INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

WILLIAN C. AMARO

# COMPARAÇÃO DO CÁLCULO ANALÍTICO DE COMPORTA ENSECADEIRA PLANA COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Xanxerê

2023

WILLIAN C. AMARO

# COMPARAÇÃO DO CÁLCULO ANALÍTICO DE COMPORTA ENSECADEIRA PLANA COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do Campus de Xanxerê do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Vinicius Gonçalves Deon

Xanxerê
2023

Amaro, Willian C.
A485c Comparação do cálculo analítico de comporta ensecadeira plana com o método dos elementos finitos / Willian C. Amaro. — 2023.
74 p. : il., color.

Trabalho de conclusão de curso (graduação). Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Câmpus Xanxerê.
Orientação: Prof. Me. Vinicius Gonçalves Deon.
Inclui referências.

1. Usina. 2. Comporta hidráulica. 3. Dimensionamento. 4. Método de elementos finitos. I. Deon, Vinicius Gonçalves, Prof. Me. II. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Câmpus Xanxerê. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Jaison Muniz – CRB-14/1852

WILLIAN C. AMARO

# COMPARAÇÃO DO CÁLCULO ANALÍTICO DE COMPORTA ENSECADEIRA PLANA COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Xanxerê, 19, Dezembro de 2023.

gov.br Documento assinado digitalmente
VINICIUS GONCALVES DEON
Data: 13/12/2023 11:17:05-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Me. Vinicius Gonçalves Deon
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

gov.br Documento assinado digitalmente
RAPHAEL BASILIO PIRES NONATO
Data: 13/12/2023 19:20:59-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Raphael Basilio Pires Nonato
Instituto Federal de Santa Catarina

gov.br Documento assinado digitalmente
SAMUEL SCHELESKI
Data: 14/12/2023 15:50:35-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Me. Samuel Scheleski
Instituto Federal de Santa Catarina

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo dessa jornada.

A toda minha família e amigos, em especial aos meus pais, Edclei e Eliane, que tenho eterna gratidão por todo o apoio, carinho, amor e educação que sempre me foi dado.

Ao meu orientador Prof. Me. Vinícius Gonçalves Deon, pela confiança, parceria e paciência ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina por proporcionar o acesso à uma ótima educação superior.

Agradeço também a todos os amigos e colegas que contribuíram e ajudaram para a realização desse projeto.

## RESUMO

Esta monografia apresenta o cálculo analítico e também o Método dos Elementos Finitos aplicados em um tabuleiro de uma comporta ensecadeira utilizada em usinas hidrelétricas. Seu objetivo principal é a comparação dos resultados obtidos entre os dois métodos, afim de verificar diferenças que possam ser de alguma maneira prejudiciais. O tabuleiro é composto pelas vigas principais, chapa do paramento, reforços verticais e horizontais e os cutelos laterais e fechamento superior. O cálculo analítico baseou-se principalmente no livro Comportas Hidráulicas, do autor Paulo C. Erbisti. Posteriormente ao dimensionamento, foi desenvolvido um modelo em CAD 3D do tabuleiro e utilizado o mesmo para a realização do estudo por MEF. Os resultados analisados foram as tensões e deslocamentos nas vigas horizontais principais do tabuleiro, elementos que apresentaram as maiores tensões e deslocamentos. Os resultados obtidos mostraram que ambos os métodos, aproximam-se muito, havendo apenas pequenas discrepâncias, porém sempre mantendo-se dentro dos critérios admissíveis definidos.



Palavras-chave: Usina, Comporta Hidráulica, Dimensionamento, Método de Elementos Finitos

## ABSTRACT

This dissertation presents the analytical calculation and the Finite Element Method applied to a sluice gate panel used in hydroelectric power plants. Its main objective is to compare the results obtained between the two methods in order to identify any differences that may be somehow detrimental. The panel is composed of main beams, faceplate, vertical and horizontal reinforcements, and lateral cutwaters and upper closure. The analytical calculation was primarily based on the book "Hydraulic Gates" by author Paulo C. Erbisti. After the sizing process, a 3D CAD model of the panel was developed and used for the Finite Element Method (FEM) study. The analyzed results included stresses and displacements in the main horizontal beams of the panel, elements that exhibited the highest stresses and displacements. The obtained results showed that both methods closely approximate each other, with only minor discrepancies, always remaining within the defined acceptable criteria.



Keywords: Power Plant, Hidraulic Gate, Analytical Calculation, Finite Element Method

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema básico de uma PCH .....17
Figura 2 - Principais partes de uma comporta: (1) conjunto do painel, (2) peças fixas e (3) mecanismo de manobras .....20
Figura 3 - Comporta com paramento radial (a) e comporta com paramento plano (b) .....22
Figura 4 – Diagrama de pressão do caso de carga hidrostática em comporta de superfície com pressão d'água em um lado do paramento .....23
Figura 5 – Diagrama de pressão do caso de carga hidrostática em comporta de superfície com pressão d'água nos dois lados do paramento .....23
Figura 6 – Diagrama de pressão do caso de carga hidrostática em comporta de fundo com pressão d'água em um lado do paramento .....24
Figura 7 - Diagrama de pressão do caso de carga hidrostática em comporta de fundo com pressão d'água nos dois lados do paramento .....24
Figura 8 - Diagrama de divisão de carregamento aplicado em uma comporta plana de fundo .....26
Figura 9 - Módulo formado pelas vigas e/ou enrijecedores e condições de apoio do módulo .....29
Figura 10 - Largura participante do paramento .....30
Figura 11 - Coeficientes de redução .....31
Figura 12 - Diagrama de carregamento da viga horizontal .....33
Figura 13 - Alguns elementos finitos comuns .....35
Figura 14 - Refinamento h-adaptativo e p-adaptativo .....36
Figura 15 - Fluxograma metodológico .....37
Figura 16 – Disposição da comporta ensecadeira .....39
Figura 17 - Fluxograma do roteiro de cálculo .....41
Figura 18 - Chapa do paramento (a) e viga horizontal (b) .....42
Figura 19 - Cutelo lateral (a) e fechamento superior (b) .....43
Figura 20 - Montagem tabuleiro e distribuição das vigas horizontais .....43
Figura 21 - Reforços verticais .....44
Figura 22 - Estrutura tabuleiro montado .....44
Figura 23 - Geometria final utilizada no MEF .....45
Figura 24 - Indicação de faces com contato frictionless .....46

Figura 25 - Aplicação carga hidrostática caso de carga normal.....47
Figura 26 - Aplicação carga hidrostática caso de carga ocasional .....47
Figura 27 - Distribuição vigas horizontais .....53
Figura 28 - Seção transversal viga horizontal.....62
Figura 29 - Malha gerada.....66
Figura 30 - Máximas tensões nas vigas horizontais no caso de carga normal.....67
Figura 31 - Máximas tensões nas vigas horizontais no caso de carga ocasional.....68
Figura 32 - Deflexão máxima nas vigas horizontais .....69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes definidores de tensões admissíveis para elementos estruturais ..... 28
Tabela 2 - Coeficiente k de acordo com a relação b/a 4 lados apoiados ..... 29
Tabela 3 - Coeficiente α (Timoshenko) de acordo com a relação b/a ..... 29
Tabela 4 - Altura das vigas horizontais ..... 32
Tabela 5 - Características gerais de projeto ..... 40
Tabela 6 - Propriedades mecânicas ASTM A-36 ..... 49
Tabela 7 - Propriedades mecânicas ASTM A 572 Gr. 50 ..... 49
Tabela 8 - Tensões admissíveis ASTM A-36 ..... 49
Tabela 9 - Tensões admissíveis ASTM A 572 Gr. 50 ..... 50
Tabela 10 - Características da seção transversal ..... 63
Tabela 11 - Características inerciais da seção transversal ..... 63
Tabela 12 - Refinamento de malha ..... 66
Tabela 13 - Comparação dos valores admissíveis de projeto com os valores obtidos pelo cálculo analítico ..... 70
Tabela 14 - Comparação dos valores admissíveis de projeto com os valores obtidos pelo Método dos Elementos Finitos ..... 70
Tabela 15 - Comparação dos valores obtidos pelo cálculo analítico e o Método dos Elementos Finitos ..... 70

**SUMÁRIO**

1 INTRODUÇÃO ..... 13
1.1 Objetivos ..... 15
1.1.1 Objetivo geral ..... 15
2 DESENVOLVIMENTO ..... 16
2.1 Usinas Hidrelétricas ..... 16
2.2 Comportas Hidráulicas ..... 18
2.2.1 Componentes ..... 19
2.3 Cálculo analítico ..... 22
2.3.1 Carga Hidrostática ..... 22
2.3.2 Posicionamento das vigas horizontais ..... 25
2.3.3 Flecha máxima admissível ..... 27
2.3.4 Casos de carga ..... 27
2.3.5 Tensões admissíveis ..... 27
2.3.6 Chapa do paramento ..... 28
2.3.7 Largura útil ..... 30
2.3.8 Vigas horizontais ..... 31
2.4 Método dos Elementos Finitos (MEF) ..... 34
3 METODOLOGIA ..... 37
3.1 Delimitação do projeto ..... 38
3.2 Cálculo Analítico ..... 40
3.3 Modelamento da estrutura ..... 42
3.4 Modelamento do estudo dos elementos finitos ..... 45
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ..... 49
4.1 Cálculo Analítico ..... 49
4.1.1 Definições das propriedades e tensões admissíveis ..... 49
4.1.2 Carga Hidrostática ..... 50
4.1.3 Número de Vigas ..... 51
4.1.4 Flecha Máxima Admissível ..... 51
4.1.5 Espaçamento Vigas Horizontais ..... 51
4.1.6 Pressão média atuante sobre a comporta ..... 54
4.1.7 Carga total sobre a comporta ..... 54
4.1.8 Carga atuante sobre as vigas horizontais ..... 55
4.1.9 Carga atuante distribuída sobre as vigas horizontais ..... 56
4.1.10 Máximo esforço cortante atuante sobre cada viga horizontal ..... 56

4.1.11 Máximo momento fletor atuante sobre cada viga horizontal .....57
4.1.12 Definição da espessura da chapa do paramento .....58
4.1.13 Definição da viga horizontal .....60
4.1.14 Características de seção transversal da viga horizontal .....61
4.1.15 Máxima tensão de compressão devido a flexão nas vigas horizontais principais 63
4.1.16 Máxima tensão de cisalhamento nas vigas horizontais principais .....64
4.1.18 Verificação de rigidez das vigas horizontais principais .....64
4.1.17 Tensões de placa na chapa do paramento .....65
4.3 Resultados do método dos elementos finitos .....65
4.3.1 Geração da malha .....65
4.3.2 Máximas tensões nas vigas principais em caso de carga normal .....67
4.3.2 Máximas tensões nas vigas principais em caso de carga ocasional .....68
4.3.3 Deflexão máxima nas vigas horizontais .....69
4.3.4 Comparação dos resultados obtidos a partir do cálculo analítico e MEF ..70
5 CONCLUSÃO .....71
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....72
REFERÊNCIAS .....73

# 1 INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas ocupam um importante papel no cenário nacional. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2023), atualmente as hidrelétricas correspondem a cerca de 57% da geração de energia elétrica do Brasil. Aliando os dados acima citados com a crescente demanda por energia e a grande disponibilidade de recursos hídricos no Brasil, tem-se no desenvolvimento de projetos de usinas hidrelétricas um nicho de mercado muito importante para a Engenharia Mecânica.

Em obras de usinas hidrelétricas, onde encontram-se equipamentos e estruturas com grande complexidade e importância, a área da mecânica faz-se de grande importância, abrangendo os principais equipamentos para o funcionamento da obra. Os equipamentos desenvolvidos pelos engenheiros mecânicos em obras de usinas hidrelétricas compreendem equipamentos de elevação (pontes rolantes, vigas pescadoras), condutos forçados, turbinas hidráulicas, válvulas, grades, sistemas de acionamento hidráulico e principalmente os dispositivos de regulação de fluxo (comportas).

Segundo Erbisti (2002), dentro das obras de Engenharia Hidráulica são frequentemente utilizados dispositivos de regulação de fluxo e dentro desses dispositivos destacam-se as comportas. São utilizadas dentro de usinas hidrelétricas, principalmente no desvio do rio durante a realização da obra, para regulação de níveis de reservatório e também para a interrupção de fluxo para isolamento de áreas onde faz-se necessária a realização da manutenção de algum equipamento, por exemplo, isolamento da casa de força para manutenção na turbina.

As comportas ensecadeiras são normalmente utilizadas em condições de equilíbrio de pressão, não sendo necessário que ela faça a interrupção do fluxo de água. São utilizadas para manutenção de equipamentos a seco ou de comportas principais das estruturas. O painel de uma comporta ensecadeira normalmente é formado por subconjuntos, sendo eles o tabuleiro, conjunto de vedação, válvula *by-pass* e conjunto de guiamento. Já o tabuleiro é constituído pela chapa do paramento, vigamento horizontal e os enrijecedores verticais e horizontais.

Diariamente, os engenheiros deparam-se com diversos problemas relacionados a cálculos estruturais, alguns possuindo simples resolução e outros

sendo mais complexos. Para tais situações, os engenheiros fazem as mais diversas abordagens a respeito do problema, e utilizam de diversas técnicas para a resolução dos problemas.

> Em particular, na área de Cálculo Estrutural, o engenheiro deve garantir que a estrutura objeto de análise não estará sujeita a falhas sob as diversas condições de operação. Os subsídios para essa missão são normalmente obtidos a partir da Resistência dos Materiais, que trata da resistência e da rigidez dos elementos das estruturas, apoiando-se nos Teoremas da Mecânica Geral e em particular no estudo da Estática. (ALVES FILHO, 2007, p. 1).

Nas diversas áreas da Engenharia Mecânica, o Método Analítico (MA) e o Método de Elementos Finitos (MEF) são duas abordagens distintas que podem ser utilizadas para analisar o comportamento de estruturas e sistemas.

Conforme o avanço tecnológico presenciado nos últimos anos, o bom emprego do MEF tornou-se fundamental para estudos de engenharia em alto nível, obtendo soluções mais rápidas de estruturas seguras e inovadoras. Além disso, busca a otimização de processos e aproximação ao máximo possível as condições de operação a que o equipamento será submetido para obtenção de melhores resultados (CARDOSO, 2021).

O emprego do MEF no cálculo de comportas hidráulicas pode ser observado com relação a possibilidade de otimização da estrutura, redução de tempo de cálculo, modelagem aproximada das condições reais em que a estrutura irá operar, além de poder ser empregado para simular situações extremas que podem ocorrer com o equipamento. Porém, como todo método utilizado, é necessário cuidado e conhecimento por parte do projetista, visto que o emprego de condições de contorno erradas pode gerar resultados errôneos, além de que é necessário que se saiba analisar os resultados, uma vez que o programa gera a informação, mas deve-se saber interpretá-la.

Desta maneira, o presente trabalho consistirá na verificação estrutural por meio do MEF do tabuleiro de uma comporta ensecadeira dimensionada por meio de CA, visando obter comparação dos métodos em termos de resistência estrutural, massa e segurança.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho consiste em comparar o dimensionamento analítico do tabuleiro de uma comporta ensecadeira com os resultados obtidos por um modelo estrutural de elementos finitos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

1. Elaborar um estudo de caso para o desenvolvimento do cálculo de dimensionamento de um tabuleiro de comporta ensecadeira;
2. Desenvolver os Cálculos Analíticos (CA) de dimensionamento estrutural de um tabuleiro de comporta ensecadeira;
3. Modelar um tabuleiro de comporta ensecadeira utilizando ferramentas de Desenho Auxiliado por Computador (CAD);
4. Elaborar uma análise estrutural estática do comportamento do tabuleiro com o Método de Elementos Finitos (MEF).

# 2 DESENVOLVIMENTO

## 2.1 Usinas Hidrelétricas

A geração de energia elétrica no Brasil utilizando usinas hidrelétricas é de grande relevância. Além disso, o país possui um rico sistema hídrico que possibilita a instalação de centenas de usinas em todo o território, podendo ser de pequeno, médio ou grande porte.

Conforme a empresa MegaWatt (2023), a construção da primeira usina hidrelétrica do mundo deu-se no final do século XIX. Geralmente eram usinas de pequeno porte usadas para fornecer energia para pequenas propriedades. Já a primeira hidrelétrica do Brasil entrou em operação em 1883, em Diamantina (MG).

Segundo a Aneel (2023), o Brasil possui atualmente uma capacidade de geração hidrelétrica instalada de 108.748 MW, o que corresponde a 57,25% da geração de energia elétrica total do país.

Usinas hidrelétricas possuem como princípio de funcionamento a conversão da energia potencial gravitacional devido à diferença de altitude do curso do rio. Esta energia se transforma em energia cinética de rotação na ação da Turbina Hidráulica (TH). A energia cinética é convertida em energia mecânica e finalmente é transformada em energia elétrica no Gerador Elétrico (GE) interligado à turbina por um acoplamento (A) (CRUZ, *apud* FARIAS, 2011).

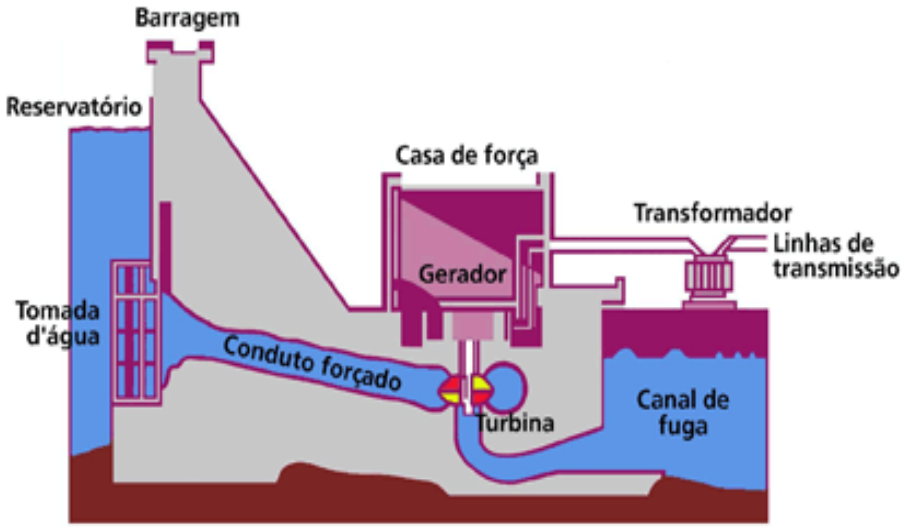
Segundo Simone (2009), dependendo da forma de operar, de armazenar água, do tamanho e finalidade do represamento formado, as plantas hidrelétricas podem ser classificadas em:

1. Usinas de acumulação e represamento: são usinas com grandes reservatórios de água, que além de gerar energia podem ser utilizadas para regulação de níveis de rios e fornecimento de água para comunidades e cidades.
2. Usinas a fio de água: são usinas que utilizam água proveniente de outras usinas instaladas a sua montante,
3. Usinas reversíveis: são usinas pouco utilizadas no Brasil, sendo constituídas por dois reservatórios, um superior e um inferior
4. Usinas maremotrizes: são as usinas que geram energia através da utilização das marés.

Segundo a Aneel (2008), uma usina hidrelétrica caracteriza-se como um conjunto de obras e equipamentos desenvolvidos para a geração de energia elétrica através do aproveitamento de potencial hidráulico. A ANEEL possui uma classificação que categoriza as hidrelétricas de acordo com sua capacidade de geração, sendo elas: Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) (com até 1 MW de potência instalada), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) (entre 1,1 MW e 30 MW de potência instalada) e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) (com mais de 30 MW).

As PCHs e CGHs são a maioria instaladas em todo o Brasil, com maior facilidade de viabilização devido aos menores tamanhos. Na figura abaixo apresenta-se se de forma simplificada um corte com os principais componentes de uma PCH.

Figura 1 - Esquema básico de uma PCH




Fonte: ABRAPCH (2014)

Outros elementos e características são essenciais para o funcionamento de uma hidrelétrica, sendo:

- Reservatório: possui a finalidade de acumular água nas ocasiões de excesso para uso em períodos de escassez, visando suprir aos grupos geradores com as vazões regulada e ordenada, conforme a demanda de energia na rede elétrica (OLIVEIRA, 2017).
- Barragem: estrutura que tem como objetivo reter a água para determinados fins (SOUZA et. al. *apud* FARIA, 2011).
- Tomada de água: é desenvolvida para conduzir a água do reservatório ao sistema de baixa e/ou de alta pressão, regular a vazão e reter os detritos (OLIVEIRA, 2017).
- Conduto forçado: é a estrutura que liga a tomada d'água à casa de força funcionando sob pressão (MME *apud* FARIA, 2011).
- Casa de força: estrutura que abriga os equipamentos elétricos e mecânicos. O arranjo típico da casa de força é, como em todo projeto dessa natureza, condicionado pelo tipo da turbina e do gerador (ELETROBRÁS *apud* FARIA, 2011).
- Canal de fuga: localizado à jusante do tubo de sucção, entre a casa de força e o rio, é o canal através do qual a vazão turbinada é restituída ao rio (ELETROBRÁS *apud* FARIA, 2011).

## 2.2 Comportas Hidráulicas

A construção de comportas hidráulicas teve seu início com as técnicas de irrigação, abastecimento de água e navegação fluvial. Antigamente, a água era represada por pequenas barragens e seguia para canais laterais de irrigação. A água excedente era descarregada por cima da barragem. Com o passar do tempo, foram construídas barreiras móveis (isto é, comportas), que além de fazerem o represamento da água, poderiam ser retiradas de sua posição original para assim dar passagem ao excesso d'água podendo ser utilizada para a segurança com relação a possíveis enchentes e também gerando uma maior usabilidade em obras hidráulicas (ERBISTI, 2002).

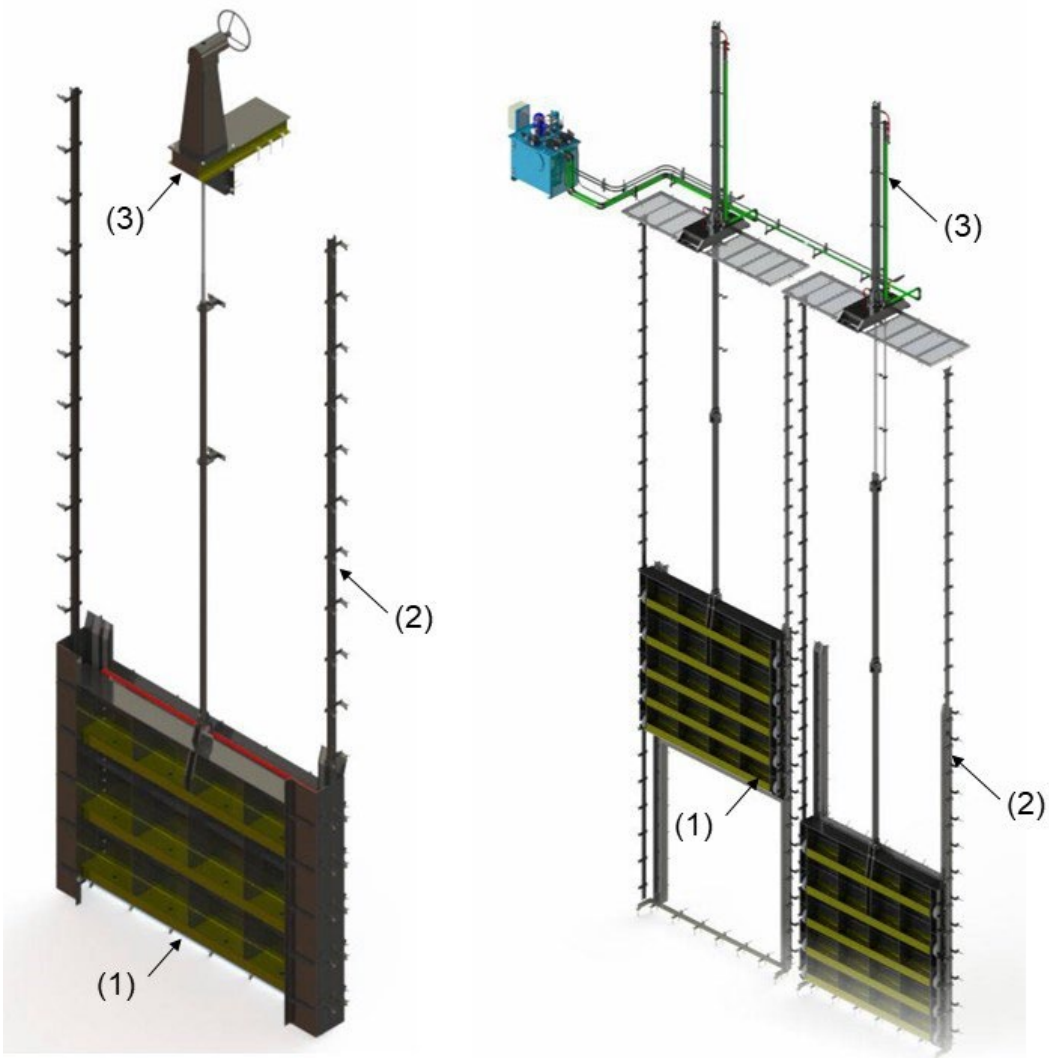
A partir dos anos 1830, teve-se o início da construção das primeiras

comportas metálicas, sendo desenvolvidas pela necessidade de comportas cada vez maiores e mais resistentes (ERBISTI, 2002).

### 2.2.1 Componentes

Uma comporta pode ser composta basicamente por três elementos, que segundo Erbisti (2002) são: tabuleiro, peças fixas e dispositivo de manobra. O tabuleiro, objeto principal de estudo do presente trabalho, é o principal componente de uma comporta, sendo ele o elemento que serve de barramento à passagem d'água. A estrutura do tabuleiro é constituída basicamente da chapa do paramento e o vigamento. O conjunto do tabuleiro conta ainda com dispositivos necessários para sua movimentação, como as rodas e guias de deslizamento, além das vedações que são os elementos responsáveis pela estanqueidade da estrutura. Dependendo do tipo de comporta, ela pode ainda contar com mais dispositivos especiais necessários ao seu funcionamento.

Figura 2 - Principais partes de uma comporta: (1) conjunto do painel, (2) peças fixas e (3) mecanismo de manobras




Fonte: Adaptado de Grupo UCM (2020)

Os tipos de comportas hidráulicas existentes e classificados são: basculante, cilíndrica, ensecadeira, gaveta, lagarta, mitra, rolante, segmento, setor, *Stoney*, tambor, telhado, vagão e visor.

Apesar de existirem todos os tipos de comportas acima citados, o que encontra-se mais usualmente empregado em obras de usinas hidrelétricas são as de tipo vagão, segmento e ensecadeira.

Segundo Erbisti (2002), as comportas podem ser classificadas e agrupadas utilizando critérios como sua função, movimentação, descarga, composição do tabuleiro, localização e forma de paramento.

Classificação quanto à função:

- de serviço: são geralmente utilizadas para regulação permanente de vazões ou níveis d'água. Podem ser citadas como exemplos de

comporta de serviço: comportas de vertedouro, comportas de eclusas e comportas automáticas de controle de enchentes.

- de emergência: são utilizadas esporadicamente na interrupção de fluxo d'água em condutos ou canais; geralmente são projetadas para operação normal aberta ou fechada. São consideradas comportas de emergência: comportas de tomada d'água, comportas instaladas a montante de válvulas de serviço de condutos forçados.
- de manutenção: são comportas operadas somente com água parada e têm como principal função permitir o esvaziamento do conduto ou canal para o devido acesso e manutenção dos equipamentos principais. O tipo de comporta de manutenção mais comum é a comporta ensecadeira.

Classificação quanto à movimentação:

- comportas de translação, sendo divididas em: deslizamento (gaveta, ensecadeira, cilíndrica) e rolamento (vagão, lagarta, Stoney);
- comportas de rotação: basculante, mitra, segmento, setor, tambor, telhado e visor;
- comportas de translo-rotação: rolante.

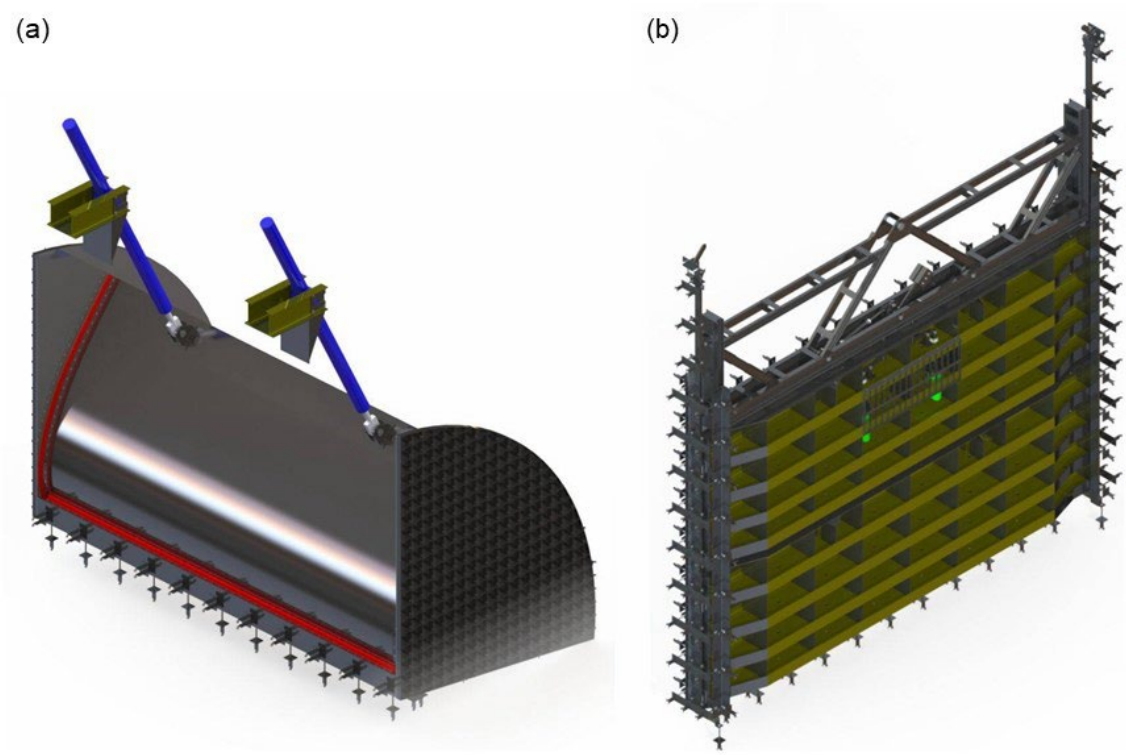
Classificação quanto à descarga:

- comportas com descarga por cima do tabuleiro: basculante, setor, telhado e tambor;
- comportas com descarga por baixo do tabuleiro: gaveta, lagarta, rolante, segmento, vagão, ensecadeira, visor e Stoney;
- comportas com descarga por cima e por baixo do tabuleiro: comportas mistas e duplas permitem esse tipo de descarga em função de necessidades operacionais.

Classificação quanto à forma do paramento:

- planas: gaveta, lagarta, vagão, ensecadeira, telhado e Stoney.
- radial: segmento, setor, basculante, tambor, visor, cilíndrica e rolante.

Figura 3 - Comporta com paramento radial (a) e comporta com paramento plano (b)




Fonte: Adaptado de Grupo UCM (2020)

A Figura 3 apresenta os dois tipos de comportas classificadas conforme a forma do paramento. O presente trabalho utilizará como objeto de estudo uma comporta com paramento plano.

## 2.3 Cálculo analítico

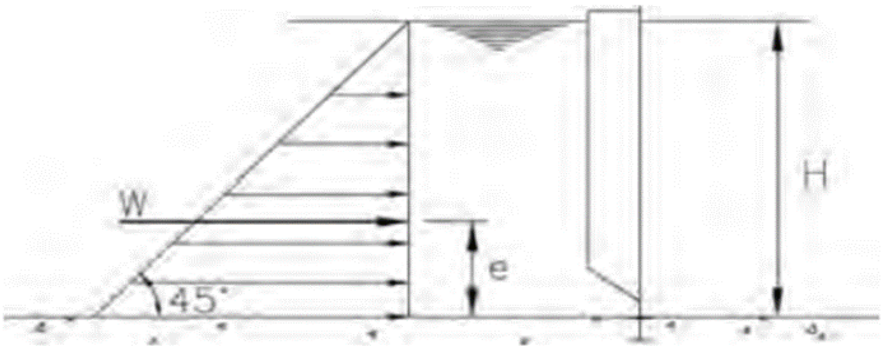
### 2.3.1 Carga Hidrostática

Segundo Munson, Young e Okiishi (1997), é possível fazer a detecção de forças atuantes nas superfícies de corpos que estão submersos em fluidos, e a determinação dessas forças é importante no projeto de tanques de armazenamento de fluidos, barragens e demais estruturas hidráulicas. Essa força ou carga é chamada de carga hidrostática.

De acordo com Erbisti (2002), no caso de comportas planas, é possível observar 4 casos de carregamento hidrostático diferente, dependendo da aplicação da comporta. Os primeiros dois casos fazem a aplicação da carga hidrostática em uma comporta de superfície, com a pressão d'água aplicada em um lado e nos dois

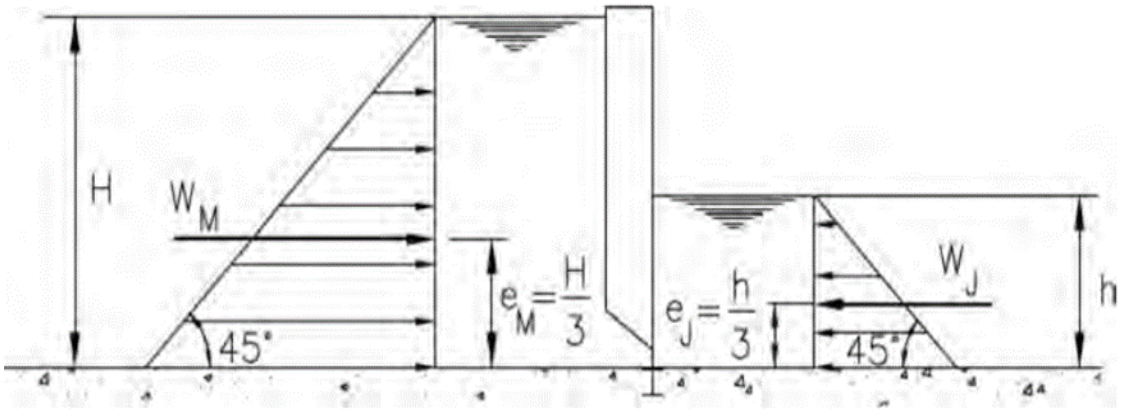
lados do paramento, respectivamente, conforme as figuras 5 e 6.

Figura 4 – Diagrama de pressão do caso de carga hidrostática em comporta de superfície com pressão d'água em um lado do paramento




Fonte: Erbisti (2002)

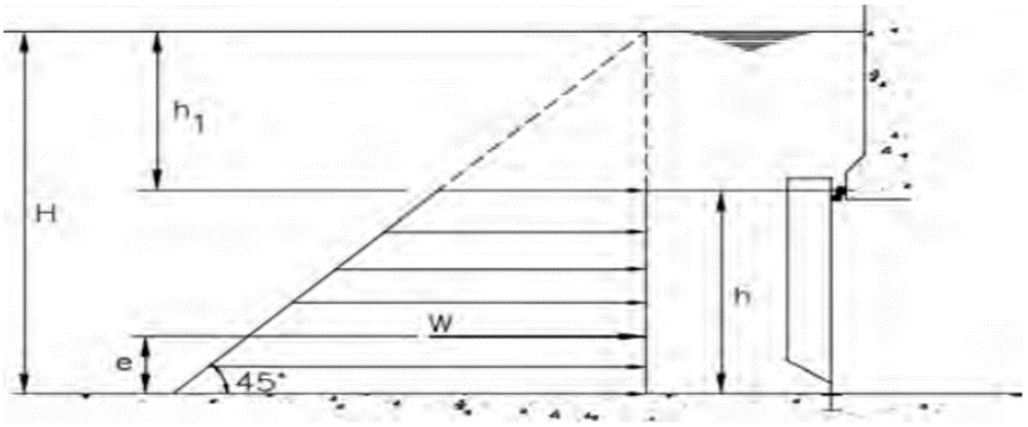
Figura 5 – Diagrama de pressão do caso de carga hidrostática em comporta de superfície com pressão d'água nos dois lados do paramento




Fonte: Erbisti (2002)

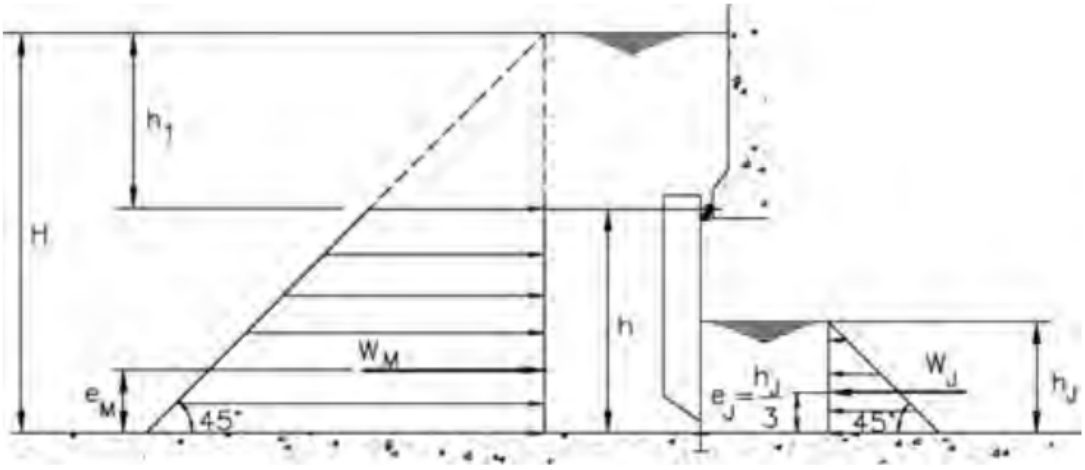
Os outros dois casos fazem menção a comportas de fundo com carga hidrostática aplicada em um e dois lados do paramento, respectivamente, conforme as figuras 7 e 8.

Figura 6 – Diagrama de pressão do caso de carga hidrostática em comporta de fundo com pressão d'água em um lado do paramento




Fonte: Erbisti (2002)

Figura 7 - Diagrama de pressão do caso de carga hidrostática em comporta de fundo com pressão d'água nos dois lados do paramento




Fonte: Erbisti (2002)

Para o caso de carga hidrostática em uma comporta de fundo com pressão d'água atuando em apenas um lado do paramento, tem-se a carga hidrostática máxima dada pela Figura 6 e a Equação 1 apresentada abaixo:

$$W = \gamma . D . \left(H - \frac{h}{2}\right) \quad (1)$$

Onde:

$\gamma$ = peso específico da água = 9,81 kN/m³;

D = vão entre as vedações laterais, em m;

H = altura d'água máxima sobre a soleira, em m;

h = altura a vedar, em m.

Levando em consideração que o diagrama de pressão possui um formato trapezoidal, a posição do ponto de aplicação da carga resultante é dado por:

$$e = \frac{h}{3} + \left(1 + \frac{H-h}{2H-h}\right) \quad (2)$$

Substituindo, nas equações (1) e (2),

$$h = H - h_1 \quad (3)$$

Ao substituir a Equação 3 na Equação 1 e na Equação 2, tem-se a Equação 4 e a Equação 5, respectivamente:

$$W = \frac{1}{2} . \gamma . D . h . (H^2 - h_1^2) \quad (4)$$

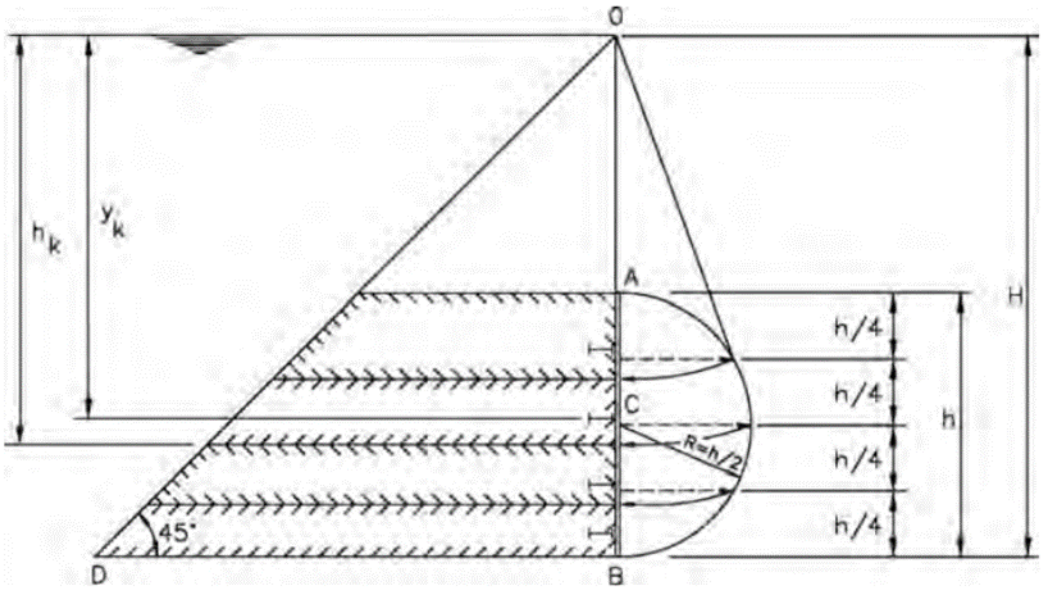
$$e = \left(\frac{H-h_1}{3}\right) . \left(\frac{H-2h_1}{H+h_1}\right) \quad (5)$$

Tendo finalizado o cálculo de carga hidrostática e utilizando-se dos dados definidos no estudo de caso do projeto proposto, o dimensionamento da comporta inicia-se propriamente dito o dimensionamento da comporta

### 2.3.2 Posicionamento das vigas horizontais

A Figura 9 a seguir apresenta o diagrama de divisão do carregamento aplicado nas vigas horizontais que serão utilizadas na estrutura do tabuleiro. Segundo Erbisti (2002), visando uma construção mais econômica, é interessante que todas as vigas estejam carregadas de forma similar, para que dessa forma possa ser utilizado o mesmo perfil ao longo do tabuleiro. Esse processo é realizado dividindo-se o diagrama de pressão em áreas equivalentes e posicionando as vigas no centro de gravidade de cada área.

Figura 8 - Diagrama de divisão de carregamento aplicado em uma comporta plana de fundo




Fonte: Erbisti (2002)

O cálculo da profundidade $h_k$, dá-se pela Equação 6 apresentada abaixo:

$$h_k = H \cdot \sqrt{\frac{k+\beta}{n+\beta}} \qquad \text{(k= 1, 2, 3, ..., n)} \qquad (6)$$

Onde:

n = número de vigas;

k = número da viga;

Sendo β a relação entre a altura da coluna d'água e a altura de vedação, conforme a Equação 7 abaixo:

$$\beta = \frac{n \times (H-h)^2}{H^2-(H-h)^2} \qquad (7)$$

O posicionamento das vigas horizontais é determinado pela Equação 8 abaixo:

$$y_k = \frac{2H}{3\sqrt{n+\beta}} \cdot \left[(k+\beta)^{\frac{3}{2}} - (K-1+\beta)^{\frac{3}{2}}\right] \qquad (8)$$

### 2.3.3 Flecha máxima admissível

A flecha máxima admissível para o projeto pode ser calculada utilizando a Equação 9 apresentada abaixo:

$$f_{máx} = \frac{l}{800} \quad (9)$$

Onde:

l = largura total do tabuleiro, em mm;

### 2.3.4 Casos de carga

Para a realização do dimensionamento de uma comporta, deve-se prever três casos de carregamento conforme a natureza, probabilidade de simultaneidade e frequência dessas cargas (ERBISTI, 2002).

I. Caso de carga normal: leva em consideração valores e combinações mais desfavoráveis das cargas hidrostáticas em caso de nível d'água normal.
II. Caso de carga ocasional: utiliza como referência os valores de carga hidrostática com relação à níveis de água extraordinários.
III. Caso de carga excepcional: considera como referência casos extremos como cargas hidrodinâmicas e sobrecargas geradas pelo esforço de manobra no caso de ruptura de blindagens ou condutos forçados.

### 2.3.5 Tensões admissíveis

Segundo Erbisti (2002), as tensões admissíveis utilizadas no projeto são calculadas em função do limite de escoamento do material escolhido e também por cada caso de carga. Para encontrar a tensão admissível em elementos estruturais, deve-se realizar o produto do limite de escoamento do material pelos coeficientes apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes definidores de tensões admissíveis para elementos estruturais

| Tensão | Caso de carga | | |
|---|---|---|---|
| | Normal | Ocasional | Excepcional |
| Tração axial, tração e compressão na flexão | 0,68 | 0,76 | 0,89 |
| Compressão na flexão, quando necessária a verificação de estabilidade | 0,59 | 0,68 | 0,79 |
| Cisalhamento | 0,69 | 0,44 | 0,51 |
| Tensão de comparação | 0,76 | 0,82 | 0,92 |
| Tensão de comparação no paramento | 0,87 | 0,87 | 0,92 |

Fonte: Adaptado de Erbisti (2002)

### 2.3.6 Chapa do paramento

A maior parcela de peso do tabuleiro reside na chapa do paramento. Dessa forma, é interessante que o projetista dedique atenção especial ao seu dimensionamento visando possuir a menor espessura possível sem deixar de lado a questão de segurança (ERBISTI, 2002).

Para a determinação da espessura da chapa do paramento é preciso ser feita uma análise de custos, buscando trabalhar com diversas alternativas de espaçamento entre enrijecedores e vigas.

#### 2.3.6.1 Tensões de placa

De acordo com Erbisti (2002), as tensões de flexão da chapa do paramento devido à atuação direta da carga hidrostática são calculadas pela teoria da elasticidade, conforme a fórmula abaixo:

$$\sigma = \pm \frac{k}{100} . p . \frac{a^2}{t^2} \quad (10)$$

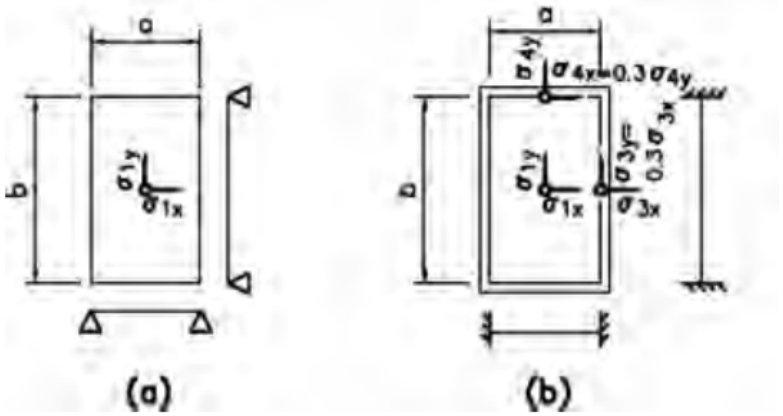
Na qual k é um coeficiente adimensional dado pela Tabela 2, em função da relação entre as dimensões “b” e “a” dos módulos formados pelas vigas e/ou enrijecedores e das condições de apoio do módulo. “p” é a pressão hidrostática no centro do módulo, “a” a menor dimensão do módulo e “t” é a espessura da chapa do paramento.

Tabela 2 - Coeficiente k de acordo com a relação b/a 4 lados apoiados

| Coeficiente "k" | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| b/a | 4 lados apoiado (a) | | 4 lados engastados (b) | | | |
| | $\pm\sigma_{1x}$ | $\pm\sigma_{1y}$ | $\pm\sigma_{1x}$ | $\pm\sigma_{1y}$ | $\pm\sigma_{4y}$ | $\pm\sigma_{3x}$ |
| ∞ | 75,0 | 22,5 | 25,0 | 7,5 | 34,2 | 50,0 |
| 3,00 | 71,3 | 24,4 | 25,0 | 7,5 | 34,3 | 50,0 |
| 2,50 | 67,7 | 25,8 | 25,0 | 8,0 | 34,3 | 50,0 |
| 2,00 | 61,0 | 27,8 | 24,7 | 9,5 | 34,3 | 49,9 |
| 1,75 | 55,8 | 28,9 | 23,9 | 10,8 | 34,3 | 48,4 |
| 1,50 | 48,7 | 29,9 | 22,1 | 12,2 | 34,3 | 45,5 |
| 1,25 | 39,6 | 30,1 | 18,8 | 13,5 | 33,9 | 40,3 |
| 1,00 | 28,7 | 28,7 | 13,7 | 13,7 | 30,9 | 30,9 |

Fonte: Adaptado de Erbisti (2002)

Figura 9 - Módulo formado pelas vigas e/ou enrijecedores e condições de apoio do módulo




Fonte: Adaptado de Erbisti (2002)

A máxima deflexão ocorre no centro de cada placa é pode ser obtida pela equação abaixo:

$$f = \frac{\alpha.p.a^4}{E.t^3} \tag{11}$$

Onde:

E = módulo de Young, em MPa;

α = coeficiente dado pela Tabela 3, em função das dimensões da placa.

Tabela 3 - Coeficiente α (Timoshenko) de acordo com a relação b/a

| b/a | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | ∞ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| α | 0,0138 | 0,0188 | 0,0226 | 0,0251 | 0,0267 | 0,0277 | 0,0284 |

Fonte: Adaptado de Erbisti (2002)

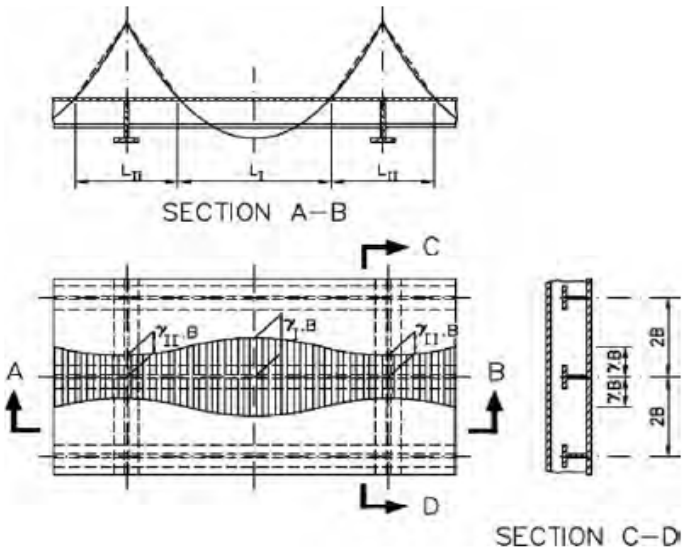
De acordo com Erbisti (2002), o espaçamento entre as vigas horizontais depende diretamente da espessura do paramento, ou seja, quanto mais espessa a chapa do paramento, maior será o espaçamento entre as vigas.

### 2.3.7 Largura útil

Segundo Erbisti (2002), o paramento atua como aba da seção das vigas do tabuleiro. A determinação da largura útil da chapa que deve ser levada em consideração no cálculo das características da seção composta é feita utilizando as Figuras 10 e 11, em função da distribuição do momento fletor e do vão de apoio da chapa, em cada lado da alma, é igual a $\gamma$ B, onde:

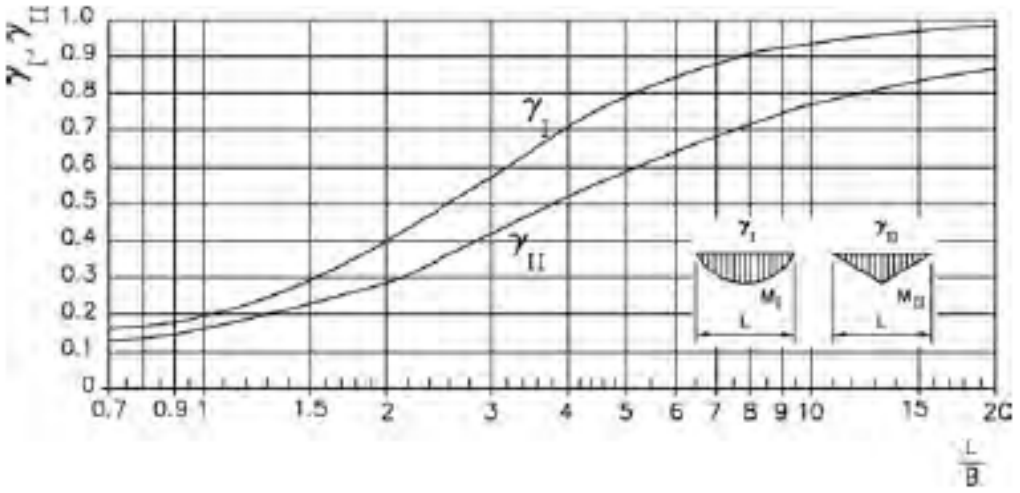
- $\gamma$ refere-se ao coeficiente de redução adimensional dado pela figura 11 em função da relação L/B, onde L é a distância medida entre dois pontos consecutivos de momentos nulos. Na região entre os apoios, adota-se $L_I$ e $\gamma_I$, e na região dos apoios $L_{II}$ e $\gamma_{II}$;
- B é a metade do vão da chapa medido entre das vigas consecutivas ou enrijecedores, ou o vão em balanço.

Figura 10 - Largura participante do paramento




Fonte: Erbisti (2002)

Figura 11 - Coeficientes de redução




Fonte: Erbisti (2002)

## 2.3.8 Vigas horizontais

A seguir apresenta-se a contribuição deste capítulo com os seguintes subtítulos, quantidade de vigas, espessura da alma, altura da viga.

### 2.3.8.1 Quantidade de vigas

De acordo com Erbisti (2002), a determinação inicial da quantidade de vigas horizontais é inicialmente por tentativas de ensaio e erro. Entretanto, para facilitar esse dimensionamento, para os casos de comportas planas, foi desenvolvida a equação apresentada abaixo:

$$N = \frac{100h}{t} \cdot \sqrt{\frac{H_m}{2\sigma_{adm}}} \qquad (12)$$

Onde:

N = quantidade de vigas horizontais;

h = altura de vedação da comporta, em m;

t = espessura do paramento, em mm;

$H_m$= coluna d'água no centro da comporta, em m;

$\sigma_{adm}$= tensão admissível à flexão, em MPa.

### 2.3.8.2 Espessura da alma

Após ser definida a quantidade de vigas que irão compor o tabuleiro, deve-se definir a seção transversal dessa viga. Nas extremidades das vigas bi-apoiadas, a espessura mínima é definida em função do esforço cortante, conforme a seguinte equação:

$$t_w = \frac{F}{2.h.\tau_{adm}} \quad (13)$$

Onde:

F = carga hidrostática atuante sobre a viga, em N;

h = altura da alma, em mm;

$\tau_{adm}$= tensão admissível de cisalhamento, em MPa.

### 2.3.8.3 Altura da viga

Por questões estruturais, quanto maior for o nível d'água ao qual o projeto está submetido e também quanto maior o vão de apoio do tabuleiro, maior será a altura das vigas horizontais. Para os cálculos preliminares da espessura da viga em comportas planas, podem ser utilizados os dados apresentados na Tabela 4 como referência.

Tabela 4 - Altura das vigas horizontais

| Coluna d'água sobre a soleira | Altura da viga |
|---|---|
| Até 15m | De 1/12 a 1/9 L |
| De 15m a 30m | De 1/9 a 1/7 L |
| Acima de 30m | De 1/7 a 1/5 L |

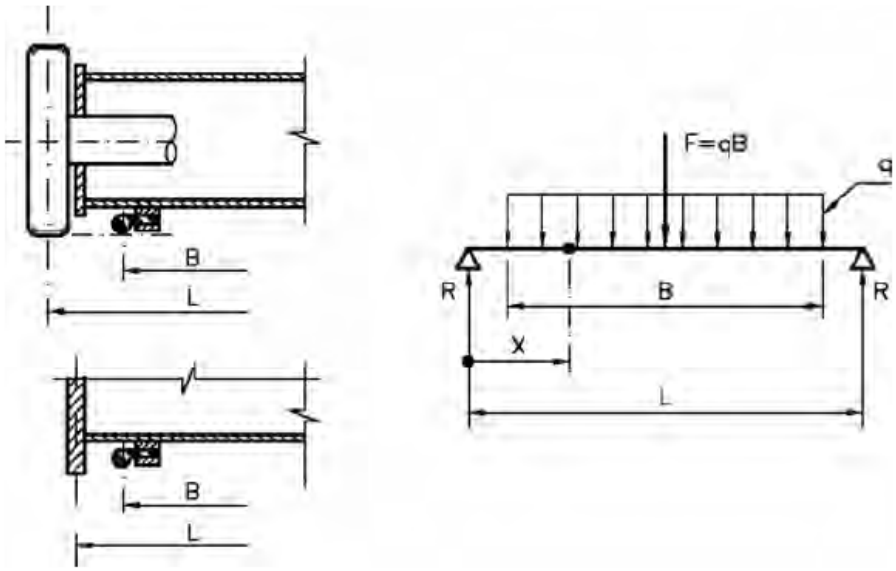
Fonte: Adaptado de Erbisti (2002)

Onde L é a largura útil total da viga horizontal no projeto.

### 2.3.8.4 Flexão da viga

Segundo Erbisti (2002), para uma comporta ensecadeira plana, pode ser utilizado o diagrama de carga da viga horizontal conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Diagrama de carregamento da viga horizontal




Fonte: Adaptado de Erbisti (2002)

O momento fletor em um ponto qualquer da viga, pode ser calculo pela seguinte fórmula:

$$M_X = R\,X\, - \frac{F}{2B}\left[X - \frac{1}{2}\,(L - B)\right]^2 \qquad (14)$$

Onde:

R = reação no apoio = $\frac{F}{2}$, em N;

X = distância entre o apoio da esquerda e o ponto considerado, em mm;

F = carga hidrostática atuante sobre a viga, em N;

B = vão de vedação, em mm;

L = vão de apoio, em mm;

Q = carga distribuída por unidade de comprimento, em N/mm.

O valor máximo do momento fletor ocorre no centro da viga, portanto, pode-se simplificar a Equação 14 para:

$$M = \frac{(2L-B)F}{8} \qquad (15)$$

### 2.3.8.5 Deflexão máxima da viga

De acordo com Erbisti (2002), o deslocamento gerado nos elementos, resultante da carga aplicada, pode ocorrer, porém deve ser limitada, não colocando em risco a segurança, movimentação e estanqueidade do equipamento. A deflexão máxima ocorre no centro da viga, e pode ser calculada pela fórmula:

$$f = \frac{5FL^3}{384\,E\,I} \tag{16}$$

Onde:

F = carga hidrostática sobre a viga, em N;

L = vão de apoio, em mm;

E = módulo de elasticidade do aço, em MPa;

I = momento de inércia da seção, em $\mathrm{mm}^4$.

## 2.4 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Na engenharia, de acordo com Fish (2009), muitos fenômenos são descritos em termos de equações diferenciais parciais, sendo praticamente impossível resolver tais equações de maneira analítica, sendo necessária a utilização de aproximações numéricas que possam obter resultados satisfatórios. Essas aproximações são possíveis utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF), utilizando-o para resolver problemas como escoamento de fluidos, transferência de calor, análise de tensões e deformação, entre outros.

O MEF baseia-se na ideia de dividir uma estrutura ou modelo que seja complexa, gerando assim elementos interligados por nós. Dessa maneira, a equação que se associa ao modelo completo também é subdividida em outras equações mais simples, possibilitando assim a sua resolução (FILHO, 2007).

### 2.4.1 Malha

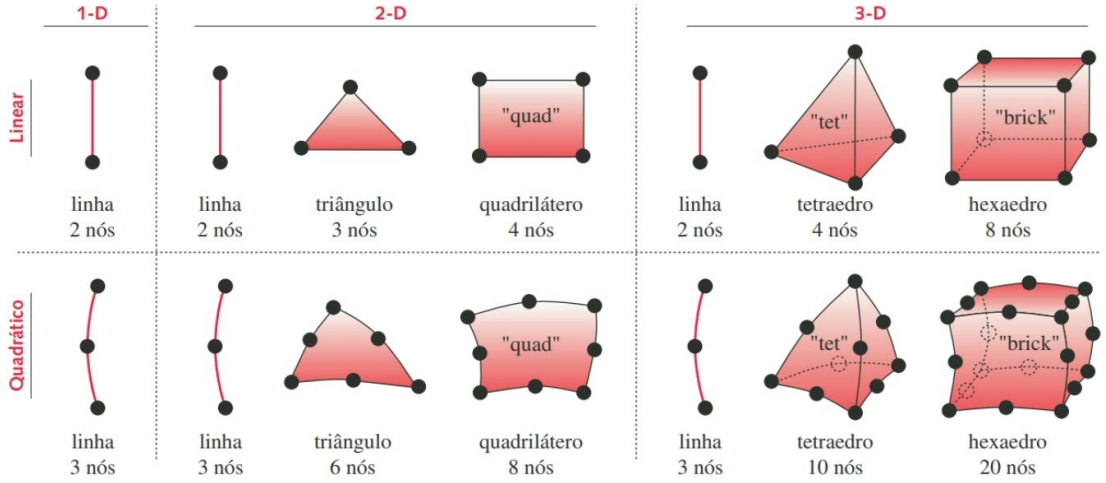
A subdivisão de uma estrutura em elementos gera uma malha de elementos finitos. Essa malha é formada pelos nós que interligam os elementos e cada um desses nós possui uma função matemática que descreve seu deslocamento (FILHO, 2007).

Os elementos utilizados para fazer a divisão do modelo podem ser de

diversos tipos, podendo ser de uma, duas ou três dimensões, ou ainda elementos de linha, área ou volume, respectivamente. Além de poderem ser classificados de acordo com a ordem de sua função (NORTON, 2013).

Na Figura 13, a seguir, apresenta-se alguns modelos comuns de elementos:

Figura 13 - Alguns elementos finitos comuns




Fonte: Adaptado de Norton (2013)

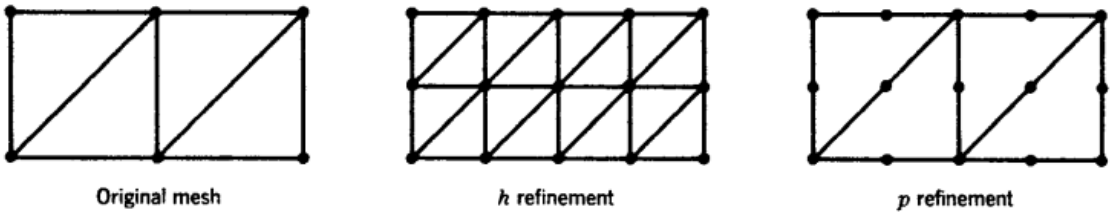
De acordo com Shigley (2016), existem 3 formas básicas de se gerar uma malha: geração de malha manual, geração de malha semiautomática e geração de malha completamente automatizada. A primeira, de forma manual, era mais comumente utilizada nos primórdios do MEF, sendo deixada de lado, por conta de ser um método trabalhoso. Com o advento dos programas de simulação, as empresas desenvolvedoras começaram a implementar em seu *software* malhas prontas, sendo necessário apenas que o usuário defina os contornos do problema. Já a geração de malha completamente automatizada é visada para reduzir o tempo empreendido do projetista no desenvolvimento do projeto, fazendo com que o *software* gere automaticamente não apenas a malha, mas que também faça o refinamento da malha adaptativa.

Durante o processo de geração de malha deve-se ajustar a densidade de malha desejada. Em pontos onde o gradiente de te tensões é pequeno, pode ser interessante utilizar uma malha maior, pois não irá acarretar em um resultado muito longe do esperado e economizará tempo de processamento. Porém onde tem-se um gradiente de tensões maior, como em locais de aplicação de carga e também locais concentradores de tensão, é importante uma malha mais refinada, a fim de obter resultados mais confiáveis (NORTON, 2013).

Norton (2013), explica que podem ser utilizados dois tipos de refinamento de malhas, sendo eles o *h-adaptativo* e o *p-adaptativo*. O primeiro, é utilizado aumentando o número de elementos da malha, porém diminuindo seu tamanho. Normalmente é utilizado em elementos de ordem menor. Já o refino p-adaptativo é utilizado de forma a aumentar a ordem do elemento, deixando dessa forma a malha com um número menor de elementos, porém de tamanho maior.

A figura 14 abaixo exemplifica o método de utilização do refinamento *h-adaptativo* e *p-adaptativo*, respectivamente.

Figura 14 - Refinamento h-adaptativo e p-adaptativo



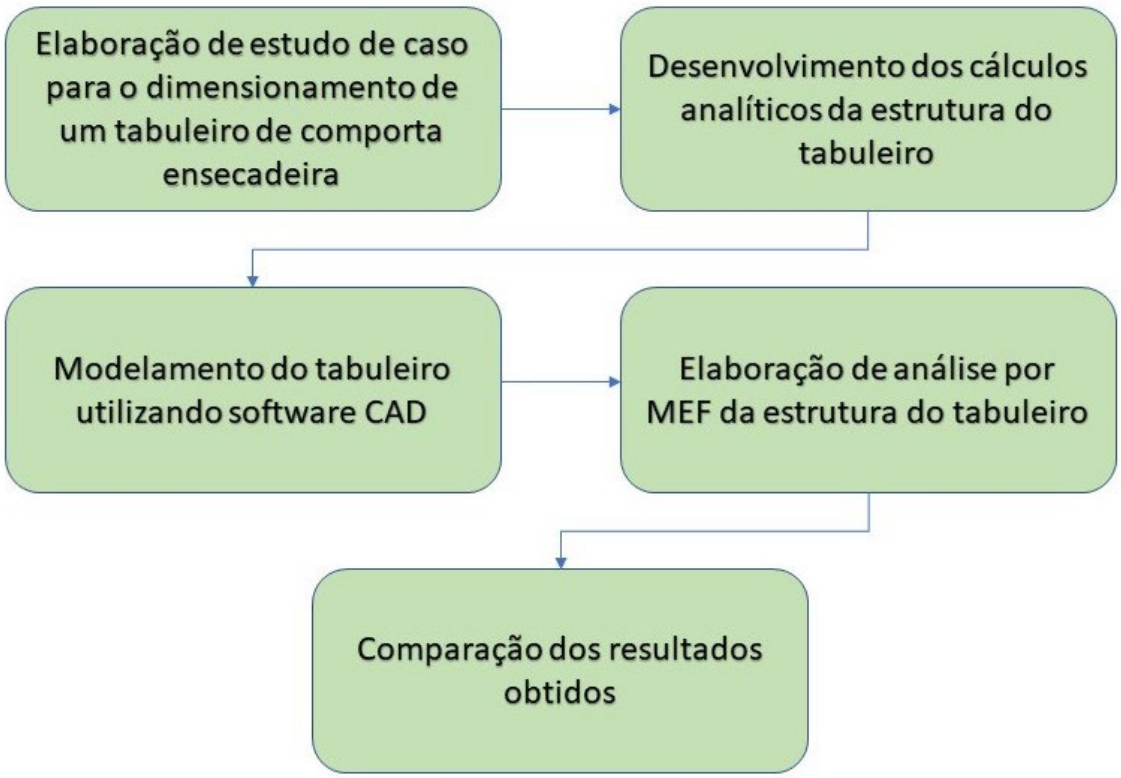

Fonte: Adaptado de Martha (2019)

Ainda de acordo com Martha (1994), as condições de convergência e a precisão obtidos com os resultados do MEF não dependem apenas dos elementos utilizados, mas também da malha utilizada para a resolução do problema. Por isso, é importante salientar que para se obter resultados que possam ser considerados adequados, não basta ter um bom programa de simulação com bons algoritmos numéricos e com bons bancos de dados de elementos, é preciso também que o projetista saiba realizar uma correta discretização do problema.

## 3 METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em 5 etapas, conforme mostrado na Figura 15. A primeira etapa da metodologia consistiu em desenvolver um estudo de caso que apresentou as informações necessárias para o desenvolvimento do projeto. A segunda etapa foi aquela em que foram selecionados os materiais utilizados no projeto e também foram realizados os cálculos analíticos. Após a finalização da etapa 2, iniciou-se a etapa 3, na qual utilizando um *software* CAD, realizou-se o modelamento da estrutura. Tendo o modelo 3D pronto, iniciou-se a etapa 4 do trabalho que consistiu em realizar o estudo por MEF utilizando um *software* CAE. A última etapa do trabalho consistiu na comparação dos resultados obtidos a partir do método analítico e o MEF.

Figura 15 - Fluxograma metodológico

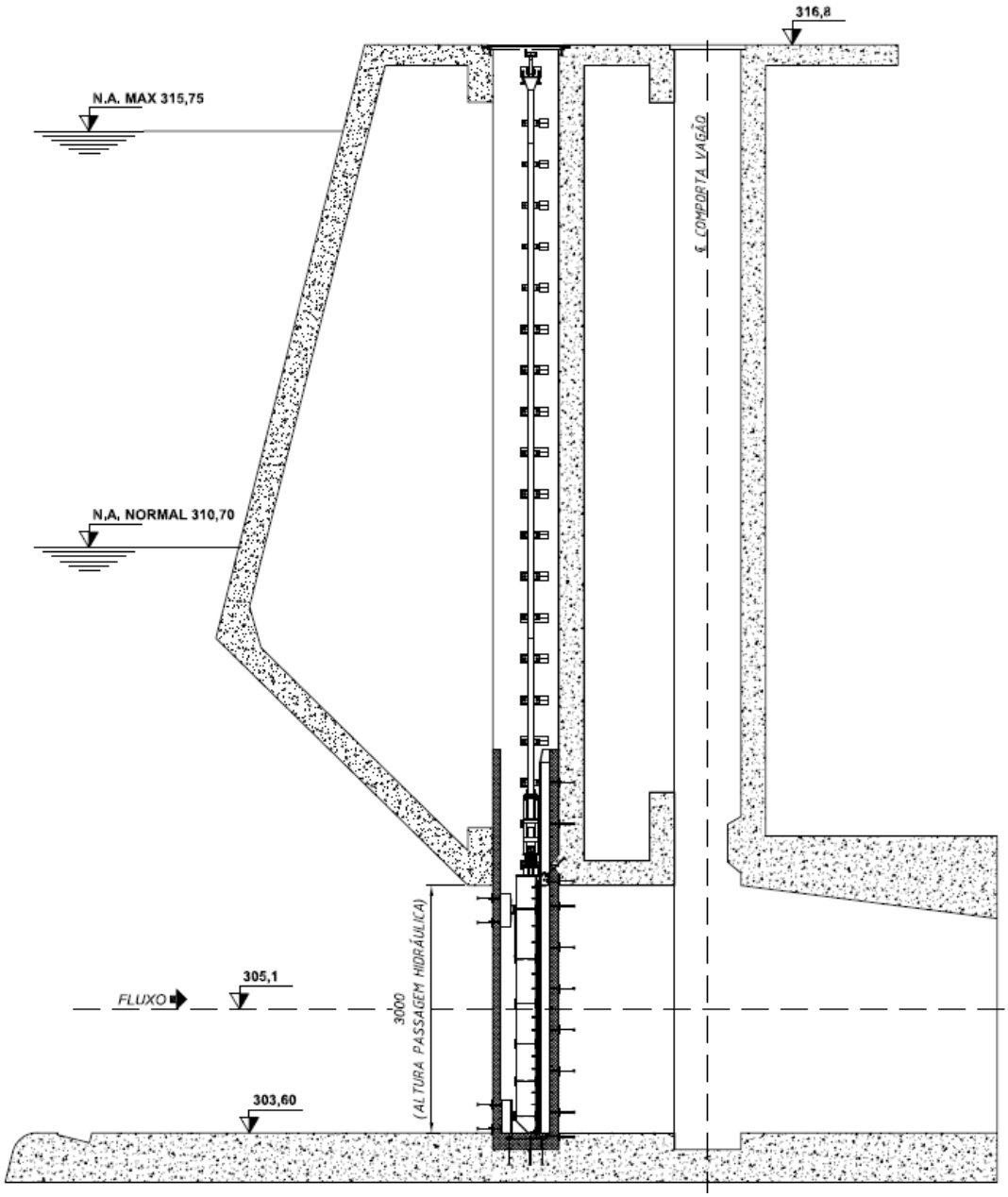



Fonte: O Autor (2023)

## 3.1 Delimitação do projeto

A comporta utilizada neste trabalho consistiu em uma comporta ensecadeira com paramento plano, de fundo, com pressão atuando em apenas um lado do paramento, localizada na tomada d'água de uma PCH e sendo utilizada para a realização da manutenção na comporta vagão de emergência. A comporta possui altura e largura de passagem hidráulica de 3000mm e 2700mm, respectivamente. Além de carga normal de projeto de 7,10 mca e carga ocasional de 12,15 mca. A disposição da comporta é conforme indicado na Figura 15, onde também são apresentados seus dados de níveis d'água, cotas de elevação e suas dimensões de passagem hidráulica.

Figura 16 – Disposição da comporta ensecadeira




Fonte: O Autor (2023)

Antes de iniciar o dimensionamento do tabuleiro, foram definidas as características básicas de projeto conforme apresentado na tabela abaixo.

Tabela 5 - Características gerais de projeto

| **Características projeto** | | |
|---|---|---|
| Tipo de comporta | -- | Ensecadeira |
| Ângulo de inclinação em relação a vertical | θ | 0º |
| Altura de passagem hidráulica | | 3000 mm |
| Largura de passagem hidráulica | | 2700 mm |
| Altura do painel | A | 3122 mm |
| Largura do painel | l | 2949 mm |
| Largura vedação lateral | D | 2880 mm |
| Altura vedação em relação a soleira | h | 3045 mm |
| Elevação soleira | EL. S | 303,60 m |
| Nível normal reservatório | N.A.N | 310,70 msnm |
| Nível maximorum reservatório | N.A.M | 315,75 msnm |
| Elevação plano de manobra | EL. PM | 316,80 m |
| Posição vedação | -- | À montante |
| Posição paramento | -- | À montante |
| Carga normal de projeto | $H_N$ | 7,10 mca |
| Carga ocasional de projeto | $H_o$ | 12,15 mca |

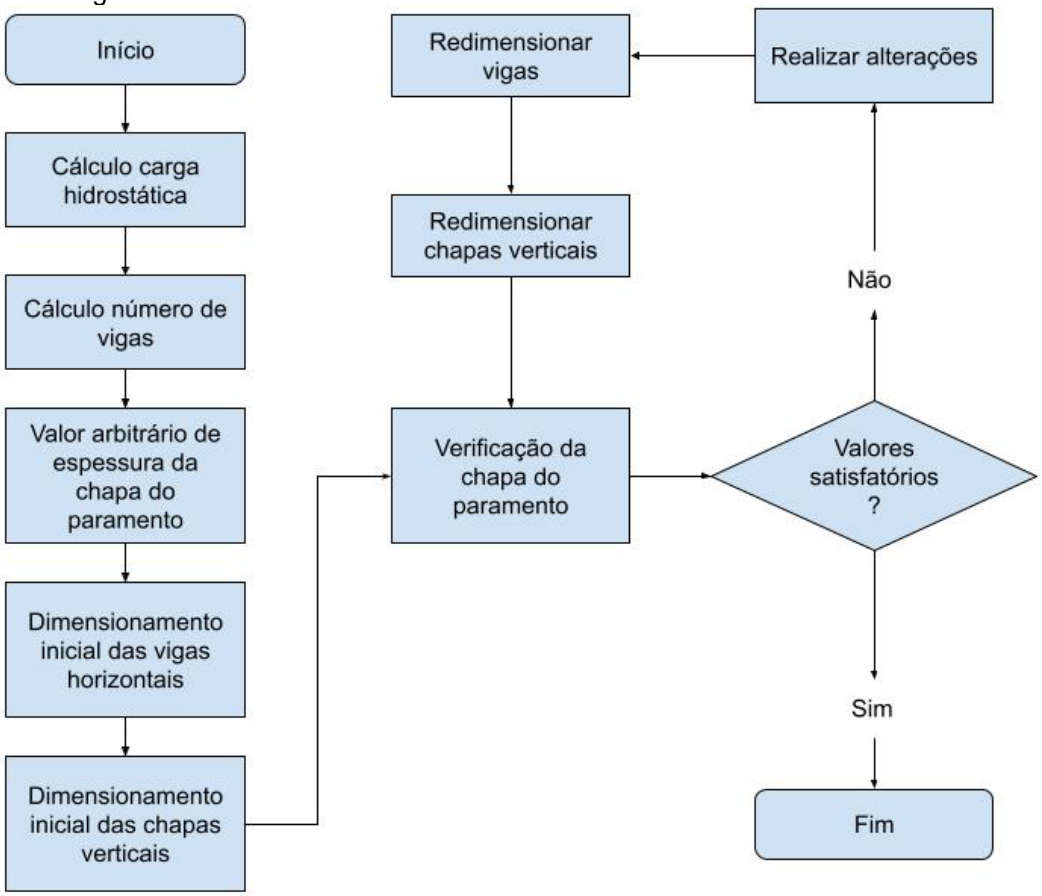
Fonte: O Autor (2023)

## 3.2 Cálculo Analítico

Por uma questão de usualidade na indústria em geral, foi definido que os materiais utilizados no projeto seriam: para chapas da estrutura do tabuleiro em geral, foi considerado como material base o aço ASTM A-36; e para as vigas principais foi utilizado como material base o aço ASTM A 572 Grau 50.

Com os materiais utilizados na estrutura do tabuleiro definidos, foi possível obter as suas características técnicas e com isso definiu-se as tensões admissíveis para ambos os materiais, utilizando os coeficientes apresentados na Tabela 1. Após isto se iniciou-se os cálculos, seguindo as etapas principais indicadas na Figura 16.

Figura 17 - Fluxograma do roteiro de cálculo




Fonte: Adaptado de (ANDRÉ LUIS DE ABREU, 2019).

O desenvolvimento do cálculo analítico conforme apresentado na Figura 16 acima, baseou-se na obra Comportas Hidráulicas, do autor Paulo C. Erbisti (2002). Com os dados apresentados na Tabela 5, foi possível iniciar o cálculo, partindo da determinação da carga hidrostática atuante no projeto. Em seguida foi determinado o número inicial de vigas horizontais e seus espaçamentos. O passo seguinte foi calcular a pressão média atuante sobre a comporta e posteriormente a carga atuante em cada viga horizontal. Com a informação da carga atuante em cada viga horizontal, calculou-se a carga atuante distribuída, máximo esforço cortante e também o máximo momento fletor atuante sobre cada viga. Com esses resultados, foi possível determinar o perfil utilizado para as vigas horizontais e também definidas a quantidade e espessura dos reforços verticais, bem como a espessura da chapa do paramento.

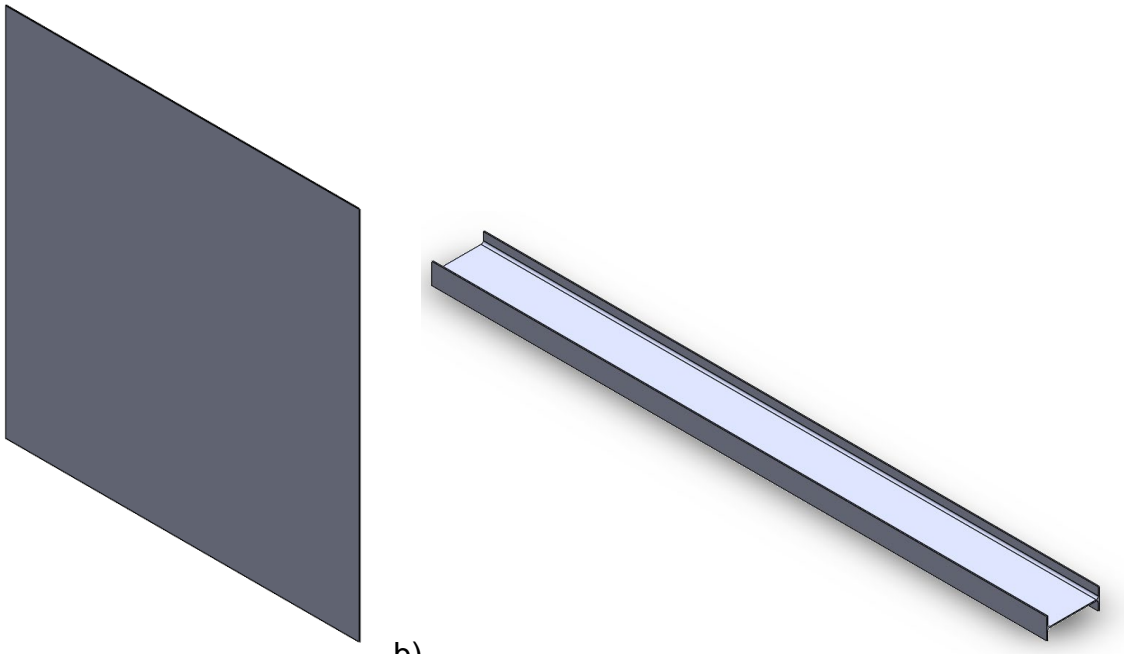
Após ter os principais elementos definidos, como a quantidade, distribuição e perfil utilizado para as vigas horizontais, espessura de chapa do paramento e quantidade e espessura dos reforços verticais, pode-se definir as características de

seção das vigas horizontais em conjunto com a chapa do paramento, para dessa forma calcular as tensões aplicadas e também a deflexão dos elementos principais.

### 3.3 Modelamento da estrutura

Após realizado o cálculo estrutural do tabuleiro, foi possível realizar o modelamento do mesmo utilizando o *software SolidWorks*. O modelo criado em 3D foi composto por todos os itens que compõem a parte estrutural do tabuleiro, como chapa do paramento, vigas horizontais e também chapas de reforço verticais e horizontais. Nesse modelo utilizou-se as espessuras de chapas e especificações de vigas, bem como os materiais selecionados para a estrutura.

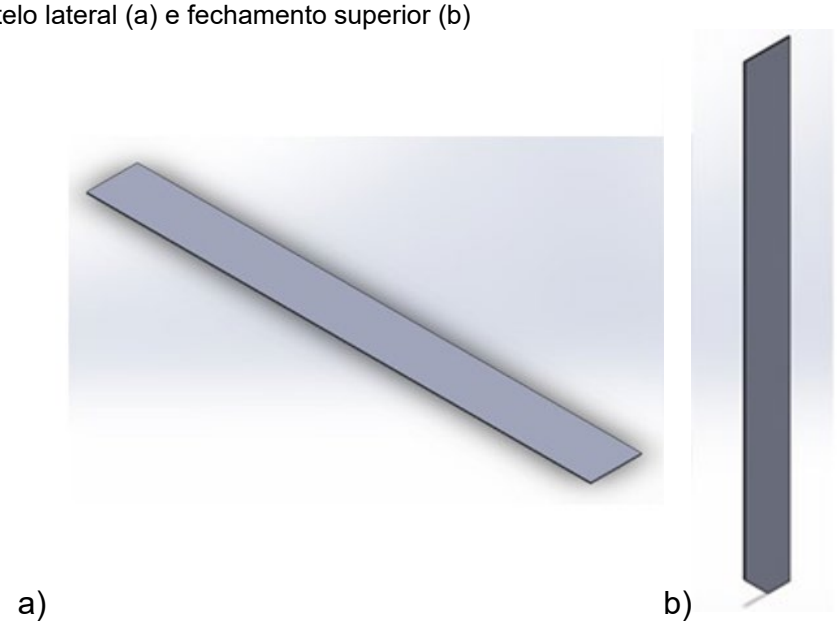
Figura 18 - Chapa do paramento (a) e viga horizontal (b)



a) b)

Fonte: O Autor (2023)

Figura 19 - Cutelo lateral (a) e fechamento superior (b)

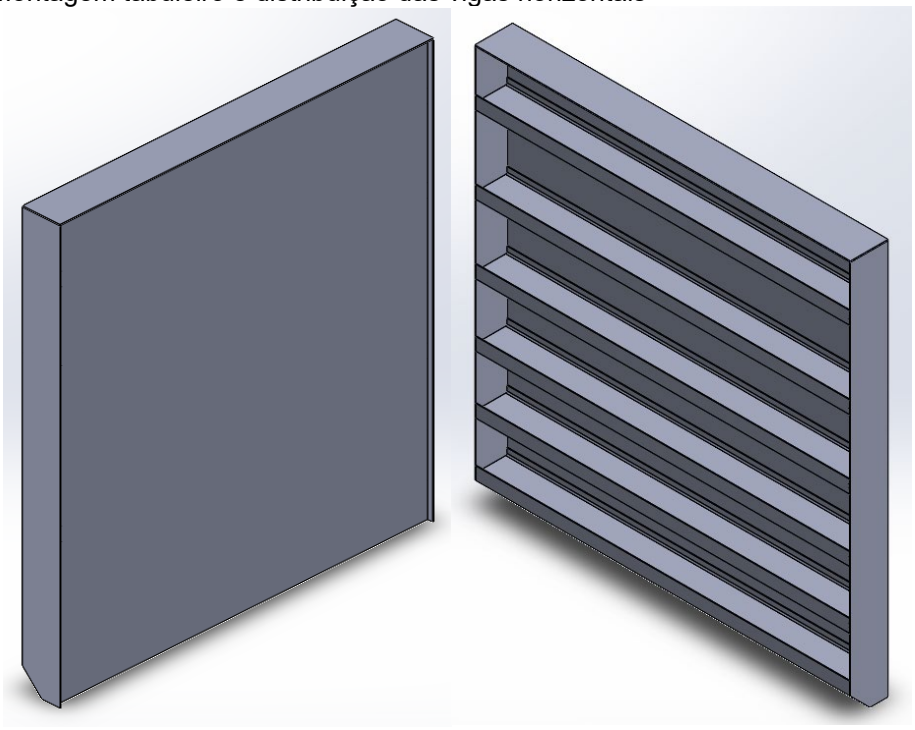


a) b)

Fonte: O Autor (2023)

Com essas 4 peças modelas, foi possível inicial a montagem do tabuleiro e fazer a distribuição das vigas horizontais, conforme as alturas obtidas anteriormente.

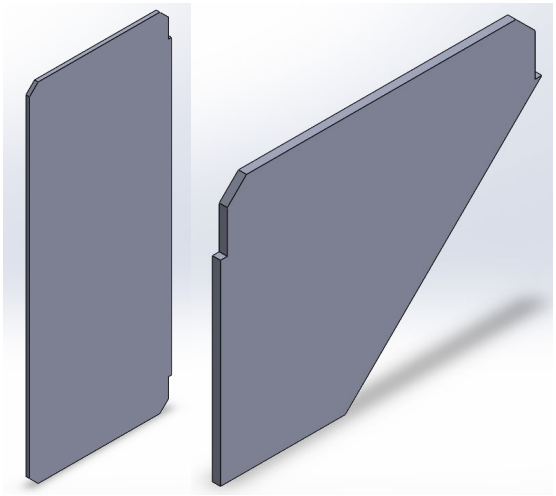
Figura 20 - Montagem tabuleiro e distribuição das vigas horizontais



Fonte: O Autor (2023)

Após feita a montagem inicial, foi possível obter as medidas das alturas dos reforços verticais e horizontais, e assim montá-los na estrutura.

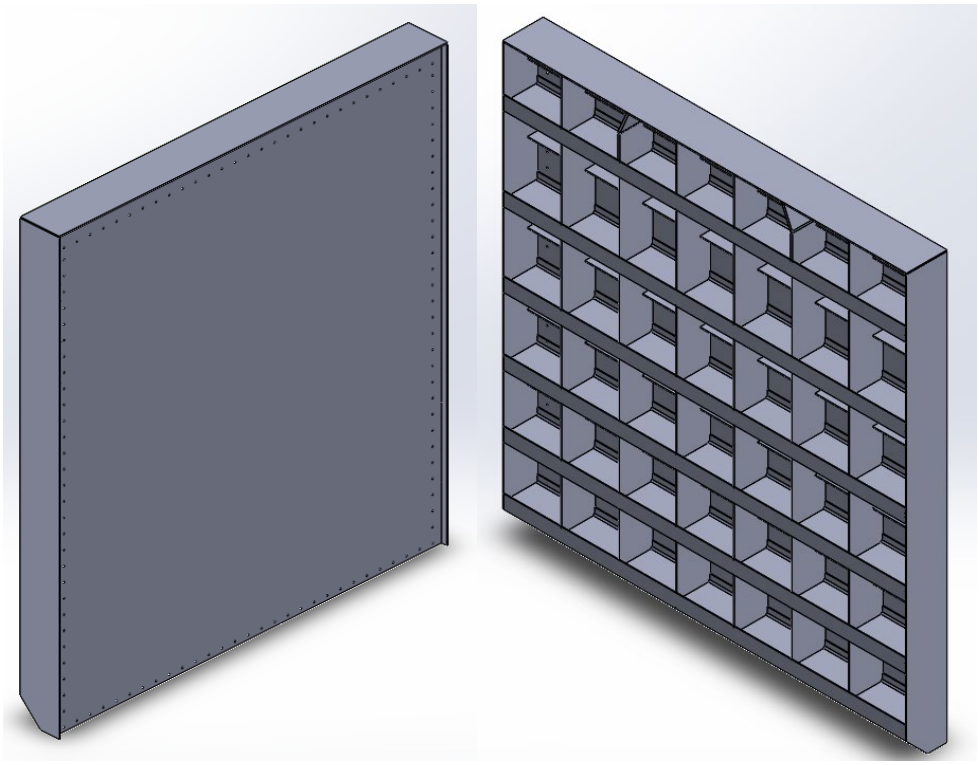
Figura 21 - Reforços verticais



Fonte: O Autor (2023)

Por fim foi finalizada a montagem das peças do tabuleiro, conforme apresentado na figura abaixo.

Figura 22 - Estrutura tabuleiro montado



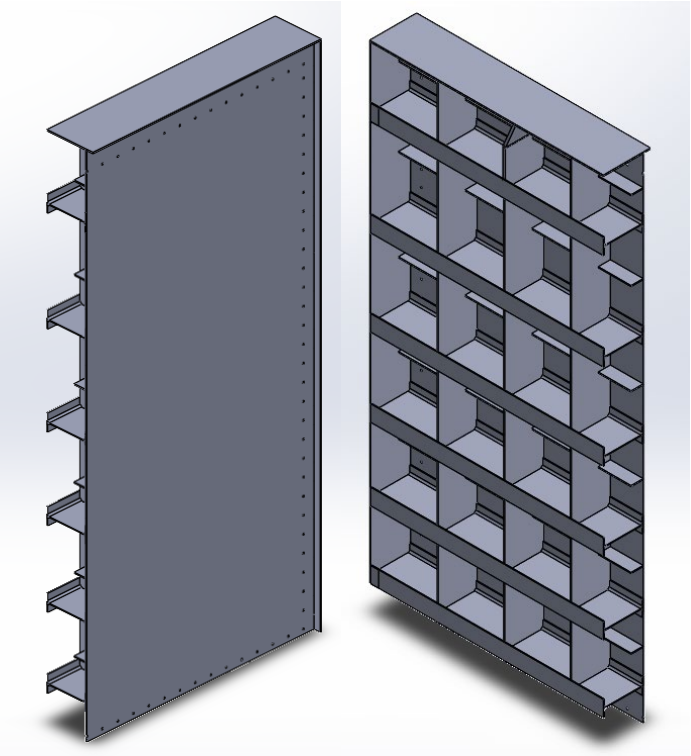
Fonte: O Autor (2023)

Tendo finalizado o modelamento e montagem da estrutura do tabuleiro, pode-se utilizá-lo para realizar o estudo de Elementos Finitos.

### 3.4 Modelamento do estudo dos elementos finitos

Com o modelamento do tabuleiro finalizado, iniciou-se o estudo de MEF utilizando o *software* Ansys de simulação CAE. Com esse *software* é possível simular as condições similares às quais a estrutura em questão será submetida quando de sua real instalação. Por se tratar de uma peça relativamente grande, que necessitaria de um *hardware* robusto para realizar o cálculo, foi optado por realizar o estudo utilizando apenas a metade da estrutura do tabuleiro. Isso foi possível devido a ser uma estrutura simétrica e também pelas cargas atuantes no projeto serem aplicadas de forma centralizada. Dessa maneira a geometria final que foi utilizada para a realização do estudo ficou conforme apresentado na figura abaixo.

Figura 23 - Geometria final utilizada no MEF

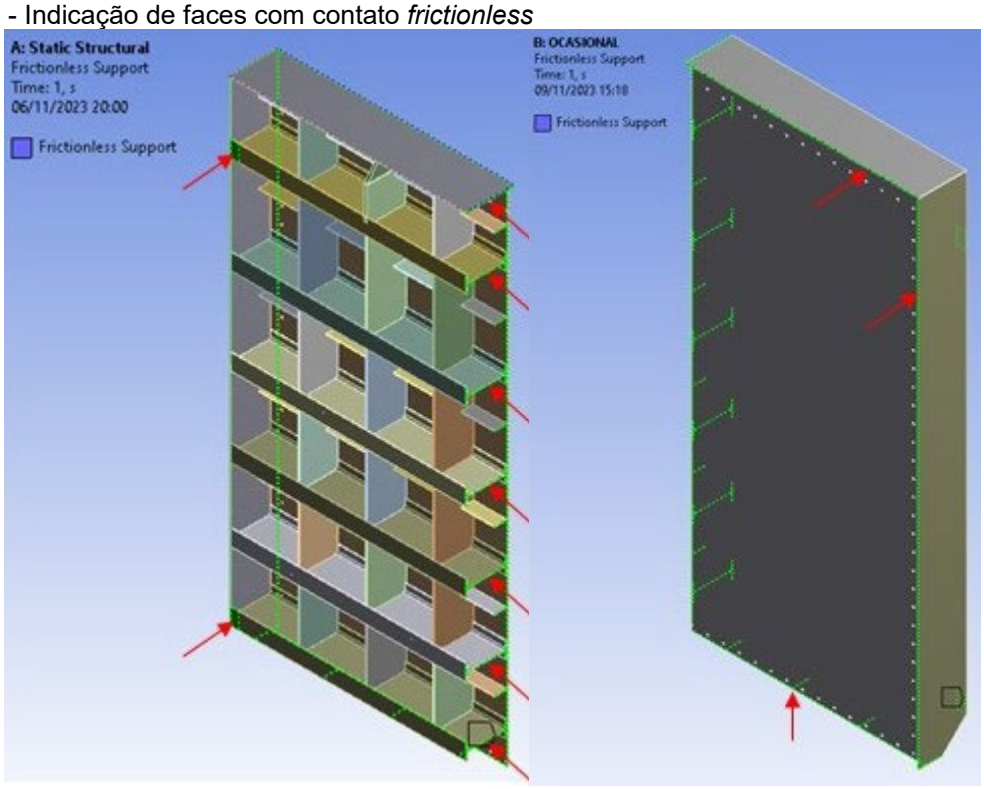


Fonte: O Autor (2023)

### 4.3.1 Condições de contorno

Para a realização do estudo, foram consideradas as condições mais próximas do uso da comporta. Dessa maneira, aplicou-se o método de contato *frictionless* nas faces que teriam contato com as peças fixas concretadas, essas faces foram todas as faces inferiores, faces frontais dos cutelos e chapa superior, além das laterais e faces de encosto nas vigas horizontais, conforme apresentado na Figura 24 abaixo.

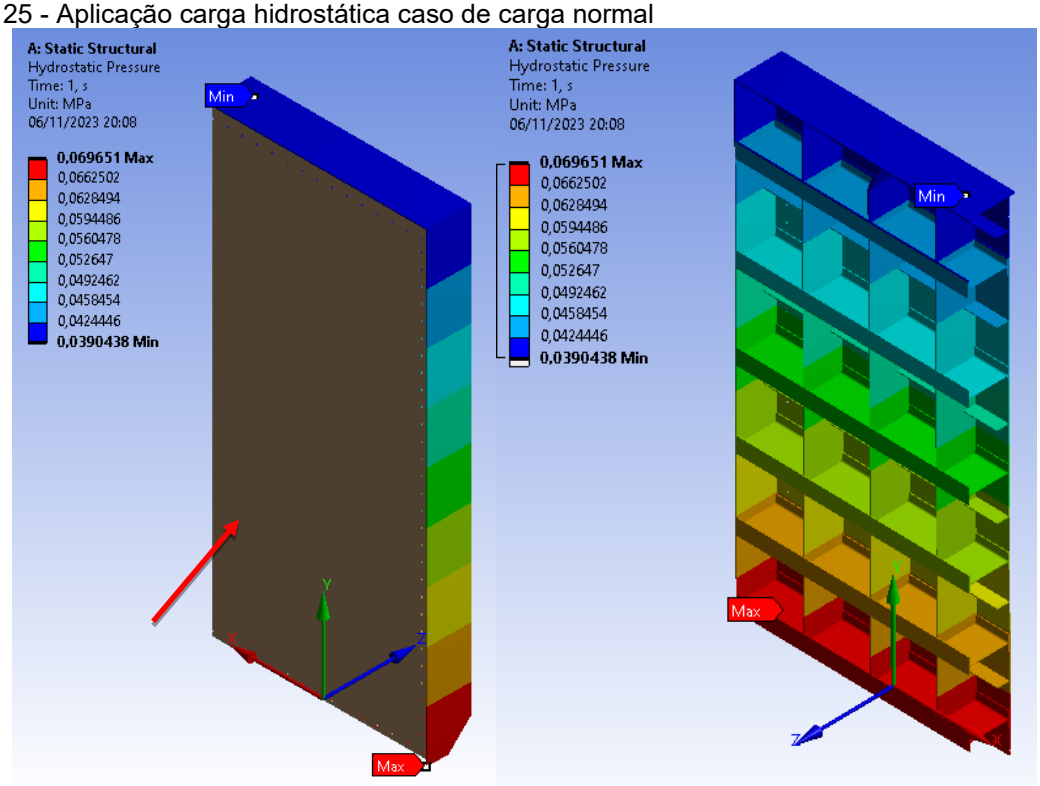
Figura 24 - Indicação de faces com contato *frictionless*




Fonte: O Autor (2023)

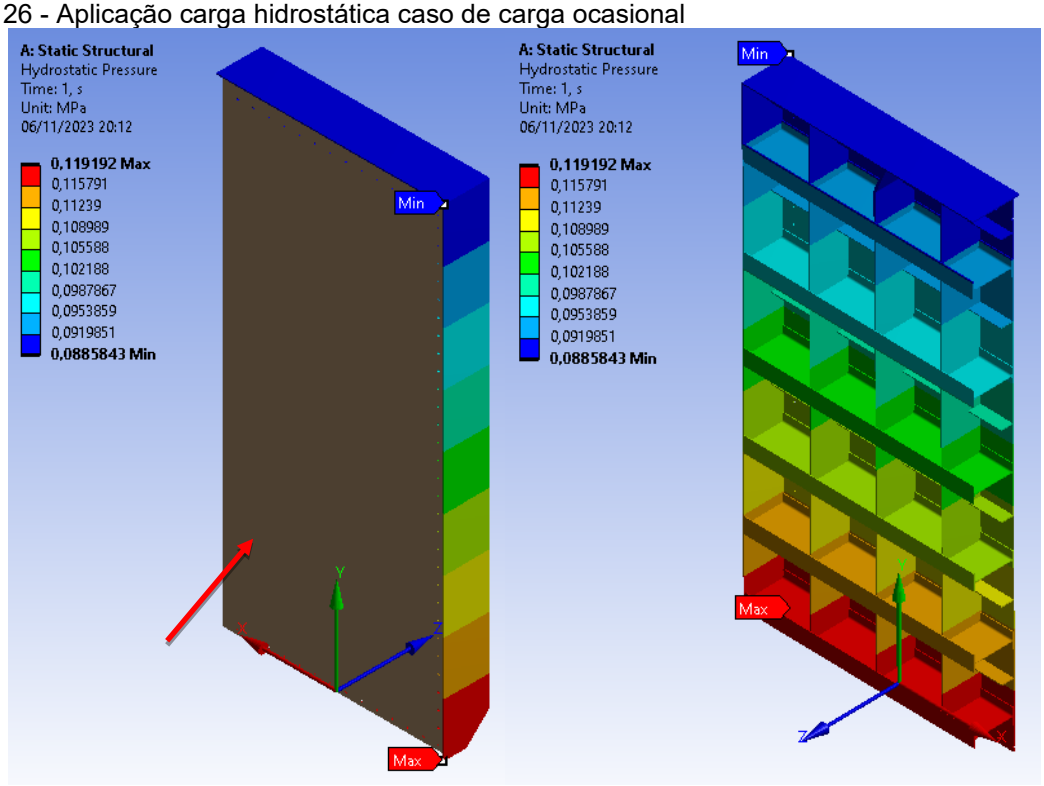
A força aplicada foi a carga hidrostática distribuída sobre todos os elementos da estrutura que tem contato com a água. Foram realizados os dois casos de carga, normal e ocasional, considerando colunas d'água de 7,10 e 12,15 mca, respectivamente. Abaixo apresentam-se as Figuras 25 e 26 que demonstram o diagrama da carga hidrostática aplicada no caso de carga normal e ocasional respectivamente. A face da chapa do paramento apresentada em cinza e indicada com a seta vermelha é a parte do tabuleiro que está vedada e dessa forma não recebe a incidência da aplicação da carga hidrostática.

Figura 25 - Aplicação carga hidrostática caso de carga normal




Fonte: O Autor (2023)

Figura 26 - Aplicação carga hidrostática caso de carga ocasional




Fonte: O Autor (2023)

Após a definição das condições de contorno, foram inseridas as cargas aplicadas a estrutura e o estudo de malha, selecionando qual a malha adequada e

seu refinamento. Foram realizadas simulações até que se chegasse em um ponto de convergência.

# 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

## 4.1 Cálculo Analítico

### 4.1.1 Definições das propriedades e tensões admissíveis

Antes de iniciar o cálculo dos elementos estruturais do tabuleiro da comporta, definiram-se os materiais utilizados, bem como as suas propriedades mecânicas. As chapas utilizadas no projeto foram de ASTM A-36 e os perfis estruturais de ASTM A 572 Gr. 50. Utilizando as tabelas apresentadas no Anexo A e B, chegou-se aos seguintes valores de propriedades para os materiais:

Tabela 6 - Propriedades mecânicas ASTM A-36

| **Material chapas** | **ASTM A-36** |
|---|---|
| Limite de ruptura | 400,00 MPa |
| Limite de escoamento (mínimo) | 250,00 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0,30 |

Fonte: ASTM A-36 (2023)

Tabela 7 - Propriedades mecânicas ASTM A 572 Gr. 50

| **Material chapas** | **ASTM A 572 Gr. 50** |
|---|---|
| Limite de ruptura | 450,00 MPa |
| Limite de escoamento (mínimo) | 345,00 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0,30 |

Fonte: ASTM A 572 (2023)

Após as propriedades dos materiais terem sido definidas, utilizando essa informação em conjunto com as informações contidas na Tabela 1, definiu-se as tensões admissíveis de projeto para os materiais utilizados, sendo apresentado na tabela abaixo.

Tabela 8 - Tensões admissíveis ASTM A-36

| **Tensão** | **Caso de carga** | |
|---|---|---|
| | **Normal** | **Ocasional** |
| Tração axial, tração e compressão na flexão | 170,00 MPa | 190,00 MPa |
| Compressão na flexão, quando necessária a verificação de estabilidade | 147,50 MPa | 170,00 MPa |
| Cisalhamento | 97,50 MPa | 110,00 MPa |
| Tensão de comparação | 190,00 MPa | 205,00 MPa |
| Tensão de comparação no paramento | 217,50 MPa | 217,50 MPa |

Fonte: O Autor (2023)

Tabela 9 - Tensões admissíveis ASTM A 572 Gr. 50

| Tensão | Caso de carga | |
|---|---|---|
| | Normal | Ocasional |
| Tração axial, tração e compressão na flexão | 234,60 MPa | 262,2 MPa |
| Compressão na flexão, quando necessária a verificação de estabilidade | 203,55 MPa | 234,60 MPa |
| Cisalhamento | 134,55 MPa | 151,80 MPa |
| Tensão de comparação | 262,20 MPa | 282,90 MPa |
| Tensão de comparação no paramento | 300,15 MPa | 300,15 MPa |

Fonte: O Autor (2023)

### 4.1.2 Carga Hidrostática

1. Caso de carga normal

O cálculo da carga hidrostática aplicada ao projeto, é calculado a partir da Equação 1 e utilizando as informações apresentadas na Tabela 5. Dessa maneira para a definição do caso de carga normal, utilizou-se a coluna d'água de 7,10 mca.

$$W = \gamma \,.\, D \,.\, h \,.\, \left(H_N - \frac{h}{2}\right)$$

$$W = 9{,}81 \,.\, 2{,}88 \,.\, 3{,}045 \,.\, \left(7{,}10 - \frac{3{,}045}{2}\right)$$

$$W = 479{,}83\ kN$$

2. Caso de carga ocasional

O cálculo da carga hidrostática aplicada ao projeto, é calculado a partir da Equação 1 e utilizando as informações apresentadas na Tabela 5. Dessa maneira para a definição do caso de carga ocasional, utilizou-se a coluna d'água de 12,15 mca.

$$W = \gamma \,.\, D \,.\, h \,.\, \left(H_O - \frac{h}{2}\right)$$

$$W = 9{,}81 \,.\, 2{,}88 \,.\, 3{,}045 \,.\, \left(12{,}15 - \frac{3{,}045}{2}\right)$$

$$W = 914{,}28\ kN$$

### 4.1.3 Número de Vigas

Afim de podermos calcular a carga atuante sobre cada viga, primeiro atribuímos uma espessura estimada para a chapa do paramento e um número pré-determinado de vigas. Para o cálculo do número de vigas, utilizou-se a Equação 12.

$$N = \frac{100h}{t} \cdot \sqrt{\frac{H_m}{2\sigma_{adm}}}$$

$$N = \frac{100 \,.\, 3{,}045}{6{,}35} \cdot \sqrt{\frac{5{,}69}{2 \,.\, 217{,}5}}$$

$$N = 5{,}48 \; vigas$$

Com o resultado obtido, definiu-se que o número de vigas a ser utilizado no projeto da comporta seria de 6 vigas horizontais.

### 4.1.4 Flecha Máxima Admissível

A flecha máxima que pode ser admitida no projeto é definida utilizando a Equação 9.

$$f_{máx} = \frac{l}{800}$$

$$f_{máx} = \frac{2949}{800}$$

$$f_{máx} = 3{,}68 \; mm$$

### 4.1.5 Espaçamento Vigas Horizontais

Como citado anteriormente, afim de utilizar apenas um padrão de viga horizontal, calculou-se a distribuição delas, afim de quem todas ficassem igualmente carregadas. Dessa forma, o cálculo iniciou-se com a definição do Coeficiente β, a partir da Equação 7.

$$\beta = \frac{n \times (H_N - h)^2}{{H_N}^2 - (H_N - h)^2}$$

$$\beta = \frac{6 \times (7{,}10 - 3{,}045)^2}{7{,}10^2 - (7{,}10 - 3{,}045)^2}$$

$$\beta = 2{,}905$$

Tendo em mãos o valor do Coeficiente β, utilizou-se a Equação 8 para definir a altura de cada viga.

$$y_k = \frac{2H_N}{3\sqrt{n + \beta}} . \left[(k + \beta)^{\frac{3}{2}} - (K - 1 + \beta)^{\frac{3}{2}}\right]$$

$$y_1 = \frac{2 \times 7{,}10}{3 \times \sqrt{6 + 2{,}905}} . \left[(1 + 2{,}905)^{\frac{3}{2}} - (1 - 1 + 2{,}905)^{\frac{3}{2}}\right]$$

$$y_1 = 4{,}386\, m \rightarrow 4386\, mm$$

$$y_2 = 4{,}990\, m \rightarrow 4990\, mm$$

$$y_3 = 5{,}529\, m \rightarrow 5529\, mm$$

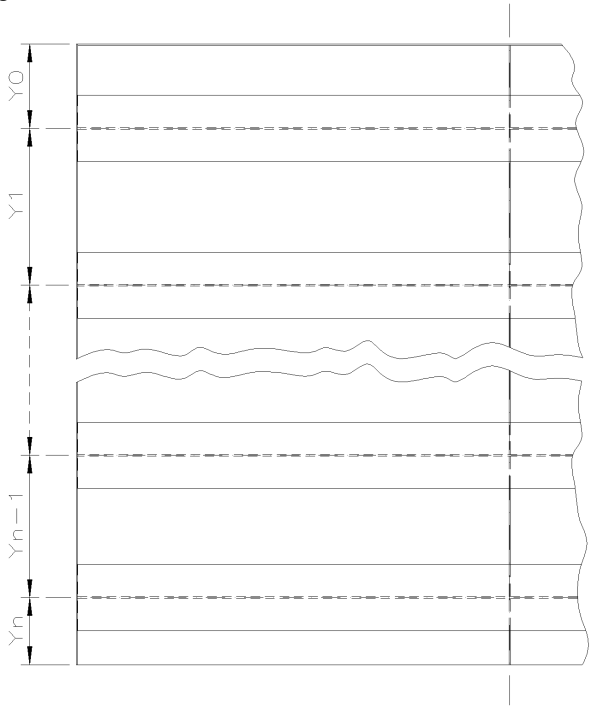
$$y_4 = 6{,}019\, m \rightarrow 6019\, mm$$

$$y_5 = 6{,}473\, m \rightarrow 6473\, mm$$

$$y_6 = 6{,}896\, m \rightarrow 6896\, mm$$

Após definidas as alturas das vigas horizontais, fez-se seu posicionamento na comporta, conforme apresentado na Figura 27, tendo como ponto de referência a parte inferior do tabuleiro. Para isso, subtraiu-se dos valores obtidos para cada viga, o resultado da subtração entre o N.A Normal e a cota de elevação da soleira. Assim, obteve-se os seguintes valores e distribuição das vigas.

Figura 27 - Distribuição vigas horizontais




Fonte: O Autor (2023)

- N.A Normal 310,70 msnm
- Elevação Soleira 303,60 m

$h_1 = [N.A.N - EL.S] - y_6$

$h_1 = 7{,}10 - 6{,}896$

$h_1 = 0{,}204\ m \rightarrow 204\ mm$

$h_2 = 0{,}627\ m \rightarrow 627\ mm$

$h_3 = 1{,}081\ m \rightarrow 1081\ mm$

$h_4 = 1{,}571\ m \rightarrow 1571\ mm$

$h_5 = 2{,}110\ m \rightarrow 2110\ mm$

$h_6 = 2{,}714\ m \rightarrow 2714\ mm$

### 4.1.6 Pressão média atuante sobre a comporta

A pressão atuante sobre a comporta pode ser calculada utilizando a carga de projeto e a altura de passagem hidráulica vedada. Dessa forma, calculou-se para os casos de carga normal e ocasional.

1. Caso de carga normal

$$p_N = H_N - \left(\frac{h}{2}\right) \quad (17)$$

$$p_N = 7{,}10 - \left(\frac{3{,}045}{2}\right)$$

$$p_N = 5{,}577\ mca$$
$$p_N = 0{,}055\ Mpa$$

2. Caso de carga ocasional

$$p_O = H_O - \left(\frac{h}{2}\right)$$

$$p_O = 12{,}15 - \left(\frac{3{,}045}{2}\right)$$

$$p_O = 10{,}627\ mca$$
$$p_O = 0{,}106\ Mpa$$

### 4.1.7 Carga total sobre a comporta

A carga total atuante sobre a comporta foi calculada utilizando a pressão média atuante sobre a comporta, e a área na qual incide a pressão.

1. Caso de carga normal

$$p_N = \frac{F_N}{A} \quad (18)$$

$$F_N = p_N \times A$$

$$F_N = p_N \times h \times D$$

$$F_N = 0{,}055 \times 3045 \times 2880$$

$$F_N = 482328\ N$$

2. Caso de carga ocasional

$$p_O = \frac{F_O}{A}$$

$$F_O = p_O \times A$$

$$F_O = p_O \times h \times D$$

$$F_O = 0{,}106 \times 3045 \times 2880$$

$$F_O = 929577\ N$$

### 4.1.8 Carga atuante sobre as vigas horizontais

Utilizando a carga total atuante sobre a comporta e também o número de vigas que foi anteriormente definido, definiu-se o valor da carga atuante sobre cada viga horizontal.

1. Caso de carga normal

$$Q_N = \frac{F_N}{n} \tag{19}$$

$$Q_N = \frac{482328}{6}$$

$$Q_N = 80388\ N$$

2. Caso de carga ocasional

$$Q_O = \frac{F_O}{n}$$

$$Q_O = \frac{929577}{6}$$

$$Q_O = 154929\ N$$

### 4.1.9 Carga atuante distribuída sobre as vigas horizontais

A carga atuante distribuída sobre cada viga horizontal, foi calculada utilizando carga atuante sobre cada vida e dividindo pelo seu comprimento útil.

1. Caso de carga normal

$$q_n = \frac{Q_N}{L} \quad (20)$$

$$q_n = \frac{80388}{2941}$$

$$q_n = 27{,}33\ N/mm$$

2. Caso de carga ocasional

$$q_o = \frac{Q_O}{L}$$

$$q_o = \frac{154929}{2941}$$

$$q_o = 52{,}67\ N/mm$$

### 4.1.10 Máximo esforço cortante atuante sobre cada viga horizontal

1. Caso de carga normal

$$v_n = \frac{Q_N}{2} \quad (21)$$

$$v_n = \frac{80388}{2}$$

$$v_n = 40194\ N$$

2. Caso de carga ocasional

$$v_O = \frac{Q_O}{2}$$

$$v_O = \frac{154929}{2}$$

$$v_O = 77646{,}5\ N$$

4.1.11 Máximo momento fletor atuante sobre cada viga horizontal

O máximo momento fletor atuante sobre cada viga horizontal foi calculado utilizando a Equação 15, para os casos de carga normal e ocasional.

1. Caso de carga normal

$$M_N = \frac{(2L - B)F}{8}$$

$$M_N = \frac{(2 \times 2941 - 2880\ ) \times 80388}{8}$$

$$M_N = 30165597\ N.mm$$

2. Caso de carga ocasional

$$M_o = \frac{(2L - B)F}{8}$$

$$M_o = \frac{(2 \times 2941 - 2880\ ) \times 154929}{8}$$

$M_O = 58137107{,}25\ N.mm$

### 4.1.12 Definição da espessura da chapa do paramento

Para a definição da espessura da chapa do paramento, utilizou-se o cálculo da tensão de placa, utilizando a Equação 10 modificada para encontrar diretamente a espessura. Temos 4 valores para o coeficiente “k”, foi calculado para os 4 valores de “k” e considerado o valor mais alto de espessura, e assim aproximando ele para uma espessura comercial. Foi considerado que estariam dispostas 6 chapas de reforço vertical em cada viga.

Para a definição do coeficiente “k”, resolveu-se a relação b/a, tendo:

$$\frac{b}{a} = \frac{605}{421} = 1{,}437$$

Como o valor de 1,028 obtido pela relação b/a não está apresentado diretamente na Tabela 3, foi realizada uma interpolação linear para obter os valores resultantes. Dessa forma, obteve-se:

$\sigma_{1x} = 19{,}83$
$\sigma_{1y} = 12{,}20$
$\sigma_{4y} = 33{,}31$
$\sigma_{3x} = 41{,}61$

Assim podemos calcular os valores de espessura considerando o caso de carga normal para os 4 valores do coeficiente “k”, utilizando a Equação 10.

Para $\sigma_{1x} = 17{,}83$

$$217{,}5 = \frac{19{,}83}{100}.0{,}055.\frac{421^2}{t^2}$$

$$t = 2{,}98\ mm$$

Para $\sigma_{1y} = 12{,}20$

$$217{,}5 = \frac{12{,}20}{100}.0{,}055.\frac{421^2}{t^2}$$

$$t = 2{,}33\ mm$$

Para $\sigma_{4y} = 33{,}31$

$$217{,}5 = \frac{33{,}31}{100}.0{,}055.\frac{421^2}{t^2}$$

$$t = 3{,}86\ mm$$

Para $\sigma_{3x} = 41{,}61$

$$217{,}5 = \frac{41{,}61}{100}.0{,}055.\frac{421^2}{t^2}$$

$$t = 4{,}31\ mm$$

Para o caso de carga ocasional, utilizou-se o valor de 0,106 MPa ao invés de 0,055 MPa, e foram obtidos os seguintes valores para a espessura:

Para $\sigma_{1x} = 17{,}83$

$$217{,}5 = \frac{19{,}83}{100}.0{,}106.\frac{421^2}{t^2}$$

$$t = 4{,}13\ mm$$

Para $\sigma_{1y} = 12{,}20$

$$217{,}5 = \frac{12{,}20}{100}.0{,}106.\frac{421^2}{t^2}$$

$$t = 3{,}24\ mm$$

Para $\sigma_{4y} = 33{,}31$

$$217{,}5 = \frac{33{,}31}{100}.0{,}106.\frac{421^2}{t^2}$$

$$t = 5{,}36\ mm$$

Para $\sigma_{3x} = 41{,}61$

$$217{,}5 = \frac{41{,}61}{100}.0{,}106.\frac{421^2}{t^2}$$

$$t = 5{,}99\ mm$$

Considerando a espessura obtida de 5,99mm, determinou-se que a espessura utilizada para a chapa do paramento será de 6,35mm (1/4”).

### 4.1.13 Definição da viga horizontal

Para iniciar a definição das vigas horizontais utilizadas, definiu-se a altura da viga e a espessura de sua alma. A partir dessas informações foi selecionada uma viga comercial que atendesse às solicitações. A altura da viga pode ser definida utilizando uma relação apresentada na Tabela 4. Como a comporta que foi utilizada como objeto de estudo desse projeto possui coluna d’água sobre a soleira de até 15m, pode ser utilizada a relação de L/12, onde L é considerado a largura útil da viga, assim obteve-se:

$$L = 2941\ mm$$

$$h_{viga} = \frac{L}{12}$$

$$h_{viga} = \frac{2941}{12}$$

$$h_{viga} = 245{,}08\ mm$$

Com a altura de viga resultante e utilizando do catálogo de perfis estruturais

apresentado no Anexo B, a primeira viga comercial que se encontrou foi o perfil W 250, que possui altura de 251 mm e altura de alma de 220 mm. A espessura da alga da viga, pode ser definida utilizando a Equação 13, dessa forma chegou-se a seguinte espessura.

$$t_w = \frac{F}{2.h.\tau_{adm}}$$

$$t_w = \frac{154929}{2 \times 220 \times 151{,}80}$$

$$t_w = 2{,}31\ mm$$

Com a espessura da alma definida de 2,31mm o primeiro perfil comercial encontrado que possui uma espessura de alma maior ou igual foi o W 250 X 17,9. As propriedades geométricas desse perfil, encontram-se Anexo B.

### 4.1.14 Características de seção transversal da viga horizontal

Após ter definido a quantidade de vigas e também o perfil comercial utilizado no projeto, foi possível definir as tensões e deflexões a que o perfil estará submetido durante sua utilização. Para isso, é necessário definir a largura participante $(b_1)$ da chapa do paramento, utilizando as informações apresentadas nas Figuras 10 e 11.

$$L = 2941\ mm$$

$$b_s = 211{,}8\ mm$$

$$b_i = 203{,}0\ mm$$

$$\frac{L}{b_s} = 13{,}89\ mm$$

$$\frac{L}{b_i} = 14{,}47\ mm$$

$$\gamma_I = 0{,}956$$

$$\gamma_{II} = 0{,}959$$

$\gamma_I \times b_s = 202{,}4\ mm$

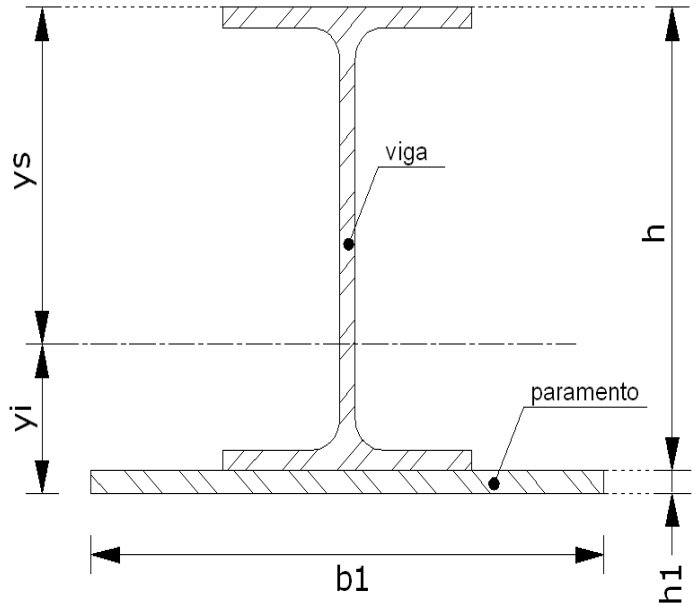
$\gamma_{II} \times b_i = 194{,}8\ mm$

$b_1 = \gamma_I \times b_s + \gamma_{II} \times b_i$

$b_1 = 397{,}2\ mm$

Onde, os valores de $b_i$ é a distância entre a viga horizontal inferior e a face inferior do tabuleiro e $b_s$ é a metade da distância entre a viga horizontal inferior e sua sucessora. Os valores de $\gamma_I$ e $\gamma_{II}$, são obtidos por interpolação linear a partir da Figura 11 e utilizando a relação $\frac{L}{b_s}$ e $\frac{L}{b_i}$.

Figura 28 - Seção transversal viga horizontal




Fonte: O Autor (2023)

Dessa forma, para o perfil W 250 x 17,9, temos:

$b_1 = 397{,}2\ mm$

$h_1 = 6{,}35\ mm$

$h = 251\ mm$

Com as informações das características do perfil selecionado e também com as definições acima, podem ser apresentadas as seguintes características de seção:

Tabela 10 - Características da seção transversal

| Elementos | Largura (mm) | h (mm) | Yg (mm) | A ($mm^2$) | A X Yg ($mm^3$) | I ($mm^4$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Viga | | 251 | 131,9 | 2310 | 304574 | 33331456 |
| Paramento | 397,3 | 6,35 | 3,175 | 2523 | 8009 | 9551793 |
| Total | | 257,35 | | 4833 | 312583 | 42883249 |

Fonte: O Autor (2023)

Tabela 11 - Características inerciais da seção transversal

| Características inerciais da seção transversal | |
|---|---|
| Área da seção | 4833 $mm^2$ |
| Momento de inércia da seção (I) | 42883249 $mm^4$ |
| Momento estático de primeira ordem ($S_i$) | 191713 $mm^3$ |
| Distância da linha neutra à superfície da mesa superior ($Y_s$) | 192,7 mm |
| Distância da linha neutra à superfície da mesa inferior ($Y_i$) | 64,7 mm |
| Distância da linha neutra à superfície interna do paramento ($Y_{sp} = Y_i - h1$)) | 58,3 mm |

Fonte: O Autor (2023)

### 4.1.15 Máxima tensão de compressão devido a flexão nas vigas horizontais principais

A máxima tensão de compressão devido a flexão na viga horizontal principal pode ser calculada a partir da fórmula:

$$\sigma_s = \frac{(M \times Y_s)}{I} \quad (22)$$

1. Caso de carga normal

$$\sigma_s = \frac{(29548789{,}47 \times 192{,}7)}{42883249}$$

$$\sigma_s = 132{,}78\ MPa$$

2. Caso de carga ocasional

$$\sigma_s = \frac{(56946020{,}53 \times 192{,}7)}{42883249}$$

$$\sigma_s = 255{,}89\ MPa$$

4.1.16 Máxima tensão de cisalhamento nas vigas horizontais principais

A máxima tensão de cisalhamento na viga horizontal principal pode ser calculada a partir da fórmula:

$$\tau = \frac{(q\prime \times S_i)}{(I \times b)} \quad (23)$$

1. Caso de carga normal

$$\tau = \frac{(40194 \times 191713)}{(42883249 \times 4{,}8)}$$

$$\tau = 37{,}43\ MPa$$

2. Caso de carga ocasional

$$\tau = \frac{(77646{,}5 \times 191713)}{(42883249 \times 4{,}8)}$$

$$\tau = 72{,}31\ MPa$$

4.1.18 Verificação de rigidez das vigas horizontais principais

A flecha máxima que ocorre nas vigas horizontais principais devido a carga aplicada, pode ser verificada utilizando a Equação 16.

$$f = \frac{5 \times q \times L^4}{384 \times I \times E}$$

$$f = \frac{5 \times 27{,}33 \times 2941^4}{384 \times 42883249 \times 206.10^6}$$

$$f = 3{,}01\ mm$$

4.1.17 Tensões de placa na chapa do paramento

O cálculo das tensões de placa na chapa do paramento pode ser realizado utilizando a Equação 10 e os coeficientes já definidos no Item 4.1.13. Dessa forma temos os seguintes dados:

$\sigma_{1x} = 19{,}83$

$\sigma_{1y} = 12{,}20$

$\sigma_{4y} = 33{,}31$

$\sigma_{3x} = 41{,}61$

$t = 6{,}35\ mm$

Como o pior caso de tensão será observado utilizando o valor de k para $\sigma_{3x}$, realizamos o cálculo apenas utilizando o mesmo, e alternando entre caso de carga normal e ocasional.

$$\sigma = \pm \frac{k}{100} . p . \frac{a^2}{t^2}$$

1. Caso de carga normal

$$\sigma = \frac{41{,}61}{100} . 0{,}055 . \frac{421^2}{6{,}35^2}$$

$$\sigma = 100{,}59\ MPa$$

2. Caso de carga ocasional

$$\sigma = \frac{41{,}61}{100} . 0{,}106 . \frac{421^2}{6{,}35^2}$$

$$\sigma = 193{,}87\ MPa$$

## 4.3 Resultados do método dos elementos finitos

4.3.1 Geração da malha

Diante de todas as opções de malha apresentadas pelo *Ansys* a selecionada para o desenvolvimento do estudo foi a *MultiZone*, utilizando elementos predominantemente hexaédricos. Essa opção de malha foi a que apresentou

melhores resultados, menor desvio e mais média de elementos. Durante o estudo foram realizados refinamentos da malha, resultando em 8 modelos, com tamanhos de elementos diferentes. Na Tabela 12 são apresentados os tamanhos de malha utilizados, além do número de elementos e nós gerados.

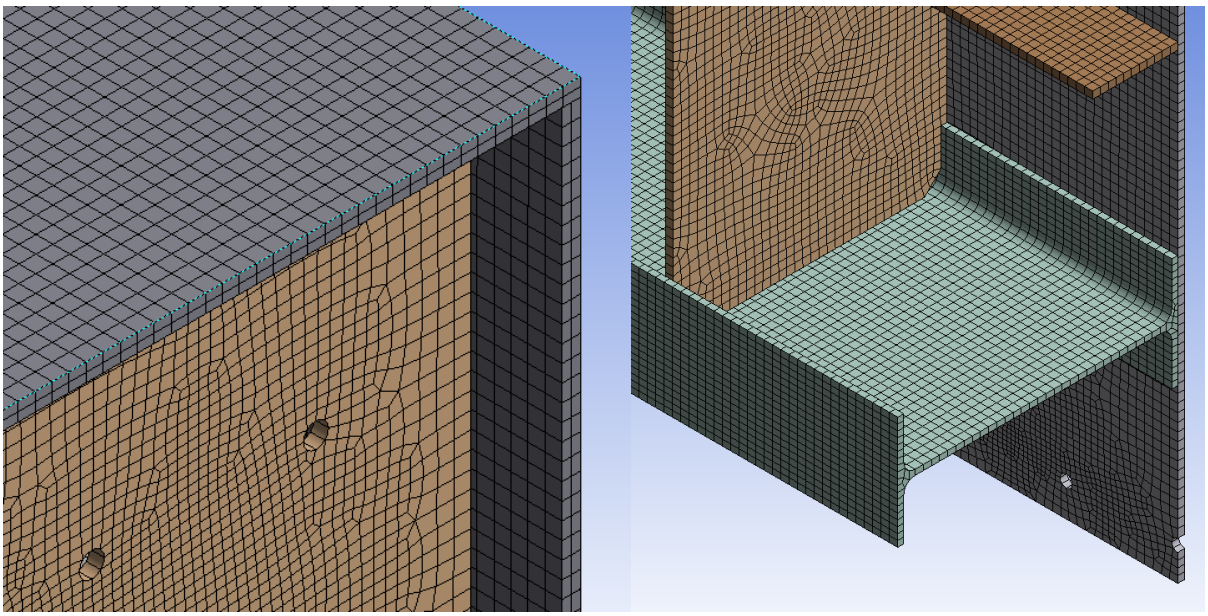
Tabela 12 - Refinamento de malha

| Malha | Elementos | Nós |
|---|---|---|
| MultZone – Padrão | 99646 | 13611 |
| MultiZone – 50 mm | 118003 | 16282 |
| MultiZone – 40 mm | 143916 | 19947 |
| MultiZone – 30 mm | 192613 | 26806 |
| MultiZone – 20 mm | 327447 | 45853 |
| MultiZone – 15 mm | 548041 | 77685 |
| MultiZone – 10 mm | 992339 | 139165 |
| MultiZone – 7,5 mm | 1999346 | 295570 |

Fonte: O Autor (2023)

É possível observar na Figura 29 de forma aproximada a malha gerada em dois pontos distintos do tabuleiro, um deles apresentando a face de jusante da chapa do paramento, cutelo lateral e chapa de fechamento superior e outro ponto com a malha gerada na face a montante da chapa do paramento, em uma das vigas horizontais e na chapa de reforço vertical.

Figura 29 - Malha gerada

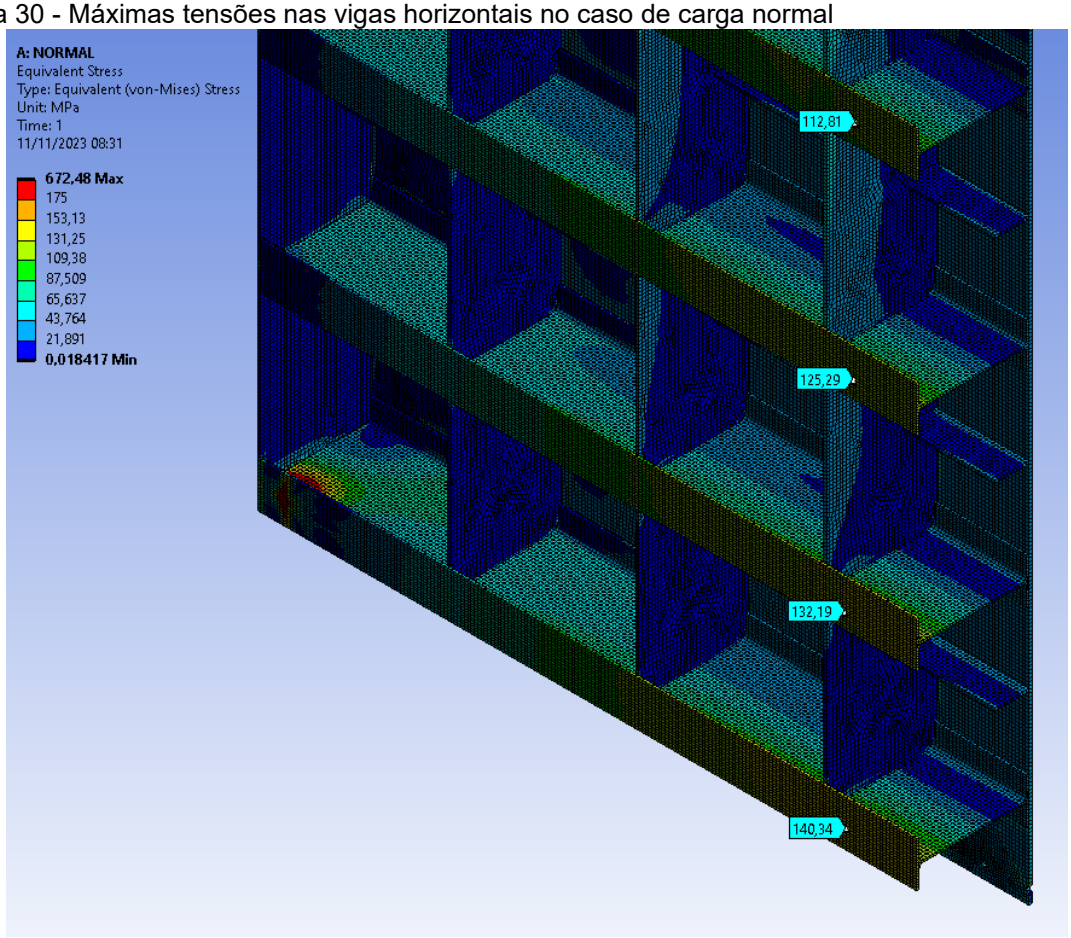


Fonte: O Autor (2023)

### 4.3.2 Máximas tensões nas vigas principais em caso de carga normal

Com o refinamento da malha tendo sido realizado e obtendo um ponto de convergência, foi possível realizar o estudo e obter as máximas tensões atuantes tanto nas vigas horizontais, quando na chapa do paramento. O *software* apresentou pontos de máxima com elevada tensão, porém após análise, foi possível observar que esses pontos são de concentração de tensão, que estavam ocorrendo de maneira aleatória a cada estudo gerado. Dessa maneira, esses máximos foram descartados para a análise, e foram utilizadas as tensões obtidas em regiões de interesse do estudo. Na Figura 30 apresenta-se o resultado do estudo de tensões resultantes no caso de carga normal nas vigas horizontais, em sua área de mais esforço.

Figura 30 - Máximas tensões nas vigas horizontais no caso de carga normal




Fonte: O Autor (2023)

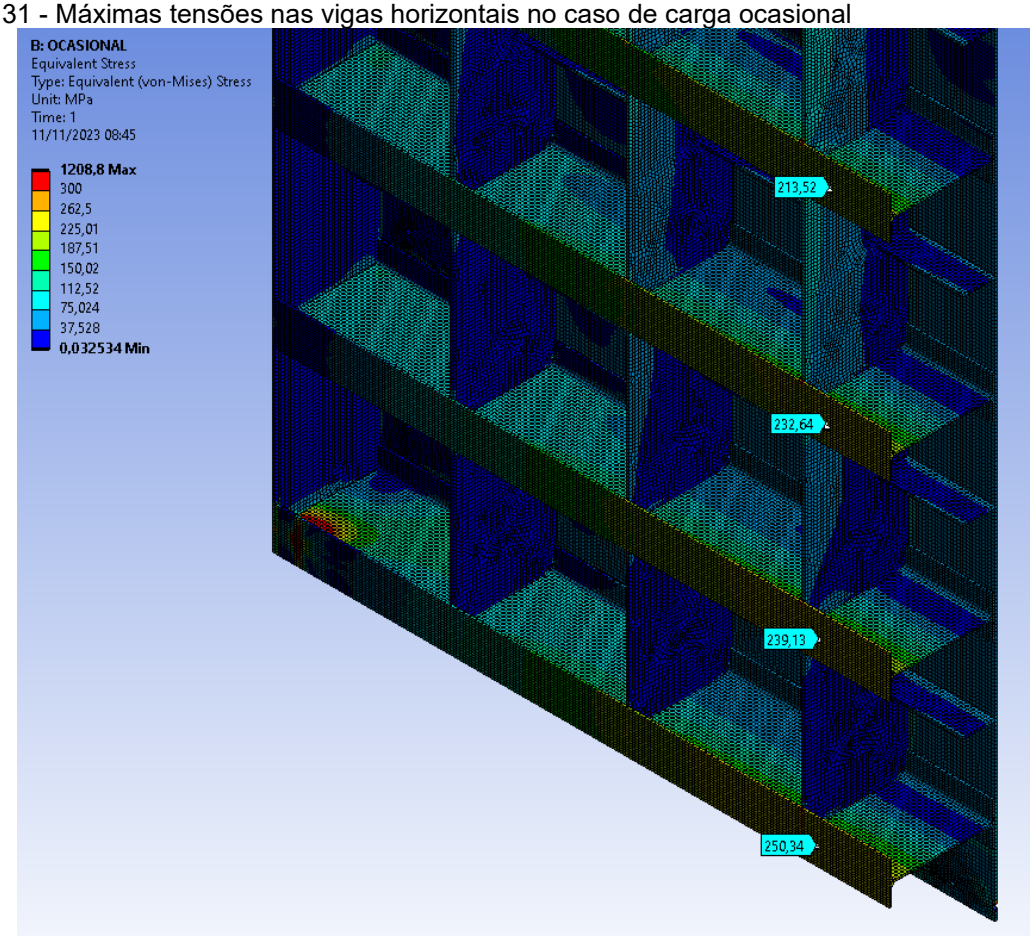
Durante a execução do cálculo analítico, foi obtido um valor de tensão máxima nas vigas horizontais de 132,78 MPa para o caso de carga normal.

Observando a Tabela 9, a tensão admissível para as vigas nesse caso, seria de 234,60 MPa, ficando o valor obtido no cálculo dentro da tensão admissível. No resultado obtido com o MEF, observou-se uma região com as máximas tensões que chegaram em 140,34 MPa, tendo uma diferença de 5,7% aproximadamente dos resultados.

### 4.3.2 Máximas tensões nas vigas principais em caso de carga ocasional

Após realizado o estudo para o caso de carga normal, foi realizado o estudo para o caso de carga ocasional. É possível observar os resultados na Figura 31 abaixo.

Figura 31 - Máximas tensões nas vigas horizontais no caso de carga ocasional




Fonte: O Autor (2023)

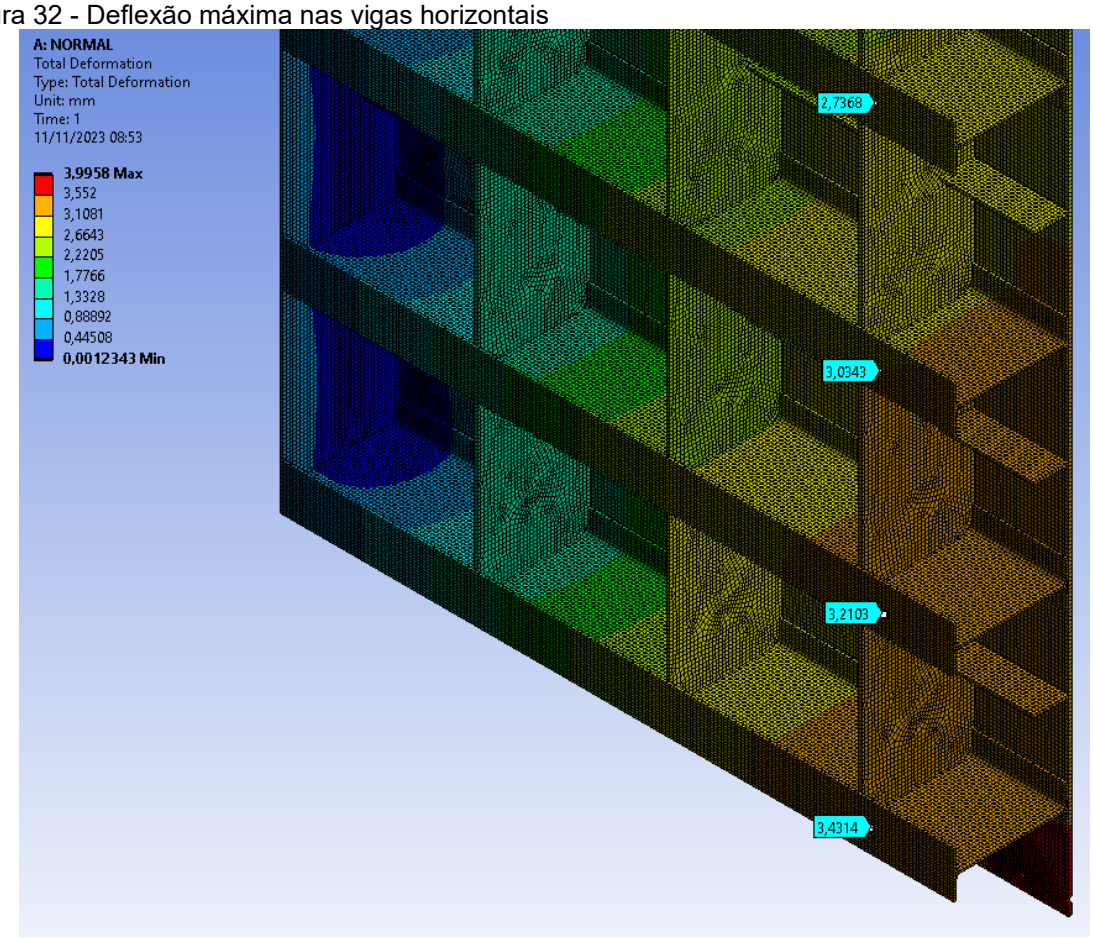
Para o caso de carga ocasional, foi obtido um valor de tensão máxima de 255,89 MPa com o cálculo analítico, onde de acordo com a Tabela 9 a máxima tensão admissível seria de 262,20 MPa, dessa forma, ainda ficando dentro do

esperado. No resultado obtido com o MEF, observou-se uma região com as máximas tensões que chegaram em 250,34 MPa, tendo uma diferença de 2,2% aproximadamente dos resultados.

### 4.3.3 Deflexão máxima nas vigas horizontais

Da mesma forma como ocorre com as tensões, a deflexão máxima das vigas horizontais ocorre também na região central do tabuleiro. Para a deflexão, é utilizado para comparação apenas o caso de carga normal. Dessa forma, abaixo apresenta-se a Figura 32 com os resultados máximas obtidos de deflexão das vigas horizontais.

Figura 32 - Deflexão máxima nas vigas horizontais




Fonte: O Autor (2023)

De acordo com o método analítico, a deflexão calculada para as vigas foi de 3,01 mm, quando a admissível foi definida com o valor de 3,68 mm para os elementos estruturais. O MEF resultou em uma deflexão máxima de 3,43mm,

resultando em uma diferença de 14%, porém ainda dentro do admissível definido de 3,68mm.

### 4.3.4 Comparação dos resultados obtidos a partir do cálculo analítico e MEF

Após realizados os estudos de tensão e deslocamento da estrutura, foi possível fazer uma comparação, apresentando os valores obtidos em cada um dos métodos e comparando-os entre si e também com os valores admissíveis definidos.

A tabela 13 apresenta a comparação dos resultados obtidos com o cálculo analítico em comparação com os valores admissíveis de projeto.

Tabela 13 - Comparação dos valores admissíveis de projeto com os valores obtidos pelo cálculo analítico

| Estudo | Valores Admissíveis | Cálculo Analítico | Diferença |
|---|---|---|---|
| Análise de tensão – Caso de carga normal | 234,60 MPa | 132,78 MPa | 43,40 % |
| Análise de tensão – Caso de carga ocasional | 262,20 MPa | 255,89 MPa | 2,40 % |
| Análise de deslocamento | 3,68 mm | 3,01 mm | 18,20 % |

Fonte: O Autor (2023)

A tabela 14 apresenta a comparação dos resultados obtidos com o Método dos Elementos Finitos em comparação com os valores admissíveis de projeto.

Tabela 14 - Comparação dos valores admissíveis de projeto com os valores obtidos pelo Método dos Elementos Finitos

| Estudo | Valores Admissíveis | MEF | Diferença |
|---|---|---|---|
| Análise de tensão – Caso de carga normal | 234,60 MPa | 140,34 MPa | 40,17 % |
| Análise de tensão – Caso de carga ocasional | 262,20 MPa | 250,34 MPa | 5,52 % |
| Análise de deslocamento | 3,68 mm | 3,43 mm | 6,79 % |

Fonte: O Autor (2023)

A tabela 15 apresenta a comparação dos resultados obtidos entre os dois métodos utilizados no projeto.

Tabela 15 - Comparação dos valores obtidos pelo cálculo analítico e o Método dos Elementos Finitos

| Estudo | Cálculo Analítico | MEF | Diferença |
|---|---|---|---|
| Análise de tensão – Caso de carga normal | 132,78 MPa | 140,34 MPa | 5,7 % |
| Análise de tensão – Caso de carga ocasional | 255,89 MPa | 250,34 MPa | 2,2 % |
| Análise de deslocamento | 3,01 mm | 3,43 mm | 14 % |

Fonte: O Autor (2023)

# 5 CONCLUSÃO

As comportas possuem um papel fundamental em estruturas para geração de energia, utilizadas tanto para controle de fluxo e reservatórios, quanto para a realização de manutenção em outros equipamentos. Dessa maneira é fundamental que esse equipamento seja devidamente dimensionado afim de proporcionar a segurança necessária para sua utilização.

Visto que a Norma Brasileira que regia o correto dimensionamento de comportas hidráulicas (NBR 8883) foi cancelada há algum tempo, fez-se necessário buscar alternativas a fim de realizar o correto dimensionamento. O cálculo analítico desenvolvido no trabalho provou-se correto e podendo ser utilizado de forma confiável para o caso das comportas ensecadeiras.

O estudo por meio do Método dos Elementos Finitos é uma alternativa útil para o dimensionamento, visto que com uma modelagem correta das condições de contorno, é possível aproximar-se significativamente das condições reais de utilização do mesmo. Porém quanto mais complexo e grande for o equipamento, mais tempo e disponibilidade de *hardware* será necessário, podendo inviabilizar a utilização do método.

O trabalho tinha como objetivo principal a realização da comparação entre dois métodos de dimensionamento, sendo eles o Cálculo Analítico e o Método dos Elementos Finitos, afim de observar se existem grandes discrepâncias e superdimensionamento. Com os resultados obtidos foi possível observar que ambos os métodos mostraram resultados muito próximos, podendo ser observado na Tabela 15, que no caso do cálculo das tensões, tanto no caso de carga normal quando no caso de ocasional, a diferença percentual foi de 5,7% e 2,2%, respectivamente. Já para o cálculo do deslocamento foi onde obteve-se a maior diferença percentual com um valor de 14%. Porém ambos os métodos ficando dentro dos critérios admissíveis.

Com isso pode-se concluir que ambos os métodos são válidos e podem ser utilizados para o correto dimensionamento, dependendo de o projetista escolher qual o método mais eficaz para o projeto em questão, com base na complexidade e dimensões do equipamento.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o estudo realizado ficou evidenciado que o emprego de Método dos Elementos Finitos pode ser utilizado de maneira importando no dimensionamento de equipamentos, porém quanto maior for o equipamento, maior vai ser a demanda de *hardware* para a realização desse estudo. Dessa maneira sugere-se a realização e comparação do estudo por meio de cascas, transformando o elemento de estudo em 2D e dessa maneira reduzindo o tempo de cálculo.

# REFERÊNCIAS


ABRAPCH, 2014. **O que são PCHs e CGHs.** Disponível em: https://abrapch.org.br/2014/03/o-que-sao-pchs-e-cghs/. Acesso em: 31 mai, 2023.

ABREU, André Luis de. **Comparativo entre método empírico e analítico por meio da aplicação da análise de elementos finitos em uma comporta hidráulica**. 2019. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

Brasil, 2013. **Hidrelétricas.** Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d0886b5c-f94c-4573-941b-febad5a990f3#:~:text=A%20Ag%C3%AAncia%20Nacional%20de%20Energia,com%20mais%20de%2030%20MW). Acesso em: 31 mai, 2023.

Brasil, 2023. **Brasil ultrapassa os 190 GW em capacidade de geração de energia elétrica.** Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/brasil-ultrapassa-os-190-gw-em-capacidade-de-geracao-de-energia-eletrica. Acesso em: 31 mai, 2023.

BUDYNAS, Richard; NISBETT, J K. **Elementos de máquinas de Shigley**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2016. *E-book.* ISBN 9788580555554. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555554/.

CARDOSO, Leonardo Rudolfo. **Introdução à análise estrutural via método dos elementos finitos**. 2021. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

ERBISTI, Paulo Cezar Ferreira. **Comportas hidráulicas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 394 p.

FARIA, Felipe Aguiar Marcondes de. **Metodologia de prospecção de pequenas centrais hidrelétricas** / F.A.M. de Faria. -- ed. rev. – São Paulo, 2011.120 p.

FILHO, Avelino A. **Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE**. [Digite o Local da Editora]: Editora Saraiva, 2009. *E-book.* ISBN 9788536519708. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519708/.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2009. *E-book.* ISBN 978-85-216-1941-3. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1941-3/.

MARTHA, L. F. (1994), "**Notas de aula do curso CIV 2118** – método dos elementos finitos", Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 48 p

Megawhat, 2023. **Usina hidrelétrica**. Disponível em: https://megawhat.energy/verbetes/418/usina-hidreletrica. Acesso em: 31 mai, 2023.

MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H.. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1997. 412 p.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2013. *E-book.* ISBN 9788582600238. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582600238/.

OLIVEIRA, Bruno Alexandre de. **Conhecendo os componentes de uma usina hidrelétrica** [livro eletrônico] / Bruno Alexandre Oliveira. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2017. 4Mb; e-Pub

SIMONE, Gilio A. **Centrais e Aproveitamentos Hidrelétricos** - Uma Introdução ao Estudo. [Digite o Local da Editora]: Editora Saraiva, 2009. E-book. ISBN 9788536519647. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519647/. Acesso em: 02 abr. 2023.

# ANEXO A – TABELA DE PERFIS ESTRUTURAIS

## Aplicações para Torres Eólicas

São aços destinados à fabricação de componentes de torres eólicas onshore e offshore. Possuem boa soldabilidade, tenacidade e resistência à fadiga.

Para atender às demandas específicas deste setor, a Gerdau possui diferentes soluções: utilização do processo de laminação de normalização para graus das classes até 50 kgf/mm²; utilização do processo de laminação termomecânico, com opção de resfriamento acerelado, para graus de aços de mais alta resistência.

| ESPECIFICAÇÃO | GRAU | COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em massa) (1) (2) (3) | | | | | | | PROPRIEDADES MECÂNICAS (1) (10) | | | | IMPACTO CHARPY (1) (11) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | Si | Mn | P | S | Outros | CEIIW (6) | L.E. (MPa) | L.R. (MPa) | Alongamento mín. (%) | | Temperatura (°C) | Energia Absorvida mín. (J) |
| | | | | | | | | | | | BM = 50 mm | BM = 5,65√So | | |
| ASTM A36 | | 0,29 (7) | 0,40 (7) | (7) | 0,04 | 0,05 | (5) | NE | 250 mín. | 400 - 550 | 50 (8) | NE | NE | NE |
| ASTM A572 | 42 T1, 2 e 3(4) | 0,21 | | 1,35 | | | | | 290 mín. | 415 mín. | 50 (8) | | | |
| | 50 T1, 2 e 3(4) | 0,23 | | | | | | | 345 mín. | 450 mín. | 50 (8) | | | |
| | 55 T1, 2 e 3(4) | 0,25 | | | | | | | 415 mín. | 485 mín. | 50 (8) | | | |
| | 60 T1, 2 e 3(4) | 0,23 | | 0,60 - 0,90 | 0,035 | 0,040 | | | 220 mín. | 520 mín. | 50 (8) | | | |
| | 65 T1, 2 e 3(4) | 0,25 | | 0,05 - 1,20 | | | | | 240 mín. | 550 mín. | 50 (8) | | | |
| EN 10025-2 | S235 JR | 0,17 (7) | NE | 1,40 | 0,030 | 0,036 | 0,36 (7) | | 235 mín. (7) | 360 - 510 (7) | NE | 26 (9) | 20 | 27 |
| | S235 J0 | | | | | 0,030 | | | | | | 22 (9) | 0 | |
| | S235 J2 | | | | 0,025 | 0,025 | | | | | | | -20 | |
| | S275 JR | 0,21 (7) | | 1,50 | 0,035 | 0,035 | 0,40 (7) | | 275 mín. (7) | 430 - 580 (7) | | 19 (9) | 20 | |
| | S275 J0 | 0,18 | | | 0,030 | 0,030 | | | | | | | 0 | |
| | S275 J2 | | | | 0,025 | 0,025 | | | | | | | -20 | |
| | S355 JR | 0,24 | 0,55 | 1,60 | 0,035 | 0,035 | | 0,45 (7) | 355 mín. (7) | 510 - 680 (7) | | 18 (9) | 20 | |
| | S355 J0 | 0,20 (7) | | | 0,030 | 0,030 | | | | | | | 0 | |
| | S355 J2 | | | | 0,025 | 0,025 | | | | | | | -20 | |
| | S355 K2 | | | | | | | | | | | | -20 | 40 |
| | S460 J0 | 0,20 (7) | | 1,70 | 0,030 | 0,030 | | 0,47 (7) | 460 mín. (7) | 550 - 720 (7) | | 17 (9) | 0 | 27 |
| EN 10025-4 | S275M | 0,15 | 0,55 | 1,50 | 0,030 | 0,025 | | 0,34 (7) | 275 mín. (7) | 370 - 530 (7) | | 24 (9) | -20 | 40 |
| | S275 ML | | | | 0,025 | 0,020 | | | | | | | -50 | 27 |
| | S355 M | 0,16 | | 1,70 | 0,030 | 0,025 | | 0,39 (7) | 355 mín. (7) | 470 - 630 (7) | | 22 (9) | -20 | 40 |
| | S355 ML | | | | 0,025 | 0,020 | | | | | | | -50 | 27 |
| | S420 M | 0,18 | | 1,80 | 0,030 | 0,025 | | 0,43 (7) | 420 mín. (7) | 520 - 680 (7) | | 19 (9) | -20 | 40 |
| | S420 ML | | | | 0,025 | 0,020 | | | | | | | -50 | 27 |
| | S460 M | | 0,60 | | 0,030 | 0,025 | | 0,45 (7) | 460 mín. (7) | 540 - 720 (7) | | 17 (9) | -20 | 40 |
| | S460 ML | | | | 0,025 | 0,020 | | | | | | | -50 | 27 |

(1) Requisitos citados apenas como referência, sem todo o detalhamento contido nas normas. Para mais detalhes, consultar nossa equipe de vendas.
(2) Teores máximos, exceto quando especificado de forma diferente.
(3) Elementos adicionados intencionalmente devem ser determinados e reportados.
(4) Tipo 1: Nb = 0,005-0,05%; Tipo 2: V = 0,01-0,15%; Tipo 3: Nb = 0,005-0,05%, V = 0,01-0,15% e V + Nb = 0,03-0,15%.
(5) Outros elementos, como Al, Nb, V, Ti, Cr, Ni, Mo, B, N, conforme detalhado na norma.
(6) CEIIW = C + Mn/6 + (Mo + Cr + V)/5 + (Ni + Cu)/15.
(7) Varia de acordo com a faixa de espessura. Para mais detalhes, consultar a norma.
(8) Norma também admite corpo de prova com 200 mm de base de medida. Para mais detalhes, consultar a norma aplicável.
(9) Norma também admite corpo de prova com 80 mm de base de medida. Para mais detalhes, consultar a norma aplicável.
(10) Ensaios em corpos de prova com comprimento transversal à direção principal de laminação.
(11) Ensaios em corpos de prova com comprimento longitudinal à direção principal de laminação.
NE = Não especificado.

## ANEXO B – TABELA DE PERFIS ESTRUTURAIS

# PERFIS ESTRUTURAIS GERDAU

- Laminados, nas formas I e H.
- Mesas paralelas que permitem melhores soluções de ligações, encaixes e acabamentos estruturais.
- Ampla variedade de bitolas, de 150 a 610 mm (6 a 24 polegadas).
- Permitem ganhos de escala aos fabricantes de estruturas.
- Uniformidade da composição química e das propriedades mecânicas.
- Material certificado com garantia de qualidade.
- Seguem rigorosamente as especificações das normas ABNT NBR 15980:2011 e ASTM A6/A6M.
- Disponíveis para pronta entrega em aço ASTM A 572 Grau 50, no comprimento padrão de 12 metros para todas as bitolas, ou de 6 metros, para as bitolas até 310 mm.

Informações adicionais: consulte o Atendimento Técnico da Gerdau, que está à sua disposição para ajudá-lo desde o desenvolvimento do projeto até a aplicação dos Perfis Estruturais Gerdau.

## CARACTERÍSTICAS E TOLERÂNCIAS

### PROPRIEDADES MECÂNICAS

| | ASTM A 572 Grau 50 | ASTM A 572 Grau 60* | ASTM A 992* |
|---|---|---|---|
| Limite de Escoamento (MPa) | 345 mín. | 415 mín. | 345 a 450 |
| Limite de Resistência (MPa) | 450 mín. | 520 mín. | 450 mín. |
| Alongamento após ruptura (%) | 18 mín. | 16 mín. | 18 mín. |

| | AÇO COR 500* | ASTM A 131 AH32* | ASTM A 131 AH36* |
|---|---|---|---|
| Limite de Escoamento (MPa) | 370 mín. | 315 mín. | 355 mín. |
| Limite de Resistência (MPa) | 500 mín. | 440 a 590 | 490 a 620 |
| Alongamento após ruptura (%) | 18 mín. | 19 mín. | 19 mín. |

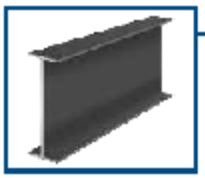
*Sob encomenda.
As especificações dos aços ASTM A 572 Grau 50 e AÇO COR 500, de acordo com a Norma NBR 7007:2011, são AR 350 e AR 350 COR, respectivamente.
Os aços ASTM A 131 AH32/AH36 garantem tenacidade de 34 J (longitudinal) para ensaio Charpy realizado a 0°C.

### NOTAS

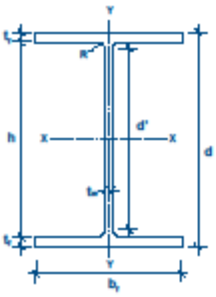
1) Materiais certificados para uso naval, produzidos sob encomenda.
2) Perfis destinados ao mercado europeu com selo CE Marking (S275JR e S355JR, em atendimento à norma EN 10025-2) e ao mercado argentino com selo IRAM INTI (F36 e F26, em atendimento à norma IRAM IAS U500-503). Produzidos sob encomenda.
3) Aço ASTM A 572 Grau 50 supera as solicitações do ASTM A 36.

## ANEXO B – TABELA DE PERFIS ESTRUTURAIS

# Tabela de Bitolas



Legenda




d - altura

d' - altura plana da al

h - altura interna ma

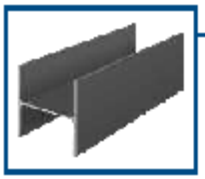
$b_f$ - largura da aba do

$t_f$ - espessura da aba perfil

$t_w$ - espessura da al ma

R - raio de concordâ ncl

a



| BITOLA mm x kg/m | Massa Linear kg/m | d mm | $b_f$ mm | ESPESSURA $t_w$ mm | ESPESSURA $t_f$ mm | h mm | d' mm | Área cm² | EIXO X - X $I_x$ cm⁴ | EIXO X - X $W_x$ cm³ | EIXO X - X $r_x$ cm | EIXO Y - Y $I_y$ cm⁴ | EIXO Y - Y $W_y$ cm³ | EIXO Y - Y $r_y$ cm | x m²/m | Bitola lo x lb/ft |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| W 150 x 13,0 | 13,0 | 148 | 100 | 4,3 | 4,9 | 138 | 118 | 16,6 | 635 | 85,8 | 6,18 | 82 | 16,4 | 2,22 | 0,67 | W 6x 8,5 |
| W 150 x 18,0 | 18,0 | 153 | 102 | 5,8 | 7,1 | 139 | 119 | 23,4 | 939 | 122,8 | 6,34 | 126 | 24,7 | 2,32 | 0,69 | W 6 x12 |
| W 150 x 22,5(H) | 22,5 | 152 | 152 | 5,8 | 6,6 | 139 | 119 | 29,0 | 1.229 | 161,7 | 6,51 | 387 | 50,9 | 3,65 | 0,68 | W 6 x15 |
| W 150 x 24,0 | 24,0 | 160 | 102 | 6,6 | 10,3 | 139 | 115 | 31,5 | 1.384 | 173,0 | 6,63 | 183 | 35,9 | 2,41 | 0,69 | W 6 x16 |
| W 150 x 29,8(H) | 29,8 | 157 | 153 | 6,6 | 9,3 | 139 | 119 | 38,5 | 1.739 | 221,5 | 6,72 | 556 | 72,6 | 3,80 | 0,90 | W 6 x20 |
| W 150 x 37,1(H) | 37,1 | 162 | 154 | 8,1 | 11,6 | 139 | 119 | 47,8 | 2.244 | 277,0 | 6,85 | 707 | 91,8 | 3,84 | 0,91 | W 6 x25 |
| W 200 x 15,0 | 15,0 | 200 | 100 | 4,3 | 5,2 | 190 | 170 | 19,4 | 1.305 | 130,5 | 8,20 | 87 | 17,4 | 2,12 | 0,77 | W 8 x10 |
| W 200 x 19,3 | 19,3 | 203 | 102 | 5,8 | 6,5 | 190 | 170 | 25,1 | 1.686 | 166,1 | 8,19 | 118 | 23,7 | 2,14 | 0,79 | W 8 x13 |
| W 200 x 22,5 | 22,5 | 206 | 102 | 6,2 | 8,0 | 190 | 170 | 29,0 | 2.029 | 197,0 | 8,37 | 142 | 27,9 | 2,22 | 0,79 | W 8 x15 |
| W 200 x 26,6 | 26,6 | 207 | 133 | 5,8 | 8,4 | 190 | 170 | 34,2 | 2.611 | 252,3 | 8,73 | 330 | 49,6 | 3,10 | 0,92 | W 8 x18 |
| W 200 x 31,3 | 31,3 | 210 | 134 | 6,4 | 10,2 | 190 | 170 | 40,3 | 3.169 | 301,7 | 8,86 | 410 | 61,2 | 3,19 | 0,93 | W 8 x21 |
| W 200 x 35,9(H) | 35,9 | 201 | 165 | 6,2 | 10,2 | 181 | 161 | 45,7 | 3.437 | 342,0 | 8,67 | 784 | 92,6 | 4,09 | 1,03 | W 8 x24 |
| W 200 x 41,7(H) | 41,7 | 205 | 166 | 7,2 | 11,8 | 181 | 157 | 53,5 | 4.114 | 401,4 | 8,77 | 901 | 108,5 | 4,10 | 1,04 | W 8 x28 |
| W 200 x 46,1(H) | 46,1 | 203 | 203 | 7,2 | 11,0 | 181 | 161 | 58,8 | 4.543 | 447,6 | 8,81 | 1.535 | 151,2 | 5,12 | 1,19 | W 8 x31 |
| W 200 x 52,0(H) | 52,0 | 206 | 204 | 7,9 | 12,6 | 181 | 157 | 66,9 | 5.296 | 514,4 | 8,90 | 1.784 | 174,9 | 5,16 | 1,19 | W 8 x35 |
| HP 200 x 53,0(H) | 53,0 | 204 | 207 | 11,3 | 11,3 | 181 | 161 | 68,1 | 4.977 | 488,0 | 8,55 | 1.673 | 161,7 | 4,96 | 1,20 | HP 8 x36 |
| W 200 x 59,0(H) | 59,0 | 210 | 205 | 9,1 | 14,2 | 182 | 158 | 76,0 | 6.140 | 584,8 | 8,99 | 2.041 | 199,1 | 5,18 | 1,20 | W 8 x40 |
| W 200 x 71,0(H) | 71,0 | 216 | 206 | 10,2 | 17,4 | 181 | 161 | 91,0 | 7.880 | 709,2 | 9,17 | 2.537 | 246,3 | 5,28 | 1,22 | W 8 x48 |
| W 200 x 86,0(H) | 86,0 | 222 | 209 | 13,0 | 20,6 | 181 | 157 | 110,9 | 9.496 | 855,7 | 9,26 | 3.139 | 300,4 | 5,32 | 1,23 | W 8 x58 |
| W 250 x 17,9 | 17,9 | 251 | 101 | 4,8 | 5,3 | 240 | 220 | 23,1 | 2.291 | 182,6 | 9,96 | 91 | 18,1 | 1,99 | 0,88 | W 10 x 12 |
| W 250 x 22,3 | 22,3 | 254 | 102 | 5,8 | 6,9 | 240 | 220 | 28,9 | 2.939 | 231,4 | 10,09 | 123 | 24,1 | 2,06 | 0,89 | W 10 x 15 |
| W 250 x 25,3 | 25,3 | 257 | 102 | 6,1 | 8,4 | 240 | 220 | 32,8 | 3.473 | 270,2 | 10,31 | 149 | 29,3 | 2,14 | 0,89 | W 10 x 17 |
| W 250 x 28,4 | 28,4 | 260 | 102 | 6,4 | 10,0 | 240 | 220 | 36,8 | 4.046 | 311,2 | 10,51 | 178 | 34,8 | 2,20 | 0,90 | W 10 x 19 |
| W 250 x 32,7 | 32,7 | 258 | 146 | 6,1 | 9,1 | 240 | 220 | 42,1 | 4.937 | 382,7 | 10,83 | 473 | 64,8 | 3,35 | 1,07 | W 10 x 22 |
| W 250 x 38,5 | 38,5 | 262 | 147 | 6,6 | 11,2 | 240 | 220 | 49,8 | 6.057 | 462,4 | 11,05 | 594 | 80,8 | 3,46 | 1,08 | W 10 x 26 |
| W 250 x 44,8 | 44,8 | 266 | 148 | 7,6 | 13,0 | 240 | 220 | 57,6 | 7.158 | 538,2 | 11,15 | 704 | 95,1 | 3,50 | 1,09 | W 10 x 30 |
| HP 250 x 62,0(H) | 62,0 | 246 | 256 | 10,5 | 10,7 | 225 | 201 | 79,6 | 6.729 | 709,6 | 10,47 | 2.995 | 234,0 | 6,13 | 1,47 | HP 10x 42 |
| W 250 x 73,0(H) | 73,0 | 253 | 254 | 8,6 | 14,2 | 225 | 201 | 92,7 | 11.257 | 889,9 | 11,02 | 3.880 | 305,5 | 6,47 | 1,48 | W 10 x 49 |
| W 250 x 80,0(H) | 80,0 | 256 | 255 | 9,4 | 15,6 | 225 | 201 | 101,9 | 12.550 | 980,5 | 11,10 | 4.313 | 338,3 | 6,51 | 1,49 | W 10 x 54 |
| HP 250 x 85,0(H) | 85,0 | 254 | 260 | 14,4 | 14,4 | 225 | 201 | 108,5 | 12.280 | 966,9 | 10,64 | 4.225 | 325,0 | 6,24 | 1,50 | HP 10x 57 |
| W 250 x 89,0(H) | 89,0 | 260 | 256 | 10,7 | 17,3 | 225 | 201 | 113,9 | 14.237 | 1.095,1 | 11,18 | 4.841 | 378,2 | 6,52 | 1,50 | W 10 x 60 |
| W 250 x101,0(H) | 101,0 | 264 | 257 | 11,9 | 19,6 | 225 | 201 | 128,7 | 16.352 | 1.238,8 | 11,27 | 5.549 | 431,8 | 6,57 | 1,51 | W 10 x 68 |
| W 250 x 115,0(H) | 115,0 | 269 | 259 | 13,5 | 22,1 | 225 | 201 | 146,1 | 18.920 | 1.406,7 | 11,36 | 6.405 | 494,6 | 6,62 | 1,53 | W 10 x 77 |
| W 310 x 21,0 | 21,0 | 303 | 101 | 5,1 | 5,7 | 292 | 272 | 27,2 | 3.776 | 249,2 | 11,77 | 90 | 19,5 | 1,90 | 0,98 | W 12 x 14 |
| W 310 x 23,8 | 23,8 | 305 | 101 | 5,6 | 6,7 | 292 | 272 | 30,7 | 4.346 | 285,0 | 11,89 | 116 | 22,9 | 1,94 | 0,99 | W 12 x 16 |
| W 310 x 28,3 | 28,3 | 309 | 102 | 6,0 | 8,9 | 291 | 271 | 36,5 | 5.500 | 356,0 | 12,26 | 158 | 31,0 | 2,08 | 1,00 | W 12 x 19 |
| W 310 x 32,7 | 32,7 | 313 | 102 | 6,6 | 10,8 | 291 | 271 | 42,1 | 6.570 | 419,8 | 12,49 | 192 | 37,6 | 2,13 | 1,00 | W 12 x 22 |
| W 310 x 38,7 | 38,7 | 310 | 165 | 5,8 | 9,7 | 291 | 271 | 49,7 | 8.581 | 553,6 | 13,14 | 727 | 88,1 | 3,82 | 1,25 | W 12 x 26 |
| W 310 x 44,5 | 44,5 | 313 | 166 | 6,6 | 11,2 | 291 | 271 | 57,2 | 9.997 | 638,8 | 13,22 | 855 | 103,0 | 3,87 | 1,26 | W 12 x 30 |
| W 310 x 52,0 | 52,0 | 317 | 167 | 7,6 | 13,2 | 291 | 271 | 67,0 | 11.909 | 751,4 | 13,33 | 1.026 | 122,9 | 3,91 | 1,27 | W 12 x 35 |
| HP 310 x 79,0(H) | 79,0 | 299 | 308 | 11,0 | 11,0 | 277 | 245 | 100,0 | 16.316 | 1.091,3 | 12,77 | 5.258 | 343,7 | 7,25 | 1,77 | HP 12x 53 |
| HP 310 x 93,0(H) | 93,0 | 303 | 308 | 13,1 | 13,1 | 277 | 245 | 119,2 | 19.682 | 1.299,1 | 12,85 | 6.367 | 414,7 | 7,32 | 1,78 | HP 12x 63 |
| W 310 x 97,0(H) | 97,0 | 308 | 305 | 9,9 | 15,4 | 277 | 245 | 123,6 | 22.284 | 1.447,0 | 13,43 | 7.266 | 477,8 | 7,68 | 1,79 | W 12 x 65 |
| W 310 x107,0(H) | 107,0 | 311 | 306 | 10,9 | 17,0 | 277 | 245 | 136,4 | 24.839 | 1.597,3 | 13,49 | 8.123 | 530,9 | 7,72 | 1,80 | W 12 x 72 |
| HP 310 x 110,0(H) | 110,0 | 308 | 310 | 15,4 | 15,5 | 277 | 245 | 141,0 | 23.703 | 1.539,1 | 12,97 | 7.707 | 497,3 | 7,39 | 1,80 | HP 12x 74 |
| W 310 x 117,0(H) | 117,0 | 314 | 307 | 11,9 | 18,7 | 277 | 245 | 149,9 | 27.563 | 1.755,8 | 13,56 | 9.034 | 587,9 | 7,78 | 1,80 | W 12 x 79 |
| HP 310 x 125,0(H) | 125,0 | 312 | 312 | 17,4 | 17,4 | 277 | 245 | 159,0 | 27.076 | 1.735,8 | 13,05 | 8.823 | 565,6 | 7,45 | 1,81 | HP 12x 84 |
| W 360 x 32,9 | 32,9 | 349 | 127 | 5,8 | 8,5 | 332 | 306 | 42,1 | 8.356 | 479,0 | 14,09 | 291 | 45,9 | 2,63 | 1,17 | W 14 x 22 |
| W 360 x 39,0 | 39,0 | 353 | 128 | 6,5 | 10,7 | 332 | 306 | 50,2 | 10.331 | 585,3 | 14,35 | 375 | 58,6 | 2,73 | 1,18 | W 14x26 |
| W 360 x 44,6 | 44,6 | 352 | 171 | 6,9 | 9,8 | 332 | 306 | 57,7 | 12.258 | 696,5 | 14,58 | 818 | 95,7 | 3,77 | 1,35 | W 14 x 30 |
| W 360 x 51,0 | 51,0 | 355 | 171 | 7,2 | 11,6 | 332 | 306 | 64,8 | 14.222 | 801,2 | 14,81 | 988 | 113,3 | 3,87 | 1,36 | W 14 x 34 |
| W 360 x 58,0 | 58,0 | 358 | 172 | 7,9 | 13,1 | 332 | 306 | 72,5 | 16.143 | 901,8 | 14,92 | 1.113 | 129,4 | 3,92 | 1,37 | W 14 x 38 |
| W 360 x 64,0 | 64,0 | 347 | 203 | 7,7 | 13,5 | 320 | 286 | 81,7 | 17.890 | 1.031,1 | 14,80 | 1.885 | 185,7 | 4,80 | 1,46 | W 14 x 43 |
| W 360 x 72,0 | 72,0 | 350 | 204 | 8,6 | 15,1 | 320 | 286 | 91,3 | 20.169 | 1.152,5 | 14,86 | 2.140 | 209,8 | 4,84 | 1,47 | W 14 x 48 |
| W 360 x 79,0 | 79,0 | 354 | 205 | 9,4 | 16,8 | 320 | 286 | 101,2 | 22.713 | 1.283,2 | 14,98 | 2.416 | 235,7 | 4,89 | 1,48 | W 14 x 53 |
| W 360 x 91,0(H) | 91,0 | 353 | 254 | 9,5 | 16,4 | 320 | 286 | 115,9 | 26.755 | 1.515,9 | 15,19 | 4.483 | 353,0 | 6,22 | 1,68 | W 14 x 61 |
| W 360 x101,0(H) | 101,0 | 357 | 255 | 10,5 | 18,3 | 320 | 286 | 129,5 | 30.279 | 1.696,3 | 15,29 | 5.063 | 397,1 | 6,25 | 1,68 | W 14 x 68 |
| W 360 x 110,0(H) | 110,0 | 360 | 256 | 11,4 | 19,9 | 320 | 286 | 140,6 | 33.155 | 1.841,9 | 15,36 | 5.570 | 435,2 | 6,29 | 1,69 | W 14 x 74 |
| W 360 x122,0(H) | 122,0 | 363 | 257 | 13,0 | 21,7 | 320 | 286 | 155,3 | 36.580 | 2.016,5 | 15,35 | 6.147 | 478,4 | 6,29 | 1,70 | W 14 x 82 |
| W 410 x 38,8 | 38,8 | 399 | 140 | 6,4 | 8,8 | 361 | 357 | 50,3 | 12.777 | 640,5 | 15,94 | 404 | 57,7 | 2,83 | 1,32 | W 16 x 26 |
| W 410 x 46,1 | 46,1 | 403 | 140 | 7,0 | 11,2 | 361 | 357 | 59,2 | 15.690 | 778,7 | 16,27 | 514 | 73,4 | 2,95 | 1,33 | W 16 x 31 |
| W 410 x 53,0 | 53,0 | 403 | 177 | 7,5 | 10,9 | 361 | 357 | 68,4 | 18.734 | 929,7 | 16,55 | 1.009 | 114,0 | 3,84 | 1,48 | W 16 x 36 |
| W 410 x 60,0 | 60,0 | 407 | 178 | 7,7 | 12,8 | 361 | 357 | 76,2 | 21.707 | 1.066,7 | 16,88 | 1.205 | 135,4 | 3,98 | 1,49 | W 16 x 40 |
| W 410 x 67,0 | 67,0 | 410 | 179 | 8,8 | 14,4 | 361 | 357 | 86,3 | 24.878 | 1.203,8 | 16,91 | 1.379 | 154,1 | 4,00 | 1,50 | W 16 x 45 |
| W 410 x 75,0 | 75,0 | 413 | 180 | 9,7 | 16,0 | 361 | 357 | 95,8 | 27.818 | 1.337,3 | 16,98 | 1.559 | 173,2 | 4,03 | 1,51 | W 16 x 50 |
| W 410 x 85,0 | 85,0 | 417 | 181 | 10,9 | 18,2 | 361 | 357 | 108,8 | 31.858 | 1.518,4 | 17,07 | 1.804 | 199,3 | 4,08 | 1,52 | W 16 x 57 |
| W 460 x 52,0 | 52,0 | 450 | 152 | 7,6 | 10,8 | 428 | 404 | 66,6 | 21.370 | 949,8 | 17,91 | 634 | 83,5 | 3,09 | 1,47 | W 18 x 35 |
| W 460 x 60,0 | 60,0 | 455 | 153 | 8,0 | 13,3 | 428 | 404 | 76,2 | 25.652 | 1.127,8 | 18,35 | 796 | 104,1 | 3,23 | 1,49 | W 18 x 40 |
| W 460 x 68,0 | 68,0 | 459 | 154 | 9,1 | 15,4 | 428 | 404 | 87,6 | 29.851 | 1.300,7 | 18,46 | 941 | 122,2 | 3,28 | 1,50 | W 18 x 46 |
| W 460 x 74,0 | 74,0 | 457 | 190 | 9,0 | 14,5 | 428 | 404 | 94,9 | 33.415 | 1.462,4 | 18,77 | 1.661 | 174,8 | 4,18 | 1,64 | W 18 x 50 |
| W 460 x 82,0 | 82,0 | 460 | 191 | 9,9 | 16,0 | 428 | 404 | 104,7 | 37.157 | 1.615,5 | 18,84 | 1.862 | 195,0 | 4,22 | 1,64 | W 18 x 55 |
| W 460 x 89,0 | 89,0 | 463 | 192 | 10,5 | 17,7 | 428 | 404 | 114,1 | 41.105 | 1.775,8 | 18,96 | 2.093 | 218,0 | 4,28 | 1,65 | W 18 x 60 |
| W 460 x 97,0 | 97,0 | 466 | 193 | 11,4 | 19,0 | 428 | 404 | 123,4 | 44.858 | 1.918,7 | 19,03 | 2.283 | 236,6 | 4,30 | 1,66 | W 18 x 65 |
| W 460 x 106,0 | 106,0 | 469 | 194 | 12,6 | 20,6 | 428 | 404 | 135,1 | 48.978 | 2.088,8 | 19,04 | 2.515 | 259,3 | 4,32 | 1,67 | W 18 x 71 |
| W 530 x 66,0 | 66,0 | 525 | 165 | 8,9 | 11,4 | 502 | 476 | 83,6 | 34.971 | 1.332,2 | 20,46 | 857 | 103,9 | 3,20 | 1,67 | W 21 x 44 |
| W 530 x 72,0 | 72,0 | 524 | 207 | 9,0 | 10,9 | 502 | 476 | 91,6 | 39.969 | 1.525,5 | 20,89 | 1.615 | 156,0 | 4,20 | 1,84 | W 21 x 48 |
| W 530 x 74,0 | 74,0 | 529 | 166 | 9,7 | 13,6 | 502 | 476 | 95,1 | 40.969 | 1.548,9 | 20,76 | 1.041 | 125,5 | 3,31 | 1,68 | W 21 x 50 |
| W 530 x 82,0 | 82,0 | 528 | 209 | 9,5 | 13,3 | 501 | 477 | 104,5 | 47.589 | 1.801,8 | 21,34 | 2.026 | 194,1 | 4,41 | 1,85 | W 21 x 55 |
| W 530 x 85,0 | 85,0 | 535 | 166 | 10,3 | 16,5 | 502 | 476 | 107,7 | 48.453 | 1.811,3 | 21,21 | 1.263 | 152,2 | 3,42 | 1,69 | W 21 x 57 |
| W 530 x 92,0 | 92,0 | 533 | 209 | 10,2 | 15,6 | 502 | 476 | 117,6 | 55.157 | 2.069,7 | 21,65 | 2.379 | 227,6 | 4,50 | 1,86 | W 21 x 62 |
| W 530 x 101,0 | 101,0 | 537 | 210 | 10,9 | 17,4 | 502 | 470 | 130,0 | 62.196 | 2.316,5 | 21,87 | 2.693 | 256,5 | 4,55 | 1,86 | W 21 x 68 |
| W 530 x 109,0 | 109,0 | 539 | 211 | 11,6 | 18,8 | 501 | 469 | 139,7 | 67.226 | 2.494,5 | 21,94 | 2.952 | 279,8 | 4,60 | 1,87 | W 21 x 73 |
| W 610 x 101,0 | 101,0 | 603 | 228 | 10,5 | 14,9 | 573 | 541 | 130,3 | 77.003 | 2.554,0 | 24,31 | 2.951 | 258,8 | 4,76 | 2,07 | W 24 x 68 |
| W 610 x 113,0 | 113,0 | 606 | 228 | 11,2 | 17,3 | 573 | 541 | 145,3 | 88.196 | 2.901,2 | 24,84 | 3.426 | 300,5 | 4,86 | 2,08 | W 24 x 76 |
| W 610 x 125,0 | 125,0 | 612 | 229 | 11,9 | 19,6 | 573 | 541 | 160,1 | 99.184 | 3.241,3 | 24,89 | 3.933 | 343,5 | 4,96 | 2,09 | W 24 x 84 |
| W 610 x 140,0 | 140,0 | 617 | 230 | 13,1 | 22,2 | 573 | 541 | 179,3 | 112.819 | 3.650,5 | 25,06 | 4.515 | 392,6 | 5,02 | 2,10 | W 24 x 94 |
| W 610 x 155,0 | 155,0 | 611 | 324 | 12,7 | 19,0 | 573 | 541 | 198,1 | 129.583 | 4.241,7 | 25,58 | 10.783 | 665,6 | 7,38 | 2,47 | W 24 x 104 |
| W 610 x 174,0 | 174,0 | 616 | 325 | 14,0 | 21,6 | 573 | 541 | 222,6 | 147.754 | 4.797,2 | 25,75 | 12.374 | 761,5 | 7,45 | 2,48 | W 24 x 117 |

GERDAU