pôde-se evidenciar que a geometria permaneceu a mesma, no entanto, foi necessário que a propriedade do material fosse configurada em conformidade com o passo seguinte explicitado no item 3.4.



Chapa A
Chapa B
Figura 23: Conjunto das chapas A e B importadas no software FEMAP

(Fonte: O autor, 2019)

3.4.2 Configuração dos materiais

Embora a geometria seja importada, as propriedades não seguem o mesmo procedimento. Sendo assim, foi preciso configurar os materiais utilizados nos componentes. Para esse passo, serviram como referência as propriedades do aço 1020 informadas na biblioteca do Solidworks, no momento da configuração do material (Figura 24).

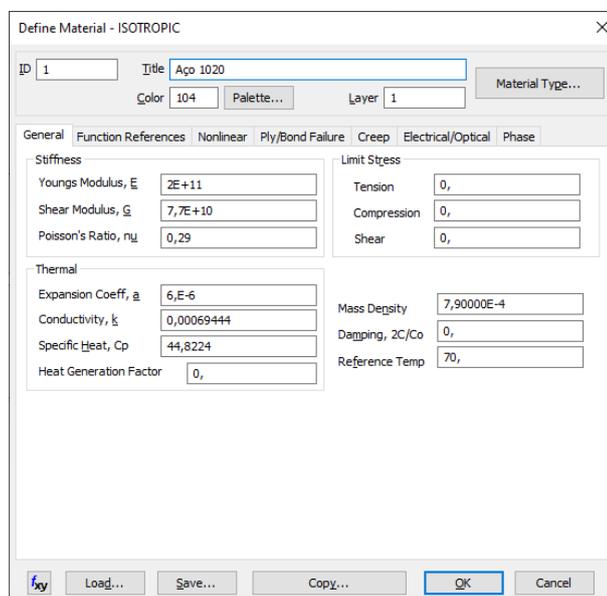


Figura 24: Definição do material utilizado nos componentes da análise

(Fonte: O autor, 2019)

3.4.3 Definição dos elementos que compõem a malha

Dentre os vários elementos disponíveis no MEF, o elemento que melhor representou a condição das simulações realizadas foi o elemento de casca, por se tratar de uma análise de chapas metálicas com pequena espessura. Salienta-se que, neste caso, os elementos retangulares e triangulares variam conforme a necessidade da geometria (Figura 25).

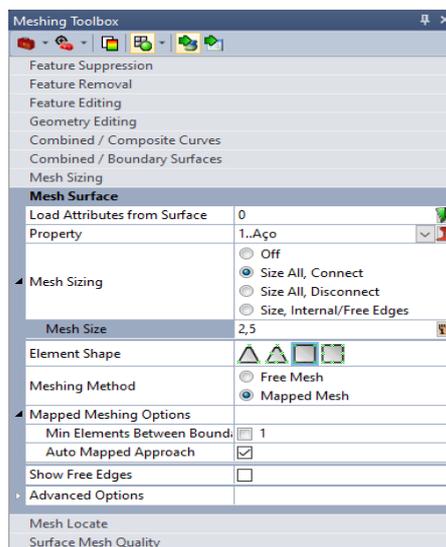


Figura 25: Definição dos elementos utilizados para formar a malha

(Fonte: O autor, 2019)

A Figura 26 apresenta as chapas A e B em um modelo discretizado em vários elementos de casca.

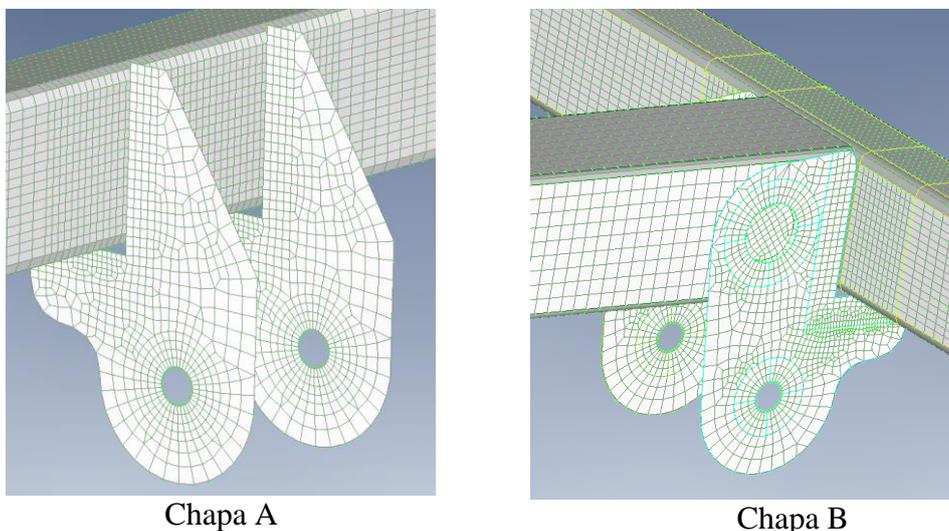


Figura 26: Conjunto das chapas A e B discretizado em vários elementos de casca

(Fonte: O autor, 2019)

3.4.4 Elementos de transição

Após finalizada a malha dos componentes do modelo, são necessários outros elementos que conectam os componentes, denominados elementos de transição os quais, no protótipo físico, correspondem à solda de união das peças. Os elementos são atribuídos com o mesmo material, entretanto, a criação é feita de forma manual, informando quais os nós que devem ser interligados. No caso do conjunto da chapa A, essa ligação é simples, pois a união ocorre entre tubo e chapas em suas arestas de contato. Na Figura 27, os elementos estão na coloração branca.

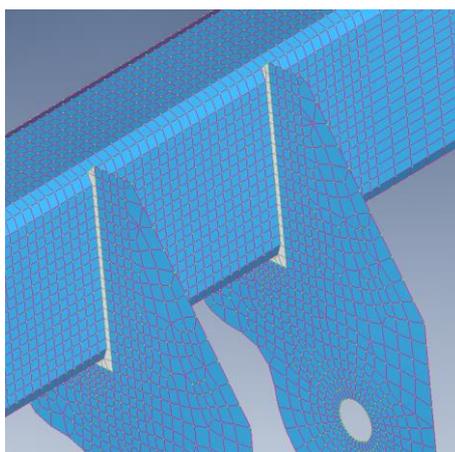


Figura 27: Elementos de transição no conjunto da chapa A

(Fonte: O autor, 2019)

Distintamente, no conjunto da chapa B, a ligação é um pouco mais complexa, devido à junção ocorrer entre chapas e tubos, e também, entre tubo horizontal e tubo vertical. Da mesma maneira como se demonstrou para o conjunto da chapa A, na Figura 28, os elementos de transição apresentam-se na coloração branca.

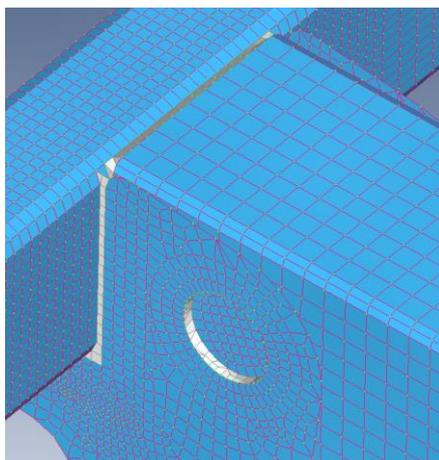


Figura 28: Elementos de transição no conjunto da chapa B

(Fonte: O autor, 2019)

3.4.5 Definição das regiões de restrição

Um item fundamental é a restrição de movimento, haja vista que, sem esta informação, o software “entende” que o objeto em análise está solto em todos os eixos. Para isso não ocorrer, foram informados os nós que estavam restritos à movimentação, seja em translação ou rotação, ou seja, os nós engatados.

Na Figura 29, é possível verificar que o conjunto da chapa A ficou restrito às extremidades do tubo lateral.

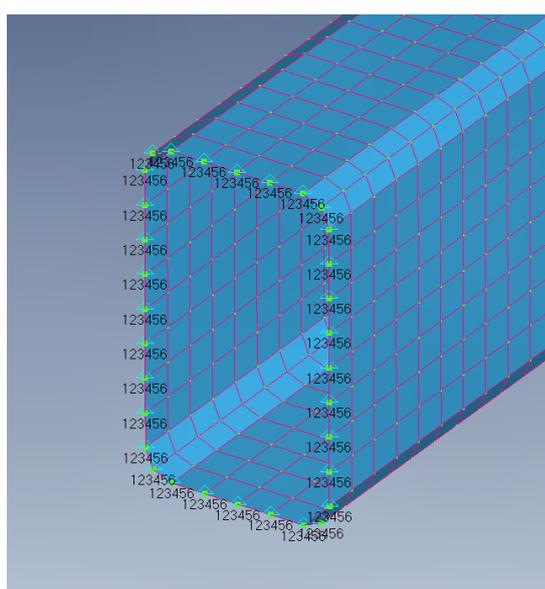


Figura 29: Região fixada no tubo lateral

(Fonte: O autor, 2019)

Já no conjunto da chapa B, as extremidades do tubo lateral foram restritas a uma das extremidades do tubo central.

3.4.6 Fornecimento das forças atuantes no modelo

A última informação cedida ao software é a carga aplicada em cada uma das chapas nas simulações. Para se chegar ao valor, foi utilizada uma média do peso do componente porta-pacote, utilizado nos ônibus rodoviários, pois em decorrência da variação do tamanho do ônibus, há variação no comprimento do porta-pacote e de seu peso. À vista disso, o valor médio de um dos porta-pacotes é de 190 quilos (kg).

Outro valor a ser considerado no cálculo da carga é o peso dos volumes que eventualmente são colocados sobre os porta-pacotes. Esse valor se baseia no Regulamento nº 107, da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNICE, 2018), o qual indica que, para fins de cálculo, cada passageiro pode carregar 3 kg de bagagem consigo. Por conseguinte, essa carga deve ser multiplicada pela quantidade de pessoas. Devido ao fato de existirem dois porta-pacotes por ônibus, posicionados um em cada lado, para o cálculo dessa carga, utilizou-se a Equação 3:

$$C_b = Q_p * 3 \text{ kg} \quad (3)$$

onde:

C_b = carga de bagagem de mão;

Q_p = quantidade de pessoas referente ao lado que há mais poltronas, ou seja, o lado que cabe o maior número de pessoas.

Assumindo o pior caso, com um ônibus comportando 56 lugares, ou seja, 28 poltronas em cada lado, deve-se fazer os devidos cálculos com a Equação 4:

$$C_t = P_p + C_b \quad (4)$$

$$C_t = (190 \text{ kg} * 1,2) + (28 * 3 \text{ kg})$$

$$C_t = 312 \text{ kg}$$

sendo que foi multiplicado o P_p (Peso médio do porta-pacote sem bagagens) por 1,2. Esse valor foi utilizado como fator de segurança, pelo fato de ser uma média entre os pesos dos porta-pacotes. Já o C_b (Carga de bagagem) foi calculado para a situação com máxima carga. Desse modo, a carga total exercida pelo porta-pacote foi de 312kg.

Um detalhe importante é o fato de o software utilizar a carga em Newtons (força de aceleração da gravidade igual a $9,81 \text{ m/s}^2$). Nesse sentido, foi preciso realizar a conversão conforme Equação 5.

$$C_t = C_t * 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (5)$$

$$C_t = 312 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$C_t = 3,06 \text{ Kn}$$

Por fim, foi necessário dividir essa carga pela quantidade de chapas utilizadas para fixar o componente porta-pacote, ou seja, distribuir a carga igualmente entre todas as chapas.

Convém ressaltar que, para cada lado do ônibus, utiliza-se de 14 a 18 chapas para fixação. Sendo assim, foi calculada a carga, aplicada individualmente em cada chapa, em conformidade com a Equação 6:

$$C_i = C_t / qtC \quad (6)$$

$$C_i = 3,06 \text{ kN} / 14$$

$$C_i = 218,6 \text{ N}$$

onde:

C_i = carga aplicada individualmente em cada chapa;

qtC = quantidade de chapas fixadas.

Por fim, no software FEMAP, foi informada a direção e a grandeza da força, juntamente com a indicação dos nós onde a carga atua (Figura 30).

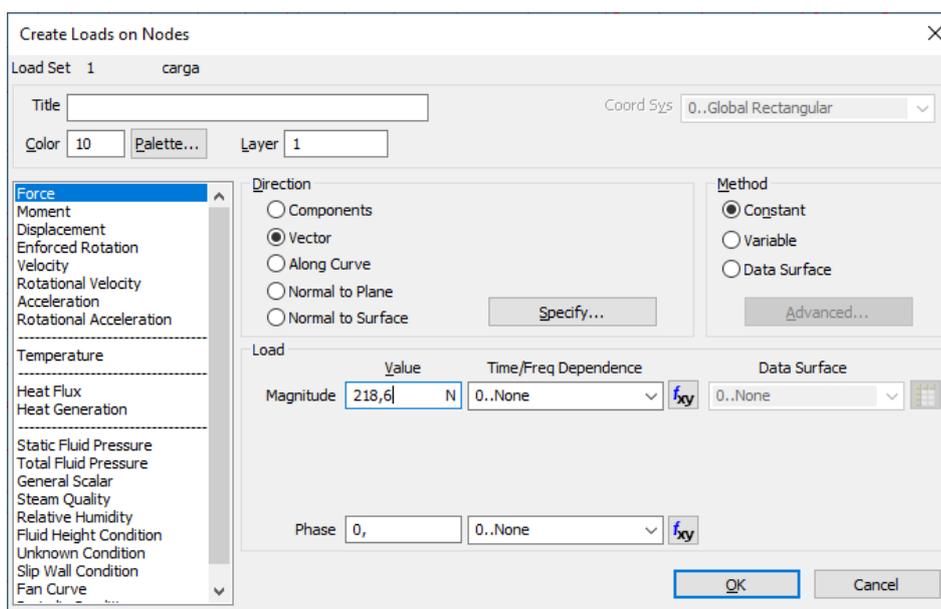


Figura 30: Definição da carga a ser aplicada

(Fonte: O autor, 2019)

A Figura 31 apresenta a região na qual a carga é aplicada em ambas as chapas empregadas na estrutura.

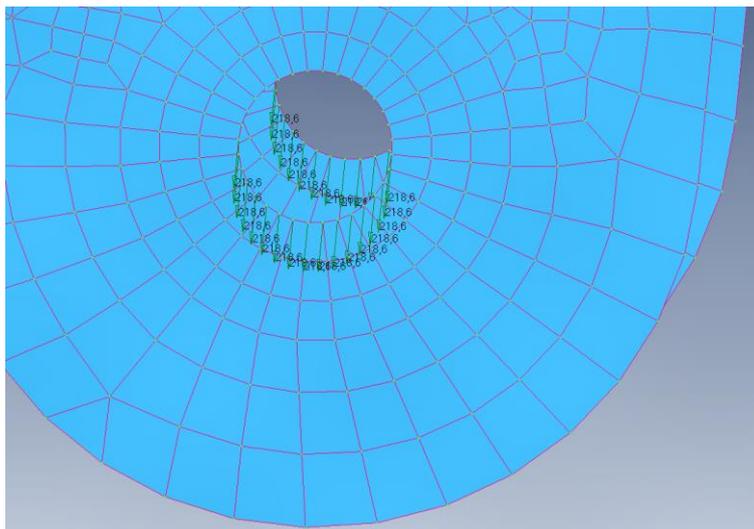
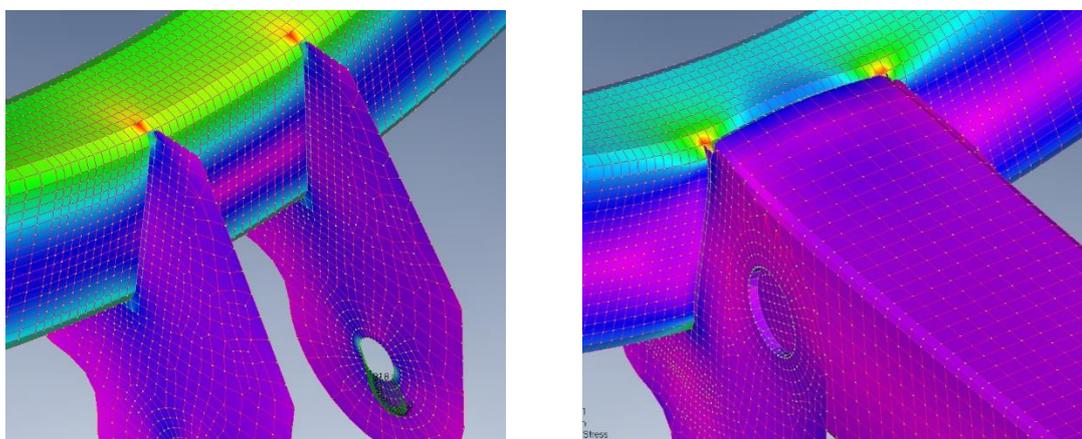


Figura 31: Região onde a carga é aplicada em ambas as chapas

(Fonte: O autor, 2019)

3.4.7 Realização da análise estática

Após o fornecimento de todas as informações, gerou-se a análise dos conjuntos, sendo estas estáticas, isto é, com carga constante ao longo do tempo. Na Figura 32, é possível visualizar a concentração de tensão expressa junto ao conjunto das chapas A e B.



Chapa A

Chapa B

Figura 32: Concentração de tensão no conjunto das chapas A e B

(Fonte: O autor, 2019)

A Figura 32 mostra que, no conjunto da chapa A, as regiões com maior concentração de tensão (apresentadas em vermelho) são as quinas do tubo lateral em contato com as chapas. O mesmo ocorre no conjunto da chapa B.

De forma complementar, a Figura 33 apresenta os valores numéricos correspondentes à concentração de tensão gerada através da simulação sobre as chapas A e B, podendo-se identificar um pico de concentração de tensão menor na chapa B em comparação com os valores da chapa A.

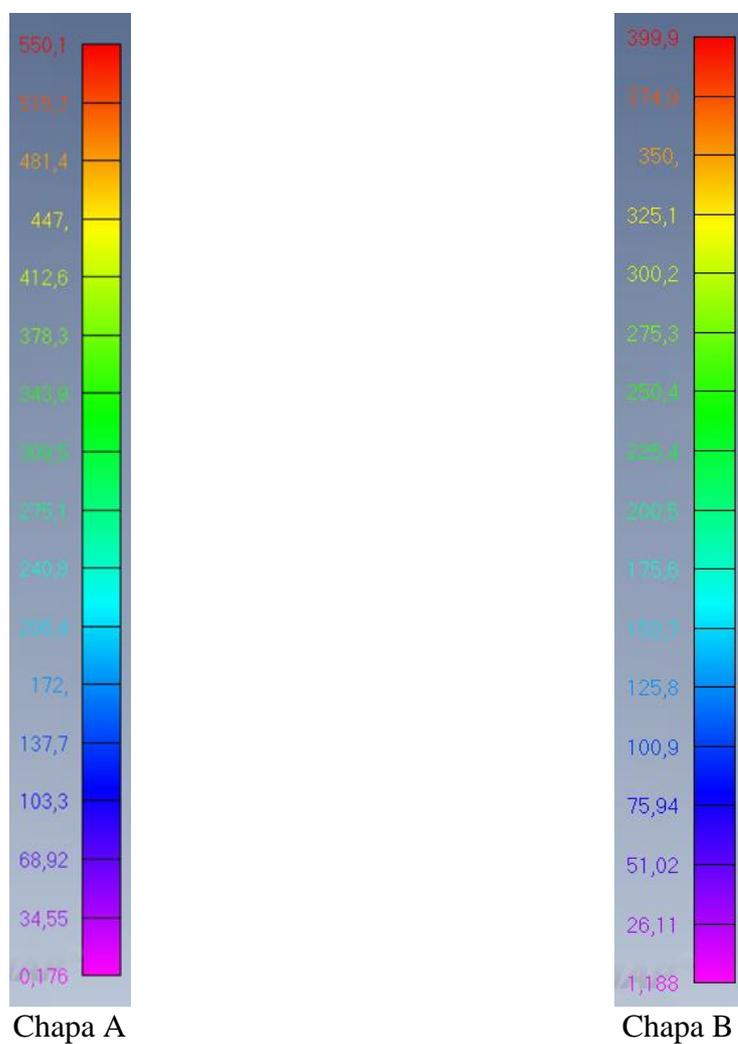


Figura 33: Valores das tensões

(Fonte: O autor, 2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das análises realizadas no conjunto das chapas A e B, pôde-se evidenciar a região em que ocorre a maior concentração de tensão e, através dela, foi possível realizar a comparação. Para o estabelecimento de uma comparação entre as regiões com maior tensão nos conjuntos A e B, aplicou-se a Equação 7:

$$R_{ab} = \sigma_A / \sigma_B \quad (7)$$
$$R_{ab} = 550,1 \text{ N/m}^2 / 399,9 \text{ N/m}^2$$
$$R_{ab} = 37,56\%$$

onde:

R_{ab} = relação da maior tensão do conjunto A sobre a maior tensão do conjunto B.

Verifica-se, portanto, que o conjunto A tem uma zona de concentração equivalente a 37,56% de tensão maior. Uma justificativa plausível para o resultado é o fato do conjunto B ter um tubo central que, além de ter a função de estruturar a parte central do teto do ônibus, dissipa-se no tubo lateral no qual ocorre o processo de soldagem, retendo, assim, parte da tensão aplicada na chapa (Figura 34).

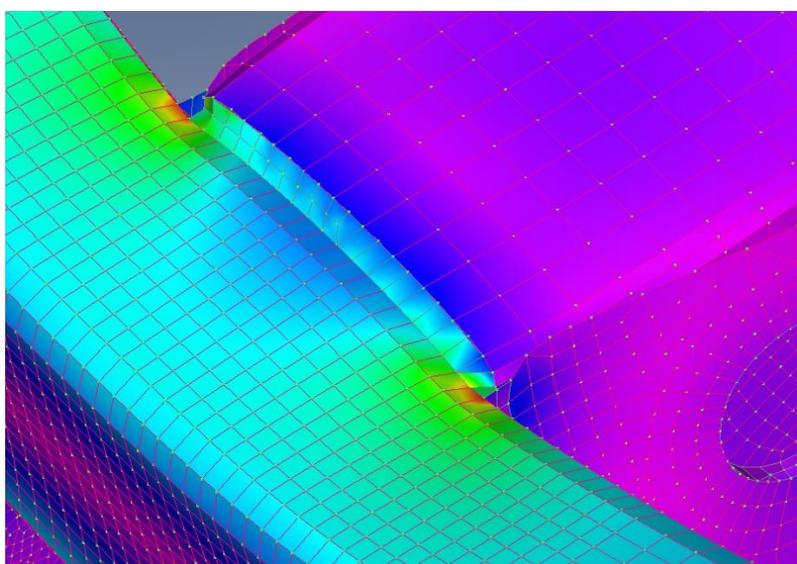


Figura 34: Região onde a tensão é dissipada no conjunto da chapa B

(Fonte: O autor, 2019)

É importante destacar que, por se tratar de uma análise estática, variáveis como fadiga e vibração não foram consideradas no experimento. Destarte, a inclusão dessas variáveis pode resultar em diferentes tensões de concentração.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visando otimizar processos e reduzir custos, para que a empresa, na qual a pesquisa foi realizada, possa se tornar mais competitiva no meio em que atua, há necessidade de mais estudos e pesquisas, tendo em vista a aplicação de melhorias. Isso porque o mercado em que a mesma está inserida é altamente competitivo. Sob essa consideração, quaisquer que sejam os ganhos podem influenciar diretamente na satisfação dos clientes e expandir as ações da empresa no mercado de atuação.

Tendo em vista que o resultado final da comparação entre as duas chapas A e B modeladas apresentou uma diferença de aproximadamente 37% na concentração de tensão, infere-se que a ideia de padronização na utilização de somente um modelo de chapa metálica é extremamente válida. Nessa perspectiva, a chapa B pode ser utilizada em ambos os conjuntos referenciados, por apresentar a mesma área de soldagem da chapa A, com o adicional de soldagem diante da existência do tubo central de teto.

Embora as chapas A e B sejam semelhantes, o que conseqüentemente torna o custo de confecção também aproximado, o ganho monetário por trás da comparação não está na exclusão de uma das versões das chapas utilizadas, mas sim, no ganho indireto que a alteração proporciona.

Sob essa lógica, a padronização de um item que eventualmente é foco de erro dentro do setor da engenharia da empresa favorece a produtividade e o rendimento. Assim sendo, erros de quantidade, frequentes em determinados setores, em virtude da similaridade das chapas e regiões de fixação parecidas, que confundem, muitas vezes, os projetistas que, por sua vez, confundem a chapa certa a ser utilizada em determinado local podem ser evitados. Tais erros demandam tempo para corrigi-los e este tempo poderia ser melhor utilizado no desenvolvimento de itens com valor agregado maior.

Com este estudo, depreende-se que o MEF é uma ferramenta de grande importância e, apesar de ter sido inicialmente associado a aplicações estruturais, o método pode ser de grande valia e aplicado em outras áreas de engenharia e análise, como nas áreas de transferência de calor, escoamento de fluidos, ondas eletromagnéticas e hidrodinâmica.

Outrossim, considerando que a empresa pode se empenhar na execução do emprego das análises feitas neste estudo e obstinada à reaplicação em outras regiões dos ônibus rodoviários, com o intuito de realizar melhorias e reduzir custos, o presente estudo tem sua relevância. Ademais, pode ser utilizado como exemplo para aplicação em outras indústrias com o propósito

de aperfeiçoamento a quem produz e coloca o produto no mercado e de conforto para os que deste se beneficiam.

Enfatiza-se também que o presente estudo agrega maior conhecimento ao meio acadêmico, podendo este ser impulsionador para análises com o método dos elementos finitos, uma vez que é de fundamental importância que estes sejam amplamente explorados tanto em cursos da Graduação quanto nos de Pós-Graduação devido à sua abrangência.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no Banco de Dados que se iniciou com este estudo, sugere-se:

- a) execução de análises dinâmicas, com foco na fadiga e/ou vibração do componente porta-pacote;
- b) replicação das análises em conjuntos mais complexos do ônibus rodoviário.

REFERÊNCIAS

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

BRANDI, S. D.; WAINER, E.; MELLO, F. D. H. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1992.

GERDAU S. A. **Catálogo Barras e Perfis**. Linha de aços SAE. 2013.

GONÇALVES, F. J. F; MARTINS, F. **Tecnologia dos Materiais I**. Santa Catarina: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Unidade de Araranguá, Curso Técnico em Eletroeletrônica, jul. 2005.

KIRSCHBAUM, C. Decisões entre pesquisas quali e quanti sob a perspectiva de mecanismos causais. **Rbcs**, São Paulo, v. 28, n. 82, p.180-180, jun. 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcsoc/v28n82/v28n82a11>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2009.

MIRLISENNA, G. Método dos Elementos Finitos: o que é? **ESSS**, 22 jan. 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 08 ago. 2019.

NETO, B. B.; SCARMÍNIO, I. S; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas, SP: Editora da UNESP, 1995.

PEREIRA, C. N. **Análise estrutural estática por elementos finitos de um chassi veicular tipo spaceframe**. 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás. Regional Catalão, Catalão, GO, 2016.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PINHEIRO, A. C. F. B. **Estruturas metálicas**: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2005.

SCHÖN, C. G. **Mecânica de Matérias**: Fundamentos e Tecnologia do Comportamento Mecânico. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

SIEMENS. **Minimize costly prototyping & bring your products to market faster**. 2019. Disponível em: <<https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/products/simcenter/femap.html>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

SORIANO, H. L. **Elementos Finitos** - Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

SUBSTECH. Substances and Technologies. **Catalog**: Carbon steel SAE 1020. USA, jun. 2012.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais**: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo: Atlas, 1987.

UNICE - Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa. Regulamento nº 107. Disposições uniformes relativas à homologação de veículos das categorias M2 ou M3 no que respeita às suas características gerais de construção. **Jornal Oficial da União Europeia** (Atos não legislativos), p. 112, 2018. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.052.01.0001.01.POR>. Acesso em: 04 out. 2019.

VAZ, L. E. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.