

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW
DA FONSECA
Departamento de Mecânica
Engenharia Mecânica**

**Cristian Maia Matos
Emerson Souvain**

DIMENSIONAMENTO DE UM DEFLETOR VERTICAL PARA NAVIOS PLSV

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2025**

**Cristian Maia Matos
Emerson Souvain**

DIMENSIONAMENTO DE UM DEFLETOR VERTICAL PARA NAVIO PLSV

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel Engenharia Mecânica, do Departamento de Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Manuel Calas
Lopes Pacheco
Co-orientador: Bruno Felipe Silva

**Rio de Janeiro
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M433 Matos, Cristian Maia
Dimensionamento de um defletor vertical para navios PLSV /
Cristian Maia Matos [e] Emerson Souvain – 2025.
87f.: il (algumas color.) , enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.

Bibliografia: f. 86-87.

Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco.

Co-orientador: Bruno Felipe Silva

1. Engenharia mecânica. 2. Engenharia de materiais.
3. Tubulação offshore. 4. Materiais – Fadiga. 5. Análise estrutural
I. Souvain, Emerson. II. Pacheco, Pedro Manuel Calas
Lopes (Orient.). III. Silva, Bruno Felipe (Coorient.). IV. Título.

CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

DEDICATÓRIA

Por Cristian Maia Matos

Dedico este trabalho a minha mãe e meu pai que sempre acreditaram e investiram no meu futuro, me permitindo ser a continuação do sonho deles.

Por Emerson Souvain

Dedico este trabalho a minha família que me ensinou a nunca desistir dos meus sonhos e sempre batalhar pelos meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Por Cristian Maia Matos

Agradeço a minha família que me deu todo suporte necessário durante essa jornada, principalmente meu pai e minha mãe que me deram todas as oportunidades de progredir no curso e na vida. Aos meus amigos que sempre me acompanharam e me deram o ânimo necessário para enfrentar todos os desafios. A minha dupla que me acompanhou durante esse incrível desafio, e aos meus orientadores pela orientação e apoio durante todo o trabalho.

Por Emerson Souvain

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me guiar e fortalecer durante este grande desafio. Agradeço também à minha família e à minha noiva pelo apoio incondicional. Um agradecimento especial aos meus pais, que me ensinaram a nunca desistir dos meus objetivos e a sempre dar o meu melhor para alcançá-los. Agradeço à minha dupla, que compartilhou comigo essa difícil jornada, e aos meus orientadores, pelos valiosos conselhos e conhecimentos fornecidos.

EPÍGRAFE

**"A persistência é o caminho do êxito."
- Charles Chaplin.**

RESUMO

MAIA, Cristian e SOUVAIN, Emerson. **Dimensionamento de um defletor vertical para navios PLSV**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Cidade, 2025.

Os defletores verticais de linhas flexíveis são estruturas utilizadas em navios PLSV (*Pipe Laying Support Vessel*). Essas estruturas estão fixadas no deck da embarcação e atuam na operação do lançamento da linha flexível, guiando esse componente para a direção desejada, evitando possíveis curvaturas que possam exercer esforços prejudiciais à linha e promovendo ganhos operacionais e de segurança. O objetivo deste trabalho é analisar os esforços presentes no defletor vertical e propor uma geometria de defletor para situações reais de carregamento. A primeira abordagem envolve o estudo analítico da estrutura com objetivo de determinar os esforços e tensões atuantes. Em uma segunda abordagem serão realizadas análises através do método elementos finitos utilizando o pacote computacional Ansys Workbench para estimar os valores de tensão/deformação, além de simular novas geometrias de forma reduzir a espessura da chapa do defletor. Dessa forma, será possível avaliar como os carregamentos influenciam no dimensionamento do defletor, e assim estabelecer uma geometria aperfeiçoada com reforços estruturais para a redução da espessura da chapa.

Palavras-chave: Defletor; linhas flexíveis. dimensionamento. navios PLS.

ABSTRACT

MAIA, Cristian e SOUVAIN, Emerson. **Design of a vertical deflector for PLSV vessels**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Federal Center of Technological Education. Rio de Janeiro. City, 2025.

Vertical deflectors for flexible lines are structures used on PLSVs (Pipe Laying Support Vessels). These structures are fixed to the deck of the vessel and act in the launching operation of the flexible line, guiding this component in the desired direction, avoiding possible curvatures that could exert harmful stress on the line and promoting operational and safety gains. The aim of this work is to analyze the stresses present in the vertical deflector and propose a deflector geometry for real loading situations. The first approach involves an analytical study of the structure to determine the acting stresses and strains. In a second approach, analysis will be carried out using the finite element method using the Ansys Workbench computational package to estimate the stress/strain values, as well as simulating new geometries to reduce the thickness of the deflector plate. In this way, it will be possible to evaluate how the loads influence the design of the deflector and thus establish an improved geometry with structural reinforcements for reducing the thickness of the plate.

Keywords: Deflector; flexible lines. sizing. PLSV Vessel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Defletor vertical	15
Figura 2 - Crescimento da demanda de petróleo ao longo dos anos	18
Figura 3 - Aumento da profundidade de exploração ao longo dos anos	19
Figura 4 - Campo de extração de petróleo	20
Figura 5 - Esquema de um duto flexível.....	20
Figura 6 - Navio PLSV.....	21
Figura 7 - Bobina de dutos flexíveis	22
Figura 8 - Tracionador de linhas flexíveis.....	22
Figura 9 - Guincho A&R	23
Figura 10 - Guincho auxiliar	23
Figura 11 - Navio PLSV com torre de lançamento	24
Figura 12 - Mesa de trabalho	25
Figura 13 - Defletor vertical	26
Figura 14 - Arranjo típico de navio HLS	27
Figura 15 - Típico arranjo VLS	27
Figura 16 - Amarração para realização da operação	28
Figura 17 – Diferença das geometrias	32
Figura 18 - Geometria 3D simplificada curva	33
Figura 19 - Vistas do modelo simplificado.....	33
Figura 20 - Vista Isométrica estrutura plana.....	34
Figura 21 - Vista frontal e lateral esquerda da estrutura plana	35
Figura 22 – Vista frontal da geometria	36
Figura 23 – Vista isométrica da geometria	36
Figura 24 – Propriedades do aço AH36	37
Figura 25 Propriedades do aço VMB350	37
Figura 26 - Dimensionais do aço VMB 350	37
Figura 27 - Viga tri engastada no plano XY.....	39
Figura 28 - Viga mono engastada no plano YZ.....	39
Figura 29 – Modelo numérico chapa plana	40
Figura 30 - Modelo numérico da estrutura simplificada completa	41
Figura 31 - Modelo numérica estrutura aperfeiçoada.....	41
Figura 32 - Passagem da linha pelo defletor.....	43
Figura 33 - Transmissão flexível: correia/polia.....	44
Figura 34 - Diagrama de corpo livre no eixo XY.....	45
Figura 35 - Diagrama de corpo livre no plano YZ.....	49
Figura 36 - Primeira seção plano XY.....	50
Figura 37 - Segunda seção plano XY.....	51

Figura 38 - Primeira seção plano YZ.....	52
Figura 39 - Segunda seção plano YZ.....	54
Figura 40 - Localização do tensor	56
Figura 41 - Tensões geradas pelos momentos	56
Figura 42- Modelos 1D, 2D e 3D.....	59
Figura 43- Modelamento estrutura plana tri-engastada.....	60
Figura 44-Suporte fixo estrutura plana tri-engastada.	61
Figura 45-Pressão estrutura plana tri-engastada.	61
Figura 46-Força de atrito estrutura plana tri-engastada.	61
Figura 47-Aceleração da gravidade estrutura plana tri-engastada.....	62
Figura 48- Condições de contorno estrutura plana com engaste longitudinal.	63
Figura 49-Modelamento estrutura simplificada curva.....	64
Figura 50-Modelamento estrutura simplificada curva.....	64
Figura 51-Ferramenta Share do Space Claim.....	65
Figura 52-Aplicando a ferramenta Share.	65
Figura 53 - Condições de contorno estrutura simplificada curva.....	66
Figura 54-Modelamento estrutura aperfeiçoada.....	67
Figura 55 - Condições de contorno da geometria aperfeiçoada.....	68
Figura 56- Resultados pedidos para as análises.....	70
Figura 57 - Malha estrutura simplificada plana tri-engastada	70
Figura 58 - Tensão máxima estrutura simplificada plana tri-engastada	71
Figura 59 - Deslocamento da estrutura simplificada plana tri-engastada.....	71
Figura 60 - Malha estrutura simplificada plana com engaste longitudinal	72
Figura 61 - Tensão de von Mises estrutura plana longitudinal.	73
Figura 62 - Deslocamento total estrutura plana longitudinal.	73
Figura 63 - Malha geometria simplificada curvada	75
Figura 64 - Tensão máxima na chapa da estrutura simplificada curva	75
Figura 65 - Filtros aplicados as tensões da chapa da estrutura simplificada curva...76	76
Figura 66 - Deslocamento da chapa da estrutura simplificada curva	77
Figura 67 - Tensão máxima combinada nos tubos.....	78
Figura 68 - Filtro aplicado as tensões dos tubos da estrutura simplificada curva.....	79
Figura 69 - A malha utilizada para a estrutura aperfeiçoada	80
Figura 70 - Tensão máxima da chapa estrutura aperfeiçoada	80
Figura 71 - Filtros aplicados as tensões da chapa da estrutura aperfeiçoada	81
Figura 72 - Deslocamento máximo da chapa estrutura aperfeiçoada	82
Figura 73 - Tensão máxima combinada nos tubos estrutura aperfeiçoada	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis fixas da simulação.	59
Tabela 2 Resultados modelo analítico	69
Tabela 3 - Convergência de malha para estrutura simplificada plana tri engastada .	70
Tabela 4 - Convergência de malha para estrutura simplificada plana com engaste longitudinal	72
Tabela 5 - Convergência de malha para estrutura simplificada curva tri engastada .	74
Tabela 6 - Convergência de malha Estrutura aperfeiçoada	79
Tabela 7 - Comparativo entre modelo analítico e numérico Plano	83
Tabela 8 - Comparativo entre geometrias	84

LISTA DE ABREVIações

A&R.	Abandonment and Recovery
DCL.	Diagrama de corpo livre
FDL.	Fator de dinamicidade de linha
HLS.	Horizontal Laying System
MCV.	Módulo de conexão vertical
MEF.	Método de elementos finitos
PLSV.	Pipe Lay Support Vessel
ROV.	Remotely Operated Underwater Vehicle
VLS.	Vertical Laying System

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS GERAIS	14
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 A IMPORTÂNCIA DA EXPLORAÇÃO DO PETRÓLEO	17
2.2 A EXPLORAÇÃO OFFSHORE	18
2.3 NAVIOS PLSV	21
2.3.1 Cestas e bobinas	21
2.3.2 Tracionadores	22
2.3.3 Guinchos.....	23
2.3.4 Torre de lançamento.....	24
2.3.5 Mesa de trabalho	24
2.3.6 Defletores	25
2.4 INSTALAÇÃO DAS LINHAS FLEXÍVEIS	26
2.4.1 Métodos de lançamento.....	26
2.4.2 Sequência de operação	27
2.5 ANÁLISES ESTRUTURAIS	29
2.6 MÉTODO ANALÍTICO	29
2.7 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	30
3 METODOLOGIA	31
3.1 ESTUDO DE CASO	31
3.1.1 Cargas atuantes.....	31
3.1.2 Geometria simplificada	32
3.1.3 Geometria aperfeiçoada	35
3.1.4 Material	36
3.2 METODOLOGIA ANALÍTICA.....	38
3.3 METODOLOGIA NUMÉRICA	40
3.3.1 Convergência de malha	42
4 MODELAMENTO	43
4.1 MODELAMENTO ANALÍTICO	43
4.1.1 Cálculo das forças atuantes.....	43
4.1.2 Cálculo das reações	44
4.1.3 Determinação do ponto crítico	50
4.1.4 Cálculo das tensões.....	55
4.2 MODELAMENTO NUMÉRICO	58

4.2.1 Tipo de modelagem	58
4.2.2 Parâmetros iniciais.....	59
4.2.3 Estrutura plana tri-engastada.....	60
4.2.4 Estrutura plana com engaste longitudinal	62
4.2.5 Estrutura simplificada curva	63
4.2.6 Estrutura aperfeiçoada.....	67
5 RESULTADOS	68
5.1 RESULTADOS DO MODELO ANALÍTICO	69
5.2 RESULTADOS DO MODELO NUMÉRICO	69
5.2.1 Estrutura plana tri engastada	70
5.2.2 Estrutura plana com engaste longitudinal	72
5.2.3 Estrutura simplificada curva	74
5.2.4 Estrutura aperfeiçoada.....	79
5.2.5 Comparativo.....	83
6 CONCLUSÃO.....	85
6.1 Sugestão para trabalho futuro.....	85
REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é uma das principais matérias primas do mundo moderno, tendo grande parte de sua extração no ramo offshore. Os navios PLSV (*Pipe Laying Support Vessel*) desempenham um papel crucial nessa cadeia de extração, sendo sua principal função realizar a instalação linhas flexíveis e equipamentos submarinos.

Durante sua operação as embarcações movimentam as linhas flexíveis pelo convés em direção a torre de lançamento. Em certo ponto da operação essas linhas devem ser verticalizadas para alcançar o topo da torre, nesse momento elas ficam suscetíveis as solicitações dos ventos e do balanço do barco. Essas solicitações movimentam a linha que pode sofrer danos e causar acidentes. Outro risco associado a operação é o de dano da linha devido a superação do seu raio mínimo de curvatura.

De forma a amenizar esse risco as linhas flexíveis são fixadas ao convés através de amarrações com uso de cintas sintéticas. Esse procedimento, apesar de comum, acrescenta complexidade e tempo a operação, e além de aumentar a exposição da equipe a acidentes, acrescenta a possibilidade de erro humano.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo dimensionar uma estrutura metálica que conduza a linha flexível durante a verticalização e resista aos esforços da operação, de forma a não falhar pelas solicitações da operação.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Dada a crescente expansão da exploração petrolífera para o ramo *offshore*, cada vez mais são utilizados os navios do tipo PLSV para a instalação de linhas flexíveis que permitam a extração do petróleo. As operações marítimas realizadas por essas embarcações possuem grande complexibilidade e devem ser realizadas com alta eficiência e segurança. Com o objetivo de reduzir o tempo, e os riscos presentes durante a operação, será realizado o dimensionamento de uma estrutura baseada em um defletor vertical comercial visto na figura 1 para um determinado PLSV, de forma que ela atue durante a etapa de verticalização da linha, evitando movimentos laterais

sem a necessidade da amarração. Em que a estrutura não deve apresentar tensões de escoamento maiores que a tensão admissível do projeto, e não deve apresentar grandes deslocamentos, de forma a manter linearidade da análise.



Figura 1 - Defletor vertical
Fonte: Marine Developments

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Nessa etapa será descrita a organização do trabalho, através de uma breve explicação sobre cada capítulo que podem ser vistos a seguir:

No capítulo 2, será apresentada a revisão bibliográfica, em que serão descritos os conteúdos utilizados para a elaboração do trabalho, assim como os materiais onde são apresentados.

No capítulo 3, será descrita a metodologia utilizada para o dimensionamento da estrutura. A qual será dividida entre o método analítico, utilizando os conceitos da disciplina de resistência dos materiais, e método numérico utilizando análises através do método dos Elementos Finitos (MEF). Também será apresentado o estudo de caso que será utilizado para o dimensionamento.

No capítulo 4 será apresentado o desenvolvimento das metodologias abordadas no capítulo três, em que para o modelo analítico serão apresentadas as condições e equações desenvolvidas, e para a metodologia numérica serão apresentados os modelos desenvolvidos e suas condições de contorno.

No capítulo 5, serão apresentados os resultados obtidos pela substituição dos valores, apresentados na condição de contorno, as equações e condições de contorno

apresentadas no desenvolvimento. Também será realizada a comparação dos resultados obtidos

No capítulo 6, serão apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados, assim como propostas para os próximos trabalhos

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A IMPORTÂNCIA DA EXPLORAÇÃO DO PETRÓLEO

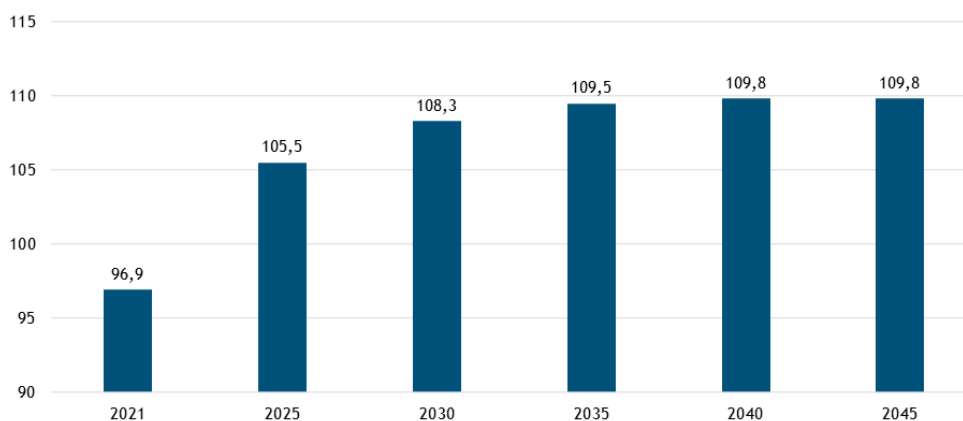
De acordo com Juberg (2016) a importância do petróleo para a humanidade data antes mesmo do uso da gasolina, dado que ele era usado na construção de casas, estradas e muralhas. A indústria do petróleo atual se iniciou no século XIX de forma a atender à crescente necessidade por um combustível para lâmpadas que substituísse a gordura baleia, a qual iniciou a procura por um método de extração que atendesse a escala necessária, que culminou com o desenvolvimento de uma técnica que consistia no uso de guindastes para perfuração do solo, e uso da injeção de água para a extração.

Com a revolução industrial a humanidade encontrou um novo desafio a ser superado, a geração de energia para a alimentação das máquinas que ali foram criadas. Como visto em Salomão et al. (2018) a criação do motor a combustão para automóveis baseado em gasolina, os quais eram mais leves e possuíam melhor relação de potência por peso, aumentou ainda mais a importância do petróleo, dada a crescente demanda da população.

Tais mudanças tornaram a indústria do petróleo uma das mais importantes no panorama econômico mundial, já que segundo Bicudo (2009) seus insumos, os hidrocarbonetos, representam a maior fonte de energia disponível na atualidade. Como pode ser visto na figura 2 a projeção da demanda global mostra um salto de 96,9 milhões de barris por dia em 2021, para 105,5 milhões de barris em 2025, atingindo um pico de consumo e se estabilizando para a próxima década.

Projeção da demanda global de petróleo no longo prazo

2021-2045, milhões de barris por dia (mb/d)



Atualização: Novembro 2022
Fonte: Elaboração IBP com dados OPEC

Figura 2 - Crescimento da demanda de petróleo ao longo dos anos
Fonte: Elaboração IBP com dados da OPEC (2022)

2.2 A EXPLORAÇÃO OFFSHORE

Segundo Bicudo (2009) a indústria offshore vem desempenhando um papel fundamental em atender à crescente demanda por petróleo, dado que as grandes empresas buscam explorar novos campos para aumentar sua produção, levando a poços cada vez mais profundos, onde se localizam bacias sedimentares com alto potencial de produção, o aumento da profundidade de exploração do petróleo pode ser visto na figura 3.

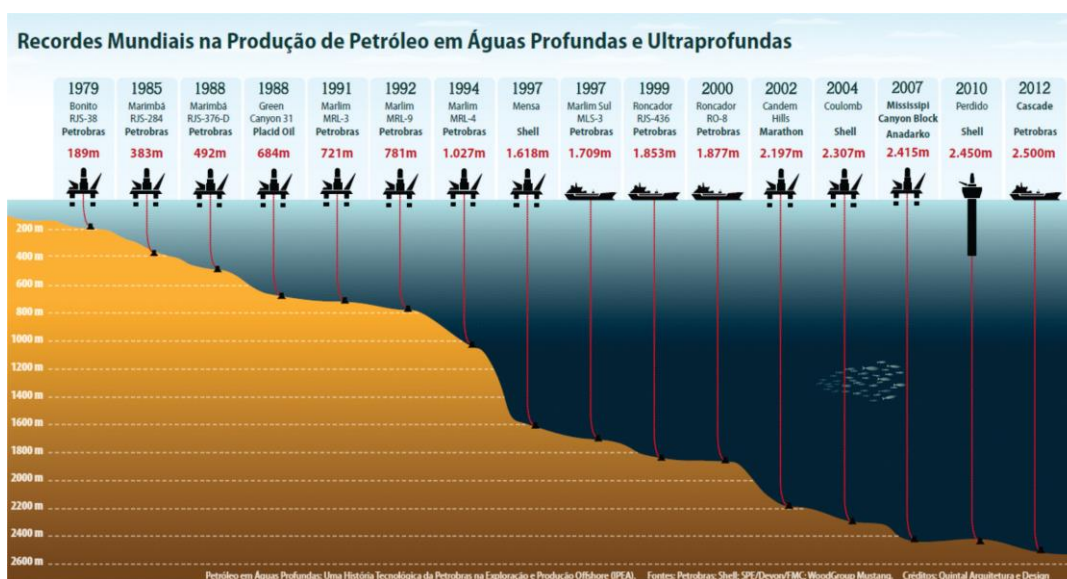


Figura 3 - Aumento da profundidade de exploração ao longo dos anos
Fonte: Petrobras (2013)

Acompanhado o alto potencial de produção, a exploração do petróleo nessas profundidades requer o emprego de diversos sistemas como: plataformas fixas ou flutuantes, navios adaptados à exploração e campos desenvolvidos para extração de petróleo.

Segundo Mendes et al. (2012) cada sistema de produção submarino é composto basicamente por três tipos de subsistemas: (i) equipamentos submarinos; (ii) linhas submarinas; e (iii) sistemas de controle e alimentação, nos quais se destacam-se a árvore de natal molhada, e responsável por controlar a vazão dos fluidos produzidos, e a cabeça de poço, a qual é responsável por fazer a interface entre o poço e os equipamentos, permitindo assim a produção, os quais são representados na figura 4.

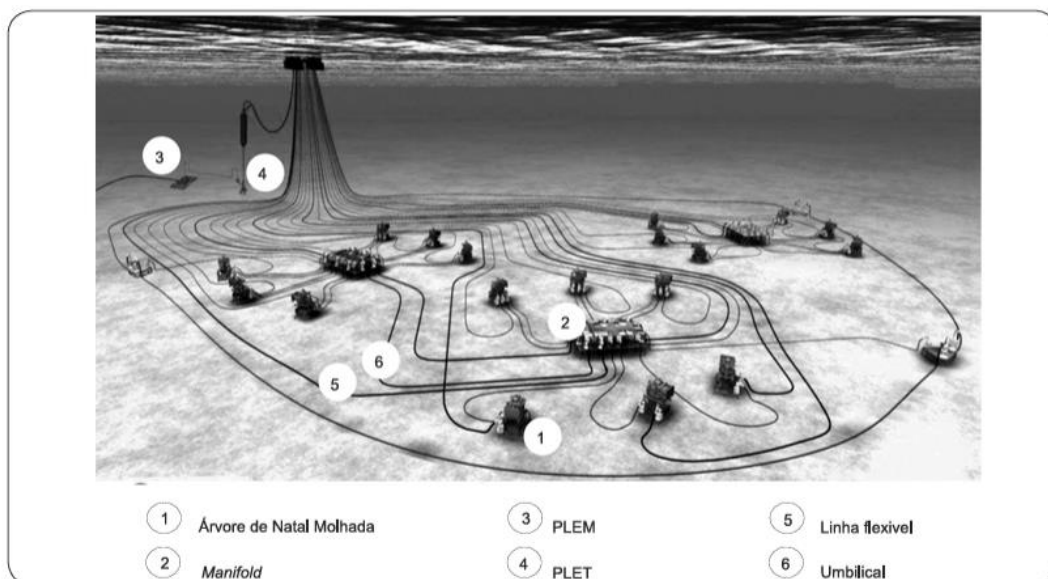


Figura 4 - Campo de extração de petróleo
Fonte: Mendes et al. (2012)

As tubulações empregadas nas conexões submarinas são comumente chamadas de linhas flexíveis (*flowlines*), elas são responsáveis por transportar os hidrocarbonetos até a base do *riser*, ou ainda usadas na injeção de produtos químicos e transporte de água. Sua construção é feita por diversas camadas de polímeros e metais, que garantem resistência e flexibilidade a linha como pode ser visto na figura 5.

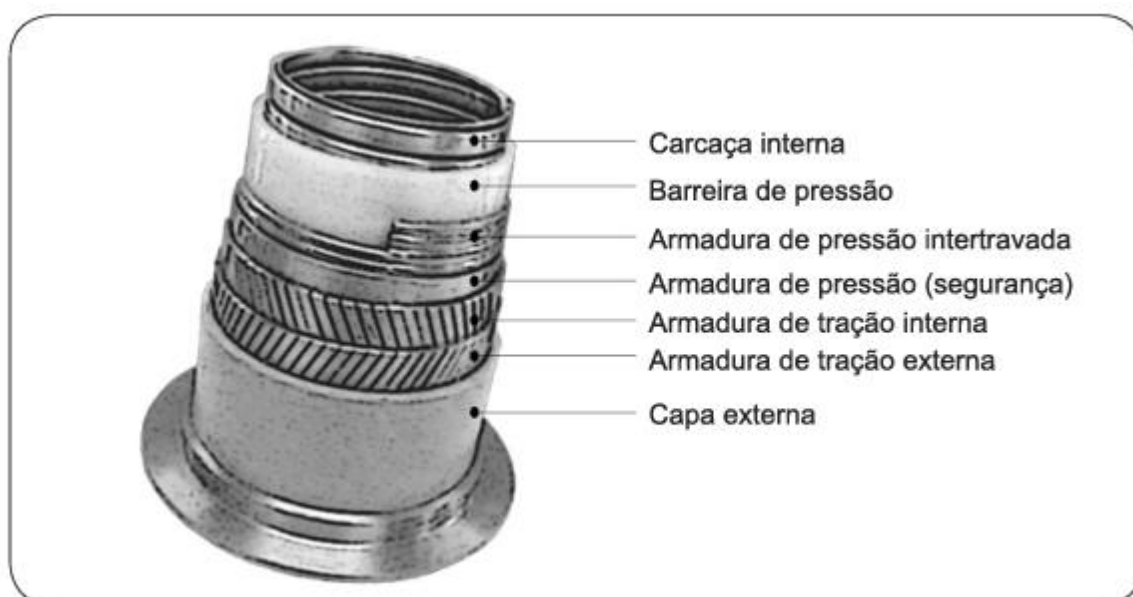


Figura 5 - Esquema de um duto flexível
Fonte: Mendes et al. (2012)

2.3 NAVIOS PLSV

Segundo Ferreira (2013), as embarcações do tipo *Pipelay suport vessel* (PLSV) (figura 6) são navios destinados a instalação das tubulações submarinas, podendo elas serem de diversos modelos e com diversas configurações, dependendo do tipo de serviço prestado. Estas embarcações são responsáveis por instalar dutos rígidos ou flexíveis que transportam o petróleo extraído dos poços.



Figura 6 - Navio PLSV
Fonte: Click petróleo e gás

Essas embarcações possuem diversos equipamentos característicos em sua construção, sendo os mais comuns: Guindastes, cestas, bobinas, tensionadores, guinchos, ROVs (*Remotely operated underwater vehicle*), Torres de lançamento, defletores, entre diversos outros. Sendo esses fundamentais na operação da embarcação.

2.3.1 Cestas e bobinas

As cestas e bobinas (figura 7) são os locais responsáveis por armazenar as linhas flexíveis que serão lançadas pela embarcação. O número de cestas e bobinas varia de a cordo com o espaço disponível do navio, e de a cordo com a necessidade dos projetos executados por ele.



Figura 7 - Bobina de dutos flexíveis
Fonte: Petronotícias (2020)

2.3.2 Tracionadores

Os tracionadores (figura 8) são os equipamentos responsáveis por tracionar as linhas durante as operações de recolhimento e lançamento das linhas, sendo eles os responsáveis por: aplicar a carga que sustenta o peso do flexível durante as operações sem danificar a linha, controlar a velocidade de abandono e recolhimento, sustentar o flexível durante as paradas de forma a permitir o trabalho seguro.

Seu funcionamento se baseia no uso de lagartas que entram em contato com a linha de forma a gerar uma força de atrito proporcional a força de aperto usada, nota-se que para cada projeto a força de aperto deve ser adequada para não danificar a linha.

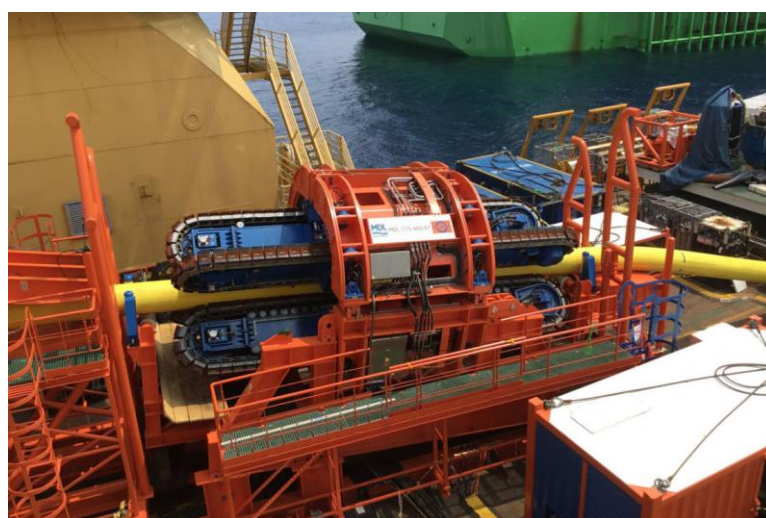


Figura 8 - Tracionador de linhas flexíveis
Fonte: Marine Developments

2.3.3 Guinchos

Desenvolvido para o uso em operações *offshore*, o guincho de abandono e recolhimento – guincho A&R (figura 9) é usado junto com os tracionadores no sistema de lançamento, ele deve possuir carga igual ou maior a carga máxima de projeto dos tracionadores, garantindo assim a transferência de carga durante as operações.

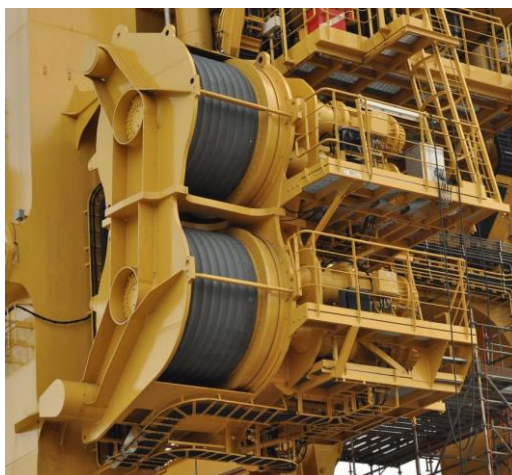


Figura 9 - Guincho A&R
Fonte: Huisman

Além do guincho A&R as embarcações PLSV também contam com os guinchos auxiliares posicionados no convés e na torre, os quais possuem uma menor capacidade. Sua principal função é auxiliar (figura 10) em manobras de convés durante as operações de lançamento. Um deles é o guincho de iniciação, responsável pela movimentação da linha da cesta para a mesa durante a operação de lançamento.



Figura 10 - Guincho auxiliar
Fonte: SISTAC.

2.3.4 Torre de lançamento

Como visto em Albuquerque (2023) a torre de lançamento é o equipamento responsável pelo lançamento das linhas em navios com o sistema de lançamento vertical, sendo ela a estrutura responsável por abrigar os tracionadores e guinchos, que permitem a manipulação e suporte da carga das linhas flexíveis, durante a instalação. É importante ressaltar que existem diversos modelos de torres usadas pelos navios, em que cada uma possui particularidades de operação e diferentes capacidades de carga, variando de a cordo com a quantidade e capacidade dos tensionadores e guinchos instalados nela.

Além dos componentes de suporte de carga a torre de lançamento também possui a roda de topo, a qual é responsável pela passagem da linha pela parte superior da torre, permitindo que ela chegue a sua projeção vertical do lado oposto, a *fireline*, e siga para a mesa de trabalho sem danos. A torre de lançamento pode ser vista em amarelo na figura 11.



Figura 11 - Navio PLSV com torre de lançamento
Fonte: Huisman

2.3.5 Mesa de trabalho

A mesa de trabalho (figura 12) é uma plataforma móvel localizada na projeção vertical da torre de lançamento (*fireline*) que permite o acesso de operadores a linha flexível durante a operação, de forma que a extremidade possa ser apoiada permitindo a instalação de conectores, módulos de conexão vertical (MCVs) e outros. Durante a

operação a mesa de trabalho encontra-se totalmente aberta, permitindo a passagem das linhas, e nos momentos em que se precisa de acesso dos operadores a linha ou a extremidade o *moonpool* permanece fechado.



Figura 12 - Mesa de trabalho
Fonte: Sapura (2024)

2.3.6 Defletores

Os defletores são as estruturas responsáveis por direcionar as linhas flexíveis durante sua movimentação, atuando de forma a impedir que os flexíveis se curvem além do raio mínimo de curvatura, evitando assim danos ao produto. Existem diversos tipos de defletores, sendo os mais comuns os horizontais, responsáveis por guiar a linha flexível ao longo convés do navio.

Algumas embarcações possuem também os defletores verticais (figura 13), objeto de estudo desse trabalho, os quais são responsáveis por verticalizar e guiar o duto flexível para a torre de lançamento durante a movimentação, eles são responsáveis por impedir a movimentação lateral das linhas, devido ao vento ou movimento do barco, e impedir que o duto ultrapasse seu raio mínimo de curvatura durante a operação de lançamento.



Figura 13 - Defletor vertical
Fonte: Marine Developments

2.4 INSTALAÇÃO DAS LINHAS FLEXÍVEIS

O processo de instalação das linhas flexíveis e umbilicais é extremamente complexo e envolve grandes cargas e riscos, devido a isso diversos métodos de lançamento e padrões de operação são utilizados para minimizar acidentes que causem danos a linhas e risco de vida.

2.4.1 Métodos de lançamento

Segundo Bicudo (2009) no início da exploração offshore era utilizado o sistema de lançamento horizontal (*HLS - Horizontal Laying System*) (figura 14), porém com o avanço para águas mais profundas as cargas envolvidas se tornaram cada vez maiores, obrigando o uso de tracionadores. O uso da roda de popa gerava um gargalo ao sistema, dado que durante a operação em águas profundas eram impostas altas cargas nas linhas flexíveis durante sua passagem por ela.

De acordo Bicudo (2009) a sequência de operação de lançamento do PLSV Pertinacia se inicia com a passagem do cabo do guincho auxiliar, o qual é conduzido pelo sistema de lançamento no sentido inverso a operação sendo da mesa de trabalho em direção ao sistema de armazenamento, passando entre os tracionadores que, neste momento se encontram totalmente abertos, após chegarem as cestas ou bobinas da embarcação os cabos são conectados aos flanges das linhas. Com a linha conectada ao cabo do guincho, ela é deslocada por meio de manobras conjuntas entre o operador da cesta, ou bobina, e do guincho até a saída dos tracionadores, em que é aplicada a pressão de *clamp*. Após esse ponto a linha encontra-se segura pelo sistema permitindo a retirada do guincho auxiliar e terminando a etapa de iniciação.

Com o início do lançamento, o guincho principal é conectado ao flange da linha flexível, de forma que a linha possa ser conduzida até a entrada dos tracionadores, em que após a transferência de carga para o guincho a linha é conduzida até a mesa, onde a carga será devolvida aos tracionadores.

Em um sistema VLS durante o processo de condução pelo convés em direção a torre, a linha deve ser verticalizada como visto na figura 15, de forma a chegar ao topo da torre. Nessa etapa a linha fica sujeita as forças de vento e variações do mar, ao risco de ultrapassar seu raio mínimo de curvatura, de forma a evitar a falha e acidentes algumas operações amarram as linhas com cintas, de forma a limitar sua movimentação e evitar o dano ao produto, como pode ser visto na figura 16.

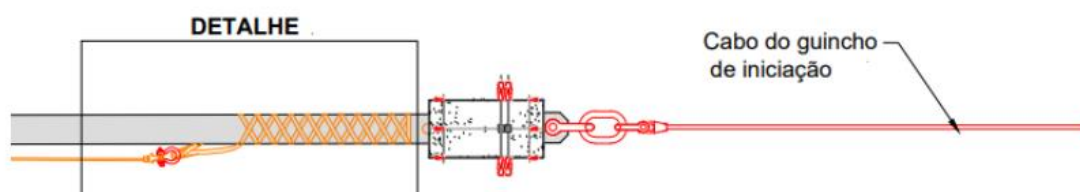


Figura 16 - Amarração para realização da operação
Fonte: Albuquerque (2023)

A importância do defletor vertical se dá no ganho de velocidade na operação e segurança em seu uso, dado que durante a operação a estrutura permite a movimentação da linha flexível sem o uso das amarras, as quais devem ser instaladas para cada linha flexível que será movimentada, permitindo assim uma operação mais simples e rápida, e evitando os riscos de erro humano, assim como a estrutura evita

grandes movimentos laterais da linha que podem gerar danos ao produto ou acidentes.

Durante esse processo a estrutura do defletor vertical está sujeita a grandes cargas estáticas provenientes do guincho de iniciação, o qual traciona a estrutura ao puxar a linha flexível, e a cargas dinâmicas derivadas da movimentação da linha durante sua passagem pelo defletor, sendo de extrema importância o dimensionamento através de análises estruturais.

2.5 ANÁLISES ESTRUTURAIS

Segundo o livro Fundamentos da Análise Estrutural (2009), para projetar uma estrutura é necessário pôr em prática uma análise estrutural que estabelece as forças internas e deslocamentos em todos os pontos, produzidos pela carga de projeto. Esse estudo da estrutura está diretamente ligado ao dimensionamento, dado que nelas são observadas as solicitações a qual o corpo está resistindo, o material que pode ser usado para garantir a integridade do componente, a geometria da peça e o quanto de massa pode ser reduzida. Na concepção do projeto, tudo deve ser analisado e explicitado um argumento para cada tomada de decisão do produto. Por exemplo, componentes como flanges, bobinas de linha flexível, sapatas e olhais de içamento são projetados de acordo com os esforços sofridos e o tempo de operação.

Analisar significa examinar minuciosamente cada detalhe e prever cenários antes que eles ocorram, isto é fundamental para realizar tomadas de decisão e propor projetos seguros, independente de fatores externos. Atualmente, duas ferramentas são largamente empregadas na indústria de engenharia para realizar tais decisões, método analítico e método dos elementos finitos (MEF).

2.6 MÉTODO ANALÍTICO

O método analítico é comumente estudado na disciplina de resistência dos materiais, através do estudo do comportamento dos corpos quando solicitados. Hibbeler (2008), apresenta em seu material metodologias para o cálculo das tensões presentes nas estruturas estáticas, através do diagrama de corpo livre (DCL) e equilíbrio de forças e momentos, permitindo assim a adequação da geometria as solicitações.

Hibbeler (2008), apresenta metodologias de cálculo para a equação da linha elástica, a qual pode ser usada na determinação das reações de estruturas hiperestáticas. Assim como apresenta o modelo de tensões combinadas que permite o cálculo das tensões equivalentes de diversas solicitações e tipos de tensões.

2.7 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Conforme Carneiro (et.al 2020), o método de elementos finitos tem como propósito básico a discretização da estrutura, efetuando procedimentos matemáticos para ter uma apresentação mais próxima da realidade, uma vez que existem alguns fatores que não podem ser considerados pelo método analítico. Este método consiste na utilização de softwares como o Ansys Workbench para a avaliação de peças e estruturas complexas, tendo por objetivo se aproximar das condições reais a qual o componente será exposto.

Este procedimento tem como princípio a divisão da geometria analisada em nós e elementos, por isso recebe o nome de elementos finitos. Cada elemento é unido por um nó e para cada elemento é calculada uma equação que descreve o comportamento físico, e por fim essas equações se juntam para uma aproximação do conjunto da peça. Dessa forma, fazendo a leitura das dimensões da peça e os possíveis efeitos que ela pode sofrer quando solicitada.

3 METODOLOGIA

O estudo será dividido em cinco partes em que a primeira abordagem será realizada o diagrama de corpo livre do defletor e da linha flexível, a fim de entender as forças atuantes que serão transmitidas ao defletor. Após o cálculo das forças serão calculadas as reações do defletor para uma geometria simplificada através do método analítico e as tensões atuantes na estrutura. Então serão realizadas análises numéricas com modelos semelhantes ao modelo analítico proposto, de forma a permitir a comparação entre os dois modelos. Por fim será analisada a geometria simplificada curva completa com os tubos de apoio, e será proposta uma nova geometria aperfeiçoada que reduza a espessura da chapa utilizada no estudo de caso.

3.1 ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo serão apresentadas as cargas atuantes durante a operação, a geometria proposta para condução da linha flexível utilizada no modelo analítico e numérico, e a estrutura aperfeiçoada para redução da espessura da chapa, assim como o material utilizado na estrutura.

3.1.1 Cargas atuantes

Para os modelos apresentados a seguir será considerada a sequência de operação descrita para o PLSV Perticancia, em que o guincho auxiliar de iniciação recolhe a linha na cesta e a conduz em direção a mesa de lançamento. Segundo PETROBRAS (2022), o guincho de armazenamento deve possuir no mínimo 30 toneladas, logo a maior carga que pode ser movimentada no convés para essa configuração é uma linha de 30 toneladas, como a operação de iniciação envolve o içamento da linha, e pode apresentar cargas dinâmicas durante o processo, o guincho de iniciação deverá suportar a carga de 30 toneladas vezes o fator de dinamicidade de linha (FDL), o qual possui valor de 2 para situações críticas, logo será adotado um guincho de iniciação de 60 toneladas (588,6 kN) atuando como uma carga distribuída ao longo da chapa.

Além da carga resultante da tração exercida pelo guincho de iniciação também existirá uma carga de atrito devido ao movimento relativo da linha a chapa do defletor, a qual será proporcional a força normal e ao fator de atrito. Para o dimensionamento da estrutura será adotado o atrito estático μ , considerando a iminência da movimentação da linha flexível, de forma a considerar o caso mais crítico. BRESSAN (2000), fornece valores para o atrito estático entre diferentes materiais, será adotado o valor de 0,2 considerando uma chapa de aço e a capa do flexível sendo de polietileno.

3.1.2 Geometria simplificada

Para as geometrias propostas os roletes utilizados no modelo comercial serão substituídos por uma chapa, como pode ser visto na figura 17, de forma a simplificar o processo de fabricação, Além de reduzir as partes móveis na estrutura, o que simplifica a manutenção da estrutura, e diminui sua periodicidade.

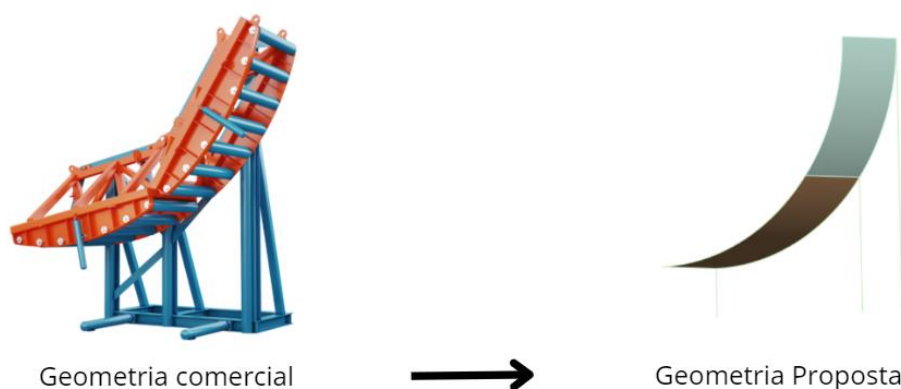


Figura 17 – Diferença das geometrias
Fonte: o próprio autor

A geometria 3D proposta para o modelo simplificado pode ser vista na figura 18 e as vistas na figura 19, ela usa como base o desempenho para o raio de curvatura de 4,5 metros visto em MARITIME DEVELOPMENTS (2025).



Figura 18 - Geometria 3D simplificada curva
Fonte: o próprio autor

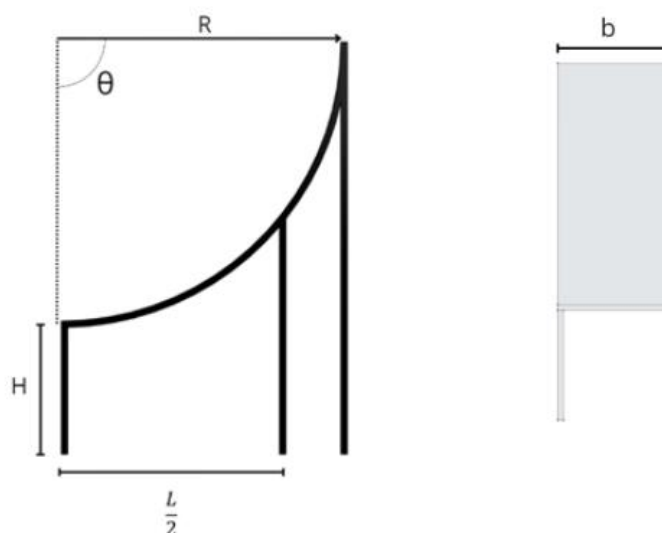


Figura 19 - Vistas do modelo simplificado
Fonte: O próprio autor.

O ângulo θ pode variar de a cordo com posição em que o defletor é instalado no barco, então foi adotado o ângulo de 90° de forma a representar a condição mais crítica possível a estrutura, em que o defletor foi instalado diretamente abaixo da torre e deve realizar a completa verticalização da linha flexível. A altura H do primeiro tubo leva em consideração o diâmetro de linha máximo do tracionador de 0,5 metros, dado que é o maior diâmetro de linha flexível que poderá passar pelo sistema, mais uma

folga de 1,5 metros totalizando 2 metros, o mesmo valor será usado para a largura b , de forma a permitir o manuseio da linha e evitar danos.

Será proposta também uma geometria simplificada plana (figura 20), com objetivo de realizar cálculos analíticos e cálculos via elementos finitos, permitindo assim a comparação entre os resultados obtidos. A vista frontal e lateral esquerda são apresentadas na figura 21:

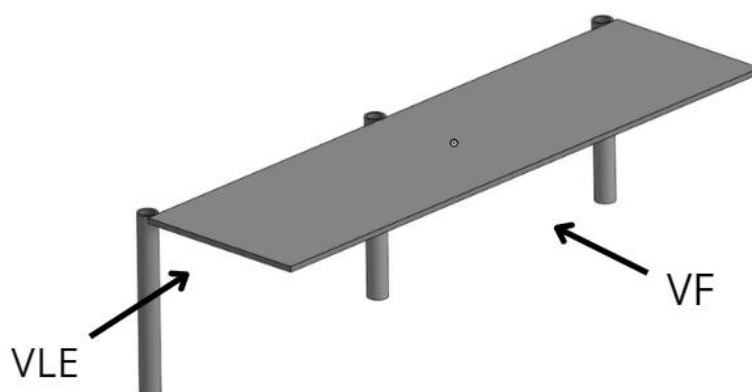


Figura 20 - Vista Isométrica estrutura plana
Fonte: o próprio autor

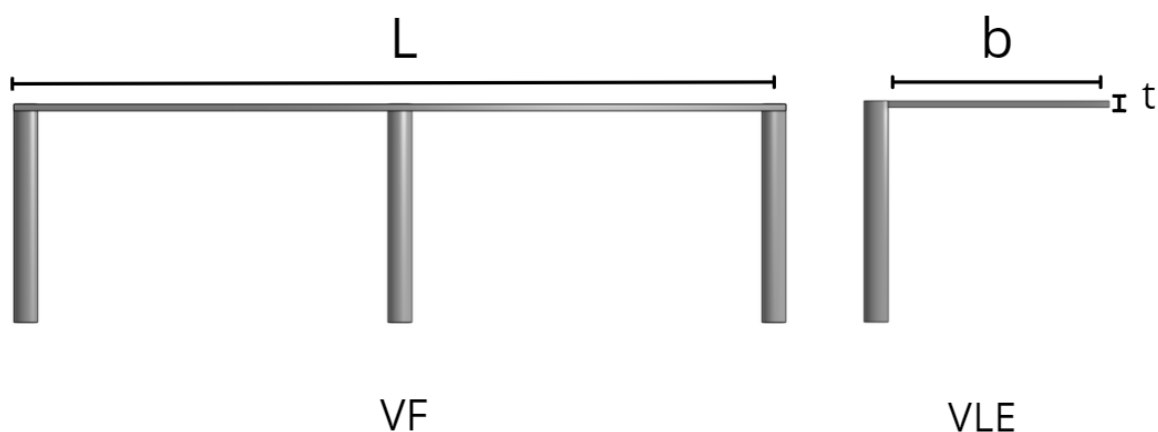


Figura 21 - Vista frontal e lateral esquerda da estrutura plana
Fonte: o próprio autor

Em que L é o comprimento da chapa quando planificada, o qual é calculado através de $L = R \cdot \frac{\pi}{2} = 7,07$ metros e t é a espessura de 60 milímetros da chapa.

3.1.3 Geometria aperfeiçoada

A geometria aperfeiçoada vista na figura 22 e na figura 23, tem como objetivo a redução da espessura da chapa, a qual será alcançada através da adição de treliças de reforço na parte superior e lateral da chapa.

Geometry
25/01/2025 22:58

Ansys
2024 R2
STUDENT

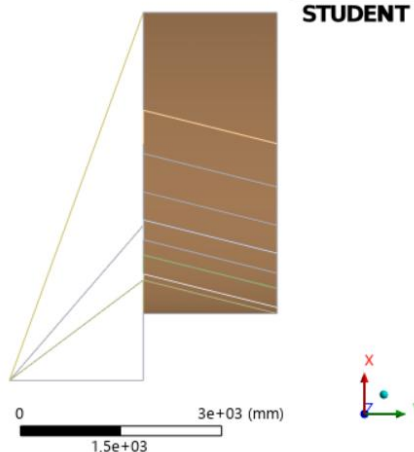


Figura 22 – Vista frontal da geometria
Fonte: O próprio autor

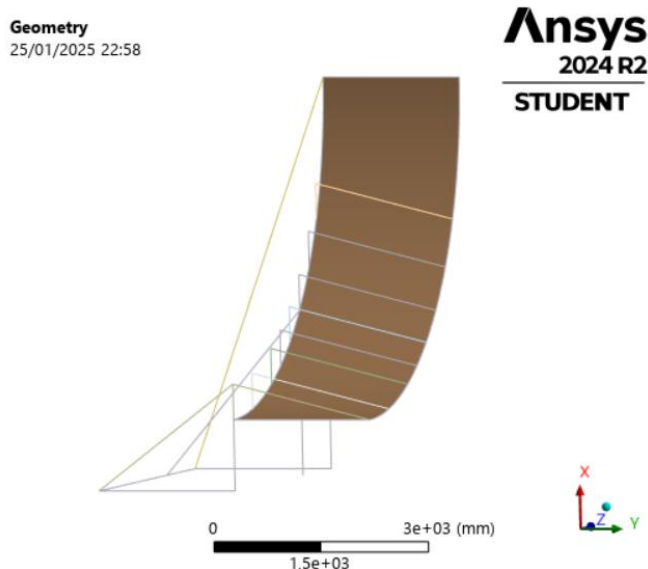


Figura 23 – Vista isométrica da geometria
Fonte: O próprio autor

Para estrutura aperfeiçoada serão usados tubos de 219,1 mm de diâmetro externo e 25 mm de espessura, assim como uma chapa de 15mm.

3.1.4 Material

O material adotado para estrutura será o aço AH36, o qual é amplamente utilizado na indústria naval, e é comumente encontrado no formato de chapas, fornecido pela empresa Steel Pro Group (2025) e disponíveis em espessuras que variam de 6mm a 120mm, e larguras até 4000 mm. As propriedades do material podem ser vistas na figura 24, ressaltando o limite de rendimento (escoamento) de 355 MPa.

Estado do AC (resfriado a ar)

Propriedade	Unidades métricas	Unidades imperiais
Resistência à tração	510-690 MPa	74-100 ksi
Resistência ao rendimento	355 MPa	51,5 ksi
Dureza Brinell HB	170-210	170-210
Dureza Rockwell HRB	73 - 91	73 - 91
Dureza Vickers HV	180 - 230	180 - 230
Alongamento	21%	21%
Módulo elástico	200 GPa	29 msi

Figura 24 – Propriedades do aço AH36
Fonte: Steel Pro Group

Para os tubos que serão utilizados nos modelos de análise o aço VMB 350 que são comumente utilizados nos decks de navios, será utilizado. Dimensões de propriedades de acordo com o catálogo da empresa Vallourec (2025) visto na figura 25 e na figura 26.




GRAUS DE AÇO PROPRIETÁRIOS (uso geral)			
Seção transversal			
COMUNS	VMB 250	VMB 300	VMB 350
Limite de escoamento - fy (MPa)	≥ 250	≥ 300	≥ 350
Limite de resistência - fu (MPa)	≥ 400	≥ 415	≥ 485
Alongamento - ΔL (50 mm) %	≥ 23	≥ 21	≥ 20

Figura 25 Propriedades do aço VMB350
Fonte: Vallourec


DIÂMETRO EXTERNO (mm)	TUBOS ESTRUTURAIS SEM COSTURA - DIMENSÕES FREQUENTES																			
	TUBOS CIRCULARES SEM COSTURA - PESO (kg/m) 																			
	ESPESSURA (mm)																			
	3,2	3,6	4,0	4,5	5,0	5,6	6,4	7,1	8,0	8,8	10,0	11,0	12,5	14,2	16,0	17,5	20,0	25,0	30,0	
33,4	2,38	2,65																		
38,1	2,75	3,06	3,36																	
42,2		3,43	3,77	4,18	4,59															
48,3		3,97	4,37	4,86	5,34	5,90	6,61													
60,3		5,03	5,55	6,19	6,82	7,55	8,51	9,32	10,3	11,2										
73,0		6,16	6,81	7,60	8,38	9,31	10,5	11,5	12,8	13,9	15,5	16,8								
88,9		7,57	8,38	9,37	10,3	11,5	13,0	14,3	16,0	17,4	19,5	21,1	23,6							
101,6			9,63	10,8	11,9	13,3	15,0	16,5	18,5	20,1	22,6	24,6	27,5							
114,3			10,9	12,2	13,5	15,0	17,0	18,8	21,0	22,9	25,7	28,0	31,4	35,1	39,7	44,5				
141,3					16,8	18,7	21,3	23,5	26,3	28,8	32,4	35,3	39,7	44,5	49,4	53,4				
168,3					20,1	22,5	25,6	28,2	31,6	34,6	39,0	42,7	48,0	54,0	60,1	65,1	73,1			
219,1							33,6	37,1	41,6	45,6	51,6	56,5	63,7	71,8	80,1	87,0	98,2	120		
273,0							42,1	46,6	52,3	57,3	64,9	71,1	80,3	90,6	101	110	125	153	180	
323,8							50,1	55,5	62,3	68,4	77,4	84,9	96,0	108	121	132	150	184		
355,6									68,6	75,3	85,2	93,5	108	120	134	146	166	204		

Figura 26 - Dimensionais do aço VMB 350
Fonte: Vallourec

De forma a encontrar a tensão admissível do projeto é dada pela divisão da tensão de escoamento pelo fator de segurança adotado, para este cálculo foi considerado um valor base de 350 MPa de escoamento, dado que a diferença de escoamento entre os aços é pequena. Segundo a norma DNVGL (2015) que contempla os requisitos técnicos para o projeto estrutural de unidades offshore, fator de segurança para carregamentos funcionais e verificações de escoamento deve ser de 1,67. Vale ressaltar que este valor de 1,67 é obtido através do fator de carregamento funcional de 0,6 e o fator para escoamento de 1,0.

Dessa forma, a tensão admissível do projeto será $\sigma_{adm} = \frac{350}{1,67} = 210$ MPa.

3.2 METODOLOGIA ANALÍTICA

Nesse capítulo será descrita a metodologia para o cálculo do modelo analítico, a qual será composta por quatro pontos principais, o cálculo das forças atuantes, o cálculo das reações, o cálculo do momento máximo e seu ponto de atuação, e por último o cálculo das tensões.

O cálculo da força atuante no defletor será realizado através do modelamento da passagem da linha flexível pelo defletor como uma correia passando por uma polia. Dessa forma será possível utilizar a metodologia apresentada por Silveira (2019) para o cálculo da força normal exercida pela linha flexível no defletor, a qual será distribuída ao longo da chapa e será usada para calcular a força de atrito.

Calculadas as cargas atuantes no defletor, deve-se calcular as reações. Com esse objetivo será utilizada a simplificação da geometria plana vista na figura 20, em que a vista frontal será aproximada como uma viga tri engastada no plano XY (figura 27), dada a solda entre os tubos laterais e a chapa, e a vista lateral esquerda será aproximada como uma viga mono engastada no plano YZ, representada na figura 28.

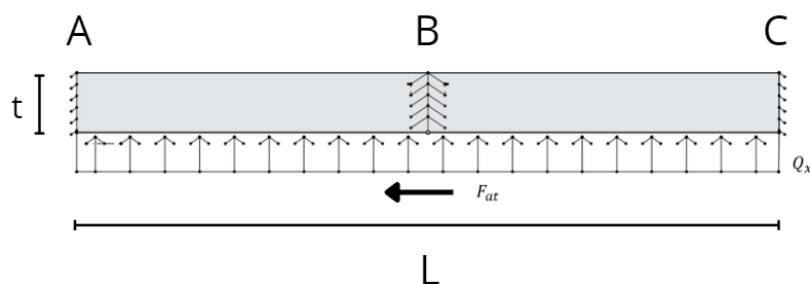


Figura 27 - Viga tri engastada no plano XY
Fonte: o próprio autor



Figura 28 - Viga mono engastada no plano YZ
Fonte: o próprio autor

Em que A, B e C são os pontos de engaste, a carga distribuída Q_x é dada pela divisão da força normal pelo comprimento L , F_{at} é a força de atrito. Como o local de aplicação da força normal exercida varia plano YZ a carga será adotada como a força distribuída Q_z , à qual é calculada pela divisão da carga normal pela largura b . Realizada a simplificação, as reações podem ser encontradas através das equações de equilíbrio apresentada em Hibbeler (2008), e através das equações para a linha elástica vistas em Hibbeler (2008).

Para o cálculo das tensões será adotada a simplificação de viga longa descrita em Hibbeler (2008), em que dado o comprimento L muito maior que a espessura t da chapa, as tensões geradas pelos esforços cortantes e normais gerados pelas forças são desprezíveis quando comparados aos esforços gerados pelos momentos. Dada a consideração adotada o ponto crítico será onde os momentos são máximos, e para calculá-los será utilizada a metodologia do método das seções apresentada em

Hibbeler (2008), em que será encontrado o ponto em que o momento é máximo e o valor dele nesse ponto.

Encontrado o ponto crítico será calculado as tensões geradas pelos momentos no mesmo, de forma a encontrar as tensões máximas nos eixos do tensor, e então será adotado o critério de falha de von Mises a fim de calcular um valor escalar diretamente comparável com a tensão admissível do projeto.

3.3 METODOLOGIA NUMÉRICA

A metodologia numérica terá como base o método dos elementos finitos (MEF), em que serão modeladas geometrias, utilizando o método de viga e casca de forma melhorar a eficiência computacional. A metodologia será dividida em duas etapas. Na primeira etapa serão realizadas duas análises numéricas para a geometria simplificada plana, em que será possível obter um comparativo entre as tensões encontradas pelo modelo analítico e numérico. O modelo utilizado pode ser visto na figura 29:

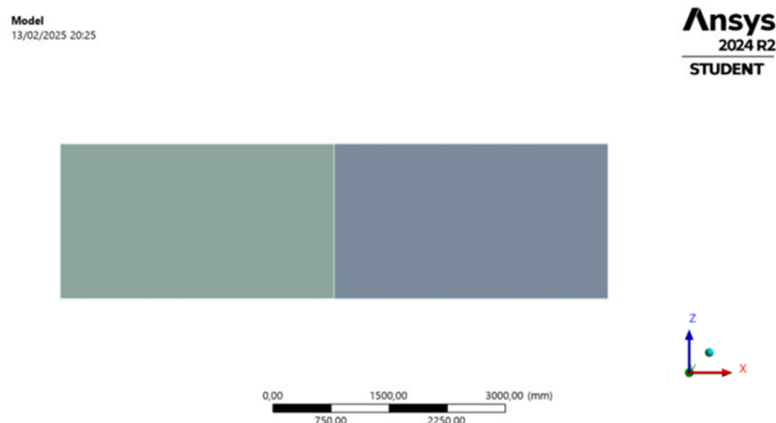


Figura 29 – Modelo numérico chapa plana
Fonte: o próprio autor

Para a segunda abordagem será modelada a estrutura simplificada completa com os tubos de apoio (figura 30), de forma a verificar se a estrutura irá falhar por escoamento ou pelo deslocamento.

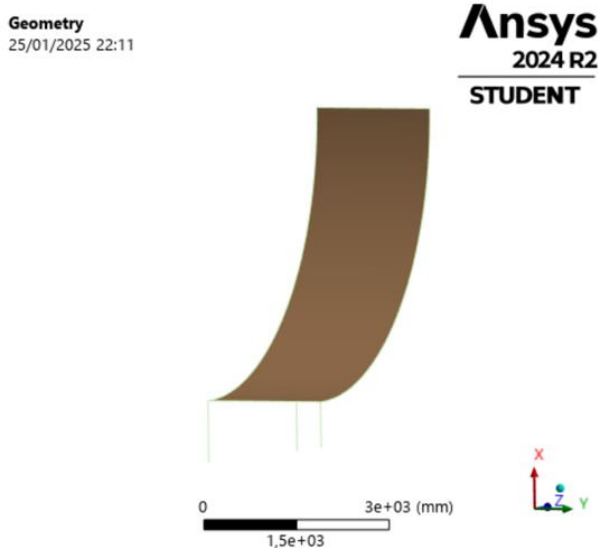


Figura 30 - Modelo numérico da estrutura simplificada completa
Fonte: O próprio autor

Por fim será modelada uma estrutura baseada nas fotos do modelo comercial visto em MARITIME DEVELOPMENTS (2025), em que a geometria será aperfeiçoada com treliças e reforços superiores (figura 31), de forma a reduzir a espessura da chapa, sem falhar por escoamento, e sem apresentar deformações maiores que espessura para respeitar a consideração de pequenas deformações, mantendo assim a linearidade da análise.

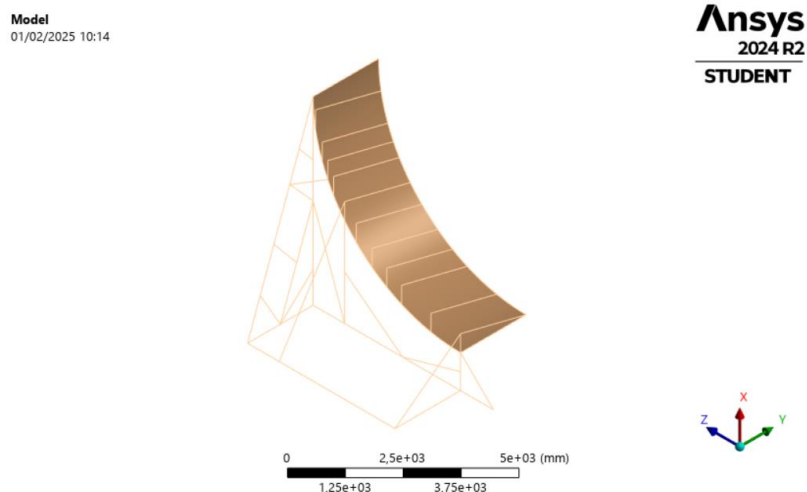


Figura 31 - Modelo numérica estrutura aperfeiçoada
Fonte: O próprio autor

3.3.1 Convergência de malha

Para todos os modelos será realizada uma análise de convergência de malha, de forma a avaliar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos. De acordo com a (ANSYS, 2025), é recomendado uma boa precisão nos resultados para realizar a tomada de decisão em um projeto. Além disso, também é verificado que erros aproximados entre 1 a 5% ocorrem para deslocamentos médios relacionados com tensões. A empresa ainda ressalta que componentes críticos sempre devem ser analisados por um engenheiro com experiência na área.

Para este presente trabalho será adotado o critério de parada para um erro de 5%, porém serão respeitadas as limitações de malha ao usar a versão estudantil do Software Ansys Workbench 2024 R2.

4 MODELAMENTO

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento das metodologias apresentadas no capítulo anterior, apresentando os cálculos e realizados para o modelo analítico, e as condições de contorno empregadas no modelo numérico.

4.1 MODELAMENTO ANALÍTICO

4.1.1 Cálculo das forças atuantes

De forma a dimensionar as forças atuantes no defletor, a passagem da linha flexível pela estrutura representada na figura 32 foi aproximada a uma correia passando por uma polia, conforme representado por Silveira (2019), em que para esse estudo devido à baixa velocidade da operação, a componente gerada pela força centrífuga será aproximada a 0. Logo as forças atuantes são apresentadas na figura 33.

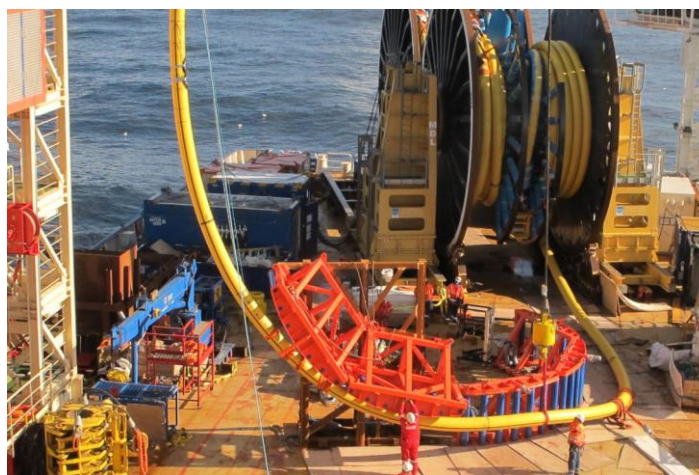


Figura 32 - Passagem da linha pelo defletor
Fonte: Marine Developments

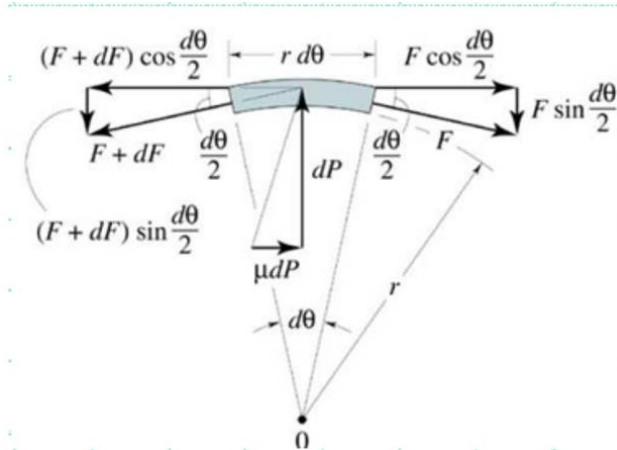


Figura 33 - Transmissão flexível: correia/polia.
Fonte: Silveira (2019)

Em que $F + \Delta F = F_1$ é a força de tração do guincho de iniciação, e por convenção e $F = F_2$ é a força que atua na parte destracionada do cabo, fazendo o equilíbrio de forças no eixo X:

$$\sum F_x = 0$$

$$F_2 = \frac{F_1}{e^{\mu \cdot \theta}} \quad (1)$$

Pelo somatório de forças em Y obtém-se:

$$\sum F_y = 0$$

$$dN = F \theta$$

$$\int_0^N dN = \int_0^\theta F \cdot d\theta$$

$$N = F_2 \theta$$

(2)

4.1.2 Cálculo das reações

De forma a determinar as reações deve-se realizar o diagrama de corpo livre da estrutura, o qual demonstra as forças e reações e pode ser visto na figura 34.

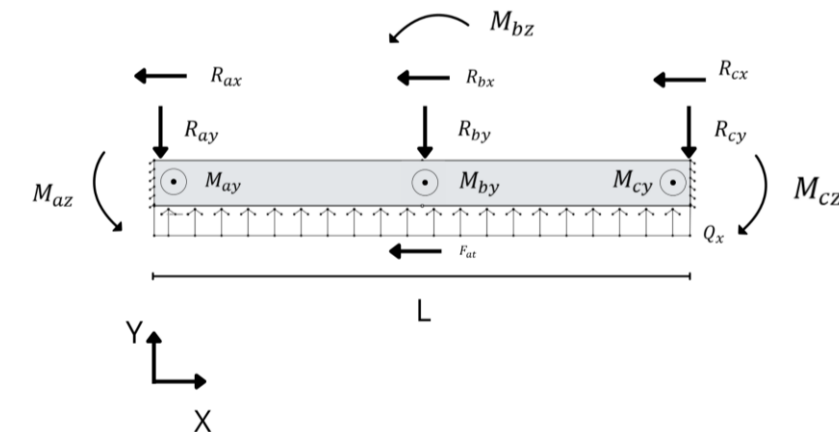


Figura 34 - Diagrama de corpo livre no eixo XY
Fonte: o próprio autor

De forma a encontrar as reações R_{ay} , R_{by} e R_{cy} e os momentos M_{az} , M_{bz} e M_{cz} são necessárias 6 equações. A primeira é encontrada através do equilíbrio de forças no eixo Y :

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{ay} + R_{by} + R_{cy} = Q_x \cdot L \quad (3)$$

A segunda equação é encontrada através do equilíbrio de momentos no ponto A

$$\sum M_z = 0$$

$$M_{az} + M_{bz} - M_{cz} - \frac{R_{by} \cdot L}{2} - R_{cy} \cdot L + \frac{Q_x \cdot L^2}{2} = 0 \quad (4)$$

Apenas com as duas equações de equilíbrio não é possível solucionar as todas as incógnitas, logo a estrutura é hiperestática. Hibbeler (2008), descreve a metodologia necessária para resolução desses problemas, em que através da

aplicação das condições de contorno a equação da linha elástica são encontradas outras equações necessárias. A equação da linha elástica é dada por:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M_z}{E \cdot I}$$

De forma a calcular M_z Será utilizado o método da singularidade descrito em Hibbeler (2008), em que:

$$M_z(x) = -M_{az}\langle x - 0 \rangle^0 - M_{bz}\langle x - \frac{L}{2} \rangle^0 + M_{cz}\langle x - L \rangle^0 - R_{ay}\langle x - 0 \rangle - R_{by}\langle x - \frac{L}{2} \rangle - R_{cy}\langle x - L \rangle + \frac{Q_x}{2}\langle x - 0 \rangle^2$$

$$M_z(x) = -M_{az} - M_{bz}\langle x - \frac{L}{2} \rangle^0 - R_{ay} \cdot x - R_{by}\langle x - \frac{L}{2} \rangle + \frac{Q_x \cdot x^2}{2} \quad (5)$$

Integrando a equação do momento em função de x:

$$\frac{dy}{dx} = \theta = \frac{1}{E \cdot I} \left(-M_{az} \cdot x - M_{bz}\langle x - \frac{L}{2} \rangle - \frac{R_{ay} \cdot x^2}{2} - \frac{R_{by}\langle x - \frac{L}{2} \rangle^2}{2} + \frac{Q_x \cdot x^3}{6} + C_1 \right) \quad (6)$$

Em que θ é o ângulo gerado pela deflexão da viga. Y é encontrado integrando novamente a equação em função de x

$$Y = \frac{1}{E \cdot I} \left(\frac{-M_{az} \cdot x^2}{2} - \frac{M_{bz}\langle x - \frac{L}{2} \rangle^2}{2} - \frac{R_{ay} \cdot x^3}{6} - \frac{R_{by}\langle x - \frac{L}{2} \rangle^3}{6} + \frac{Q_x \cdot x^4}{24} + C_1 \cdot x + C_2 \right) \quad (7)$$

As condições de contorno para o problema são: $\theta(0) = 0$, $Y(0) = 0$, $\theta\left(\frac{L}{2}\right) = 0$, $Y\left(\frac{L}{2}\right) = 0$, $\theta(L) = 0$ e $Y(L) = 0$, dado que para os engastes no ponto A, B e C não permitem que a viga rotacione, logo $\theta = 0$ nem flexione, logo $Y = 0$. Aplicando as condições de contorno nas equações 6 e 7, é possível obter as equações faltantes para a solução do problema. Utilizando a condição de $Y(0) = 0$, obtém-se:

$$C_1 = 0 \quad (8)$$

Para $\theta(0) = 0$:

$$C_2 = 0 \quad (9)$$

Para $\theta\left(\frac{L}{2}\right) = 0$:

$$\frac{M_{az} \cdot L^2}{8} + \frac{R_{ay} \cdot L^3}{48} = \frac{Q_x \cdot L^4}{384} \quad (10)$$

Para $Y\left(\frac{L}{2}\right) = 0$:

$$M_{Az} = \left(\frac{Q_x \cdot L^2}{24} - \frac{R_{ay} \cdot L}{4} \right) \quad (11)$$

Substituindo (10) em (11):

$$\frac{L^2}{8} \left(\frac{Q_x \cdot L^2}{24} - \frac{R_{ay} \cdot L}{4} \right) + \frac{R_{ay} \cdot L^3}{48} = \frac{Q_x \cdot L^4}{384}$$

$$R_{ay} = \frac{Q_x \cdot L}{4} \quad (12)$$

Logo:

$$M_{az} = - \frac{Q_x \cdot L^2}{48} \quad (13)$$

Para $Y(L) = 0$

$$\frac{M_{az} \cdot L^2}{2} + \frac{M_{bz} \cdot L^2}{8} + \frac{R_{ay} \cdot L^3}{6} + \frac{R_{by} \cdot L^3}{48} = \frac{Q_x \cdot L^4}{24} \quad (14)$$

Para $\theta(L) = 0$:

$$M_{bz} = \frac{Q_x \cdot L^2}{3} - 2M_{az} - R_{ay} \cdot L - \frac{R_{by} \cdot L}{4} \quad (15)$$

Substituindo 14 em 15:

$$R_{by} = \frac{24 \cdot M_{az}}{L} + 4R_{ay} \quad (16)$$

Logo:

$$M_{bz} = 0 \quad (17)$$

Pela equação (1):

$$R_{cy} = Q_x \cdot L - R_{ay} - R_{by} \quad (18)$$

Pela equação (2):

$$M_{cz} = M_{az} + M_{bz} - \frac{R_{by} \cdot L}{2} - R_{cy} \cdot L + \frac{Q_x \cdot L^2}{2} \quad (19)$$

De forma a simplificar o modelo analítico as reações aos momentos gerados nos eixos X e Y, M_x e M_y respectivamente, serão calculadas através do modelo de viga mono engastada no plano YZ, visto na figura 35:

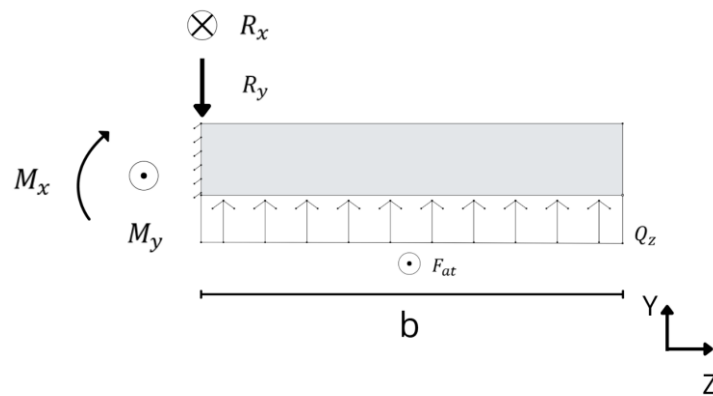


Figura 35 - Diagrama de corpo livre no plano YZ
Fonte: o próprio autor

Realizando o equilíbrio de forças em X:

$$\sum F_x = 0$$

$$R_x = F_{at} \quad (20)$$

Em que a força de atrito é dada pela equação:

$$F_{at} = Q_z \cdot b \cdot \mu \quad (21)$$

Através do equilíbrio de forças em Y:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_y = Q_z \cdot b \quad (22)$$

Através do equilíbrio de momentos em X, no ponto a:

$$\sum M_x = 0$$

$$M_x = \frac{Q_z \cdot b^2}{2} \quad (23)$$

Através do equilíbrio de momentos em Y, no ponto a:

$$\sum M_y = 0$$

$$M_y = \frac{F_{at} \cdot b}{2} \quad (24)$$

4.1.3 Determinação do ponto crítico

De forma a encontrar o ponto crítico da estrutura, deve-se achar o ponto em que os esforços são máximos. Para o cálculo das tensões será adotada a consideração de viga longa vista em Hibbeler (2008), dado que é esperado encontrar uma espessura t muito menor que o comprimento L e a largura b . Nessa consideração apenas os momentos geram tensões, dado que eles possuem uma magnitude muito maior que as tensões geradas pelas forças, logo apenas os momentos máximos serão calculados. Para o plano XY a primeira seção em que $0 < x < \frac{L}{2}$ pode ser vista na figura 36:

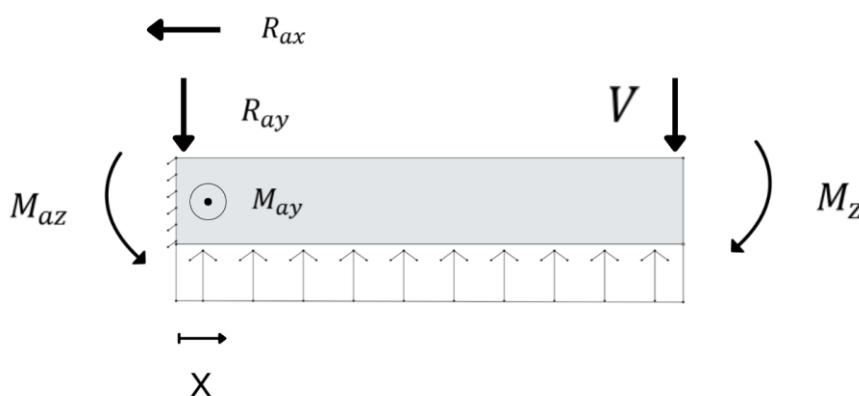


Figura 36 - Primeira seção plano XY
Fonte: o próprio autor

Através do equilíbrio de momentos em relação ao corte pode-se encontrar o momento máximo da seção em função de x :

$$\sum M_z = 0$$

$$M_z = -\frac{Q_x \cdot x^2}{2} + M_{az} + R_{ay} \cdot x \quad (25)$$

Substituindo as extremidades de forma a encontrar o ponto em que o momento é máximo:

Para $x = 0$

$$M_z = M_{az} \quad (26)$$

Para $x = \frac{L}{2}$

$$M_z = -\frac{Q_x \cdot L^2}{8} + M_{az} + \frac{R_{ay} \cdot L}{2} \quad (27)$$

Para a segunda seção em que $0 < x < L$ (figura 37):

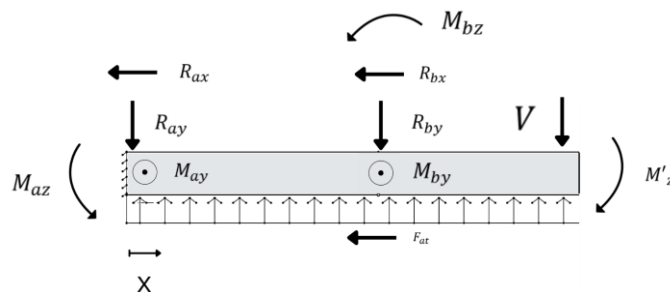


Figura 37 - Segunda seção plano XY
Fonte: o próprio autor

Através do somatório de momentos em z em relação ao corte:

$$\sum M_z = 0$$

$$M'_z = -\frac{Q_x \cdot x^2}{2} + M_{az} + R_{ay} \cdot x + R_{by} \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right) + M_{bz}$$

Para $x = L$

$$M'_z = -\frac{Q_x \cdot L^2}{2} + M_{az} + R_{ay} \cdot x + \frac{R_{by} \cdot L}{2} + M_{bz} \quad (28)$$

Realizando o mesmo método agora para o plano YZ, em que as seções variam entre $0 < z < \frac{b}{2}$, a primeira seção pode ser vista na figura 38:

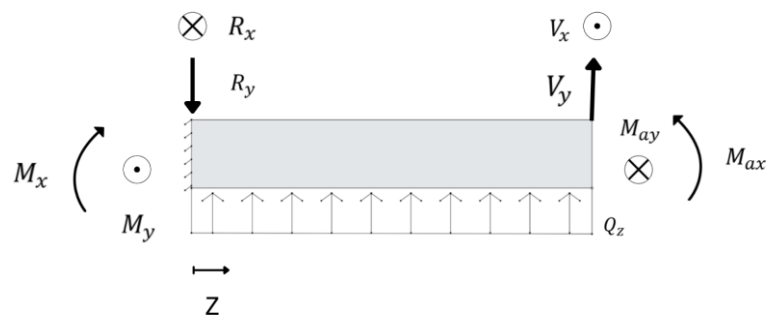


Figura 38 - Primeira seção plano YZ

Fonte: o próprio autor

Através do equilíbrio de forças em X:

$$\sum F_x = 0$$

$$V_x = R_x = F_{at}$$

Para o eixo Y:

$$\sum F_y = 0$$

$$V_y = R_y - Q_z \cdot z$$

Pelo equilíbrio dos momentos de Y em relação ao corte:

$$\sum M_x = 0$$

$$M_{ax} = M_x - R_y \cdot z + \frac{Q_z \cdot z^2}{2} \quad (29)$$

Para o eixo Y:

$$\sum M_y = 0$$

$$M_{ay} = -M_y + R_x \cdot z \quad (30)$$

Para encontrar os pontos críticos deve-se substituir as condições de contorno $z = 0$ e $z = \frac{b}{2}$ nas equações x, y e z. Para $z = 0$:

$$V_x = F_{at} \quad (31)$$

$$V_y = R_y = Q_z \cdot b \quad (32)$$

$$M_{ax} = M_x = \frac{Q_z \cdot b^2}{2} \quad (33)$$

$$M_{ay} = -M_y = -\frac{F_{at} \cdot b}{2} \quad (34)$$

Para $z = \frac{b}{2}$:

$$V_x = R_x = F_{at} \quad (35)$$

$$V_y = Q_z \cdot b - Q_z \cdot \frac{b}{2} = Q_z \cdot \frac{b}{2} \quad (36)$$

$$M_{ax} = \frac{Q_z \cdot b^2}{2} - \frac{Q_z \cdot b^2}{2} + \frac{Q_z \cdot b^2}{2} = \frac{Q_z \cdot b^2}{2} \quad (37)$$

$$M_{ay} = -M_y + R_x \cdot \frac{b}{2} = -\frac{F_{at} \cdot b}{2} + \frac{F_{at} \cdot b}{2} = 0 \quad (38)$$

A segunda seção pode ser vista na figura 39:

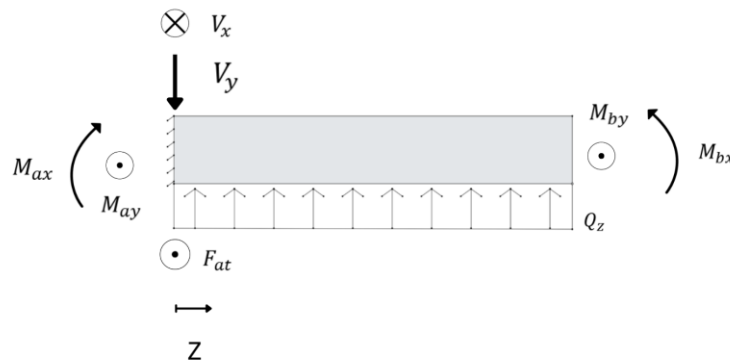


Figura 39 - Segunda seção plano YZ
Fonte: o próprio autor

Em que são colocadas as reações, forças e momentos com mesmo módulo e sentidos diferentes, as cortantes e momentos gerados em $z = \frac{b}{2}$ na seção um. Pelo equilíbrio dos momentos em relação ao corte:

$$\sum M_x = 0$$

$$M_{bx} = M_{ax} + \frac{Q_z \cdot z^2}{2} - V_y \cdot z \quad (39)$$

Para o eixo Y:

$$\sum M_y = 0$$

$$M_{by} = F_{at} \cdot z - V_x \cdot z = F_{at} \cdot z - F_{at} \cdot z = 0 \quad (40)$$

Para $z = 0$:

$$M_{bx} = M_{ax} = \frac{Q_z \cdot b^2}{2} \quad (41)$$

$$M_{by} = 0 \quad (42)$$

Para $z = \frac{b}{2}$:

$$M_{bx} = \frac{Q_z \cdot b^2}{8} + \frac{Q_z \cdot b^2}{8} - \frac{Q_z \cdot b^2}{2} = -\frac{Q_z \cdot b^2}{4} \quad (43)$$

$$M_{by} = 0 \quad (44)$$

4.1.4 Cálculo das tensões

Determinados os momentos máximos nos eixos e o ponto crítico, deve-se calcular a tensão no mesmo. Dada a geometria da estrutura ser a de uma chapa com espessura reduzida, será adotada a consideração de estado plano de tensões, em que na superfície o vetor de tensão σ_y é igual a 0. Logo a localização do tensor 2D posicionado no plano XY pode ser visto na figura 40:

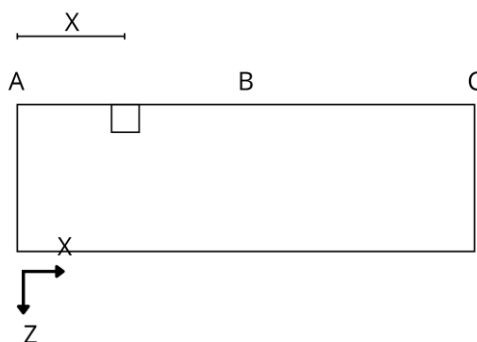


Figura 40 - Localização do tensor
Fonte: o próprio autor

Em que M_x gera a tensão normal ao eixo z σ_z devido a flexão, e os momentos M_z e M_y geram as tensões normais ao eixo x σ_x como visto na figura 41:

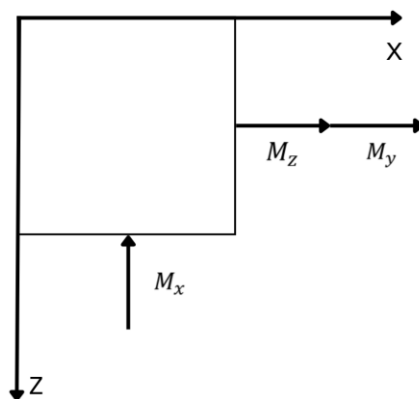


Figura 41 - Tensões geradas pelos momentos
Fonte: o próprio autor

As tensões σ_x e σ_z são calculados através das equações:

$$\sigma_x = -\frac{M_z \cdot y'}{I_z} + \frac{M_y \cdot z'}{I_y} \quad (45)$$

$$\sigma_z = \frac{M_x \cdot y'}{I_x} \quad (46)$$

Em que z' é a distância em X do tensor ao eixo neutro, e y' a distância em Y. I_x , I_y e I_z , são os momentos de inércia da seção em seu respectivo eixo. Os quais podem ser calculados através de:

$$z' = -\frac{b}{2}$$

$$y' = \frac{t}{2}$$

$$I_x = \frac{t^3 \cdot L}{12}$$

$$I_y = \frac{b^3 \cdot t}{12}$$

$$I_z = \frac{t^3 \cdot b}{12}$$

Substituindo os valores nas equações x e y:

$$\sigma_x = -\frac{6M_z}{t^2 \cdot b} + \frac{6M_y}{b^2 \cdot t} \quad (47)$$

$$\sigma_z = -\frac{6M_x}{t^2 \cdot L} \quad (48)$$

Hibbeler (2008), descreve diversos critérios de falha para materiais dúcteis. Dentre os demonstrados será adotado o critério de von Mises, dado que através dele é possível obter um valor escalar diretamente comparável a tensão admissível do projeto. Dada a consideração do estado plano de tensões, a tensão equivalente de von Mises é calculada através de:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z} \quad (49)$$

Substituindo as equações (47) e (48) em (49):

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(-\frac{6M_z}{t^2 \cdot b} + \frac{6M_y}{b^2 \cdot t}\right)^2 + \left(-\frac{6M_x}{t^2 \cdot L}\right)^2 - \left\{-\frac{6M_x}{t^2 \cdot L} \left(-\frac{6M_z}{t^2 \cdot b} + \frac{6M_y}{b^2 \cdot t}\right)\right\}} \quad (50)$$

4.2 MODELAMENTO NÚMÉRICO

4.2.1 Tipo de modelagem

Na análise de elementos finitos é possível adotar diferentes formas para modelar a estrutura, sendo possíveis: Modelo de viga (1D), casca (2D) e tridimensional (3D).

A consideração de viga (1D) é ideal para estruturas esbeltas, onde o comprimento é muito maior do que a espessura e largura, como: vigas e tubos estruturais. Além disso, com o modelamento em vigas é viável visualizar resultados como flexão, tensões normais e torção. Além disso, essa forma de modelamento gera baixo gasto computacional.

O modelo 2D, conhecido como casca é utilizado quando a espessura é muito menor do que o comprimento e largura, vale ressaltar que nesse caso o comprimento não necessariamente é maior ou muito maior que a largura, senão seria utilizado o modelo de viga. Um exemplo clássico para este tipo de modelo são as chapas. Neste modelamento é permitido visualizar flexão, tensões normais, torção e cisalhamento. Ademais, este tipo de modelo também apresenta excelente custo computacional.

Por fim, o modelo tridimensional (3D) é utilizado quando todas as dimensões apresentam um valor semelhante entre si e não podem ser simplificadas. Representam análises mais complexas e com alto custo computacional, variando de acordo com o tamanho da geometria. Podem capturar diferentes tipos de deformações e tensões.

Para este trabalho será considerado apenas modelamentos em viga e em casca, uma vez que serão projetados somente tubos e chapas, que compõem o defletor vertical. Assim, não sendo necessária a abordagem 3D e otimizando o custo computacional. Abaixo é possível visualizar os diferentes modelos (Figura 42).

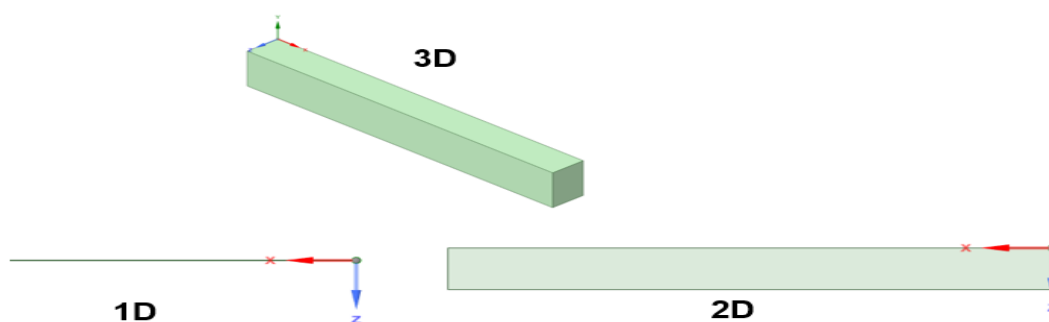


Figura 42- Modelos 1D, 2D e 3D
Fonte: O próprio autor.

4.2.2 Parâmetros iniciais

Neste tópico serão definidas as variáveis fixas que serão utilizadas em todas as análises, exceto os carregamentos aplicados, pois fazem parte dos resultados obtidos no modelo analítico. Segue a tabela 1 para modelagem das geometrias.

Tabela 1 – Variáveis fixas da simulação.
Fonte: O próprio autor.

<i>Variável</i>	<i>Unidade</i>
<i>Comprimento da chapa (L)</i>	<i>m</i>
<i>Largura (b)</i>	<i>m</i>
<i>Coefficiente de atrito (u)</i>	-
<i>Aceleração da gravidade (g)</i>	<i>m/s²</i>
<i>Raio de curvatura (R)</i>	<i>m</i>
<i>Altura do defletor</i>	<i>m</i>
<i>Força de atrito (Fat)</i>	<i>N</i>
<i>Força normal (Fn)</i>	<i>N</i>

4.2.3 Estrutura plana tri-engastada

Este modelo tem como objetivo reproduzir a configuração do modelo analítico para o plano XY. Dessa forma, a chapa foi desenhada como modelo de casca no SpaceClaim, a geometria foi dividida em duas superfícies para facilitar a aplicação das condições de contorno como visto na figura 43.

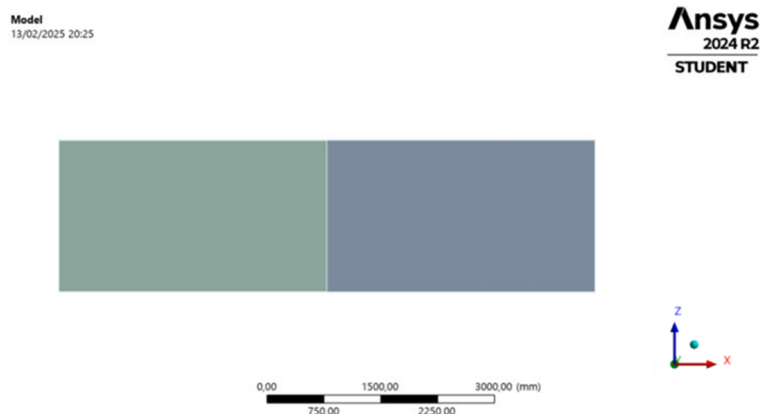


Figura 43- Modelamento estrutura plana tri-engastada
Fonte: O próprio autor.

Em seguida, foram aplicadas as condições de contorno que podem ser vistas a seguir:

- Suporte fixo: Restrição de movimento em todos os eixos, aplicada em três arestas da chapa, para simular a ação do engaste (figura 44);
- Pressão: Representa a força normal aplicada na face inferior da chapa, se distribuindo de acordo com a área (comprimento x largura). Seu módulo será explicitado futuramente no tópico de resultados (figura 45);
- Força de atrito: Resistência ao movimento, aplicada em toda face inferior da chapa. Seu módulo também será explicitado futuramente no tópico de resultados (figura 46);
- Aceleração da gravidade: $9,81 \text{ m/s}^2$ aplicado no ambiente para simular a influência do peso próprio da estrutura (figura 47).

R: Estrutura plana tri-engastada
 Suporte fixo
 Time: 1, s
 13/02/2025 20:42

Ansys
 2024 R2
 STUDENT

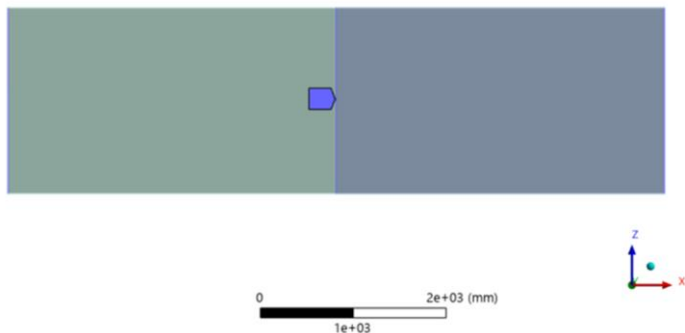


Figura 44-Suporte fixo estrutura plana tri-engastada.
 Fonte: O próprio autor.

R: Estrutura plana tri-engastada
 Pressão
 Time: 1, s
 13/02/2025 21:15

Ansys
 2024 R2
 STUDENT

R: Estrutura plana tri-engastada
 Pressão
 Time: 1, s
 13/02/2025 21:26

Ansys
 2024 R2
 STUDENT

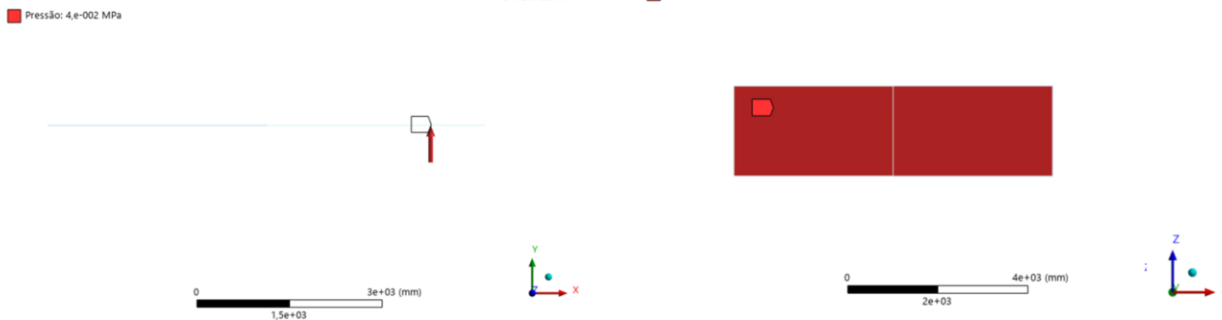


Figura 45-Pressão estrutura plana tri-engastada.
 Fonte: O próprio autor.

R: Estrutura plana tri-engastada
 Força de atrito
 Time: 1, s
 13/02/2025 21:20

Ansys
 2024 R2
 STUDENT

R: Estrutura plana tri-engastada
 Força de atrito
 Time: 1, s
 13/02/2025 21:29

Ansys
 2024 R2
 STUDENT



Figura 46-Força de atrito estrutura plana tri-engastada.
 Fonte: O próprio autor.

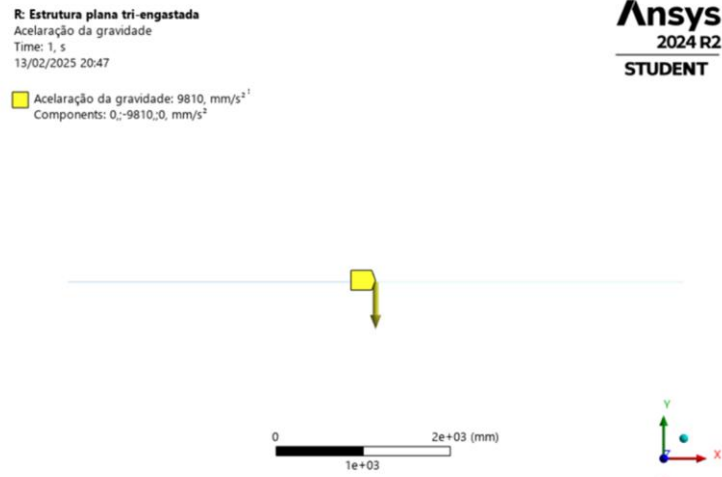


Figura 47-Aceleração da gravidade estrutura plana tri-engastada.
Fonte: O próprio autor.

Realizada a análise a tensão obtida será comparada a tensão σ_x obtida no modelo analítico.

4.2.4 Estrutura plana com engaste longitudinal

Essa geometria também tem como objetivo a validação do método analítico. No entanto, diferente do tópico anterior o modelo encontra-se engastado ao longo de todo o comprimento como pode ser visto abaixo na figura 46:

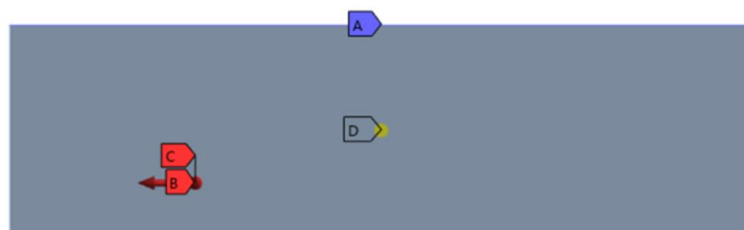
- Suporte fixo: Restrição de movimento em todos os eixos, na aresta que representa o comprimento da chapa;
- Pressão: Representa a força normal aplicada na face inferior da chapa, se distribuindo de acordo com a área (comprimento x largura). Seu módulo será explicitado futuramente no tópico de resultados;
- Força de atrito: Resistência ao movimento, aplicada em toda face inferior da chapa. Seu módulo também será explicitado futuramente no tópico de resultados;
- Aceleração da gravidade: $9,81 \text{ m/s}^2$ aplicado no ambiente para simular a influência do peso próprio da estrutura.

Em relação a estrutura anterior simplificada plana, somente foi modificada a região de aplicação do suporte fixo, conforme a figura 48.

N: Estrutura plana com engaste longitudinal
 Static Structural
 Time: 1, s
 13/02/2025 21:45

Ansys
 2024 R2
 STUDENT

- A** Suporte fixo
- B** Pressão: 4,e-002 MPa
- C** Força de atrito: 1,1243e+005 N
- D** Aceleração da gravidade: 9810, mm/s²



0 1e+03 2e+03 (mm)



Figura 48- Condições de contorno estrutura plana com engaste longitudinal.
Fonte: O próprio autor.

O resultado obtido para essa análise deve ser comparado a tensão σ_z obtida no modelo analítico.

4.2.5 Estrutura simplificada curva

De forma a verificar se a estrutura simplificada resiste as solicitações, será modelada a chapa com sua curvatura, e os tubos de sustentação em que ela é fixada. A estrutura pode ser vista na figura 49 e na figura 50.

Geometry
25/01/2025 22:11

Ansys
2024 R2
STUDENT

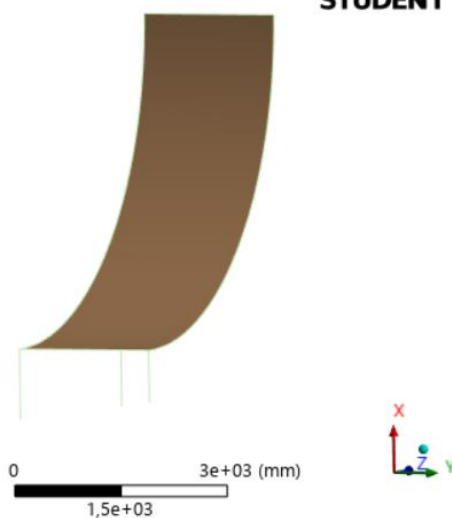


Figura 49-Modelamento estrutura simplificada curva.
Fonte: O próprio autor.

Geometry
25/01/2025 22:14

Ansys
2024 R2
STUDENT

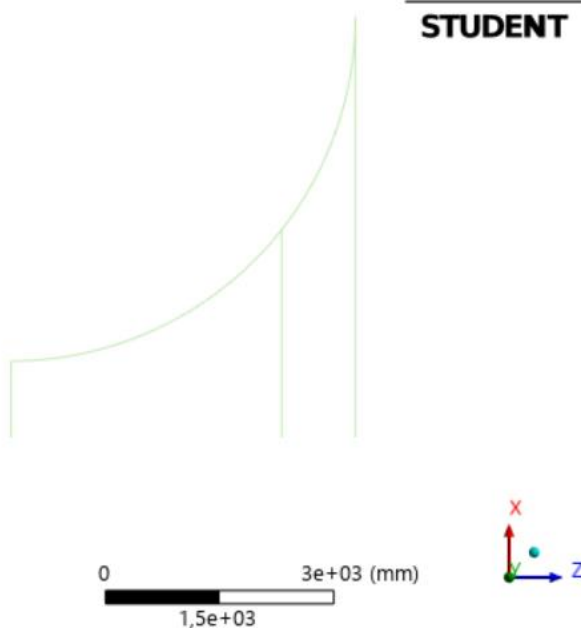


Figura 50-Modelamento estrutura simplificada curva.
Fonte: O próprio autor.

Foram utilizados os modelos de viga para representar os tubos e o modelo de casca para representar a chapa curvilínea. Foi realizado o projeto no space claim, em que para representar a união entre os elementos foi adotada a ferramenta “Share” para o reconhecimento dos contatos. Processo identificado na figura 51 e 52. Este

recurso compartilha as topologias entre si, assim, fazendo o reconhecimento do contato.

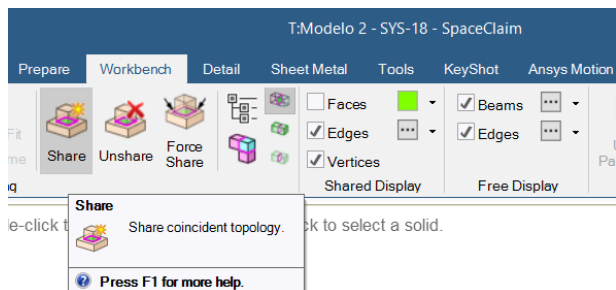


Figura 51-Ferramenta Share do Space Claim.
Fonte: O próprio autor.

11 edges, 11 vertices. Click the Complete tool guide to share all coincident topology

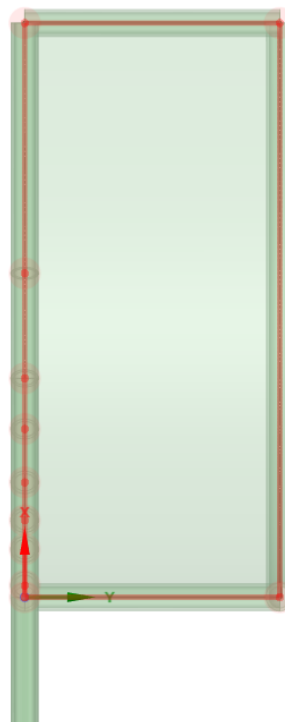


Figura 52-Aplicando a ferramenta Share.
Fonte: O próprio autor.

As condições de contorno aplicadas foram:

- Suporte fixo: Restrição de movimento em todos os eixos, aplicada em três nas três linhas que representam os tubos, para simular a ação do engaste;

- Pressão: Representa a força normal aplicada na face inferior da chapa curvilínea, se distribuindo de acordo com a área (compimento x largura). Seu módulo será explicitado futuramente no tópico de resultados;
- Força de atrito: Resistência ao movimento, aplicada em toda face inferior da chapa curvilínea. Seu módulo também será explicitado futuramente no tópico de resultados;
- Aceleração da gravidade: $9,81 \text{ m/s}^2$ aplicado no ambiente para simular a influência do peso próprio dos componentes

As condições de contorno podem ser vistas na figura 53:

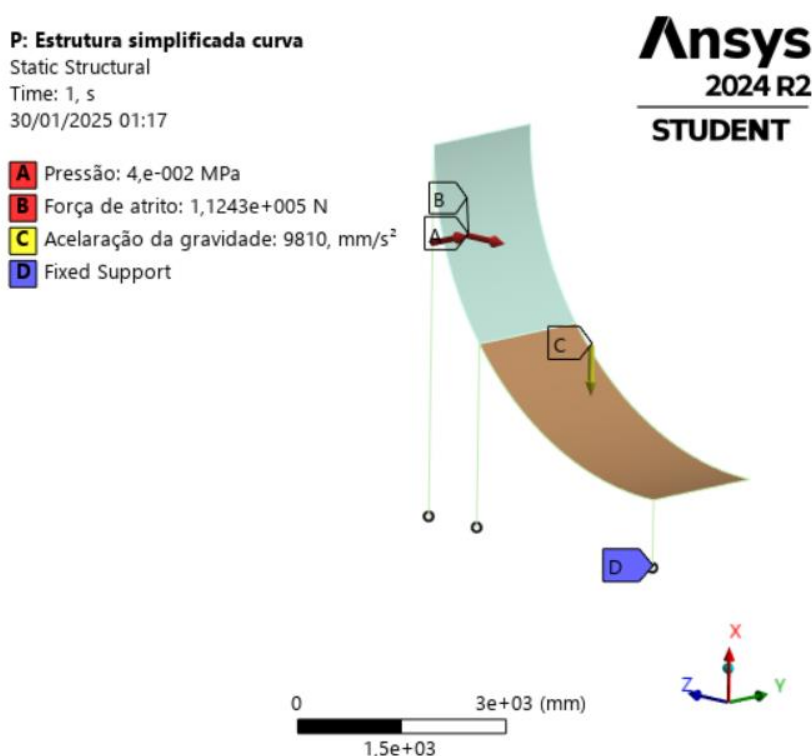


Figura 53 - Condições de contorno estrutura simplificada curva
Fonte: o próprio autor

As tensões e o deslocamento obtidos nesse modelo serão analisados para verificar se a estrutura resiste as solicitações da operação sem falhar por escoamento, e mantém a linearidade da análise. Baseado nos resultados obtidos serão propostos reforços para a estrutura aperfeiçoada.

4.2.6 Estrutura aperfeiçoada

Este caso representa a geometria do defletor vertical aperfeiçoada, acrescentando tubos estruturais como reforço afim de diminuir a espessura da chapa curvilínea do defletor, a estrutura pode ser vista na figura 54.

Para o desenho foi utilizada a ferramenta “Share’ já mencionada anteriormente no tópico 4.2.5.

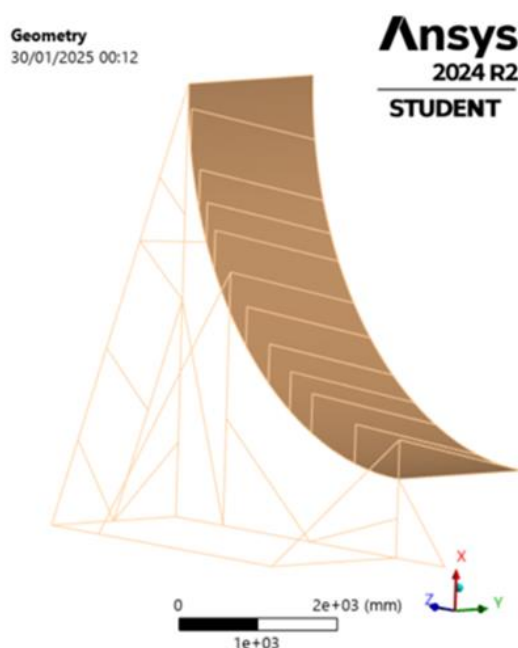


Figura 54-Modelamento estrutura aperfeiçoada.
Fonte: O próprio autor.

Segue as condições de contorno, que são similares ao tópico 4.2.5:

- Suporte fixo: Restrição de movimento em todos os eixos, aplicada em todas as arestas da base, que estão em contato com o chão. Assim, simulando o defletor engastado;
- Pressão: Representa a força normal aplicada na face inferior da chapa curvilínea, se distribuindo de acordo com a área (comprimento x largura). Seu módulo será explicitado futuramente no tópico de resultados;

- Força de atrito: Resistência ao movimento, aplicada em toda face inferior da chapa curvilínea. Seu módulo também será explicitado futuramente no tópico de resultados;
- Aceleração da gravidade: $9,81 \text{ m/s}^2$ aplicado no ambiente para simular a influência do peso próprio dos componentes.

As condições de contorno podem ser vistas na figura 55:

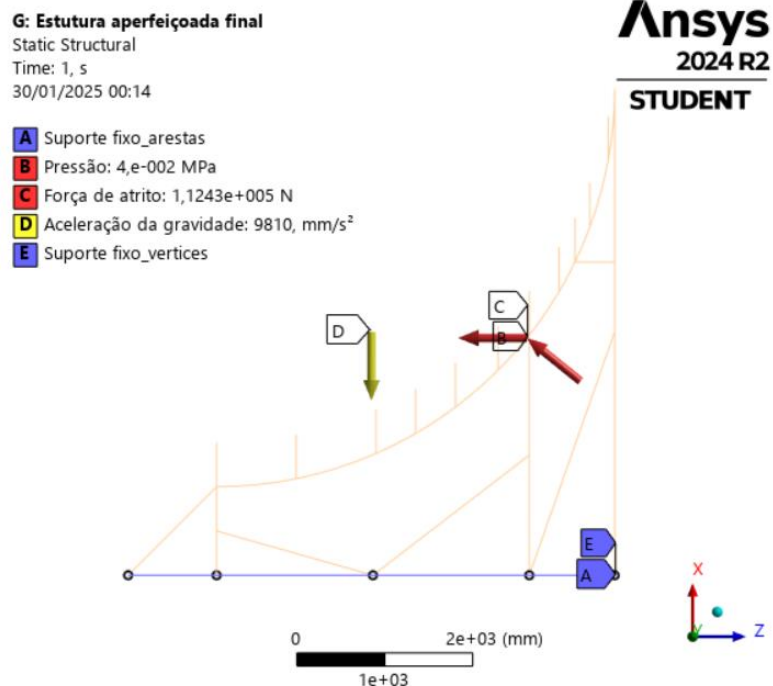


Figura 55 - Condições de contorno da geometria aperfeiçoada
 Fonte: o próprio autor

As tensões obtidas por esse modelo, devem ser menores que a tensão admissível do projeto, de forma a garantir que a estrutura não irá falhar por escoamento. E as deformações obtidas devem ser menores que a espessura da chapa, de forma a garantir a consideração de pequenas deformações, mantendo assim a linearidade da análise.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelo modelo analítico, e pelo modelo numérico, demonstrados no modelamento, assim como serão comparadas as tensões obtidas pelos dois métodos.

5.1 RESULTADOS DO MODELO ANALÍTICO

Os resultados obtidos pelo modelo analítico são obtidos ao substituir os valores apresentados no estudo de casos, nas equações apresentadas durante o tópico de modelamento, e podem ser vistos na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 Resultados modelo analítico
Fonte: O próprio autor

<i>Resultados modelo analítico</i>			
<i>Nº Equação</i>	<i>Variável</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
(2)	N	562,17	kN
(12)	R_{ay}	140,54	kN
(16)	R_{by}	281,09	kN
(18)	R_{cy}	140,54	kN
(13)	M_{az}	-82,79	kN.m
(17)	M_{bz}	0,00	kN.m
(19)	M_{cz}	-82,79	kN.m
(20)	R_x	112,43	kN
(22)	R_y	562,17	kN
(29)	$M_x (max)$	-562,17	kN.m
(30)	$M_y (max)$	-112,43	kN.m
(25)	$M_z (max)$	-206,97	kN.m
(47)	σ_z	-132,55	MPa
(48)	σ_x	69,05	MPa
(50)	σ_{eq}	177,46	MPa

Em que o valor da tensão equivalente é menor que o da tensão admissível de 210 MPa, logo o material não irá falhar por escoamento.

5.2 RESULTADOS DO MODELO NUMÉRICO

Por sua vez, os resultados do modelo numérico são obtidos ao requisitar as variáveis de saída da simulação (figura 56), como tensão equivalente de von Mises, deslocamento e tensão combinada máxima (verificação da tensão nos tubos que estão em elemento de viga).

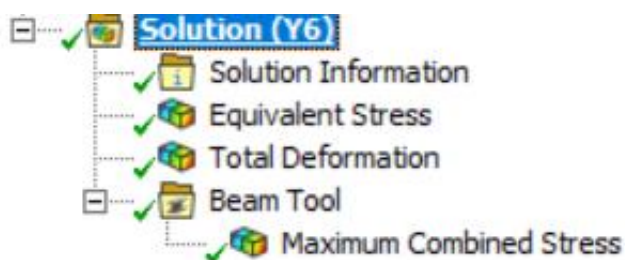


Figura 56- Resultados pedidos para as análises.
Fonte: O próprio autor.

5.2.1 Estrutura plana tri engastada

A malha utilizada na análise foi adotada através do critério de convergência de malha, e os resultados podem ser vistos na tabela 3:

Tabela 3 - Convergência de malha para estrutura simplificada plana tri engastada
Fonte: O próprio autor

<i>Estrutura simplificada plana tri engastada</i>			
<i>Element Size</i>	<i>Número de Nós</i>	<i>von Mises (MPa)</i>	<i>Diferença %</i>
150	686	63,65	
100	1491	66,58	4,60%
50	5863	70,115	5,31%
25	22923	72,005	2,70%

Logo malha utilizada no modelo é de 25 mm, e pode ser vista na figura 57:

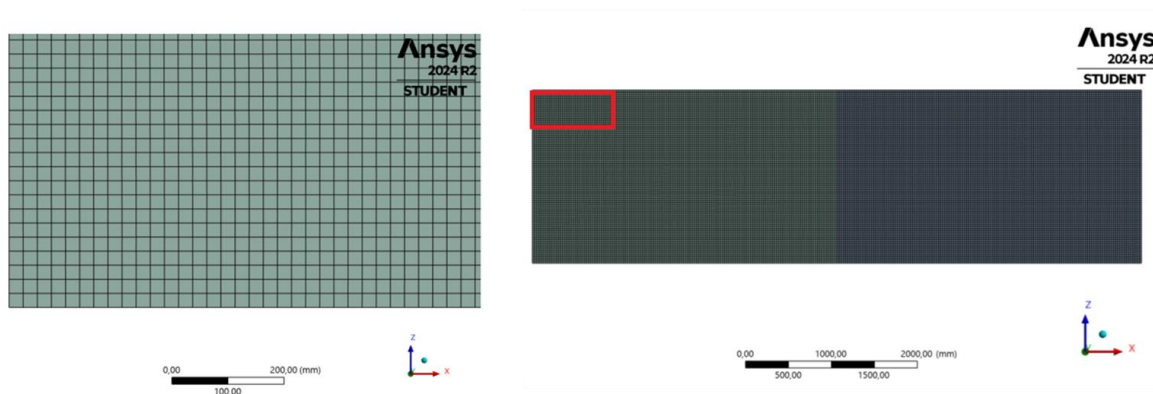


Figura 57 - Malha estrutura simplificada plana tri-engastada
Fonte: O próprio autor

A tensão máxima obtida para o modelo foi de 72,0 MPa, e pode ser vista na figura 58:

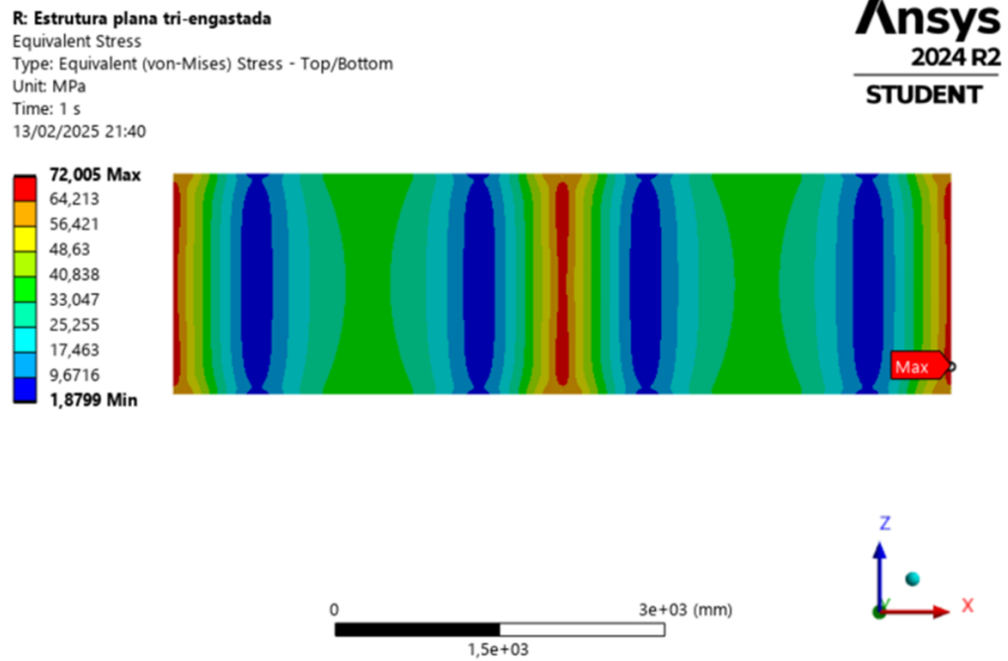


Figura 58 - Tensão máxima estrutura simplificada plana tri-engastada
 Fonte: O próprio autor

O deslocamento, pode ser vista na figura 59:

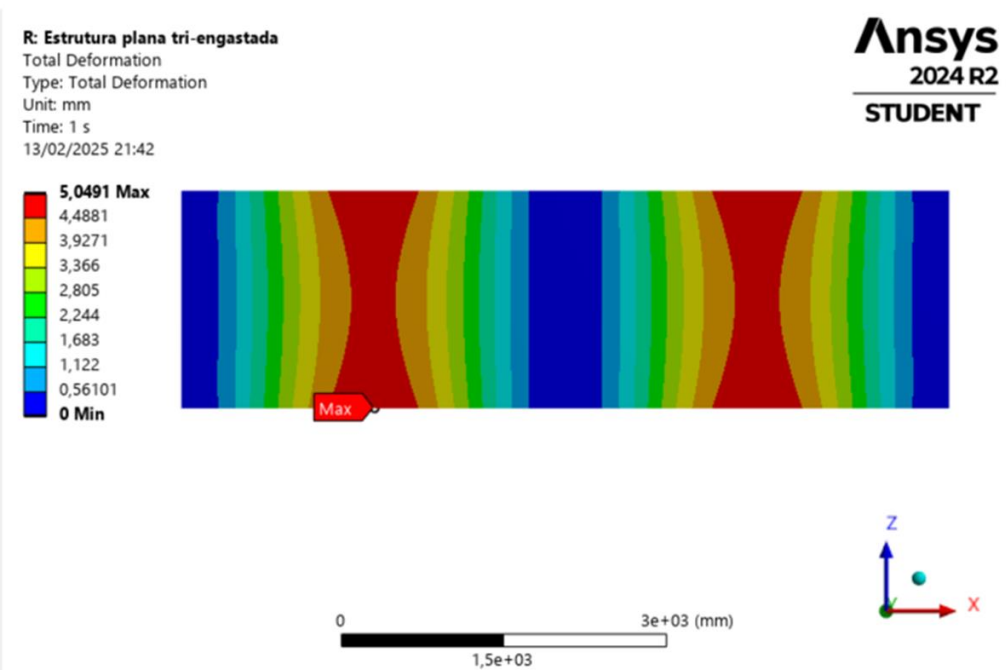


Figura 59 - Deslocamento da estrutura simplificada plana tri-engastada
 Fonte: O próprio autor

5.2.2 Estrutura plana com engaste longitudinal

A convergência de malha realizada para o modelo pode ser vista na tabela 4:

Tabela 4 - Convergência de malha para estrutura simplificada plana com engaste longitudinal
 Fonte: O próprio autor.

<i>Estrutura plana com engaste longitudinal</i>			
<i>Element Size</i>	<i>Número de Nós</i>	<i>von Mises (MPa)</i>	<i>Diferença %</i>
150	672	125,08	
100	1512	128,71	2,9%

Logo a malha adotada para o modelo foi de 100 mm (figura 60):

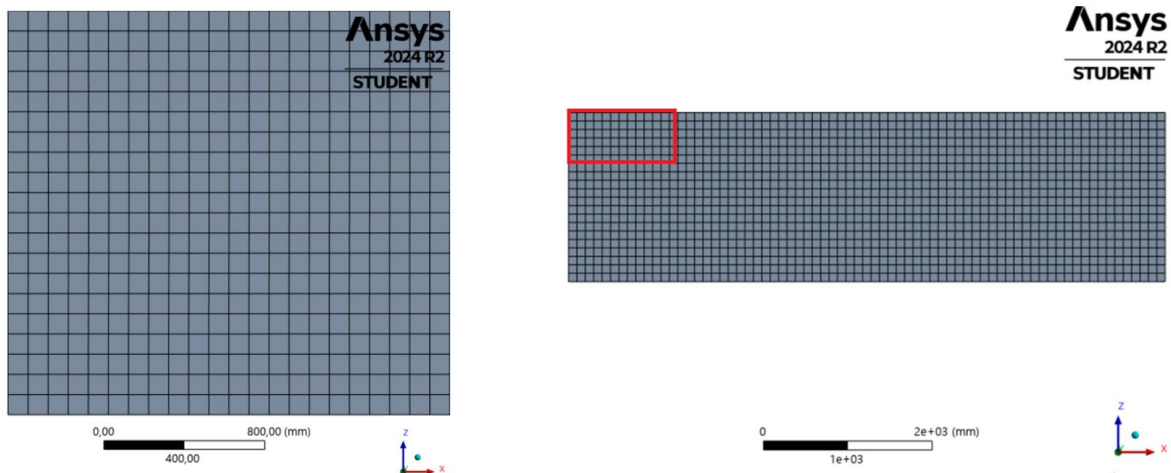
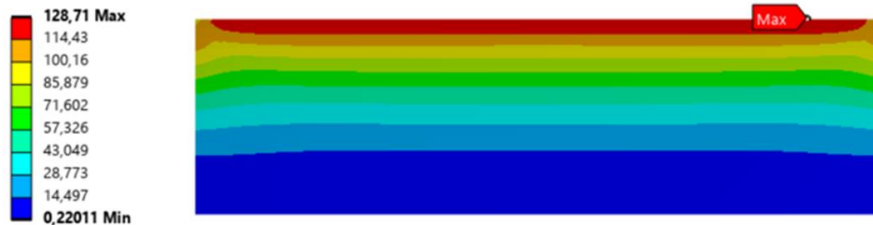


Figura 60 - Malha estrutura simplificada plana com engaste longitudinal
 Fonte: O próprio autor

A tensão máxima obtida para o modelo foi de 128,71 MPa, e pode ser vista na figura 61:

N: Estrutura plana com engaste longitudinal
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 13/02/2025 21:47

Ansys
 2024 R2
 STUDENT



0,00 1500,00 3000,00 (mm)
 750,00 2250,00

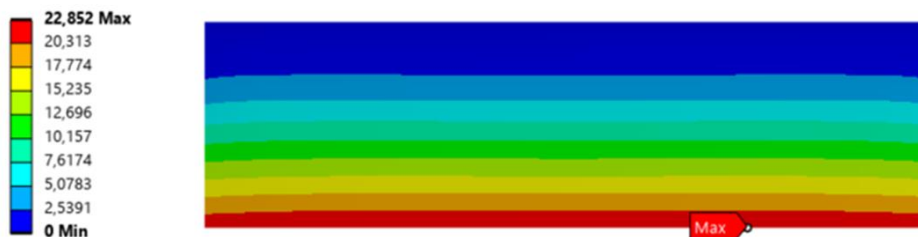


Figura 61 - Tensão de von Mises estrutura plana longitudinal.
 Fonte: O próprio autor.

O deslocamento pode ser visto na figura 62:

N: Estrutura plana com engaste longitudinal
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1 s
 13/02/2025 21:47

Ansys
 2024 R2
 STUDENT



0,00 1500,00 3000,00 (mm)
 750,00 2250,00



Figura 62 - Deslocamento total estrutura plana longitudinal.
 Fonte: o próprio autor

5.2.3 Estrutura simplificada curva

A malha adotada foi definida através da convergência de malha realizada para o modelo, a qual pode ser vista na tabela 5:

Tabela 5 - Convergência de malha para estrutura simplificada curva tri engastada
Fonte: o próprio autor

<i>Estrutura simplificada curva</i>				
<i>Element Size</i>	<i>von Mises Chapa (MPa)</i>	<i>Diferença para chapa (%)</i>	<i>Tensão Combinada Max tubos (MPa)</i>	<i>Diferença para o tubo (%)</i>
150	223,77		460,14	
100	250,24	11,8%	460,09	0,0%
50	287,24	14,8%	460,09	0,0%
25	317,46	10,5%	460,09	0,0%

Em que apesar malha convergir para os tubos, ela diverge para a chapa. Será utilizado o element size de 25 mm dada a limitação de refino do software a qual pode ser vista na figura 63:

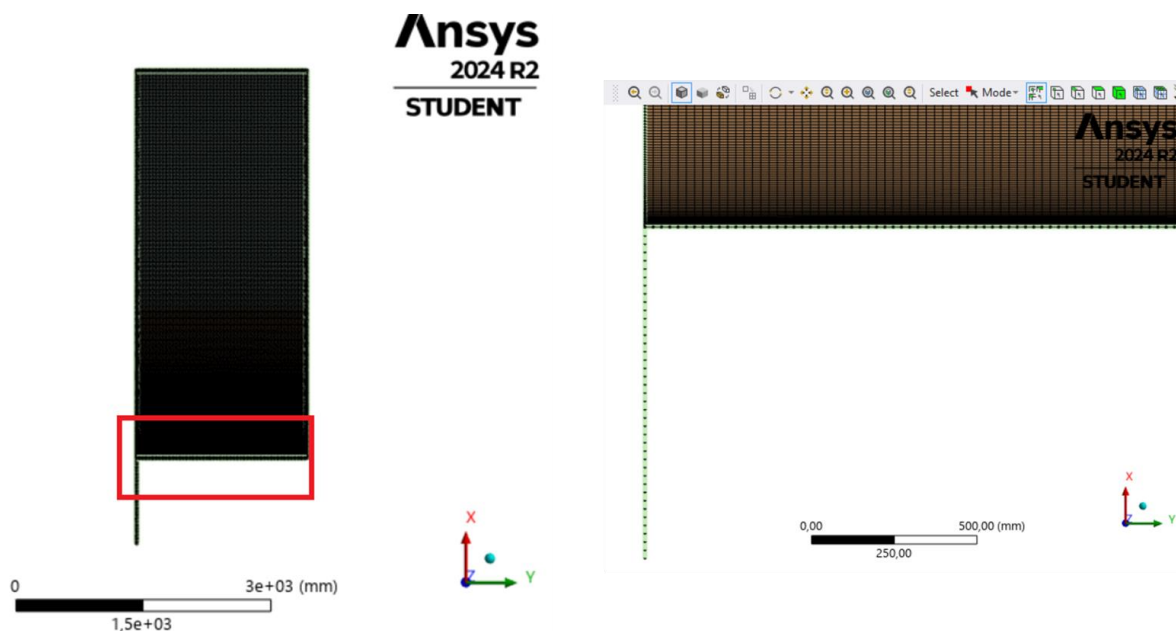


Figura 63 - Malha geometria simplificada curvada
 Fonte: O próprio autor

A tensão máxima obtida na chapa foi de 317,45 MPa e pode ser vista na figura 64:

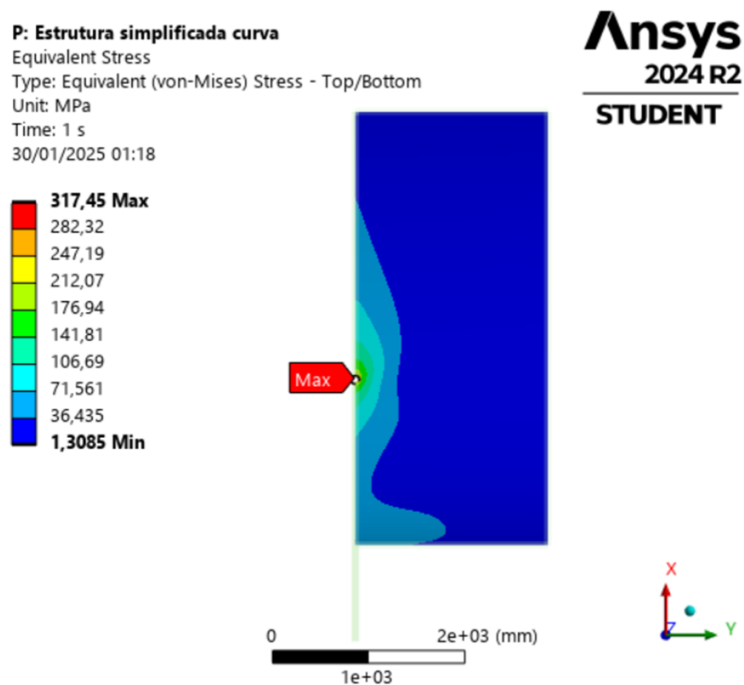


Figura 64 - Tensão máxima na chapa da estrutura simplificada curva
 Fonte: o próprio autor

Em que a tensão máxima se apresenta em uma região muito pequena (figura 65), e será tratada como um ponto de singularidade que impede a convergência da malha para a chapa.

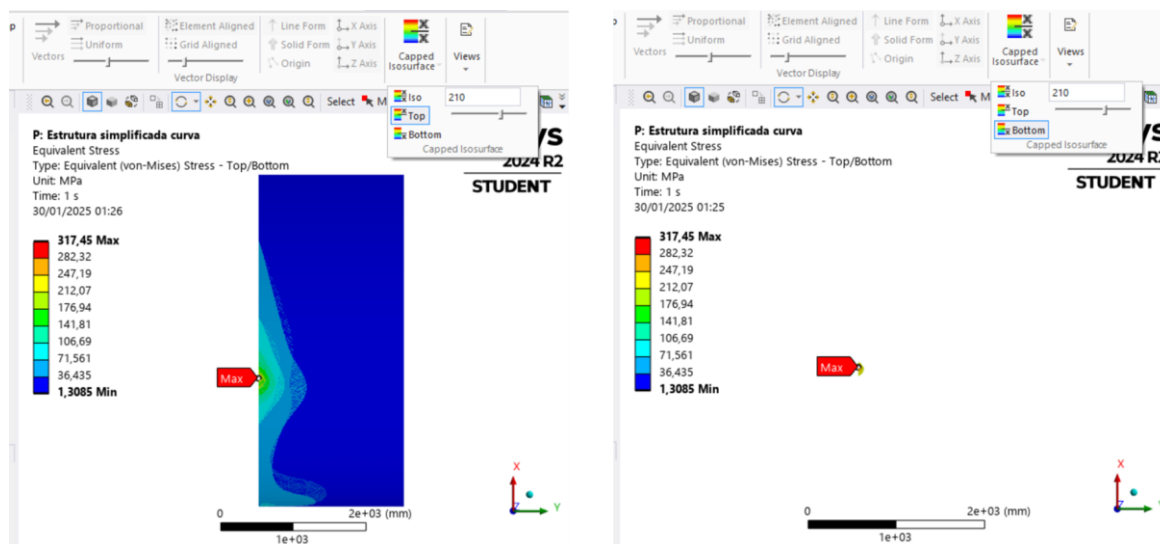


Figura 65 - Filtros aplicados as tensões da chapa da estrutura simplificada curva
Fonte: o próprio autor

O filtro “Top” representa regiões da peça que estão abaixo de 210 MPa e o filtro “Bottom” sinaliza as áreas que estão acima de 210 MPa.

Como a região em que a tensão máxima ultrapassa a tensão admissível é muito pequena, não representa uma parte significativa da chapa que irá escoar.

O deslocamento pode ser visto na figura 66:

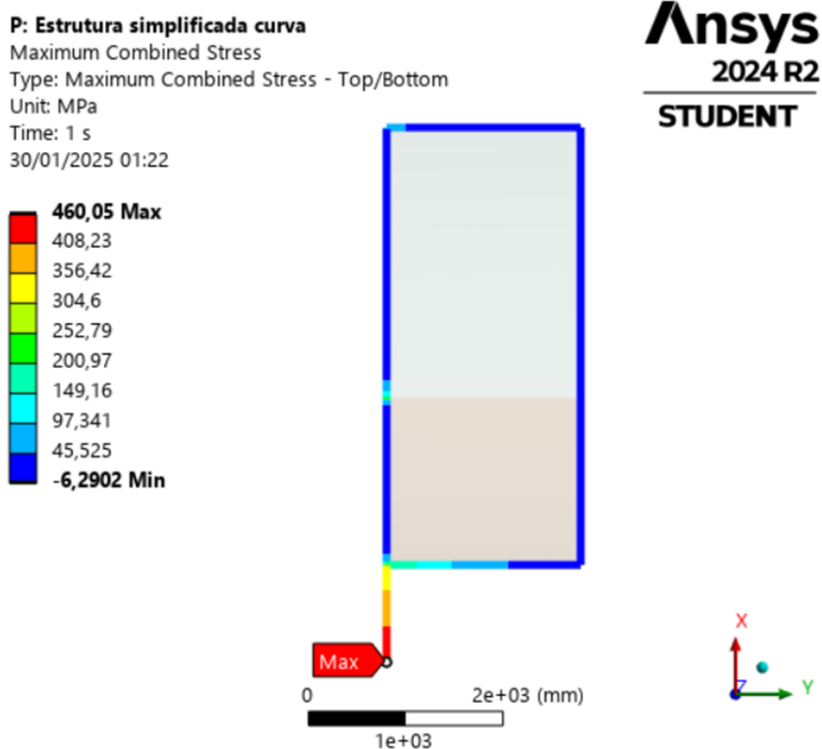


Figura 67 - Tensão máxima combinada nos tubos
Fonte: O próprio autor

Como o a região dos tubos que apresenta a tensão maior do que a tensão admissível do projeto encontra-se em uma área significativa da estrutura (figura 68), e o deslocamento máximo é muito maior que a espessura da chapa, serão propostos reforços estruturais na geometria aperfeiçoada, de forma a evitar a falha por escoamento e manter a consideração de pequenos deslocamentos.

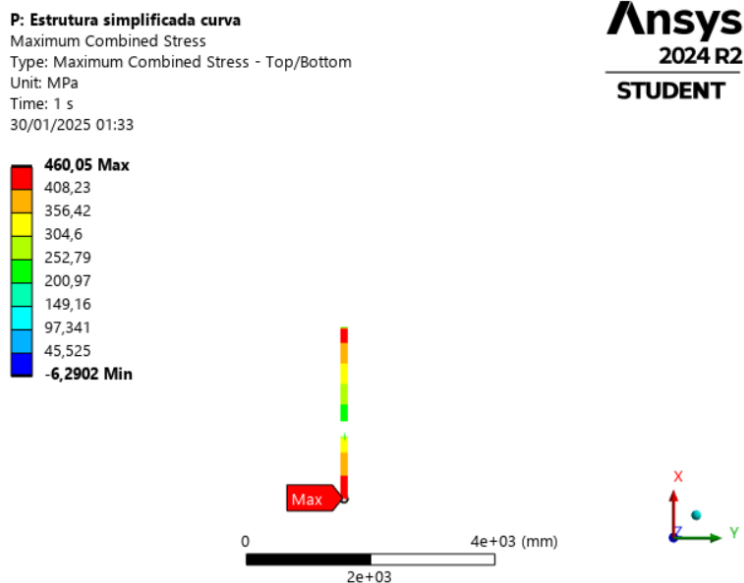


Figura 68 - Filtro aplicado as tensões dos tubos da estrutura simplificada curva
 Fonte o próprio autor

5.2.4 Estrutura aperfeiçoada

A convergência de malha realizada para chapa pode ser vista na tabela 6:

Tabela 6 - Convergência de malha Estrutura aperfeiçoada
 Fonte: o próprio autor

<i>Estrutura aperfeiçoada</i>				
<i>Element Size</i>	<i>von Mises (MPa)</i>	<i>Diferença para chapa (%)</i>	<i>Tensão Combinada Max (MPa)</i>	<i>Diferença para o tubo (%)</i>
150	67,924		90,018	
100	77,662	14,3%	94,043	4,5%
50	92,99	19,7%	102,68	9,2%
25	108,51	16,7%	106,51	3,7%

Devido a não convergência da malha, será adotada a opção mais refinada possível dadas as limitações do *software*, sendo ela de 25 mm, a qual pode ser vista na figura 69:

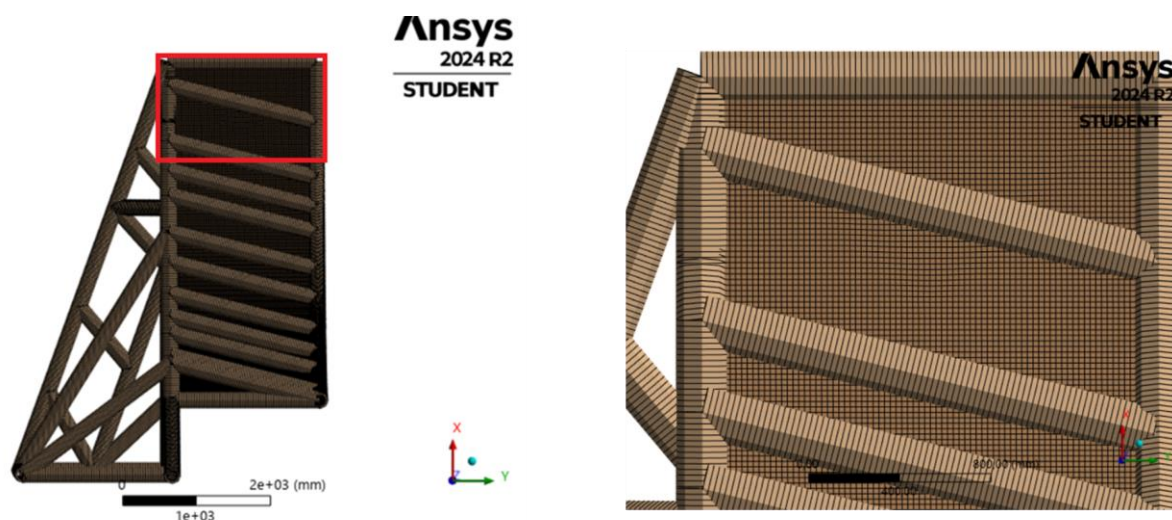


Figura 69 - A malha utilizada para a estrutura aperfeiçoada
Fonte: O próprio autor

A tensão máxima na chapa de 108,51 MPa pode ser vista na figura 70:

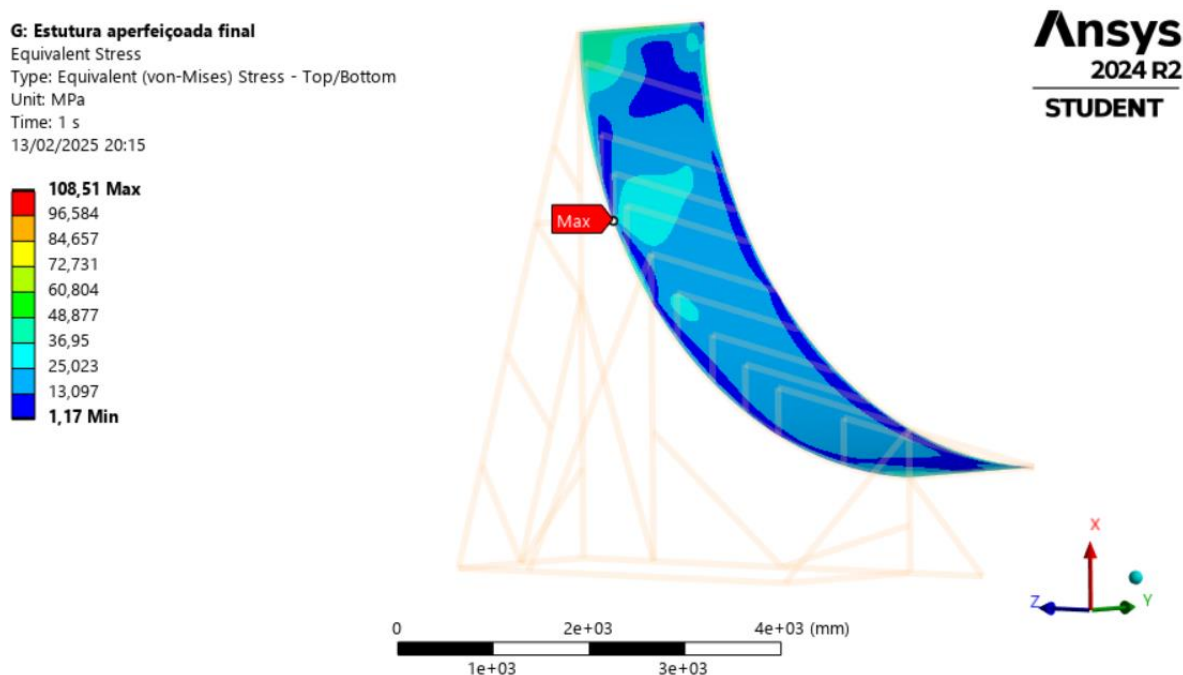


Figura 70 - Tensão máxima da chapa estrutura aperfeiçoada
Fonte: O próprio autor

Em que a tensão máxima se apresenta em uma região muito pequena (figura 71), e será tratada como um ponto de singularidade que impede a convergência da malha para a chapa.

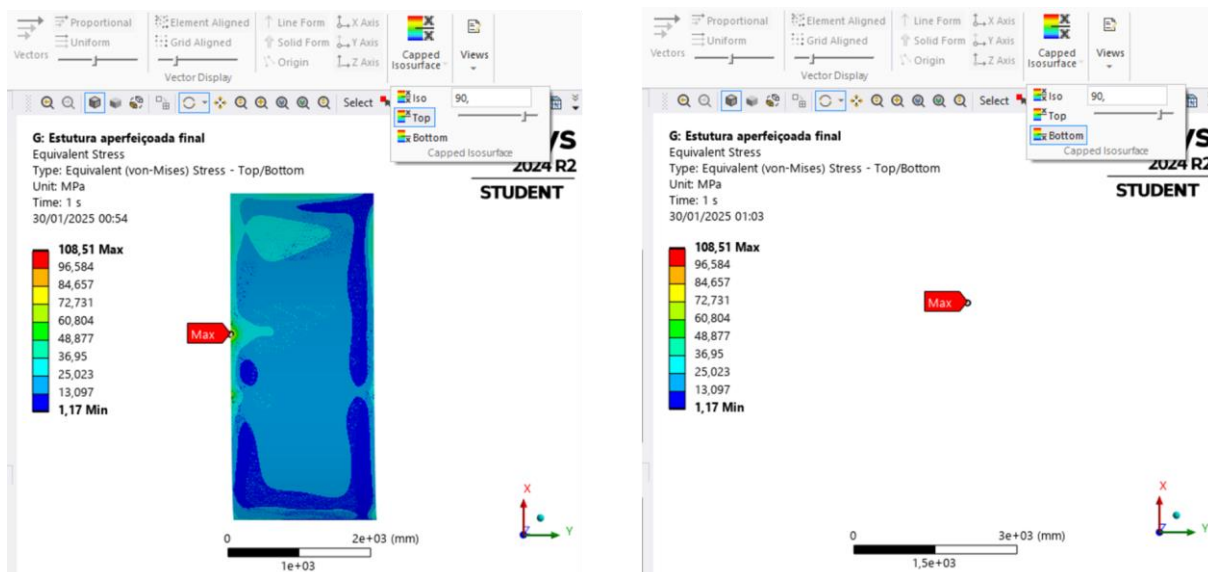


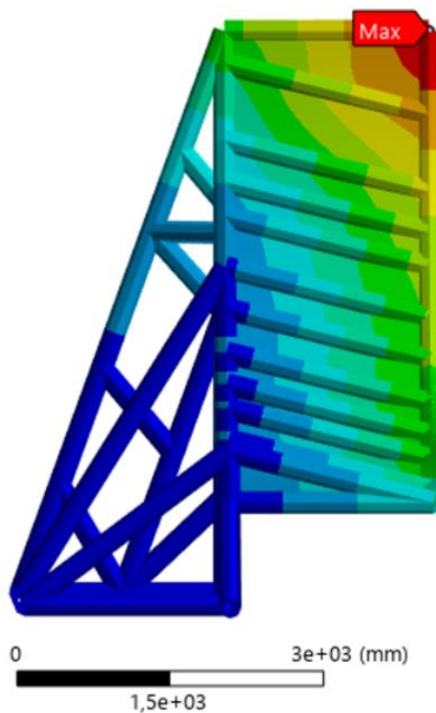
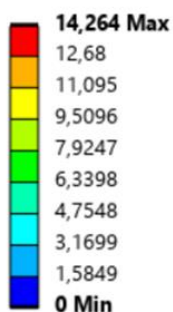
Figura 71 - Filtros aplicados às tensões da chapa da estrutura aperfeiçoada
Fonte: o próprio autor

O filtro “Top” é aplicável para visualizar toda área da peça que apresenta tensão inferior a 90 MPa, em que a maior parte da estrutura continua visível. O filtro “Bottom” plota a visualização das regiões que estão acima de 90 MPa, assim, sinalizando que o máximo de tensão ocorre em localidade pequena e isolada.

O deslocamento pode ser visto na figura 72:

G: Estrutura aperfeiçoada final

Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1 s
 30/01/2025 00:57



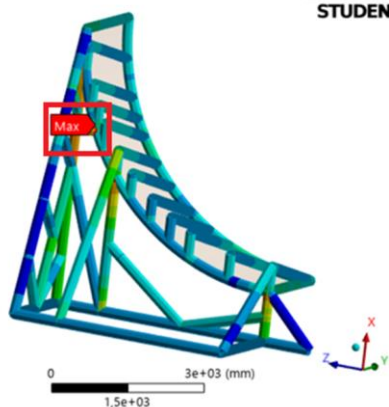
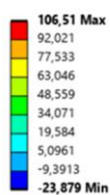
Ansys
 2024 R2
 STUDENT

Figura 72 - Deslocamento máximo da chapa estrutura aperfeiçoada
 Fonte: O próprio autor

A tensão máxima combinada nos tubos foi de 106,51 MPa e pode ser vista na figura 73:

G: Estrutura aperfeiçoada final

Maximum Combined Stress
 Type: Maximum Combined Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 30/01/2025 00:58



Ansys
 2024 R2
 STUDENT

G: Estrutura aperfeiçoada final

Maximum Combined Stress
 Type: Maximum Combined Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 30/01/2025 00:58

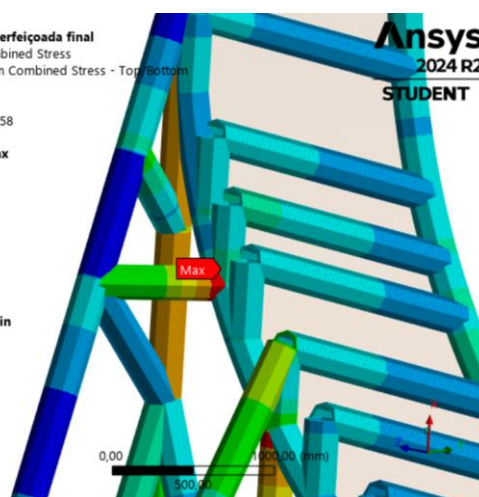
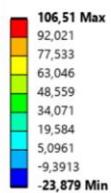


Figura 73 - Tensão máxima combinada nos tubos estrutura aperfeiçoada
 Fonte: O próprio autor

5.2.5 Comparativo

Como visto anteriormente as tensões σ_x e σ_z podem ser comparadas as tensões obtidas nos modelos numéricos representados nos capítulos 5.2.1 e 5.2.2 respectivamente, de forma a verificar se as simplificações adotadas no modelo analítico são coerentes. O comparativo entre os valores obtidos pode ser visto na tabela 7:

Tabela 7 - Comparativo entre modelo analítico e numérico Plano
Fonte: O próprio autor

<i>Comparativo entre o modelo analítico e o numérico plano</i>				
	σ_x (MPa)	<i>Diferença para o analítico (%)</i>	σ_z (MPa)	<i>Diferença para o analítico (%)</i>
<i>Modelo analítico</i>	69,05	-	132,55	-
<i>Modelo numérico plano</i>	72,01	4,29%	134,25	1,28%

A geometria aperfeiçoada apresentou a tensão máxima de 108,51 MPa na chapa, e uma tensão máxima de 106,51 MPa nos tubos, garantindo assim que a estrutura não irá falhar por escoamento, dado que ambos os componentes estão abaixo da tensão admissível de 210 MPa. A chapa apresentou um deslocamento de 14,61 mm, o qual está abaixo da espessura de 15 mm da chapa e garante a condição de pequenos deslocamentos, mantendo assim a linearidade da análise. Logo o aperfeiçoamento da estrutura reduziu essa dimensão em 75% quando comparada com a espessura de 60 mm necessária para a geometria simplificada curva, e reduziu as tensões presentes nos tubos de forma a evitar falhas por escoamento. O comparativo das tensões entre as geometrias pode ser visto na tabela 8:

Tabela 8 - Comparativo entre geometrias
Fonte: O próprio autor

<i>Comparativo entre geometrias</i>					
	<i>Espessura da chapa (mm)</i>	<i>Diâmetro dos tubos (mm)</i>	<i>Espessura dos tubos (mm)</i>	<i>Tensão máxima na chapa (MPa)</i>	<i>Tensão máxima nos tubos (MPa)</i>
<i>Geometria simplificada curva</i>	60	209,1	25	317,45	460,05
<i>Geometria Aperfeiçoada</i>	15	209,1	25	108,51	106,51

6 CONCLUSÃO

Assim, pode-se concluir que os modelos analíticos adotados são pertinentes, dado que possuem tensões semelhantes às encontradas com os modelos numéricos para a mesma geometria. Para a proposta de geometria aperfeiçoada foi possível obter grande redução da espessura da chapa, representando uma redução de 60mm para 15mm de espessura, sem apresentar tensões acima da admissível, que causariam falhas por escoamento, e respeitando o regime de pequenas deformações. O uso dos reforços na estrutura também permitiu a redução das tensões presentes nos tubos, evitando a falha por escoamento nesses componentes.

6.1 Sugestão para trabalho futuro

Apesar da redução da espessura da chapa, foram adicionados diversos tubos de reforço, que agregam massa para estrutura. Portanto, recomenda-se para próximos trabalhos, a otimização dessa geometria através de modelos matemáticos que permitam a utilização de uma menor quantidade de tubos, assim como tubos de menores diâmetros e espessuras, de forma a reduzir a massa total da estrutura.

Além disso, é proposta uma análise de custo para evidenciar os impactos que a porcentagem de redução de massa na estrutura pode influenciar no orçamento do modelo, baseado nos catálogos comerciais.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, L. C. **Análise da metodologia do cálculo de back tension em lançamento de dutos flexíveis em navios tipo PLSV.** 2023. 72 f. Projeto de graduação - Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2023.

ANSYS. **Convergence Result Control.** Disponível em: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/////Views/Secured/corp/v242/en/wb_sim/ds_Convergence.html%23ds_Convergence_result_control. Acesso em: 26 jan. 2025.

BICUDO, R. G. P. **Análise de instalação de linhas flexíveis.** 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

BRAGA, M. J. P. **Instabilidade de armaduras de tração de linhas flexíveis.** 2003. 137 f. Tese (Pós-graduação) de engenharia oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2003.

CARNEIRO, Raylson dos Santos; CARNEIRO, Rogerio dos Santos; SILVA, Kattia Ferreira da. **Método dos elementos finitos: comparativo entre solução exata e soluções aproximadas pelo método de Galerkin em estruturas unidimensionais.** Revista Sergipana de Matemática e Educação Matemática, v. 5, n. 2, p. 407-428, 2020. DOI: 10.34179/revsem.v5i2.13482.

COSTA, A. L. M.; SANTANA, É. C. **Modelo matemático-computacional para otimização de projetos de vigas contínuas com carga uniformemente distribuída.** Congresso Estadual de Engenharia Mecânica e Industrial de Sergipe. Aracaju. 11. 2020.

DNV GL AS. (2015). **DNVGL-OS-C201: Structural design of offshore units - WSD method. Høvik: DNV GL AS.**

FERREIRA, D. P. **As principais operações das embarcações PLSV.** 2013. 59 f. Monografia apresentada como parte dos requisitos para a conclusão Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Náutica – APNT, Centro de Instrução Almirante Graça Aranha. Rio de Janeiro. 2013.

JURBERG, R. F. **A evolução da indústria petrolífera mundial e os impactos no comércio internacional de petróleo do século XXI após o início da exploração de fontes não convencionais pelos Estados Unidos.** 2016. 86 f. Dissertação (Bacharelado) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2016.

LEET, Kenneth M.; UANG, Chia-Ming; GILBERT, Anne M. **Fundamentos da Análise Estrutural.** 3. ed. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2014. 793 p. ISBN 8563308343.

MENDES, A. P. A.; et al. **Mercado e aspectos técnicos dos sistemas submarinos de produção de petróleo e gás natural. BNDES Setorial.** 35, p. 155-188, mar. 2012.

SALOMÃO, T. R.; et al. **A evolução do motor a combustão ciclo Otto.** Revista Pesquisa e Ação, v. 4, n. 1, p. 106-113, 2018.

SCHNEIDER COMPANY. **Coefficient of Friction Reference Chart, s.d.** Disponível em: <https://www.schneider-company.com/coefficient-of-friction-reference-chart/>. Acesso em: 10 set. 2024.

STEELPRO GROUP. **Aço AH36 para construção naval.** Disponível em: <https://steelprogroup.com/pt/shipbuilding-steel/ah36/>. Acesso em: 28 jan. 2025

SILVA, R. **Estruturas hiperestáticas.** [PowerPoint]. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/46996/1/Estrutura%20hiperestatica.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2025.

SILVEIRA, Z. C. **Elementos de transmissão flexível: Correia/Polias.** [PowerPoint]. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7690905/mod_resource/content/0/Aula_Correas_Polias_2023.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.

HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais.** 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

MARITIME DEVELOPMENTS. **Defletor vertical.** 2025. Disponível em: <https://maritimedevelopments.com/pt/product/defletor-vertical/>. Acesso em: 26 jan. 2025.

PETROBRAS. **Especificação técnica n.º ET-2728.00-1500-91C-PMU-001 Rev. F:** prestação de serviços de interligação submarina com embarcações do tipo PLSV para águas ultra-profundas. 2022. 34 p.