



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DO ESCOAMENTO
EM CANAL ABERTO PARA O LABORATÓRIO DE ENGENHARIA MECÂNICA -
CAMPUS TUCURUÍ**

RAFAEL DE SOUSA ARAUJO

**TUCURUÍ – PA
2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DO ESCOAMENTO
EM CANAL ABERTO PARA O LABORATÓRIO DE ENGENHARIA MECÂNICA -
CAMPUS TUCURUÍ**

RAFAEL DE SOUSA ARAUJO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

**Orientador:
Prof. Dr. Francisco Jarmeson Silva Bandeira**

**TUCURUÍ – PA
2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

A658p Araujo, Rafael de Sousa.
PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O
ESTUDO DO ESCOAMENTO EM CANAL ABERTO PARA O
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CAMPUS
TUCURUÍ / Rafael de Sousa Araujo. — 2022.
XCVII, 97 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Francisco Jarmeson Silva Bandeira
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2022.

1. Análise estrutural. 2. Canal multifuncional. 3. Bancada
didática. I. Título.

CDD 620.100113



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DO ESCOAMENTO
EM CANAL ABERTO PARA O LABORATÓRIO DE ENGENHARIA MECÂNICA -
CAMPUS TUCURUÍ**

RAFAEL DE SOUSA ARAUJO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de
Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Francisco Jarmeson Silva Bandeira
FEM/CAMTUC/UFPA

Membro Interno: Prof. Msc. Maciel da Costa Furtado
FEM/CAMTUC/UFPA

Membro Interno: Prof. Msc. Walter dos Santos Sousa
FEM/CAMTUC/UFPA

Membro Externo: Eng. Msc. Arthur dos Reis Lemos Fontana
PRODERNA/UFPA

Conceito: Excelente

Tucuruí, 05 de Fevereiro de 2022.

A minha mãe Francisca Alves de Sousa Araújo e ao meu pai Lourival Araújo, por todo o suporte que mim deram durante toda a minha vida acadêmica, hoje estou tendo a oportunidade de mim formar, em virtude, do apoio recebido, só tenho a agradecer por tudo que fizeram e fazem por mim e também dedico esse trabalho ao amigo de curso João Everaldo Neto dos Santos Gonçalves (Coquinho) que infelizmente não está entre nós, tive o privilégio de conhece-lo e era uma excelente pessoa em todos os quesitos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que mim concedeu forças principalmente nos momentos no qual pensei que não iria conseguir, só tenho a agradecer por tudo.

Agradeço aos meus pais, Francisca Alves de Sousa Araújo e Lourival Araújo por todo o suporte que mim deram durante toda a minha vida acadêmica, hoje só estou tendo a oportunidade de se formar, em virtude, do apoio recebido.

Às minhas irmãs, Daniela Araújo e Elizângela Araújo, e minha sobrinha Eliza Manuela por seu apoio emocional.

A Universidade Federal do Pará e a todos os colaboradores do Campus de Tucuruí, pela oportunidade de estar mim formando em Engenharia Mecânica.

Aos professores que tive ao longo do curso de Engenharia Mecânica, em especial Bruno Lima, Adry Lima, Walter Sousa, Ezequiel Belo, Ronaldo Moura, Danilo Santos, Douglas Garcias, Maciel Furtado, Walber Nascimento, Leopoldo Bastos, Jessé Padilha, Paulo Machado, Paulo Junior, Francisco Jarmeson Bandeira, Artur Silva.

Á meu orientador, Francisco Jarmeson Silva Bandeira, por todo o suporte que mim deu ao longo da elaboração do trabalho, que não mediu esforços todas as vezes que precisei de ajuda e independente do dia sempre se mostrou disposto a tirar todas as minhas dúvidas que tive (não foram poucas), obrigado por tudo professor Jarmeson.

Ao meu grupo de estudo, Eduardo Silva, Elias Pimentel, Geremias Coelho, Rickson Santos, Luana Pontes e Reneilson Teixeira, agradeço a Deus que mim permitiu conviver com pessoas maravilhosas.

Aos pais do Geremias Coelho, Seu Maurício e Dona Maria, que sempre mim receberam bem na sua residência nas inúmeras vezes na qual fui estudar com o Geremias.

Aos meus colegas de curso Elisson Muniz e Reneilson Teixeira que mim ajudaram na elaboração do desenho da bancada, obrigado por tudo e precisando de minha ajuda estarei à disposição.

Aos meus colegas de graduação, só tenho a agradecer e dizer que foi um privilégio conviver com cada um, tenho a certeza que a Universidade Federal do Pará (UFPA) está formando excelente profissionais.

As empresas desenvolvedoras dos softwares Ansys e Ftool.

“Não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista”

(Bill Gates)

PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DO ESCOAMENTO EM CANAL ABERTO PARA O LABORATÓRIO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CAMPUS TUCURUÍ

RESUMO

O presente trabalho tem o propósito de desenvolver o projeto estrutural de uma bancada didática de um canal d'água multifuncional para o Laboratório de Engenharia Mecânica (LABMEC), campus Tucuruí, com o objetivo de utilizá-la em disciplinas e em pesquisas na área de mecânica dos fluídos, além disso, avaliar a resistência da mesma, por meio do método analítico e numérico. Foram realizados cálculos analíticos para determinar volume, as forças exercidas pela água e a carga gerada pelo vidro, as tensões de flexão e cisalhamento, além do fator de segurança. Para o método numérico é realizado uma análise estrutural da estrutura metálica com o vidro e sem o vidro, por meio de um software de elementos finitos. Após realizar os cálculos e a simulação numérica, estes métodos utilizados corroboraram para que a bancada fosse considerada segura.

Palavras-chave: *Análise estrutural, canal multifuncional, Bancada didática.*

PROJECT OF A TEACHING BENCH FOR THE STUDY OF OPEN CHANNEL FLOW FOR THE MECHANICAL ENGINEERING LABORATORY - CAMPUS TUCURUÍ

ABSTRACT

The present work has the purpose of developing the structural design of a didactic bench of a multifunctional water channel for the Mechanical Engineering Laboratory (LABMEC), Tucuruí campus, with the objective of using it in disciplines and in research in the area of mechanics of fluids, in addition, to evaluate its resistance, through the analytical and numerical method. Analytical calculations were performed to determine volume, the forces exerted by the water and the load generated by the glass, the bending and shear stresses, in addition to the safety factor. For the numerical method, a structural analysis of the metallic structure with and without glass is performed using a finite element software. After performing the calculations and numerical simulation, these methods used corroborated for the bench to be considered safe.

Keywords: *Structural analysis, multifunctional channel, Didactic bench.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aqueduto Pont du Gard	22
Figura 2 - Ilustração do aparato experimental de Reynolds	23
Figura 3 – Exemplo de canal aberto: Rio Amazonas	26
Figura 4 - Contornos típicos de velocidade igual em seções de canal aberto	27
Figura 5 - Propriedades geométricas de formas comuns de canais abertos	28
Figura 6 - Bancada didática para estudo do escoamento em canal aberto	29
Figura 7 - Perfil estrutural I	31
Figura 8 -Divisão do canal total	32
Figura 9 - Bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto	33
Figura 10 - Distribuição das pressões verticais e laterais no canal	33
Figura 11 - Distribuição das vigas ao longo do canal de escoamento.....	34
Figura 12 – Volume de um paralelepípedo	34
Figura 13 – Vidro da base do canal principal submetido a um carregamento retangular	36
Figura 14 - Diagrama simplificado do sistema principal e sistema virtual	37
Figura 15 - Diagrama simplificado do vidro lateral do canal principal.....	38
Figura 16 - Termos utilizados na Equação (3.8)	39
Figura 17 - Diagrama simplificado do vidro da base dos Reservatórios 1 e 2	39
Figura 18 - Distribuição da pressão ao longo do vidro do fundo do canal principal.....	43
Figura 19 - Sistema principal (caso 0) e Sistema virtual (caso 1).....	43
Figura 20 - Diagrama de corpo livre do vidro de base após a determinação da reação no ponto C	44
Figura 21 - Diagrama da força cortante (a) e momento fletor (b) do vidro da base do canal principal.....	44
Figura 22 - Diagrama de corpo livre com a carga concentrada no vidro lateral do canal principal	46
Figura 23 - Diagrama da força cortante (a), momento fletor (b) do vidro lateral do canal principal.....	47
Figura 24 - Distribuição de pressão no vidro de base dos reservatórios 1 e 2.....	50
Figura 25 - Diagrama simplificado do vidro da base dos reservatórios 1 e 2	50
Figura 26 - Diagrama da força cortante (a), momento fletor (b) do vidro da base dos reservatórios 1 e 2.....	51

Figura 27 - Diagrama de corpo livre do vidro lateral dos reservatórios (1 e 2)	53
Figura 28 - Diagrama da força cortante (a) e momento fletor (b) do vidro lateral dos reservatórios 1 e 2.....	53
Figura 29 - Diagrama de corpo livre do vidro frontal dos reservatórios (1 e 2).....	54
Figura 30 - Diagrama da força cortante (a) e momento fletor (b) do vidro frontal dos reservatórios 1 e 2.....	54
Figura 31 - Quatro níveis de abstração referentes a uma estrutura na análise estrutural	60
Figura 32 - Corte transversal da estrutura (real) de um galpão e seu modelo estrutural	61
Figura 33 - Superposição de soluções básicas no método das forças.....	62
Figura 34 - Discretização pelo método dos elementos finitos de uma estrutura contínua	63
Figura 35 - (a) Tensão tridimensional geral. (b) Tensão plana componentes de cisalhamento transversal de igual magnitude	65
Figura 36 - Deformação de um corpo quando aplica - se uma tensão superior a tensão de escoamento do material	66
Figura 37 - Nós e elementos presentes em uma malha.....	67
Figura 38 - (a) Estrutura metálica sem o vidro, (b) Estrutura metálica com o vidro.....	68
Figura 39 - Domínio discreto pelo método de elementos finitos da estrutura metálica sem o vidro.....	69
Figura 40 - Ampliação da malha na estrutura metálica sem o vidro	70
Figura 41 - Apoio restritivo e as cargas aplicadas na estrutura metálica sem o vidro.....	71
Figura 42 - Deformação total na estrutura metálica sem o vidro	72
Figura 43 - Tensão equivalente (Von Mises) ao longo da estrutura metálica sem o vidro	73
Figura 44 - Geração da malha da estrutura metálica com o vidro.....	74
Figura 45 - Ampliação da malha na estrutura metálica com o vidro.....	75
Figura 46 - Apoio restritivo e as cargas aplicadas na estrutura metálica com o vidro	75
Figura 47 - Deformação total ao longo da estrutura metálica com o vidro	76
Figura 48 - Tensão de Von Mises ao longo da estrutura metálica com o vidro	77
Figura 49 - Ponto onde a tensão de Von Mises é máxima	77
Figura 50 - Ilustração do sistema hidrocínético utilizada na bancada.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas do vidro	30
Tabela 2 - Resistência mecânica do vidro	31
Tabela 3 - Dimensões da seção de escoamento	32
Tabela 4 - Valores utilizados no cálculo do volume do canal principal.....	42
Tabela 5 - Valores utilizados no cálculo da força exercida pela água no vidro base do canal principal.....	42
Tabela 6 - Valores utilizados no cálculo da força peso do vidro base do canal principal.....	42
Tabela 7 - Valores utilizados no cálculo da tensão de flexão máxima do vidro da base do canal principal.....	45
Tabela 8 - Valores utilizados no cálculo da tensão de cisalhamento máximo do vidro base do canal principal.....	45
Tabela 9 - Valores utilizados na Equação (3.8).....	46
Tabela 10 - Valores utilizados na Equação (3.9).....	48
Tabela 11 - Valores utilizados na Equação (3.10).....	48
Tabela 12 - Valores utilizados na determinação do volume do reservatório.....	49
Tabela 13 - Valores utilizados na determinação da força exercida pela água no vidro da base do reservatório	49
Tabela 14 - Valores utilizados no cálculo da força peso no vidro da base do reservatório.....	49
Tabela 15 - Valores utilizados no cálculo da tensão de flexão do vidro da base dos reservatórios	51
Tabela 16 - Valores usados no cálculo da tensão de cisalhamento para o vidro da base dos reservatórios.....	51
Tabela 17 - Valores utilizados na equação (3.8) para o vidro lateral dos reservatórios (1 e 2)	52
Tabela 18 - Valores utilizados na equação (3.8) para o vidro frontal dos reservatórios (1 e 2)	52
Tabela 19 - Valores utilizados no cálculo da tensão de flexão para o vidro lateral dos reservatórios 1 e 2.....	55
Tabela 20 - Valores utilizados no cálculo da tensão de flexão para o vidro frontal dos reservatórios 1 e 2.....	55
Tabela 21 - Valores utilizados no cálculo da tensão de cisalhamento para o vidro lateral dos reservatórios.....	55

Tabela 22 - Valores utilizados no cálculo da tensão de cisalhamento para o vidro frontal dos reservatórios.....	55
Tabela 23 - Bomba d'água de potência 1,5Cv	59
Tabela 24 - Apoio e a carga aplicados na estrutura metálica	70
Tabela 25 - Propriedades do vidro utilizadas no software Workbench (Ansys)	74

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ANSYS	Empresa de <i>software</i> de simulação numérica
CAD	<i>Computer-aided-designer</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
FTOOL	<i>Two-dimensional Frame Analysis Tool</i>
LABMEC	Laboratório de Engenharia Mecânica
MEF	Método de Elementos Finitos
UFPA	Universidade Federal do Pará

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
\int	Integral
V_{canal}	Volume do canal
a	Altura do canal de escoamento
b	Base do canal de escoamento
c	Comprimento do canal de escoamento
P_{H_2O}	Pressão da coluna d'água
P_{atm}	Pressão atmosférica
ρ_{H_2O}	Massa específica da água
g	Aceleração da gravidade
h_{H_2O}	Altura da coluna de água
F_{H_2O}	Força exercida pela água
A	Area que suporta a coluna de água
FS	Fator de segurança
σ_{rup}	Tensão de ruptura do material
σ_{adm}	Tensão admissível do material
F_{vidro}	Força peso referente ao vidro
$F_{lateral}$	Força lateral
$F_{frontal}$	Força frontal
m_{vidro}	Massa do vidro
V_{vidro}	Volume do vidro
ρ_{vidro}	Massa específica do vidro
δ_{10}	Deslocamento do caso 0 com o caso 1
δ_{11}	Deslocamento do caso 1 com caso 1
R_B	Reação no ponto B
M	Momento do caso 0
\bar{M}	Momento do caso 1
L_1	Comprimento da viga no trecho A-B

L_2	Comprimento da viga no trecho B-C
E	Módulo de elasticidade
I	Momento de Inércia de área
ω	Carga distribuída
$M_{Máx}$	Momento fletor máximo
M_F	Momento fletor
$\sigma_{Máx}$	Tensão de flexão máxima
c_e	Distância perpendicular do eixo neutro a um ponto mais afastado do eixo neutro
τ	Tensão de cisalhamento
$\tau_{máx}$	Tensão de cisalhamento máximo
V	Força de cisalhamento interno resultante
$V_{Máx}$	Força de cisalhamento máximo
t	Largura da área da seção transversal do elemento
Q	Momento estático da área A' em relação à linha neutra (LN)
$V_{canal_principal}$	Volume do canal principal
$V_{reservatório1,2}$	Volume dos reservatórios 1 e 2
Re	Número de Reynolds
v_m	Velocidade média do fluido
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
m	Massa do fluido
V	Volume do fluido
R_H	Raio hidráulico
A_m	Área molhada
P_m	Perímetro molhado
B	Comprimento da base
H	Profundidade do escoamento
Q	Vazão do fluido
V_{fluido}	Velocidade do fluido
A_{esc}	Área de escoamento

σ'	Tensão equivalente de Von Mises
σ_1	Tensão máxima
σ_2	Tensão mínima
σ_x	Tensão normal que age no eixo x
σ_y	Tensão normal que age no eixo y
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento que age no plano xy
R_{ii}	Reação no ponto desejado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	22
1.2 OBJETIVOS	24
1.2.1 Objetivo Geral	24
1.2.2 Objetivo Específico	24
1.3 JUSTIFICATIVA	24
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 ESCOAMENTO EM CANAL ABERTO	26
2.1.1 Geometria do canal	27
2.2 BANCADA DIDÁTICA	28
2.2.1 Aplicações da bancada de escoamento em canal aberto	29
2.2.2 Estrutura do canal	30
2.2.2.1 <i>Estrutura de vidro</i>	30
2.2.2.2 <i>Estrutura metálica</i>	31
3. ESPECIFICAÇÃO DA GEOMETRIA E DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS	32
3.1 DESENHO CAD	32
3.1.1 Divisão do canal de escoamento	32
3.1.2 Especificação da seção de escoamento	32
3.1.3 Geometria da bancada didática	32
3.2 PARÂMETROS DA REGIÃO DE ESCOAMENTO.....	33
3.2.1 Pressões atuantes na seção de escoamento	33
3.2.2 Distribuições das vigas ao longo do canal de escoamento	34
3.2.3 Termos utilizados na determinação do volume	34
3.3 FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA.....	34
3.3.1 Volume	35
3.3.2 Força exercida pela água	35
3.3.3 Força peso do vidro	35
3.3.4 Reações de apoio	36
3.3.4.1 <i>Canal principal</i>	36
3.3.4.1.1 <i>Vidro da base do canal</i>	36

3.3.4.1.2 Vidro lateral.....	38
3.3.4.2 <i>Reservatórios</i>	39
3.3.4.2.1 Vidro da base dos reservatórios 1 e 2.....	39
3.3.4.2.2 Vidros laterais e frontais.....	40
3.3.5 Tensão de flexão	40
3.3.6 Tensão de cisalhamento	40
3.3.7 Fator de segurança	41
3.4 MEMORIAL DE CÁLCULO.....	41
3.4.1 Canal principal	41
3.4.1.1 <i>Volume</i>	42
3.4.1.2 <i>Vidro da base do canal principal</i>	42
3.4.1.2.1 Força exercida pela água.....	42
3.4.1.2.2 Força peso do vidro.....	42
3.4.1.2.3 Reações de apoio.....	42
3.4.1.2.4 Tensão de flexão.....	45
3.4.1.2.5 Tensão de cisalhamento.....	45
3.4.1.2.6 Fator de segurança.....	45
3.4.1.3 <i>Vidro lateral do canal principal</i>	46
3.4.1.3.1 Força exercida pela água.....	46
3.4.1.3.2 Reações de apoio.....	46
3.4.1.3.3 Tensão de flexão.....	48
3.4.1.3.4 Tensão de cisalhamento.....	48
3.4.1.3.5 Fator de segurança.....	48
3.4.2 Reservatórios	48
3.4.2.1 <i>Volume</i>	49
3.4.2.2 <i>Vidro da base do reservatório</i>	49
3.4.2.2.1 Força exercida pela água.....	49
3.4.2.2.2 Força peso do vidro.....	49
3.4.2.2.3 Reações de apoio.....	49
3.4.2.2.4 Tensão de flexão.....	51
3.4.2.2.5 Tensão de cisalhamento.....	51
3.4.2.2.6 Fator de segurança.....	51
3.4.2.3 <i>Vidro lateral e Vidro frontal</i>	52

3.4.2.3.1 Força exercida pela água	52
3.4.2.3.2 Reações de apoio	52
3.4.2.3.3 Tensão de flexão	55
3.4.2.3.4 Tensão de cisalhamento	55
3.4.2.3.5 Fator de segurança	55
3.5 COMPONENTES DA BANCADA	56
3.5.1 Seleção da bomba d'água	56
<i>3.5.1.1 Referência teórica</i>	<i>56</i>
3.5.1.1.1 Número de Reynolds	56
3.5.1.1.2 Vazão	57
<i>3.5.1.2 Memorial de cálculo</i>	<i>57</i>
3.5.1.2.1 Número de Reynolds	57
3.5.1.2.2 Vazão	58
4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	60
4.1 FUNDAMENTAÇÃO DA ANÁLISE ESTRUTURAL	60
4.1.1 Modelo estrutural	61
4.1.2 Modelo discreto	62
4.1.3 Modelo computacional	64
4.2 TENSÕES PRINCIPAIS	64
4.3 TENSÕES DE VON MISES	65
4.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	67
4.4.1 Etapas do método	68
4.5 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL	68
4.5.1 Estrutura metálica sem o vidro	69
<i>4.5.1.1 Geração da malha</i>	<i>69</i>
<i>4.5.1.2 Condições de contorno</i>	<i>70</i>
<i>4.5.1.3 Solução da simulação</i>	<i>71</i>
<i>4.5.1.4 Resultados e discussões</i>	<i>71</i>
4.5.1.4.1 Deformação total	72
4.5.1.4.2 Tensão equivalente (Von Mises)	73
4.5.2 Estrutura metálica com o vidro	73
<i>4.5.2.1 Material</i>	<i>73</i>
<i>4.5.2.2 Geração da malha</i>	<i>74</i>

4.5.2.3 <i>Condição de contorno</i>	75
4.5.2.4 <i>Solução da simulação</i>	75
4.5.2.5 <i>Resultados e discussões</i>	76
4.5.2.5.1 Deformação total	76
4.5.2.5.2 Tensão equivalente (Von Mises)	76
5. CONCLUSÃO	79
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A – Detalhamento do dimensionamento	84
APÊNDICE B – Desenho técnico da bancada hidráulica	97

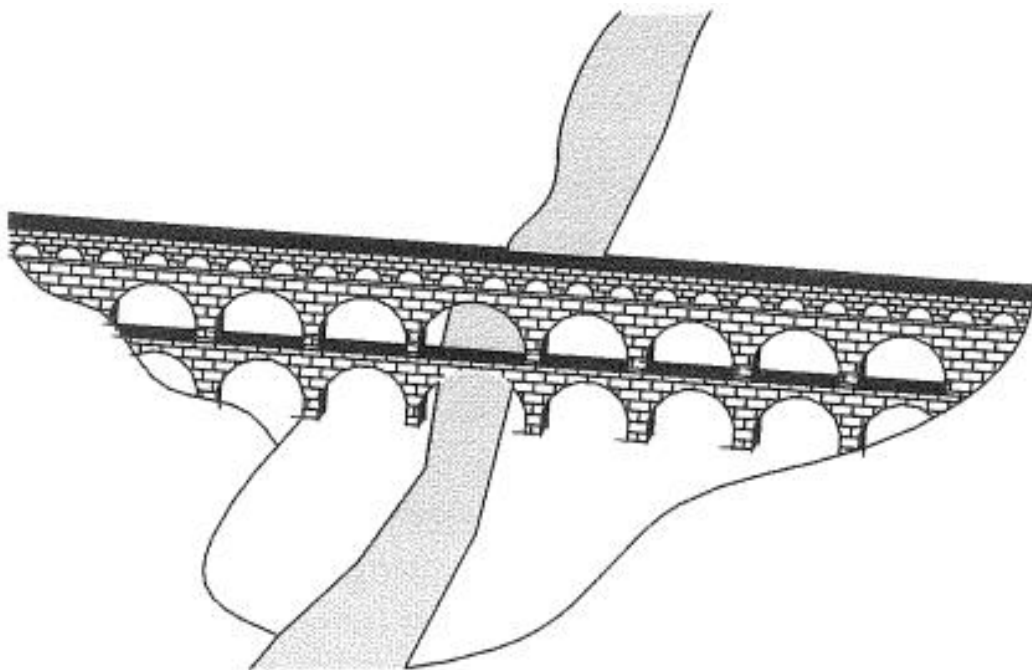
1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A hidráulica esteve presente ao longo de praticamente toda a história da humanidade em função da extrema importância da água para a vida humana, no entanto, a água distribuiu-se de forma irregular, dessa maneira, era preciso transportá-la do local onde estava disponível para o local desejado. Assim, tendo em vista a necessidade da água, a história da hidráulica remonta ao início das primeiras sociedades urbanas organizadas, quando foi imprescindível a compatibilização da sua oferta e demanda. (Baptista e Coelho, 2014)

A implantação dos primeiros artefatos e obras de condução de água, que estão na base do que se conhece hoje como a “Engenharia Hidráulica”, são datados de 4.000 a 3.000 a.C. no Egito, Iraque, Índia, Paquistão, Turquia e China. Um dos vestígios conhecidos mais antigos de obras hidráulicas consiste de complexos sistemas de canais de irrigação e de navegação, construídos pelos Sumérios, na Mesopotâmia. Estes canais constituíram o marco fundamental da civilização e também da engenharia hidráulica. (Baptista e Coelho, 2014). Um exemplo de uma obra hidráulica antiga é a ilustrada na figura (1) que representa o famoso aqueduto *Pont dy Gard*, situado no sul da França.

Figura 1 - Aqueduto Pont du Gard

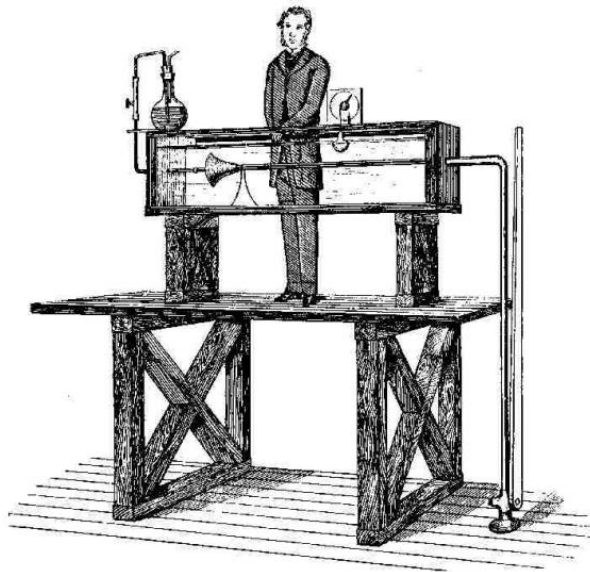


Fonte: BAPTISTA, M. LARA, M. (2014)

Uns dos primeiros pesquisadores datado na história a estudar sobre hidráulica foi Arquimedes (287 a.C. – 212 a.C.), que introduziu o conceito de empuxo. Diversos pesquisadores, tais como: Leonardo da Vinci, Evangelista Torricelli, Daniel Bernoulli, Leonardo Euler, Antoine Chezy, Louis Marie Henri Navier, Henri Philibert Gaspard Darcy, Ludwig Julius Weisbach, William Froude, Robert Manning, George Gabriel Stokes, Osborne Reynolds, Joseph Boussinesq, Boris Bakhmettef entre outros, tiveram grandes contribuições no campo dos fenômenos hidráulicos, sendo suas teorias referências até hoje na área. (Baptista e Coelho, 2014)

Osborne Reynolds realizou em 1883 um experimento que o consagrou como um pioneiro na moderna mecânica dos fluidos. Basicamente, foi introduzido, dentro de um tubo transparente contendo água em movimento, uma fina corrente de um corante com peso específico igual ao da água e observou o escoamento do fluido, e a partir disto ele classificou o fluxo em laminar ou turbulento. A figura (2) representa o aparato de Reynolds.

Figura 2 - Ilustração do aparato experimental de Reynolds



Fonte: http://meusite.mackenzie.com.br/eangelo/Exp_Reynolds.pdf

Logo, foi através de uma bancada que Reynolds observou o comportamento do fluido. Dessa maneira, é notório a importância das bancadas no fomento à pesquisa, além da possibilidade de se obter novas descobertas.

Compreender os fenômenos hidráulicos é de fundamental importância na construção do conhecimento, e é através do laboratório que o aluno pode assimilar o que é visto na teoria, com experiências práticas, logo, a teoria se transforma em algo palpável aos olhos do estudante.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar o projeto de uma bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto.

1.2.2 Objetivo Específico

- Gerar o desenho da bancada utilizando um software de CAD (computer-aided-designer).
- Realizar análise estrutural da bancada, da estrutura metálica sem o vidro e, posteriormente, com o vidro, utilizando um software de elementos finitos.
- Elaborar procedimento (ou memorial de cálculo) para auxiliar os projetos de canais d'água, bancada entre outros.

1.3 JUSTIFICATIVA

No ensino da grande maioria dos cursos de graduação, a base do conhecimento está na transmissão dos temas através dos fatos, descrição dos fenômenos e enunciados de teorias. Na área de engenharia, a teoria abordada em todas as disciplinas possui imensurável importância na construção do conhecimento do discente como futuro profissional.

As bancadas didáticas são de extrema importância para formação de profissionais, porque conseguem elevar o nível de aprendizado, contudo o seu elevado custo comercial muitas vezes acaba inviabilizando sua aquisição, todavia, quando é projetada pelos próprios discentes seu preço torna-se atrativo. E a partir do momento da sua disponibilização no laboratório é possível utilizá-la em pesquisas e até mesmo em pós graduação.

A falta de infraestrutura laboratorial nos cursos de engenharia acaba limitando o estudo prático das disciplinas, dessa maneira, limitando muitas vezes a compreensão do conteúdo e de suas reais aplicações. O discente que desenvolve soluções em situações práticas na universidade se encontrará apto a solucionar problemas quando estiver atuando na área.

Em virtude, do laboratório de engenharia mecânica (LABMEC), Campus Tucuruí, atualmente não dispor em funcionamento de uma bancada na área da hidráulica e visto que a aprendizagem na prática favorece o aproveitamento dos alunos nas disciplinas, é realizado o projeto de uma bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em capítulos, da forma mostrada abaixo:

- *Seção 1:* Fornece uma introdução acerca do estudo da hidráulica, os objetivos gerais e específicos referente ao projeto da bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto, além da justificativa do projeto da bancada.
- *Seção 2* – É fornecido um aparato geral acerca do escoamento em canal aberto, os formatos existentes da seção de escoamento do fluido, além de uma introdução sobre a importância das bancadas didática no aprendizado, o modelo existente no mercado de bancada de escoamento em canal aberto e suas aplicações e também uma abordagem referente a estrutura do canal.
- *Seção 3* – Mostra o detalhamento do desenho da bancada didática de escoamento em canal aberto; a fundamentação matemática das equações a serem utilizadas nos cálculos para o canal principal, reservatório 1 e reservatório 2; além do memorial de cálculo referente aos vidros do canal principal, reservatórios 1 e 2 e os componentes da bancada didática.
- *Seção 4* – Neste capítulo é apresentado uma abordagem geral acerca da análise estrutural; os conceitos referente as tensões principais e tensão de Von Mises; a teoria de elementos finitos; simulação da estrutura metálica sem o vidro e estrutura metálica com o vidro.
- *Seção 5* – Consta as considerações finais referente a bancada didática para o estudo do escoamento aberto e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESCOAMENTO EM CANAL ABERTO

O escoamento livre ou escoamento em canais abertos, é caracterizado pela presença de uma superfície livre, ou seja, está sujeita a pressão atmosférica. (Baptista e Coelho, 2014). O escoamento em tubos é induzido por uma diferença de pressão, enquanto que o escoamento em um canal aberto a força de acionamento é a gravidade.

Segundo Çengel e Cimbala (2007) a maioria dos escoamentos naturais encontrados, como o da água em córregos, rios e enchentes, bem como a drenagem da água da chuva nas estradas, estacionamentos e telhados, são em canal aberto. Na figura (3) é mostrado um exemplo de escoamento em canal aberto.

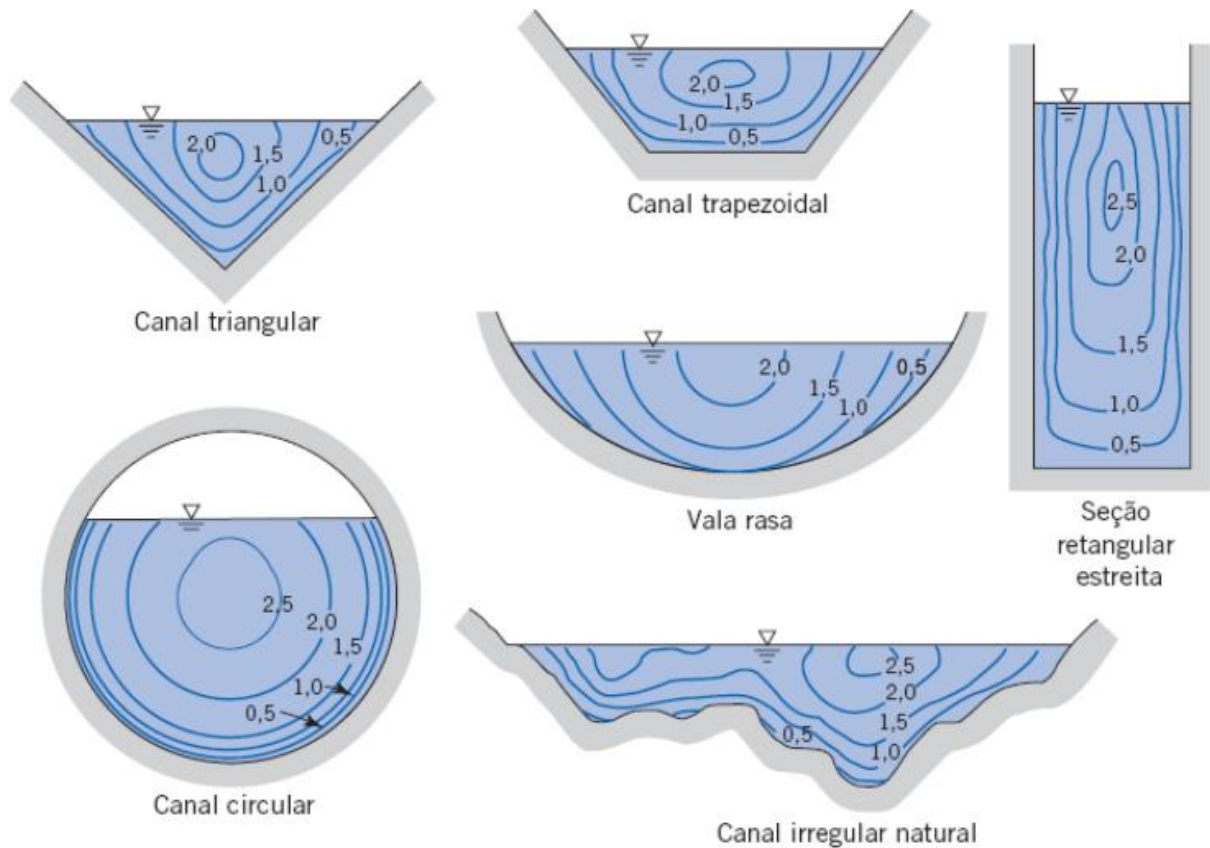
Figura 3 – Exemplo de canal aberto: Rio Amazonas



Fonte: CERQUEIRA, W. (2021).

Em um canal aberto, a velocidade de escoamento é zero nas superfícies sólidas por causa da condição de não-escorregamento, e máxima no plano médio da superfície livre, em virtude, que na superfície a água entra em contato apenas com o ar, que possui viscosidade muito inferior se comparado ao fluido líquido. (Çengel e Cimbala, 2007). Os contornos típicos de perfis reais de velocidades para uma série de seções em canais aberto são mostrados na figura (4).

Figura 4 - Contornos típicos de velocidade igual em seções de canal aberto



Fonte: FOX *et al.*, (2004)

Os escoamentos em canal aberto também são classificados como permanentes ou não-permanentes. O critério que diz se o escoamento é permanente ou não-permanente em canal aberto é a profundidade do escoamento (ou alternativamente, a velocidade média) que pode variar ao longo do canal. O escoamento é dito permanente se a profundidade não variar com o tempo em nenhuma posição ao longo do canal (embora ela possa variar de um local para outro) e caso contrário, é dito como escoamento não-permanente. (Çengel e Cimbala, 2007)

Outra classificação também pode ser observada no que tange o regime de escoamento, podendo ser uniforme ou variado. (Çengel e Cimbala, 2007)

2.1.1 Geometria do canal

De acordo com Fox *et al* (2004), os canais podem ser construídos em diversas formas de seção transversal. Os canais alinhados geralmente são construídos com seções retangulares ou trapezoidais; depressões ou valas menores algumas vezes são triangulares; galerias e túneis geralmente possuem seções circulares ou elípticas, enquanto que os canais naturais são

altamente irregulares e não prismáticos (seção transversal não é constante). As propriedades geométricas de formas comuns de canais abertos estão resumidas na figura (5).

Figura 5 - Propriedades geométricas de formas comuns de canais abertos

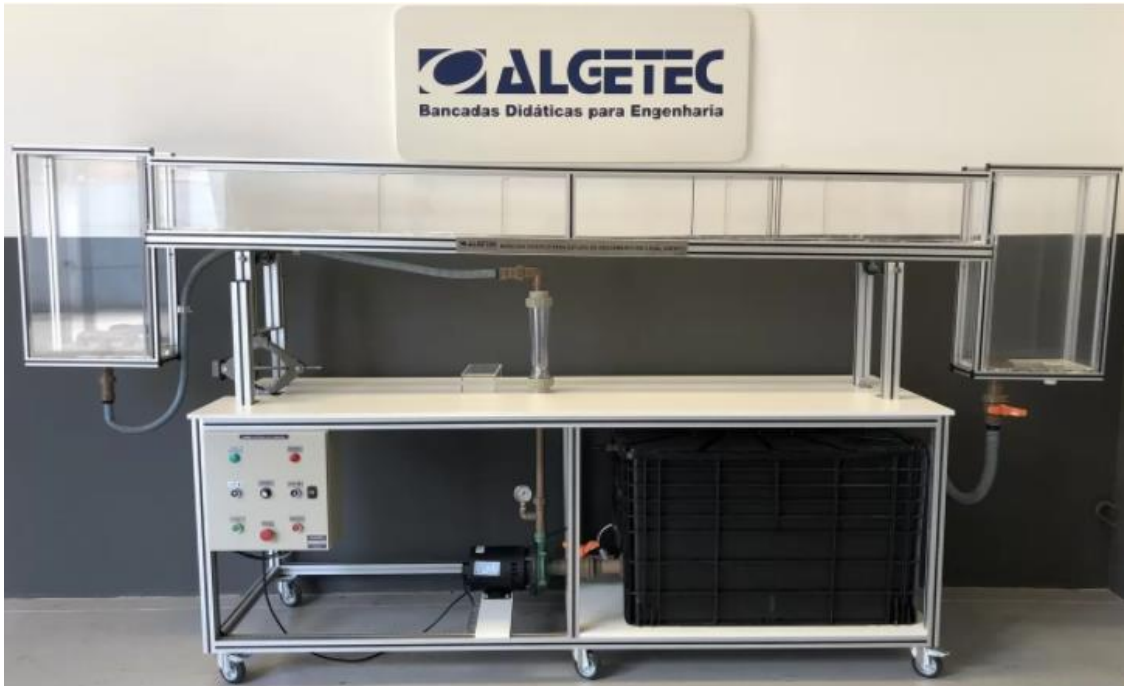
Forma	Seção	Área de Escoamento, A	Perímetro Molhado, P	Raio Hidráulico, R_h
Trapezoidal		$y(b + y \cotg \alpha)$	$b + \frac{2y}{\text{sen } \alpha}$	$\frac{y(b + y \cotg \alpha)}{b + \frac{2y}{\text{sen } \alpha}}$
Triangular		$y^2 \cotg \alpha$	$\frac{2y}{\text{sen } \alpha}$	$\frac{y \cos \alpha}{2}$
Retangular		by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$
Larga e Plana		by	b	y
Circular		$(\alpha - \text{sen } \alpha) \frac{D^2}{8}$	$\frac{\alpha D}{2}$	$\frac{D}{4} \left(1 - \frac{\text{sen } \alpha}{\alpha}\right)$

Fonte: FOX *et al.*, (2004)

2.2 BANCADA DIDÁTICA

Segundo Giordani *et al* (2003), a bancada didática é definida como uma ferramenta de auxílio para a realização de experimentos que possibilita ao operador montar diversos sistemas variando seus parâmetros, familiarizando-se com os componentes e ao mesmo tempo verificando na prática a teoria vista em aula. A figura (6) ilustra um exemplo de bancada hidráulica disponível no mercado.

Figura 6 - Bancada didática para estudo do escoamento em canal aberto



Fonte: ALGETEC, 2021.

Para Giordani *et al* (2003), o aluno tem a parte teórica visto em sala de aula, depois trabalha no simulador e por fim comprova fisicamente o experimento, fortalecendo em sua cognição, pois acaba aprendendo com a prática mesmo. Daí a importância das bancadas didáticas no auxílio as aulas práticas no ambiente acadêmico, dessa forma, gerando conhecimento e compreensão dos fenômenos tratados na teoria.

2.2.1 Aplicações da bancada de escoamento em canal aberto

De acordo com a fabricante Algetec (2021), com a bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto é possível realizar ou observar alguns fenômenos hidráulicos, tais como:

- Equação de Francis;
- Escoamentos livres uniformes e variados;
- Medição de pressão em manômetros de coluna de líquido manométrico;
- Estudos das equações de energia, continuidade e quantidade de movimento;
- Estudos com medidores em regime crítico;
- Medição de vazão em placa de orifício e Venturi;
- Teste de equações empíricas de vertedores;

- Estudo de descargas por estruturas medidoras de vazão (vertedores) e em comportas;
- Estudos de energia específica e carga crítica;

É notório a grande aplicabilidade da bancada didática no estudo dos fenômenos hidráulicos. Dessa maneira, com esta é possível consolidar o que é visto na teoria de forma prática.

2.2.2 Estrutura do canal

2.2.2.1 Estrutura de vidro

O canal para o escoamento do fluido possuirá seção de vidro, podendo ser de vidro recozido ou temperado. O vidro recozido possui ruptura frágil (fatura-se com poucas deformações) e gera cacos grandes que podem causar ferimentos graves. Quando o vidro recozido passa por um processo de aquecimento e depois esfriamento rápido, para garantir um ganho de resistência, recebe o nome de vidro temperado. Este é considerado um vidro de segurança devido sua quebra gerar pedaços bem pequenos, mas sua ruptura continua sendo frágil. Dessa forma, a seção de escoamento do fluido será construída em vidro temperado, em decorrência das suas propriedades de resistência mecânica e questões de segurança.

Algumas das propriedades físicas do vidro tais como: Módulo de Young, Coeficiente de Poisson, as resistências entre outros estão listadas na tabela (1).

Tabela 1 - Propriedades físicas do vidro

Módulo de Young E (GPa)	70 - 75
Coeficiente de Poisson ν	0,2 - 0,25
Módulo de Distorção G (GPa)	26 - 33
Resistência à compressão (MPa)	400 - 1000
Resistência à tração (MPa)	20 - 100
Resistência à flexão (MPa)	45
Condutividade térmica (W/m.K)	1
Calor específico C (J/Kg.K)	720
Coeficiente de expansão térmica α (1/K)	9×10^{-6}
Resistência ao choque térmico ΔT (K)	40

Fonte: Adaptado de Pereira (2012).

As propriedades mecânicas de resistência à tração e à flexão do vidro estão listadas na tabela (2).

Tabela 2 - Resistência mecânica do vidro

Resistência	Valor
Tração	300 a 700 MPa
Compressão	1000 MPa
Flexão	40 MPa (Vidro recozido) 120 a 200 MPa (Vidro temperado)

Fonte: Adaptado de Pereira (2012).

2.2.2.2 Estrutura metálica

O perfil que sustentará a seção de escoamento do fluido terá o formato em I. O perfil estrutural em I é utilizado principalmente em construções civis. O mesmo é conhecido por possuir uma alta resistência mecânica, construído com o aço laminado, o perfil estrutural I também é muito útil nos setores de mecânica, automobilístico e agrícola, bem como em qualquer lugar que utiliza maquinário pesado. Na figura (7) é ilustrado o perfil estrutural I e as suas respectivas nomenclaturas.

Figura 7 - Perfil estrutural I



Fonte: FERRAZ, D. (2021)

O perfil estrutural utilizado na sustentação da seção de escoamento do fluido é um perfil estrutural em I de 4" (polegadas), escolhido em decorrência do preço e da disponibilidade na empresa, que posteriormente deverá construir a bancada.

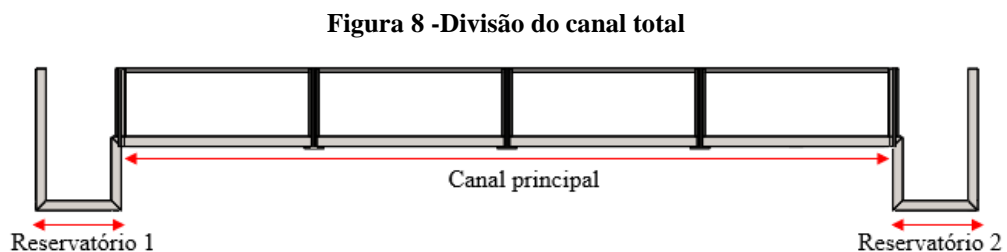
3. ESPECIFICAÇÃO DA GEOMETRIA E DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS

3.1 DESENHO CAD

Para a elaboração do desenho da bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto é utilizado um software *CAD*. O desenho técnico da bancada hidráulica encontra-se no apêndice B, é detalhado a bancada apenas em relação as dimensões totais.

3.1.1 Divisão do canal de escoamento

Na concepção da bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto, o canal total é dividido em três segmentos: canal principal, reservatório 1 e reservatório 2. E é com base nessa designação que os cálculos serão realizados, a figura (8) ilustra essa divisão.



Fonte: Autoria própria

3.1.2 Especificação da seção de escoamento

O canal de escoamento possui seção retangular, confeccionada de vidro temperado com espessura de 8mm. As dimensões adotadas no canal encontram-se na tabela (3).

Tabela 3 - Dimensões da seção de escoamento

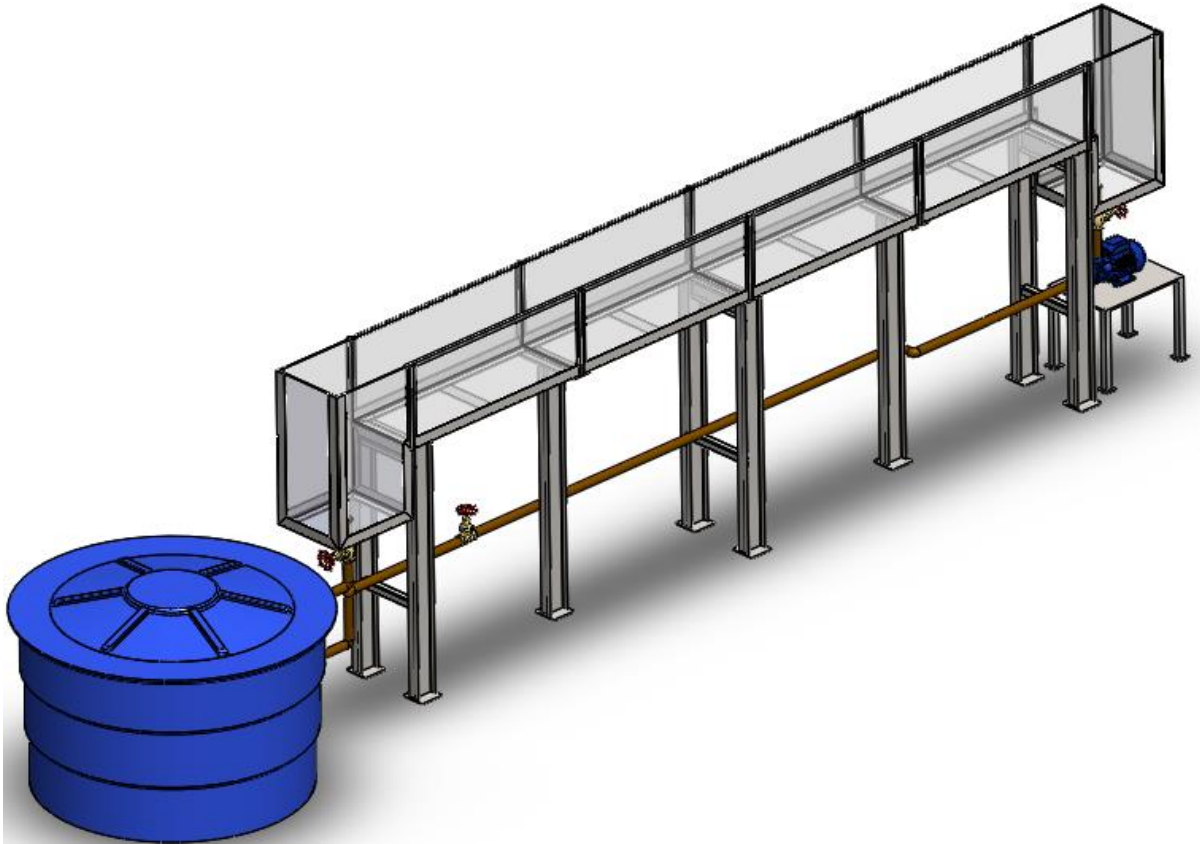
	Altura (m)	Base (m)	Comprimento (m)
Canal principal	0,4	0,35	4
Reservatório 1	0,73	0,35	0,4
Reservatório 2	0,73	0,35	0,4

Fonte: Autoria própria

3.1.3 Geometria da bancada didática

Na figura (9) é ilustrada a bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto.

Figura 9 - Bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto



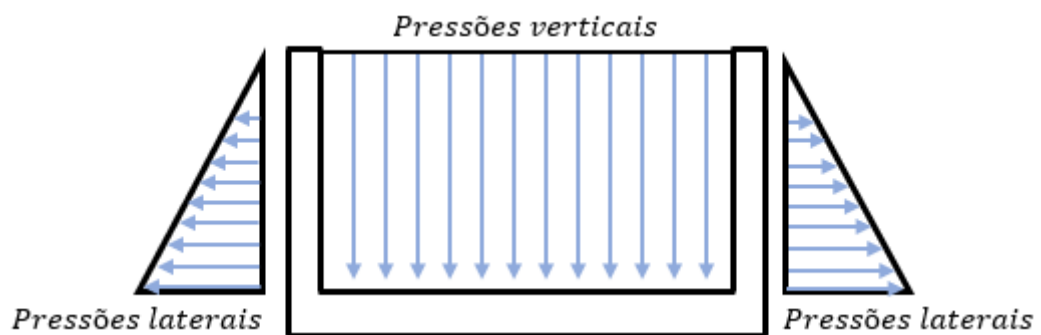
Fonte: Autoria própria

3.2 PARÂMETROS DA REGIÃO DE ESCOAMENTO

3.2.1 Pressões atuantes na seção de escoamento

O canal de escoamento está submetido tanto a pressões verticais, quanto a pressões laterais. Na figura (10) é ilustrado essa distribuição de pressão.

Figura 10 - Distribuição das pressões verticais e laterais no canal

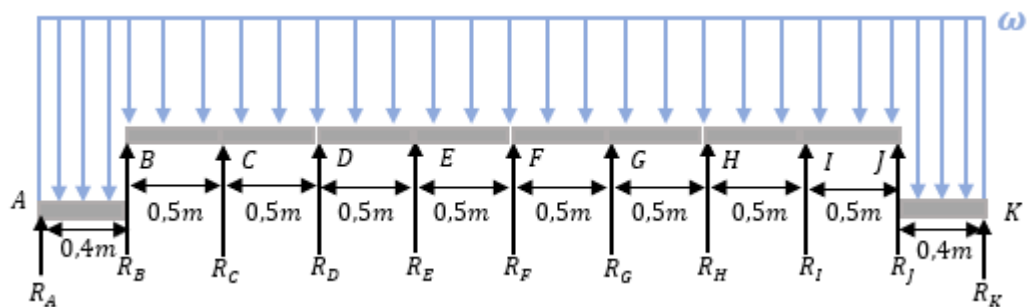


Fonte: Autoria própria

3.2.2 Distribuições das vigas ao longo do canal de escoamento

No canal principal foi adicionado uma viga a cada 0,5m, com o objetivo de prevenir o problema de flexão ao qual o vidro está submetido. Na figura (11) é ilustrado as distribuições das vigas ao longo do canal de escoamento.

Figura 11 - Distribuição das vigas ao longo do canal de escoamento

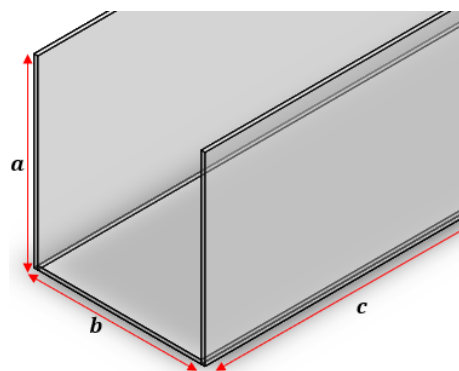


Fonte: Autoria própria

3.2.3 Termos utilizados na determinação do volume

Na figura (12) é ilustrado o volume de um paralelepípedo e seus respectivos termos utilizados para determinação do volume, onde a , b e c , são respectivamente, altura, base e comprimento.

Figura 12 – Volume de um paralelepípedo



Fonte: Autoria própria

3.3 FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA

Será abordado no transcórre deste tópico, introduções básicas referentes as equações utilizadas na concepção da bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto.

3.3.1 Volume

De acordo com Dolce e Pompeo (2019), o volume de um paralelepípedo pode ser calculado pela Equação (3.1).

$$V_{canal} = a \cdot b \cdot c \quad (3.1)$$

Onde:

V_{canal} é o volume do canal em m^3 ;

a é a altura do canal em m ;

b é a base do canal em m ;

c é o comprimento do canal em m .

3.3.2 Força exercida pela água

Segundo Çengel e Cimbala (2007), a força exercida pela coluna de água pode ser determinada pela aplicação da Equação (3.2) e Equação (3.3).

$$P_{H_2O} = P_{atm} + \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{H_2O} \quad (3.2)$$

$$F_{H_2O} = P_{H_2O} \cdot A \quad (3.3)$$

Sendo:

F_{H_2O} é a força exercida pela água em N ;

P_{H_2O} é a pressão da coluna de água em Pa ;

P_{atm} é a pressão atmosférica em Pa ;

ρ_{H_2O} é a massa específica da água em kg/m^3 ;

g é a aceleração da gravidade em m/s^2 ;

h_{H_2O} é a altura da coluna de água em m ;

A é a área que suporta a coluna de água em m^2 .

3.3.3 Força peso do vidro

De acordo com Çengel e Cimbala (2007), a força peso decorrente do vidro é calculada por meio da aplicação da Equação (3.4).

$$F_{vidro} = m_{vidro} \cdot g = (\rho_{vidro} \cdot V_{vidro}) \cdot g \quad (3.4)$$

Onde:

F_{vidro} é a força peso referente ao vidro em N ;

m_{vidro} é a massa do vidro em kg ;

ρ_{vidro} é a massa específica do vidro em kg/m^3 ;

V_{vidro} é a volume do vidro em m^3 ;

g é a aceleração da gravidade em m/s^2 .

3.3.4 Reações de apoio

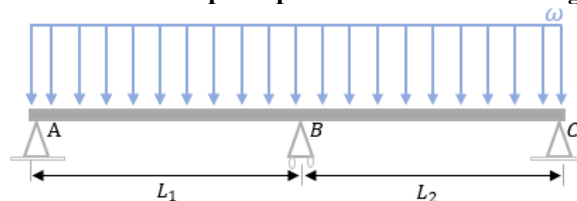
No cálculo das reações de apoio foi realizada uma análise considerando apenas a estrutura vidro. A parte da estrutura metálica será efetuado uma análise estrutural por meio do software de elementos finitos.

3.3.4.1 Canal principal

3.3.4.1.1 Vidro da base do canal

O vidro da base do canal tem um comprimento contínuo de 1m, porém na estrutura metálica é implementado vigas a cada 0,5m, logo quando o vidro é colocado sobre a estrutura metálica, o mesmo se comportará como uma viga com os apoios conforme ilustrado na figura (13).

Figura 13 – Vidro da base do canal principal submetido a um carregamento retangular



Fonte: Autoria própria

A estrutura da figura (13) é impossível de resolver utilizando o método convencional, no qual, aplica-se o somatório das forças e momentos. Isso acontece por que o número de incógnitas é maior que o número de equações da estática, necessitando de equações auxiliares para serem resolvidas, esses tipos de estrutura são chamados de estruturas hiperestáticas. (Lopez, 2018)

Para solucionar esse problema é utilizado o método das forças, utilizando-se as condições de compatibilidade de deslocamentos para determinar as redundantes estáticas, obtendo as reações de apoio na estrutura. Este método tem como hipótese que a estrutura está em regime elástico-linear, com pequenos deslocamentos e deformações, fazendo o uso do princípio da superposição de efeitos (PSE). (Lopez, 2018)

A sequência de métodos consiste em:

- Liberar a estrutura, deixando a isostática;
- Utilizar o PSE para decompor a estrutura em sistemas;
- Determinar os deslocamentos;
- Aplicar a condição de compatibilidade;
- Calcular esforços de compatibilidade;
- Calcular esforços e deformações.

Para resolver esse problema, pode-se utilizar a Equação (3.5). Os deslocamentos δ_{10} e δ_{11} é determinado pela aplicação da Equação (3.6) e Equação (3.7). (Lopez, 2018)

$$\delta_{10} + R_B \cdot \delta_{11} = 0 \quad (3.5)$$

Onde:

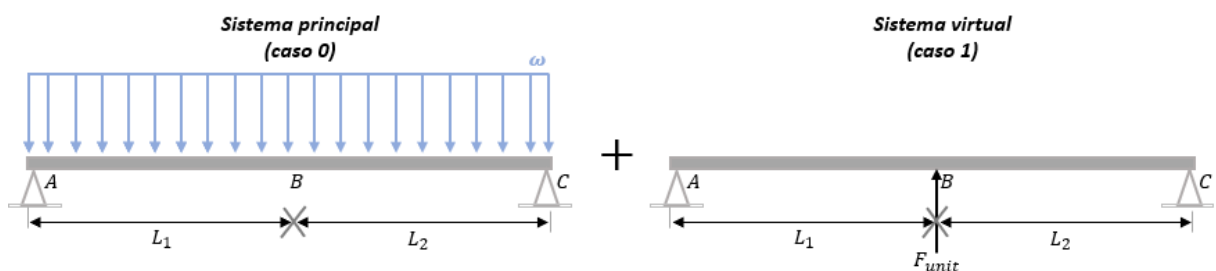
δ_{10} é o deslocamento do caso 0 com caso 1, em m ;

δ_{11} é o deslocamento do caso 1 com caso 1, em m ;

R_B é a reação no ponto B, em N .

Para se situar em relação ao que seria caso 0 (sistema principal) e caso 1 (sistema virtual), é apresentado a figura (14) que ilustra esses dois casos.

Figura 14 - Diagrama simplificado do sistema principal e sistema virtual



Fonte: Autoria própria

Os deslocamentos δ_{10} e δ_{11} , podem ser determinados por meio da Equação (3.6) e Equação (3.7). (Lopez, 2018)

$$\delta_{10} = \int_0^{L_1} \left(\frac{M \cdot \bar{M}}{EI} \right) dx + \int_{L_1}^{L_2} \left(\frac{M \cdot \bar{M}}{EI} \right) dx \quad (3.6)$$

$$\delta_{11} = \int_0^{L_1} \left(\frac{\bar{M}^2}{EI} \right) dx + \int_{L_1}^{L_2} \left(\frac{\bar{M}^2}{EI} \right) dx \quad (3.7)$$

Onde:

δ_{10} é o deslocamento do caso 0 com caso 1, em m ;

δ_{11} é o deslocamento do caso 1 com caso 1, em m ;

M é o momento fletor interno do caso 0 em $N \cdot m$;

\bar{M} é o momento fletor interno do caso 1 em $N \cdot m$;

L_1 é o comprimento da viga no trecho A-B em m ;

L_2 é o comprimento da viga no trecho B-C em m ;

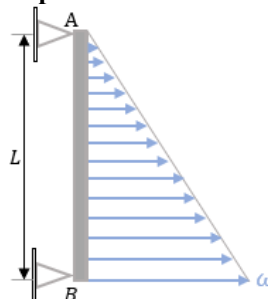
E é o módulo de elasticidade em N/m^2 ;

I é o momento de Inércia de área em m^4 .

3.3.4.1.2 Vidro lateral

As pressões que agem no vidro lateral têm o formato de um carregamento distribuído triangular como ilustra a figura (15).

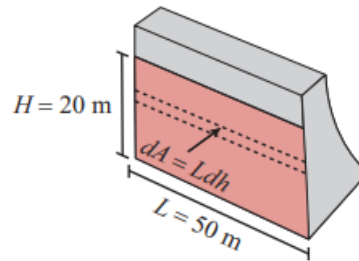
Figura 15 - Diagrama simplificado do vidro lateral do canal principal



Fonte: Autoria própria

A força exercida pela coluna de água na parede varia com a profundidade e de acordo Bechtold e Branco (2011), essa força pode ser calculada por meio da Equação (3.8). Na figura (16) é ilustrado os termos utilizados na Equação (3.8).

Figura 16 - Termos utilizados na Equação (3.8)



Fonte: BECHTOLD, I.; BRANCO, N. (2011)

$$F_{H_2O(lateral)} = \int_{h=0}^{h=H} dF = \int_0^H \rho g L h dh = \frac{\rho g L h^2}{2} \Big|_0^H = \frac{\rho g L H^2}{2} \quad (3.8)$$

Onde:

$F_{H_2O(lateral)}$ é a força exercida pela coluna de água no vidro lateral em N ;

ρ é a massa específica do fluído em kg/m^3 ;

L é o comprimento da parede (vidro lateral) em m ;

H é a altura da coluna de água em m .

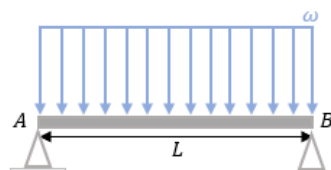
g é a aceleração da gravidade em m/s^2 .

3.3.4.2 Reservatórios

3.3.4.2.1 Vidro da base dos reservatórios 1 e 2

O compartimento reservatórios é dividido em reservatório 1 e reservatório 2. Estes possuem as mesmas dimensões, ou seja, são iguais. O vidro da base dos reservatórios 1 e 2 é modelado como uma viga biapoiado com carregamento distribuído retangular, na figura (17) é ilustrado o diagrama simplificado desse vidro.

Figura 17 - Diagrama simplificado do vidro da base dos Reservatórios 1 e 2



Fonte: Autoria própria

Para determinar as reações de apoio nos pontos A e B, a carga distribuída (ω) deve ser concentrada e partir disto aplica o somatório de momento e força.

3.3.4.2 Vidros laterais e frontais

As pressões que agem nos vidros laterais e frontais dos reservatórios 1 e 2, possui a mesma distribuição do vidro lateral do canal principal e os cálculos são similares ao efetuado no vidro lateral do canal principal.

3.3.5 Tensão de flexão

No cálculo da tensão de flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) é necessário determinar onde o momento fletor interno (M_F) é máximo. Para isto, é aplicado na viga um “corte imaginário” para encontrar o mesmo. De acordo com Hibeller (2010), a tensão de flexão pode ser determinada por meio da Equação (3.9).

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_F \cdot c_e}{I} \quad (3.9)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ é a tensão de flexão máxima em Pa ;

M_F é o momento fletor interno em $N \cdot m$;

c_e é a distância perpendicular do eixo neutro a um ponto mais afastado do eixo neutro em m ;

I é o momento de inércia de área da seção transversal em m^4 .

3.3.6 Tensão de cisalhamento

O vidro também estará submetido a uma tensão de cisalhamento (τ) que é proveniente de uma força cortante. Segundo Hibeller (2010), a tensão de cisalhamento é calculada pela Equação (3.10).

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad (3.10)$$

Onde:

τ é a tensão de cisalhamento no elemento no ponto localizado à distância y' do eixo neutro em Pa ;

V é a força de cisalhamento interna resultante em N ;

I é o momento de inércia da área da seção transversal em m^4 ;

t é a largura da área da seção transversal do elemento, medida no ponto onde τ deve ser determinada em m ;

Q é dado por $\int A'y dA' = y'A'$, onde A' é a porção superior (ou inferior) da área da seção transversal do elemento, definido pela seção onde t é medida e \bar{y}' é a distância até o centroide de A' , medida em torno do eixo neutro em m^3 .

3.3.7 Fator de segurança

Segundo Hibeller (2010), para o caso de um material frágil como o vidro, o fator de segurança (FS) é calculado por meio da Equação (3.11).

$$FS = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{adm}} \quad (3.11)$$

Onde:

FS é o fator de segurança (*adimensional*);

σ_{rup} é a tensão de ruptura do material em *MPa*;

σ_{adm} é a tensão admissível no material em *MPa*.

3.4 MEMORIAL DE CÁLCULO

No decorrer deste tópico serão abordados os cálculos referentes a concepção da bancada, tais como: dimensionamento do volume do canal principal, dos reservatórios 1 e 2; as forças que agem no canal de escoamento que são decorrentes da força exercida pela água e a força peso exercida pelo vidro; determinações das reações de apoio, momento fletor e força cortante; tensão de flexão e o fator de segurança.

3.4.1 Canal principal

São efetuados todos os cálculos referentes ao canal principal, desde a determinação do volume até o fator de segurança. Como os suportes estão igualmente espaçados, é realizado os cálculos das reações de apoio, tensão de cisalhamento, tensão de flexão e fator de segurança, apenas para o trecho B-C-D, já que os trechos D-E-F, F-G-H, e H-I-J são iguais a este, como está ilustrado na figura (11).

3.4.1.1 Volume

Como o canal de escoamento possui formato de um paralelepípedo, o volume pode ser calculado por meio da Equação (3.1). Na tabela (4) é apresentado os valores utilizados no cálculo do volume do canal principal, é considerado a altura máxima do canal no cálculo.

Tabela 4 - Valores utilizados no cálculo do volume do canal principal

Altura (m)	Base (m)	Comprimento (m)	Volume (L)
0,4	0,35	4	560

Fonte: Autoria própria

3.4.1.2 Vidro da base do canal principal

3.4.1.2.1 Força exercida pela água

A força exercida pela coluna d'água é calculada conforme a Equação (3.2) e (3.3), vale ressaltar que essa força é referente apenas o trecho B-C-D. A tabela (5) apresenta os valores utilizados na determinação da força exercida pela coluna d'água.

Tabela 5 - Valores utilizados no cálculo da força exercida pela água no vidro base do canal principal

ρ_{H_2O} (kg/m ³)	Gravidade (m/s ²)	h_{H_2O} (m)	b (m)	$c_{\text{trecho_B-C-D}}$ (m)	F_{H_2O} (N)
1000	9,81	0,4	0,35	1	1373,40

Fonte: Autoria própria

3.4.1.2.2 Força peso do vidro

A força peso exercida pelo vidro pode ser calculada por meio da Equação (3.4). A tabela (6) apresenta os valores usados no cálculo da força peso exercida pelo vidro.

Tabela 6 - Valores utilizados no cálculo da força peso do vidro base do canal principal

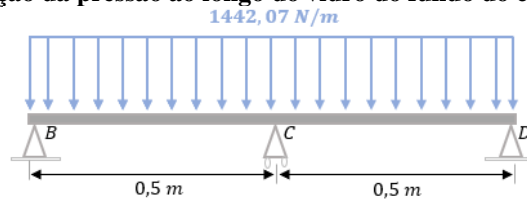
m_{vidro} (kg)	Gravidade (m/s ²)	F_{vidro} (N)
7	9,81	68,67

Fonte: Autoria própria

3.4.1.2.3 Reações de apoio

A figura (18) mostra a distribuição do carregamento no trecho B-C-D no vidro da base do canal principal. O valor do carregamento ($1442,07 \text{ N/m}$) é a soma da parcela referente a coluna d'água e o peso do vidro.

Figura 18 - Distribuição da pressão ao longo do vidro do fundo do canal principal

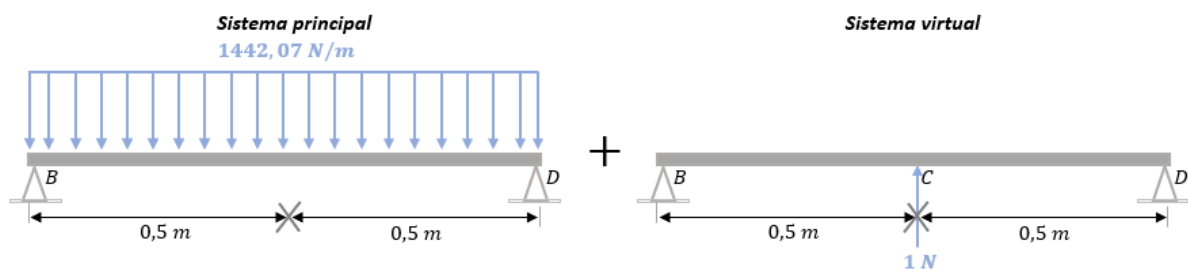


Fonte: Autoria própria

A estrutura da figura (18) é um problema de uma viga hiperestática. Dessa forma, como dito anteriormente apenas utilizando o método convencional não se consegue resolver, para solucionar essa situação é utilizado o método das forças.

A figura (19) mostra os dois sistemas (principal e virtual) criados pelo método das forças para solucionar o sistema da figura (18). No sistema virtual é aplicada uma carga unitária (1 N) no ponto C, em virtude, do procedimento a ser adotado na determinação dos deslocamentos δ_{10} e δ_{11} .

Figura 19 - Sistema principal (caso 0) e Sistema virtual (caso 1)



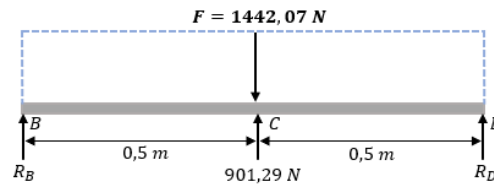
Fonte: Autoria própria

Aplicando-se a Equação (3.6) e Equação (3.7) para encontrar os deslocamentos δ_{10} e δ_{11} . E a partir disso, aplicando a Equação (3.5), chega-se ao seguinte resultado para a reação no ponto C. Esse cálculo detalhado pode ser consultado no apêndice A.

$$R_C = 901,29 \text{ N} \quad (3.12)$$

Na figura (20) é ilustrado o diagrama de corpo livre após a determinação da reação no ponto C.

Figura 20 - Diagrama de corpo livre do vidro de base após a determinação da reação no ponto C



Fonte: Autoria própria

Aplicando o somatório de força e momento, encontra o seguinte valor para a reação no ponto B e ponto D, que pode ser visto com detalhes no apêndice A.

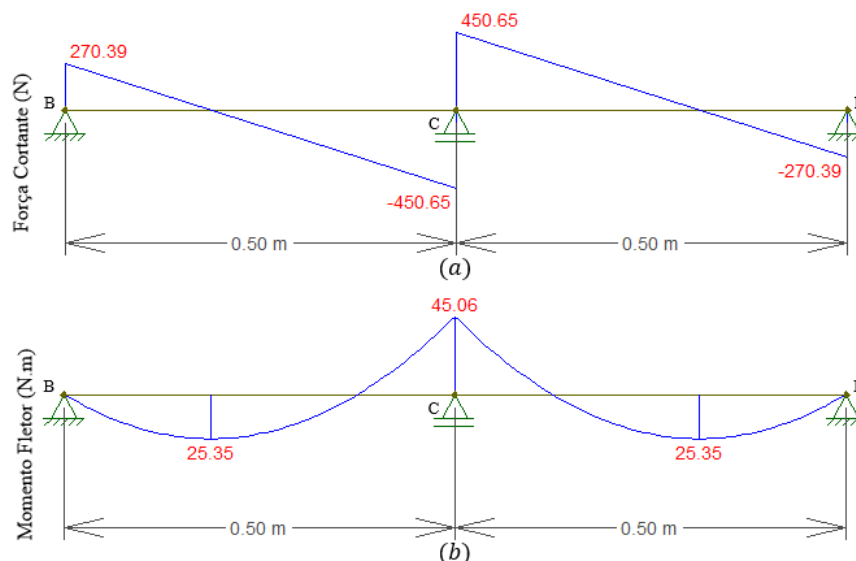
$$R_B = R_D = 270,39 \text{ N} \quad (3.13)$$

Para determinar a força cortante e o momento fletor é necessário fazer dois “cortes imaginários” na viga, um corte ($0 \text{ m} \leq x_1 \leq 0,5 \text{ m}$) e outro ($0,5 \text{ m} \leq x_1 \leq 1 \text{ m}$), esse cálculo detalhado está disponível no apêndice A. A força cortante e o momento fletor são iguais a:

$$V_{\text{máx}} = 450,65 \text{ N e } M_{\text{máx}} = 45,06 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.14)$$

É utilizado o *software Ftool* (versão gratuita) na plotagem dos gráficos da força cortante e momento fletor, além deste servirem de comparação para com os valores das reações de apoio obtidos analiticamente. Na figura (21-a) é ilustrado o diagrama da força cortante e na figura (21-b) é ilustrado o diagrama do momento fletor, ambos do vidro da base do canal principal.

Figura 21 - Diagrama da força cortante (a) e momento fletor (b) do vidro da base do canal principal



Fonte: Autoria própria

Os valores encontrados para a reação de apoio nos pontos B, C e D coincidiram com os determinados de forma analítica, além dos valores dos esforços internos (força cortante e momento fletor).

3.4.1.2.4 Tensão de flexão

Com o momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$) é possível determinar a tensão de flexão aplicando a Equação (3.9). A tabela (7) apresenta os valores utilizados no cálculo da tensão de flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$).

Tabela 7 - Valores utilizados no cálculo da tensão de flexão máxima do vidro da base do canal principal

$M_{m\acute{a}x}$ (N.m)	I (m^4)	c_e (m)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
45,06	$1,4933 \times 10^{-8}$	0,004	12,07

Fonte: Autoria própria

3.4.1.2.5 Tensão de cisalhamento

A partir do valor da força cortante máxima ($V_{m\acute{a}x}$), determina-se a tensão de cisalhamento por meio da aplicação da Equação (3.10). A tabela (8) mostra os valores utilizados no cálculo da tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$).

Tabela 8 - Valores utilizados no cálculo da tensão de cisalhamento máximo do vidro base do canal principal

$V_{m\acute{a}x}$ (N)	Q (m^3)	I (m^4)	t (m)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)
450,65	$2,8 \times 10^{-6}$	$1,4933 \times 10^{-8}$	0,35	0,24

Fonte: Autoria própria

O valor encontrado para a tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$) já era esperado que seria pequeno, em virtude que o esforço crítico predominante na estrutura vidro é o esforço decorrente da flexão.

3.4.1.2.6 Fator de segurança

O fator de segurança (FS) é determinado com base na Equação (3.11). O vidro utilizado na seção de escoamento da bancada é o vidro temperado 8mm e de acordo com a tabela (2).

Pode-se adotar para a tensão de ruptura um valor entre 120 MPa e 200 MPa, é adotado 120 MPa. Chegando no seguinte valor para o fator de segurança.

$$FS \cong 9,94 \quad (3.15)$$

Para o cálculo do fator de segurança foi considerado apenas o esforço de flexão, em decorrência de ser o esforço predominante, no qual, ao vidro estará submetido. Todos esses cálculos efetuados acima encontram-se detalhados no apêndice A.

3.4.1.3 Vidro lateral do canal principal

3.4.1.3.1 Força exercida pela água

A força exercida pela coluna d'água no vidro lateral do canal principal pode ser determinada pela Equação (3.8). A tabela (9) mostra os valores utilizados na Equação (3.8).

Tabela 9 - Valores utilizados na Equação (3.8)

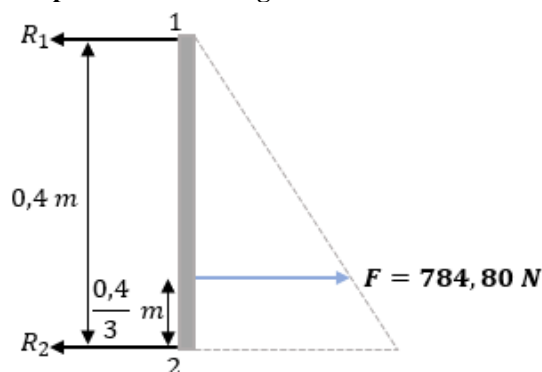
ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)	L (m)	H (m)	$F_{H_2O(lateral)}$ (N)
1000	9,81	1	0,4	784,80

Fonte: Autoria própria

3.4.1.3.2 Reações de apoio

No vidro lateral há uma distribuição de pressão que age a partir da superfície com a profundidade. A figura (22) mostra essa distribuição no vidro lateral considerando a carga concentrada, é feito uma aproximação para um comportamento de uma viga biapoiada.

Figura 22 - Diagrama de corpo livre com a carga concentrada no vidro lateral do canal principal



Fonte: Autoria própria

Aplicando o somatório de momento e força para determinar as reações R_1 e R_2 , encontra-se:

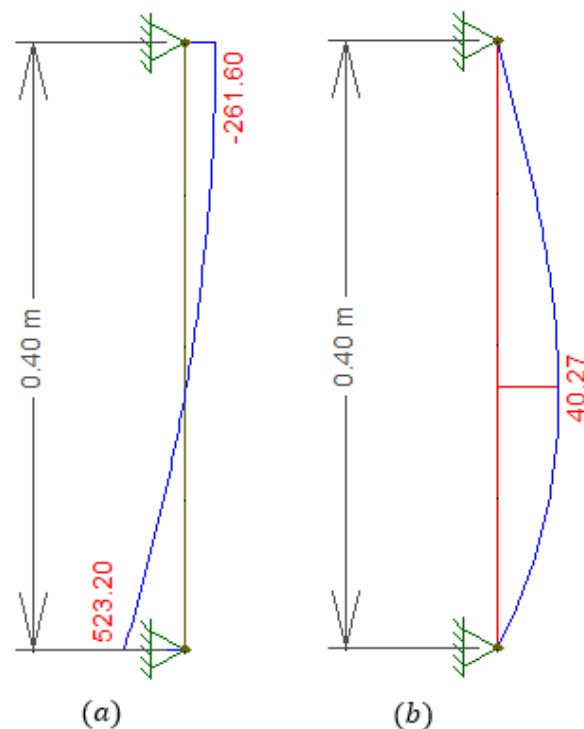
$$R_1 = 261,60 \text{ N e } R_2 = 523,20 \text{ N} \quad (3.16)$$

Dar mesma forma como foi feito para encontrar a força cortante máxima e o momento fletor máximo no vidro da base do canal principal, será executado no vidro lateral do canal principal, chegando ao seguinte resultado para a força cortante máxima e momento fletor máximo:

$$V_{m\acute{a}x} = 523,20 \text{ N e } M_{m\acute{a}x} = 40,27 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.17)$$

A figura (23-a) representa o diagrama de força cortante e a figura (23-b) representa o diagrama do momento fletor ambos do vidro lateral do canal principal.

Figura 23 - Diagrama da força cortante (a), momento fletor (b) do vidro lateral do canal principal



Fonte: Autoria própria

Os valores para as reações de apoios, momento fletor máximo e força cortante máxima obtidos de forma analítica são iguais aos encontrados no *software* Ftool.

3.4.1.3.3 Tensão de flexão

A tensão de flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), é calculada com base na Equação (3.9). A tabela (10) apresenta os valores utilizados no cálculo da tensão de flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$).

Tabela 10 - Valores utilizados na Equação (3.9)

$M_{m\acute{a}x}$ (N.m)	I (m ⁴)	c_e (m)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
40,27	$1,7067 \times 10^{-8}$	0,004	9,44

Fonte: Autoria própria

3.4.1.3.4 Tensão de cisalhamento

Com a força cortante máxima ($V_{m\acute{a}x}$) encontrada no valor de 523,20 N, com base na Equação (3.10). A tabela (11) apresenta os valores utilizados na Equação (3.10).

Tabela 11 - Valores utilizados na Equação (3.10)

$V_{m\acute{a}x}$ (N)	Q (m ³)	I (m ⁴)	t (m)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)
523,2	$3,2 \times 10^{-6}$	$1,7067 \times 10^{-8}$	0,4	0,24

Fonte: Autoria própria

3.4.1.3.5 Fator de segurança

Com a tensão de flexão máxima será determinado o fator de segurança do vidro lateral do canal principal. É adotado 120 MPa para a tensão de ruptura para o vidro temperado de 8mm, aplicando a Equação (3.11).

$$FS \cong 12,7 \quad (3.18)$$

Todos esses cálculos efetuados acima podem ser consultados detalhadamente no apêndice A.

3.4.2 Reservatórios

Serão efetuados os mesmos cálculos realizados para o canal principal. O reservatório 1 e o reservatório 2 são iguais, sendo assim, é executado o cálculo apenas para um.

3.4.2.1 Volume

O volume dos reservatórios 1 e 2 são iguais, em virtude de possuírem as mesmas dimensões. A partir da Equação (3.1), tem-se que o volume é:

Tabela 12 - Valores utilizados na determinação do volume do reservatório

Altura (m)	Base (m)	Comprimento (m)	Volume (L)
0,73	0,35	0,4	102,2

Fonte: Autoria própria

3.4.2.2 Vidro da base do reservatório

3.4.2.2.1 Força exercida pela água

A força exercida pela água (F_{H_2O}) é calculada por meio da Equação (3.2) e (3.3). A tabela (13) apresenta os valores utilizados na Equação (3.2) e (3.3).

Tabela 13 - Valores utilizados na determinação da força exercida pela água no vidro da base do reservatório

ρ_{H_2O} (kg/m ³)	Gravidade (m/s ²)	h_{H_2O} (m)	b (m)	$c_{trecho_J_K}$ (m)	F_{H_2O} (N)
1000	9,81	0,73	0,35	0,4	1002,58

Fonte: Autoria própria

3.4.2.2.2 Força peso do vidro

A força exercida pelo vidro (F_{vidro}), pode ser calculado por meio da Equação (3.4). A tabela (14) apresenta os valores utilizados no cálculo da força exercida pelo vidro.

Tabela 14 - Valores utilizados no cálculo da força peso no vidro da base do reservatório

m_{vidro} (kg)	Gravidade (m/s ²)	F_{vidro} (N)
2,8	9,81	27,47

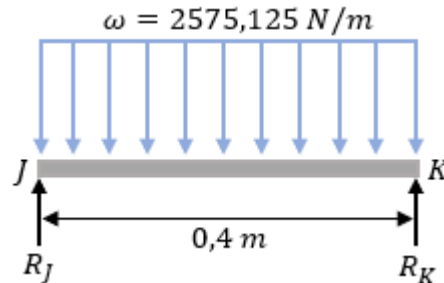
Fonte: Autoria própria

3.4.2.2.3 Reações de apoio

A partir das forças encontradas referentes a coluna de água e o peso do vidro será determinados as reações de apoio. A carga distribuída (ω) que aparece na figura (24) é a soma

da parcela referente a coluna de água e o peso do vidro. Na figura (24) é ilustrada a distribuição de pressão no vidro da base dos reservatórios 1 e 2.

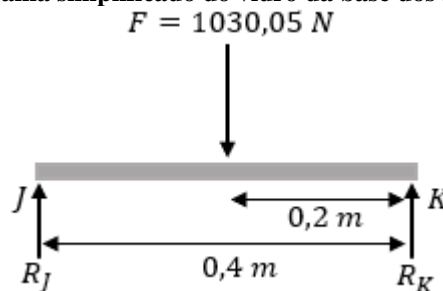
Figura 24 - Distribuição de pressão no vidro de base dos reservatórios 1 e 2



Fonte: Autoria própria

O valor da força (1030,05 N) é a soma da parcela da água e o peso do vidro. Na figura (25) é ilustrado o diagrama de corpo livre do vidro da base dos reservatórios 1 e 2.

Figura 25 - Diagrama simplificado do vidro da base dos reservatórios 1 e 2



Fonte: Autoria própria

Aplicando o somatório de momento e força, encontra-se o seguinte valor para a reação no ponto J e ponto K:

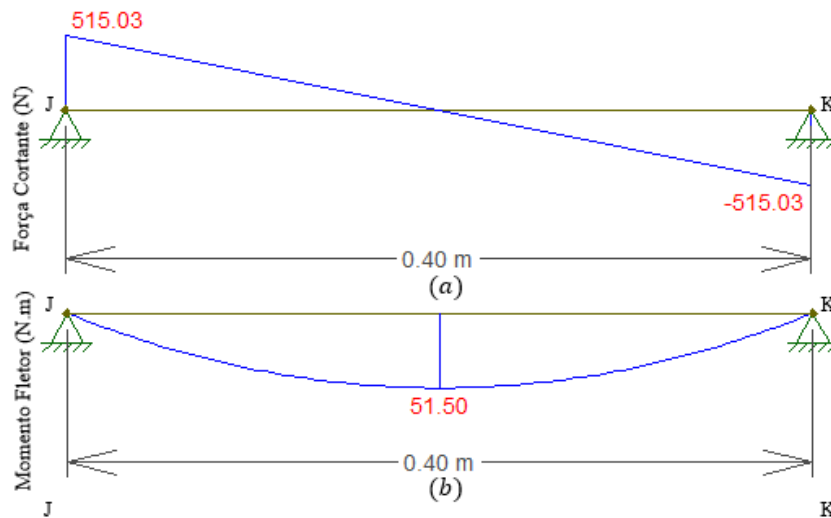
$$R_J = 515,03 \text{ N} \text{ e } R_K = 515,03 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.19)$$

Aplicando um “corte imaginário” de $(0\text{m} \leq x_1 \leq 0,4\text{m})$ no trecho J-K, para determinar o momento fletor máximo e a força cortante máxima:

$$V_{m\acute{a}x} = 515,03\text{N} \text{ e } M_{m\acute{a}x} = 51,50 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.20)$$

A figura (26-a) ilustra o diagrama da força cortante e a figura (26-b) ilustra o momento fletor ambas do vidro do fundo dos reservatórios 1 e 2.

Figura 26 - Diagrama da força cortante (a), momento fletor (b) do vidro da base dos reservatórios 1 e 2



Fonte: Autoria própria

3.4.2.2.4 Tensão de flexão

Com o momento fletor máximo é possível determinar a tensão de flexão por meio da Equação (3.9). A tabela (15) apresenta os valores utilizados na Equação (3.9).

Tabela 15 - Valores utilizados no cálculo da tensão de flexão do vidro da base dos reservatórios

$M_{\text{máx}}$ (N.m)	I (m ⁴)	c_e (m)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)
51,50	$1,4933 \times 10^{-8}$	0,004	13,80

Fonte: Autoria própria

3.4.2.2.5 Tensão de cisalhamento

Aplicando a Equação (3.10) para determinar a tensão de cisalhamento. A tabela (16) apresenta os valores usados no cálculo da tensão de cisalhamento.

Tabela 16 - Valores usados no cálculo da tensão de cisalhamento para o vidro da base dos reservatórios

$V_{\text{máx}}$ (N)	Q (m ³)	I (m ⁴)	t (m)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)
515,025	$2,8 \times 10^{-6}$	$1,4933 \times 10^{-8}$	0,35	0,28

Fonte: Autoria própria

3.4.2.2.6 Fator de segurança

O fator de segurança (FS) é calculado conforme a Equação (3.11). Nos reservatórios 1 e 2 é utilizado o mesmo vidro do canal principal, dessa maneira, será usado o mesmo valor para a tensão de ruptura (120 MPa), chegando em um fator de segurança:

$$FS \cong 8,70 \quad (3.21)$$

Todos esses cálculos efetuados encontram-se disponível no apêndice A.

3.4.2.3 Vidro lateral e Vidro frontal

3.4.2.3.1 Força exercida pela água

A força exercida pela coluna de água é calculada pela Equação (3.8). A tabela (17) e (18) apresenta respectivamente os valores utilizados na determinação da força exercida pela água no vidro lateral e frontal.

Tabela 17 - Valores utilizados na equação (3.8) para o vidro lateral dos reservatórios (1 e 2)

ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)	L (m)	H (m)	$F_{H_2O(lateral)}$ (N)
1000	9,81	0,4	0,73	1045,55

Fonte: Autoria própria

Tabela 18 - Valores utilizados na equação (3.8) para o vidro frontal dos reservatórios (1 e 2)

ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)	L (m)	H (m)	$F_{H_2O(frontal)}$ (N)
1000	9,81	0,35	0,73	914,86

Fonte: Autoria própria

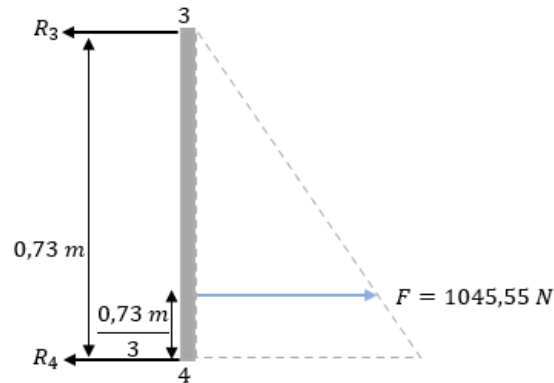
A força peso referente aos vidros laterais e frontais foram desprezados. Isto não irá prejudicar os resultados finais, em virtude, deste comparado a força exercida pela coluna d'água ser pequeno.

3.4.2.3.2 Reações de apoio

- Vidro Lateral

Na figura (27) é ilustrado o diagrama de corpo livre do vidro lateral dos reservatórios (1 e 2).

Figura 27 - Diagrama de corpo livre do vidro lateral dos reservatórios (1 e 2)



Fonte: Autoria própria

Aplicando o somatório de força e momento, tem-se para os pontos 3 e 4:

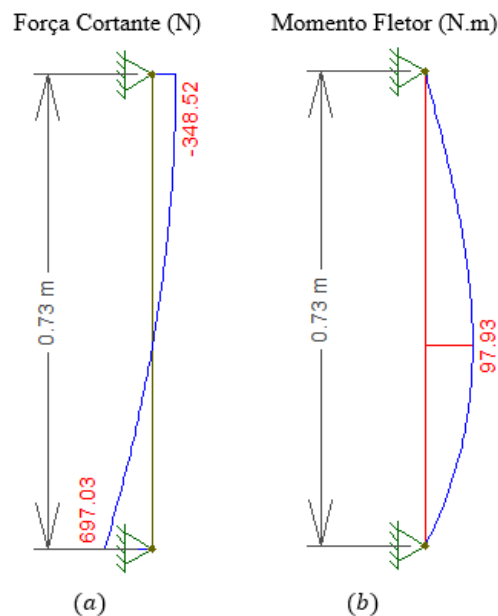
$$R_3 = 348,52 \text{ N e } R_4 = 697,03 \text{ N} \quad (3.22)$$

Para determinar o momento fletor máximo e a força cortante máxima é preciso aplicar um “corte imaginário” na seção, fazendo isso acha o seguinte valor:

$$V_{\text{máx}} = 697,03 \text{ N e } M_{\text{máx}} = 97,93 \text{ N.m} \quad (3.23)$$

A figura (28-a) ilustra o diagrama da força cortante e a figura (28-b) ilustra o diagrama do momento fletor ambos do vidro lateral dos reservatórios 1 e 2.

Figura 28 - Diagrama da força cortante (a) e momento fletor (b) do vidro lateral dos reservatórios 1 e 2

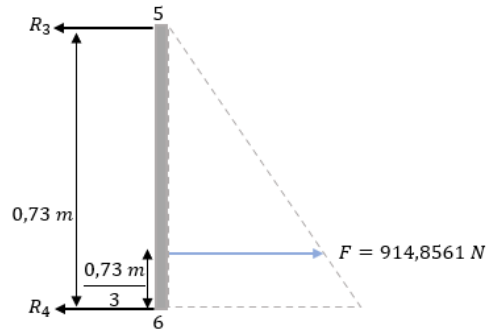


Fonte: Autoria própria

- Vidro Frontal

Na figura (29) é ilustrado o diagrama de corpo livre do vidro frontal dos reservatórios (1 e 2).

Figura 29 - Diagrama de corpo livre do vidro frontal dos reservatórios (1 e 2)



Fonte: Autoria própria

Aplicando o somatório de momento e força, tem-se que as reações nos pontos 5 e 6:

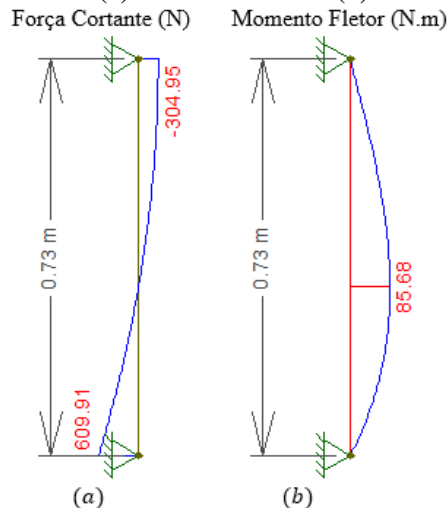
$$R_5 = 304,95 \text{ N e } R_6 = 609,90 \text{ N} \quad (3.24)$$

A força cortante máxima e o momento fletor máximo são iguais a:

$$V_{m\acute{a}x} = 609,90 \text{ N e } M_{m\acute{a}x} = 85,68 \text{ N.m} \quad (3.25)$$

A figura (30-a) ilustra o diagrama da força cortante e a figura (30-b) ilustra o diagrama do momento fletor ambos do vidro frontal dos reservatórios 1 e 2.

Figura 30 - Diagrama da força cortante (a) e momento fletor (b) do vidro frontal dos reservatórios 1 e 2



Fonte: Autoria própria

3.4.2.3.3 Tensão de flexão

A tensão de flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) é calculada pela Equação (3.9). A tabela (19) e (20) apresenta os valores utilizados na Equação (9).

Tabela 19 - Valores utilizados no cálculo da tensão de flexão para o vidro lateral dos reservatórios 1 e 2

$M_{m\acute{a}x}$ (N.m)	I (m ⁴)	c_e (m)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
97,93	$3,1147 \times 10^{-8}$	0,004	12,58

Fonte: Autoria própria

Tabela 20 - Valores utilizados no cálculo da tensão de flexão para o vidro frontal dos reservatórios 1 e 2

$M_{m\acute{a}x}$ (N.m)	I (m ⁴)	c_e (m)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
85,68	$3,1147 \times 10^{-8}$	0,004	11,00

Fonte: Autoria própria

3.4.2.3.4 Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento é determinada pela aplicação da Equação (3.10). A tabela (21) e (22) apresenta os valores usados no cálculo da tensão de cisalhamento.

Tabela 21 - Valores utilizados no cálculo da tensão de cisalhamento para o vidro lateral dos reservatórios

$V_{m\acute{a}x}$ (N)	Q (m ³)	I (m ⁴)	t (m)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)
697,03	$5,84 \times 10^{-6}$	$3,1147 \times 10^{-8}$	0,73	0,18

Fonte: Autoria própria

Tabela 22 - Valores utilizados no cálculo da tensão de cisalhamento para o vidro frontal dos reservatórios

$V_{m\acute{a}x}$ (N)	Q (m ³)	I (m ⁴)	t (m)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)
609,9	$5,84 \times 10^{-6}$	$3,1147 \times 10^{-8}$	0,73	0,16

Fonte: Autoria própria

3.4.2.3.5 Fator de segurança

O fator de segurança é calculado por meio da Equação (3.11), adotando para a tensão de ruptura do vidro temperado 8mm (120 MPa).

$$FS(lateral) \cong 9,54 \text{ e } FS(frontal) \cong 10,91 \quad (3.26)$$

3.5 COMPONENTES DA BANCADA

Será abordado neste tópico os componentes fundamentais para o pleno funcionamento da bancada hidráulica.

3.5.1 Seleção da bomba d'água

Neste tópico da seleção da bomba d'água é apresentado uma fundamentação matemática necessária no cálculo para a escolha adequada da bomba.

3.5.1.1 Referência teórica

Nessa parte será feito uma abordagem sobre o número de Reynolds, diâmetro hidráulico e vazão, além disso, o memorial de cálculo para a seleção da bomba.

3.5.1.1.1 Número de Reynolds

Segundo Çengel e Cimbala (2007), o escoamento em canal aberto pode ser laminar, transicional ou turbulento dependendo do valor do número de Reynolds, expresso por:

$$Re = \frac{\rho V R_h}{\mu} = \frac{V R_h}{\nu} \quad (3.27)$$

Onde,

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} = \frac{(H \cdot B)}{(B + 2 \cdot H)} \quad (3.28)$$

e

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.29)$$

Sendo:

Re é o número de Reynolds (adimensional);

V é a velocidade média do escoamento em m/s ;

R_h é o raio hidráulico em m ;

ρ é a massa específica do fluido em kg/m^3 ;

μ é a viscosidade dinâmica em $Pa \cdot s$;

ν é a viscosidade cinemática em m^2/s ;

B é o comprimento da base em m ;

H é o profundidade do escoamento em m .

De acordo com Çengel e Cimbala (2007), o escoamento em canal aberto é laminar ou turbulento quando o número de Reynolds, encontra-se na seguinte faixa:

- $Re \leq 500$, Escoamento laminar;
- $Re \geq 2500$, Escoamento turbulento.

Como a seção de escoamento do fluido tem o formato de um retângulo, é necessário colocar as dimensões deste em termo do Raio Hidráulico (R_H), dado pela Equação (3.28).

3.5.1.1.2 Vazão

Segundo Çengel e Cimbala (2007), a vazão é a velocidade do fluido pela área de escoamento, matematicamente é:

$$Q = V_{\text{fluido}} \cdot A_{\text{esc}} \quad (3.30)$$

Sendo:

Q é vazão do fluido em m^3 ;

V_{fluido} é a velocidade do fluido em m/s ;

A_{esc} é a área de escoamento em m^2 .

3.5.1.2 Memorial de cálculo

Na seleção da bomba d'água, esta é selecionada com base na vazão requerida no canal, para chegar na vazão requerida são realizados os cálculos abaixo que se encontram detalhados no apêndice A.

3.5.1.2.1 Número de Reynolds

Será aplicado a equação do número de Reynolds para determinar a velocidade média do fluido (V) necessário na determinação da vazão (Q), é adotado os seguintes passo para a determinação da velocidade:

- Primeiramente é determinado o raio hidráulico (R_H), por meio da Equação (3.28).

$$R_H \cong 0,12 \text{ m} \quad (3.31)$$

Serão consideradas duas situações de escoamento do fluido, uma no regime laminar e outra no regime turbulento. Para o laminar adotará um Reynolds igual a 450 e para o turbulento 2600.

- Para o regime laminar ($Re = 450$), aplicando a Equação (3.27) encontrasse que a velocidade média do fluido é aproximadamente igual a:

$$V(\text{laminar}) \cong 0,0037 \text{ m/s} \quad (3.32)$$

- Para o regime turbulento ($Re = 2600$), aplicando a Equação (3.27) chega-se no seguinte valor para a velocidade média do fluido:

$$V(\text{turbulento}) \cong 0,02 \text{ m/s} \quad (3.33)$$

3.5.1.2.2 Vazão

Para determinar a vazão requerida é levado em consideração a condição mais crítica desejada que é no regime turbulento, dessa maneira, na aplicação da Equação (3.15) é usado a velocidade média do fluido do regime turbulento, chegando na vazão requerida de aproximadamente:

$$Q(\text{requerida}) \cong 2,94 \text{ L/s} \quad (3.34)$$

Deverá procurar no mercado uma bomba d'água que consiga fornecer a vazão requerida (2,94 L/s). A tabela (23) mostra as bombas d'água disponíveis no mercado que atende a vazão requerida.

Tabela 23 - Bomba d'água de potência 1,5Cv

Descrição	Vazão máxima (L/s)
Bomba Monoestágio Thebe Th-16 1,5Cv Monofásica 110v/220v	4,44
Motobomba centrífuga Monoestágio Trifásica 1,5 Cv 220v/380v Schneider	4,06

Fonte: Aatoria própria

Pode-se utilizar qualquer bomba da tabela (23) devido satisfazer as condições operacionais desejadas. Por conta do preço, a bomba a ser utilizada na bancada é a Bomba Monoestágio Thebe Th-16 1,5Cv Monofásica 110v/220v.

4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

4.1 FUNDAMENTAÇÃO DA ANÁLISE ESTRUTURAL

De acordo com Martha (2010) a *análise estrutural* é a fase do projeto estrutural em que é feita a idealização do comportamento da estrutura. Esse comportamento pode ser expresso por diversos parâmetros, como pelos campos de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura. De maneira geral, a análise estrutural tem como objetivo a determinação de esforços internos e externos (cargas e reações de apoio), e das tensões correspondentes, bem como a determinação dos deslocamentos e as correspondentes deformações da estrutura que está sendo projetada. Essa análise deve ser realizada para os possíveis estágios de carregamentos e solicitações que devem ser previamente determinados.

O desenvolvimento das teorias que descrevem o comportamento de estruturas se deu inicialmente para *estruturas reticuladas*, isto é, estruturas formadas por barras (elementos estruturais que têm um eixo claramente definido). Trata-se dos tipos mais comuns de estruturas, tais como a estrutura de uma cobertura ou o esqueleto de um edifício metálico. Mesmo em casos de estruturas nas quais nem todos os componentes podem ser considerados como barras (como é o caso de edifícios de concreto armado), é comum analisar, de forma simplificada, o comportamento global ou parcial da estrutura utilizando-se um modelo de barras. (Martha, 2010)

Como dito, a análise estrutural é a etapa do projeto estrutural na qual é realizada uma previsão do comportamento da estrutura. Nela são utilizadas todas as teorias físicas e matemáticas resultantes da formalização da engenharia estrutural como ciência.

Segundo Martha (2010) a análise estrutural moderna trabalha com quatro níveis de abstração com relação à estrutura que está sendo analisada, como indicado na figura (31), sendo o primeiro o mundo físico, isto é, o nível que representa a estrutura real tal como é construída.

Figura 31 - Quatro níveis de abstração referentes a uma estrutura na análise estrutural



Fonte: MARTHA, L. (2010).

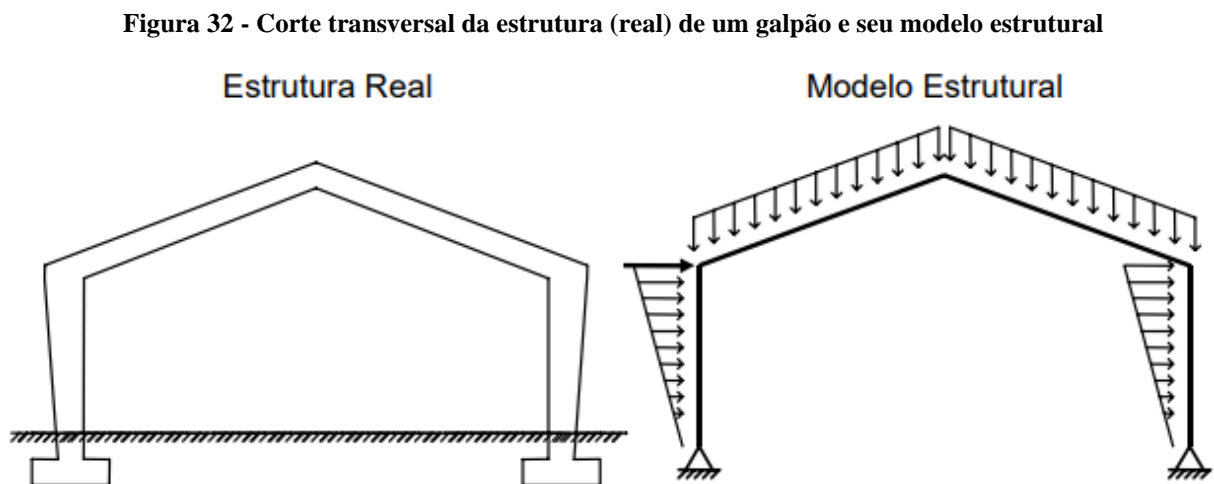
4.1.1 Modelo estrutural

O segundo nível de abstração da análise estrutural é o modelo analítico utilizado para representar matematicamente a estrutura que está sendo analisada. Esse modelo é chamado de *modelo estrutural* ou *modelo matemático* e incorpora todas as teorias e hipóteses elaboradas para descrever o comportamento da estrutura em função das diversas solicitações. Essas hipóteses são baseadas em leis físicas, tais como o equilíbrio entre forças e tensões, as relações de compatibilidade entre deslocamentos e deformações, e as leis constitutivas dos materiais que compõem a estrutura. (Martha, 2010)

Na concepção do modelo estrutural faz-se uma *idealização* do comportamento da estrutura real em que se adota uma série de hipóteses simplificadoras. Estas estão baseadas em teorias físicas e em resultados experimentais e estatísticos, e podem ser divididas nos seguintes tipos:

- hipóteses sobre a geometria do modelo;
- hipóteses sobre as condições de suporte (ligação com o meio externo, por exemplo, com o solo);
- hipóteses sobre o comportamento dos materiais;
- hipóteses sobre as solicitações que atuam sobre a estrutura (cargas de ocupação ou pressão de vento, por exemplo).

A figura (32) ilustra um exemplo de um modelo estrutural bidimensional para o pórtico de um galpão industrial.



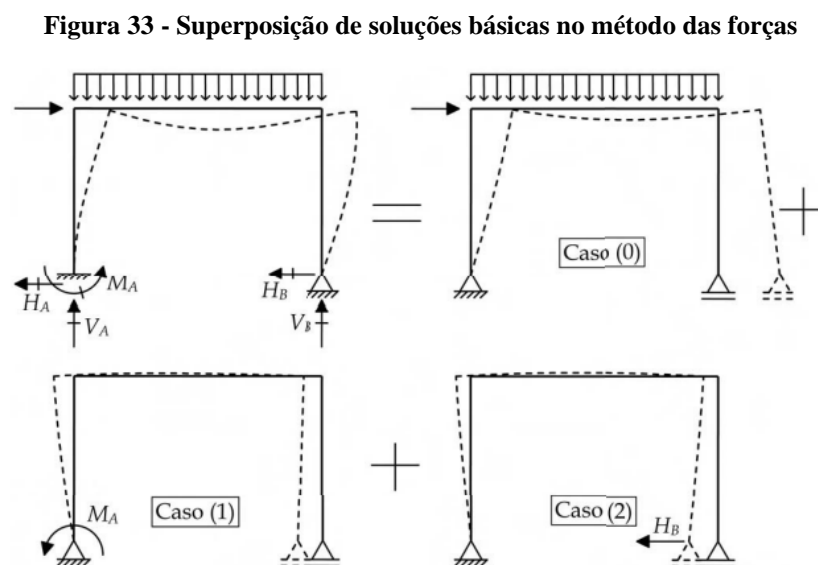
Fonte: MARTHA, L. (2010).

Observa-se na figura (32), a ligação da estrutura com o solo foi modelada por apoios que impedem os deslocamentos horizontal e vertical, mas que permitem o giro da base das colunas. No modelo da figura (32), as cargas verticais representam o peso próprio da estrutura, e as cargas horizontais representam o efeito do vento.

4.1.2 Modelo discreto

O terceiro nível de abstração utilizado na análise estrutural é o do *modelo discreto*, que é concebido dentro das metodologias de cálculo dos métodos de análise. De forma geral, os métodos de análise utilizam um conjunto de variáveis ou parâmetros para representar o comportamento de uma estrutura. Nesse nível de abstração, o comportamento analítico do modelo estrutural é substituído por um comportamento discreto, em que soluções analíticas contínuas são representadas pelos valores discretos dos parâmetros adotados. A passagem do modelo matemático para o modelo discreto é denominada *discretização*. (Martha, 2010)

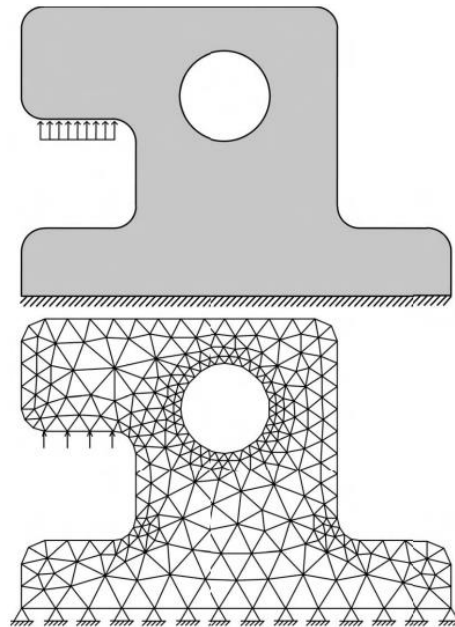
Por exemplo, a figura (33) mostra a discretização utilizada na solução de um pórtico plano pelo método das forças. A solicitação externa atuante, denominada *carregamento*, é constituída de uma força lateral (horizontal) e uma força vertical uniformemente distribuída na viga (barra horizontal). Na figura (33), as setas indicadas com um traço no meio são reações de apoio. Nesse método, os parâmetros adotados para *discretizar* a solução são forças ou momentos redundantes para garantir o equilíbrio estático da estrutura, isto é, forças e momentos associados a vínculos excedentes de uma estrutura hiperestática.



Fonte: MARTHA, L. (2010).

No caso de estruturas contínuas (que não são compostas por barras), comumente é utilizado na análise estrutural o *método dos elementos finitos* com uma formulação em deslocamentos. Nesse método, o modelo discreto é obtido pela subdivisão do domínio da estrutura em subdomínios, chamados de *elementos finitos*, com formas simples (em modelos planos, usualmente triângulos ou quadriláteros), como exemplificado na figura (34) para o modelo bidimensional de uma estrutura contínua com um furo. Essa subdivisão é denominada *malha de elementos finitos*, e os parâmetros que representam a solução discreta são valores de deslocamentos nos nós (vértices) de malha. (Martha, 2010)

Figura 34 - Discretização pelo método dos elementos finitos de uma estrutura contínua



Fonte: MARTHA, L. (2010).

Pode-se observar por esse exemplo que a obtenção do modelo discreto para estruturas contínuas é muito mais complexa do que no caso de modelos de estruturas reticuladas (pórticos, treliças ou grelhas).

Uma importante diferença entre os modelos discretos de estruturas reticuladas e de estruturas contínuas é que a discretização de uma malha de elementos finitos introduz simplificações em relação à idealização matemática feita para o comportamento da estrutura. Isso ocorre porque as funções de interpolação que definem a configuração deformada de uma malha de elementos finitos não são, em geral, compatíveis com a idealização matemática do comportamento do meio contínuo feita pela teoria da elasticidade. Dessa forma, a solução do modelo discreto de elementos finitos é uma aproximação da solução analítica da teoria da

elasticidade, ao passo que a solução do modelo discreto de uma estrutura com barras prismáticas é igual à solução analítica da mecânica dos sólidos.

4.1.3 Modelo computacional

Desde a década de 1960, o computador tem sido utilizado na análise estrutural, embora inicialmente apenas em institutos de pesquisa e universidades. Nos anos 70 essa utilização passou a ser corriqueira e, nos anos 80 e 90, com a criação de programas gráficos interativos, a análise estrutural passou a ser feita com uso de computador em praticamente todos os escritórios de cálculo estrutural e empresa de consultoria. A análise de estruturas pode ser vista atualmente como uma simulação computacional do comportamento de estruturas. (Martha, 2010)

4.2 TENSÕES PRINCIPAIS

Frequentemente, no estudo das tensões, o interesse está voltado para a determinação da maior e menor tensão, dadas as expressões de σ_x , σ_y e τ_{xy} . O estado de tensão em um dado ponto descrito por três superfícies mutuamente perpendiculares é mostrado na figura (35-a). Pode ser demonstrado por meio de transformação de coordenadas que isso é suficiente para determinar o estado de tensão em *qualquer* superfície intersectando o ponto. À medida que as dimensões do cubo da figura (35-a) se aproximam de zero, as tensões nas faces ocultas se tornam iguais e opostas àquelas sobre as faces visíveis opostas. Portanto, em geral, um estado de tensão completo é definido por nove componentes de tensão, σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} e τ_{zy} . (Nisbett, J. Budynas, R., 2011)

Para o equilíbrio, na maioria dos casos, tensões de cisalhamento transversais são iguais, portanto

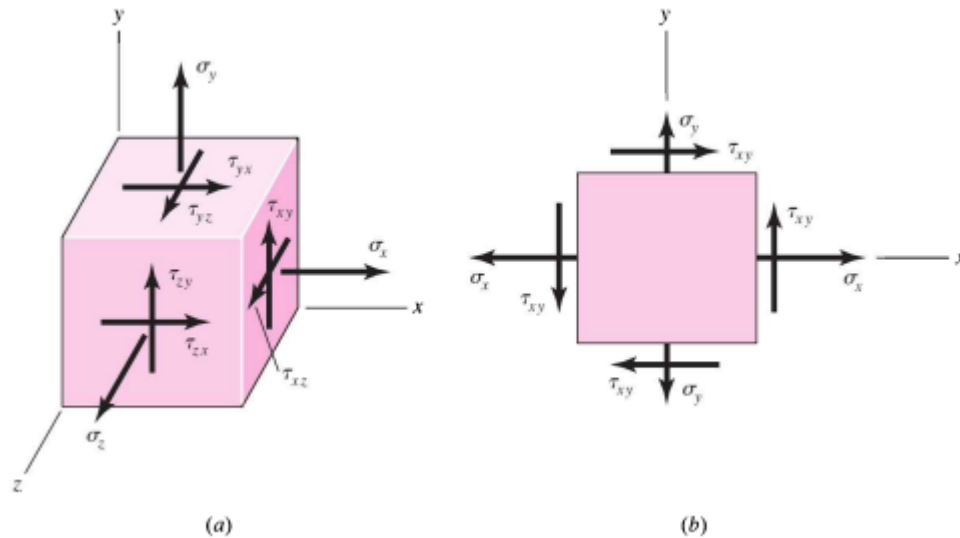
$$\tau_{yx} = \tau_{xy} \quad \tau_{zy} = \tau_{yz} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad (4.1)$$

Isso reduz o número de componentes de tensão para a maioria dos estados de tensão tridimensionais de nove para seis quantidades, σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx} .

Um estado de tensão muito comum ocorre quando as tensões em uma superfície são iguais a zero. Quando isso acontece, o estado de tensão é denominado *tensão plana*. A figura (35-b) mostra um estado de tensão plana, supondo arbitrariamente que a normal à superfície livre de tensões é a direção z tal que $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$. É importante notar que o elemento

na figura (35-b) ainda é um cubo tridimensional. Também, aqui foi suposto que as componentes de cisalhamento transversais são iguais, de modo que $\tau_{yx} = \tau_{xy}$ e $\tau_{yz} = \tau_{zy} = \tau_{xz} = \tau_{zx} = 0$.

Figura 35 - (a) Tensão tridimensional geral. (b) Tensão plana componentes de cisalhamento transversal de igual magnitude



Fonte: NISBETT, J. BUDYNAS, R. (2011).

As tensões máximas são chamadas de tensões principais. A tensão máxima e mínima é calculada conforme a Equação (4.2).

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.2)$$

Onde:

σ_1 é a tensão máxima em *MPa*;

σ_2 é a tensão mínima em *MPa*;

σ_x é a tensão normal que age no eixo x em *MPa*;

σ_y é a tensão normal que age no eixo y em *MPa*;

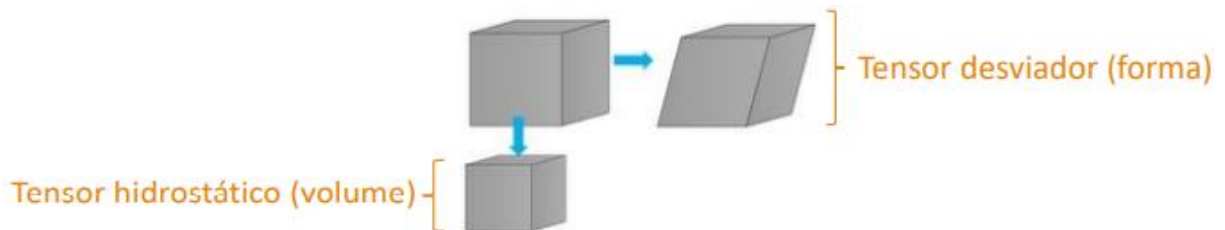
τ_{xy} é a tensão de cisalhamento que age no plano xy em *MPa*.

4.3 TENSÕES DE VON MISES

O critério de Von Mises leva em consideração os conceitos de energia de distorção de um elemento, que também pode ser interpretado como a energia necessária para que ocorra

mudança de forma em um elemento (Cury, 2015). A figura (36) mostra a deformação de um corpo quando se aplica uma tensão superior a tensão de escoamento do material.

Figura 36 - Deformação de um corpo quando aplica - se uma tensão superior a tensão de escoamento do material



Fonte: CURY, A. (2015).

Esse critério define que um elemento estrutural (dúctil) irá falhar se a energia associada à mudança de forma de um corpo, submetido a um carregamento multiaxial, ultrapassar a energia de distorção de um corpo de prova submetido a um ensaio uniaxial de tração.

A tensão equivalente de Von Mises em termos da tensão principal, pode ser calculada por meio da Equação (4.3):

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

Onde:

σ' é a tensão equivalente de Von Mises em *MPa*;

σ_1 é a tensão máxima principal em *MPa*;

σ_2 é a tensão mínima principal em *MPa*;

σ_3 é a tensão média principal em *MPa*.

Para casos de estado plano de tensão, podemos considerar a parcela de $\sigma_3 = 0$, resultando na Equação (4.4).

$$\sigma' = (\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)^{1/2} \quad (4.4)$$

Onde:

σ' é a tensão equivalente de Von Mises em *MPa*;

σ_1 é a tensão máxima principal em *MPa*;

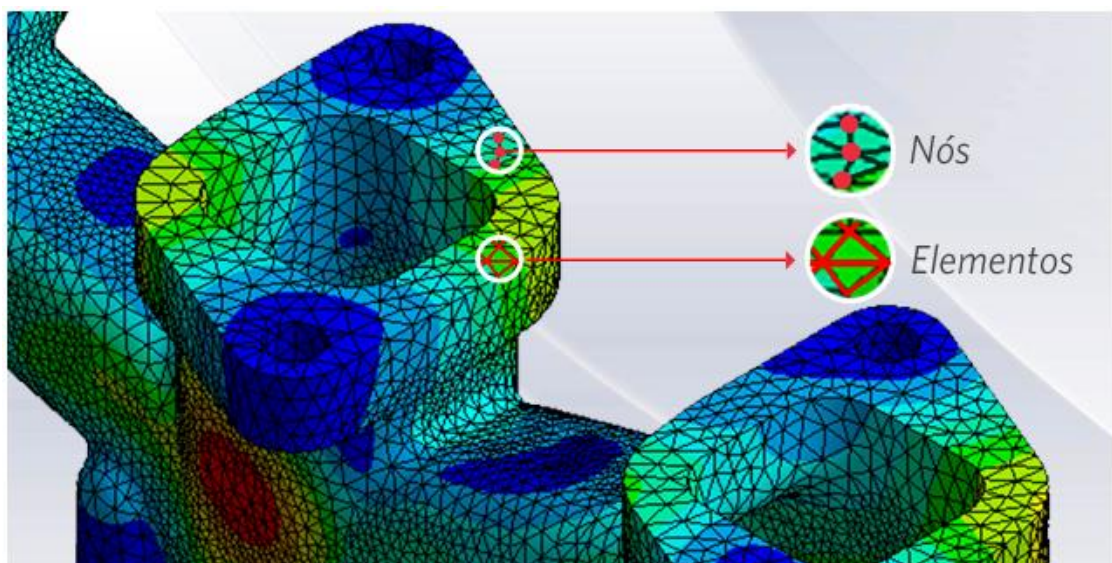
σ_2 é a tensão mínima principal em *MPa*.

4.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Para Azevedo (2003), o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas e surge, por exemplo, no estudo de edifícios, pontes, barragens, etc. Quando existe a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual proceder-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objetivo de se alcançar uma solução satisfatória, quer em termos econômicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares.

Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses itens – elementos e nós – dá-se o nome de malha. Em função dessas subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem os comportamento físico não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico. A precisão do Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha, ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise (Mirlisenna, 2016). A figura (37) representa os nós e elementos presentes em uma malha.

Figura 37 - Nós e elementos presentes em uma malha



Fonte: MIRLISENNA, G. (2016).

4.4.1 Etapas do método

Segundo Azevedo (2016), a análise pelo método de elementos finitos se divide em três etapas distintas são elas:

- *Pré-processamento*: É definido a geometria, tipo de análise, malha, propriedades dos materiais e condições de contorno.
- *Processamento*: É definido o tipo de análise desejado (utilizando equações lineares ou não lineares, e outras configurações) para obter os deslocamentos nodais.
- *Pós-processamento*: Nessa etapa de pós-processamento é obtido os resultados escolhido no processamento tais como, tensões, fluxo de calor, convergência, fatores de segurança, entre outros.

4.5 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL

Será realizado uma análise estrutural estática via software de elementos finitos da estrutura metálica sem o vidro (figura 38-a) e da estrutura metálica com o vidro (figura 38-b).

Figura 38 - (a) Estrutura metálica sem o vidro, (b) Estrutura metálica com o vidro



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

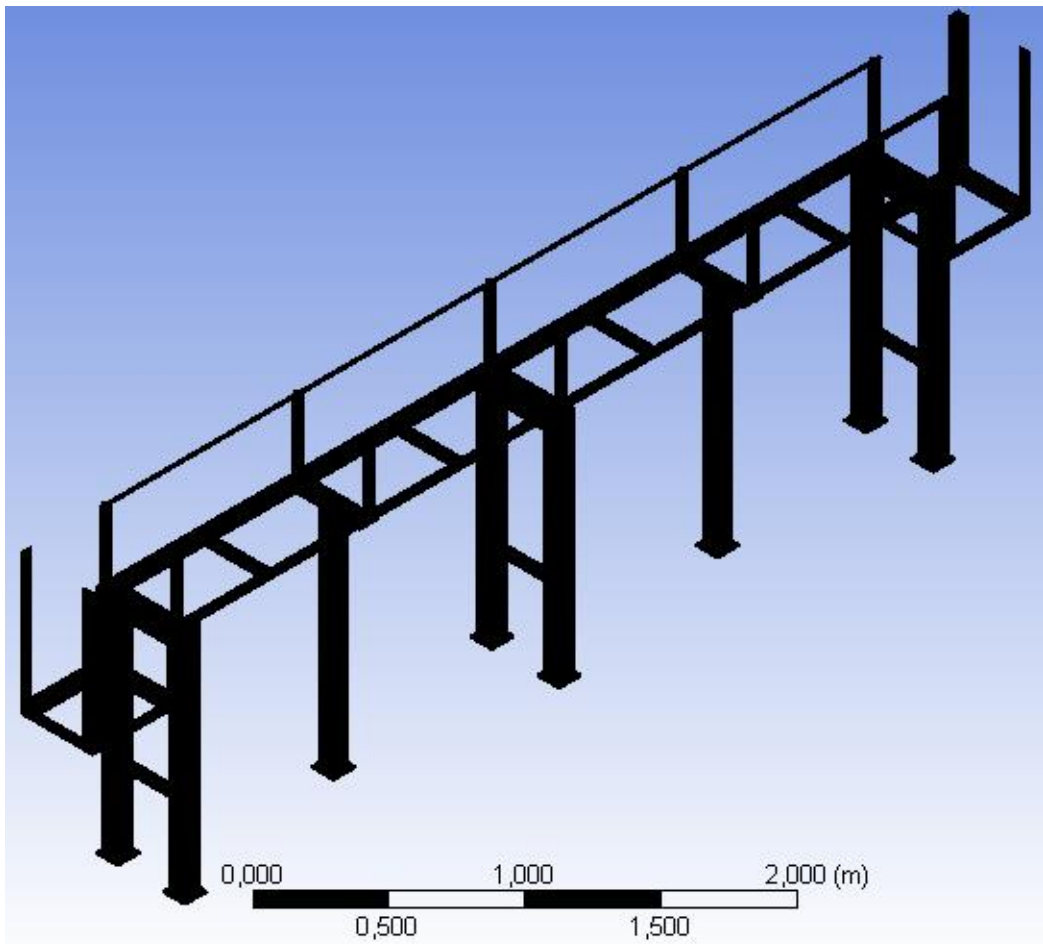
4.5.1 Estrutura metálica sem o vidro

É apresentado todos os passos utilizados desde a geração da malha até a obtenção dos resultados para a estrutura metálica sem o vidro. O material utilizado na estrutura metálica é o aço estrutural. O principal objetivo da análise estrutural da estrutura metálica é atestar a integridade dos componentes estrutural.

4.5.1.1 Geração da malha

Com o desenho obtido com o auxílio do software de CAD, é efetuado a geração da malha. Na figura (39) é ilustrada a malha gerada.

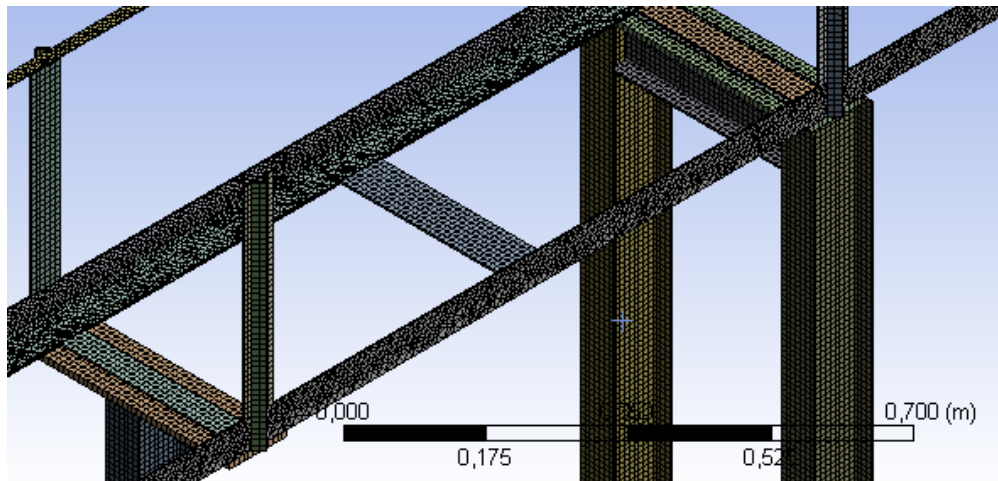
Figura 39 - Domínio discreto pelo método de elementos finitos da estrutura metálica sem o vidro



Fonte: Autoria própria

A malha da figura (39) possui 715954 nós e 224995 elementos, a malha está bem refinada. Foi realizado uma segunda malha com 650000 nós e 205000 elementos e comparou-se os resultados e deram muito próximos. Na figura (40) é mostrado a ampliação da malha.

Figura 40 - Ampliação da malha na estrutura metálica sem o vidro



Fonte: Autoria própria

4.5.1.2 Condições de contorno

Nas condições de contorno aplicada a estrutura metálica, considera-se que no “pé” de sustentação da estrutura o deslocamento nos eixos x,y e z são iguais a 0 (zero), ou seja, não sofre nenhum deslocamento. Em relação aos esforços que agem na estrutura, é utilizado a pressão decorrente da coluna d’água. A tabela (24) apresenta de forma simplificado as condições de contorno e os carregamentos aplicados na estrutura metálica

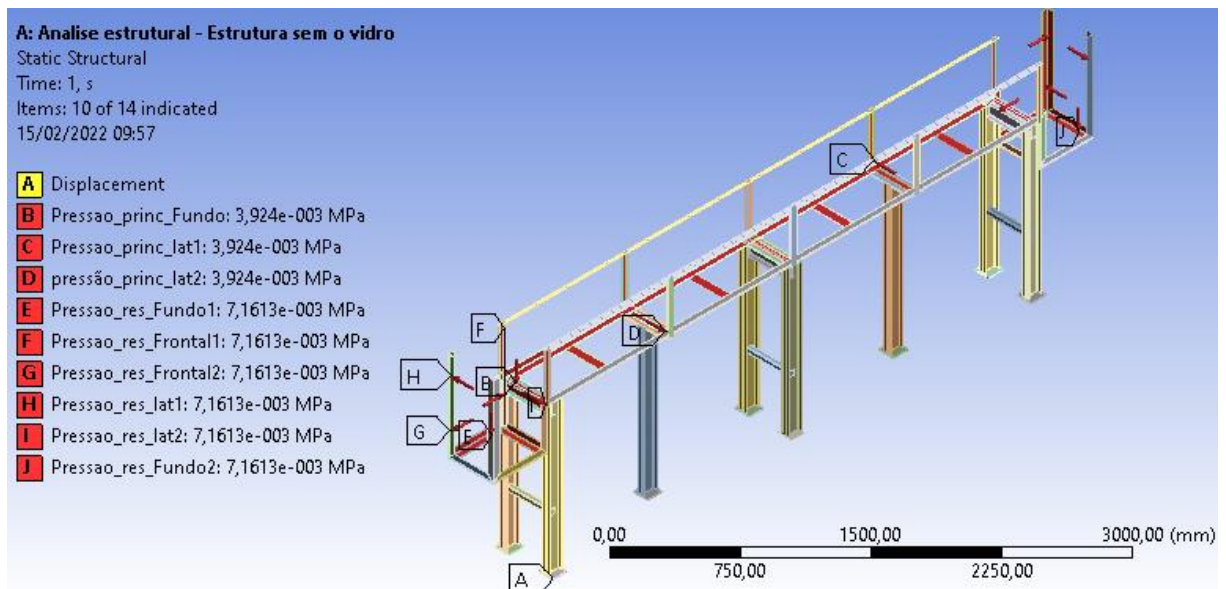
Tabela 24 - Apoio e a carga aplicados na estrutura metálica

Apoio	Deslocamento no plano x,y e z	Ponto A	0 m
	Carga	Pressao_princ_Fundo	Ponto B
Pressao_princ_lat1		Ponto C	3924 Pa
Pressao_princ_lat2		Ponto D	3924 Pa
Pressao_res_Fundo1		Ponto E	7161,3 Pa
Pressao_res_Frontal1		Ponto F	7161,3 Pa
Pressao_res_Frontal2		Ponto G	7161,3 Pa
Pressao_res_lat1		Ponto H	7161,3 Pa
Pressao_res_lat2		Ponto I	7161,3 Pa
Pressao_res_Fundo2		Ponto J	7161,3 Pa
Pressao_res_Frontal3		Ponto K	7161,3 Pa
Pressao_res_Frontal4		Ponto L	7161,3 Pa
Pressao_res_lat3		Ponto M	7161,3 Pa
Pressao_res_lat4		Ponto N	7161,3 Pa

Fonte: Autoria própria

Na figura (41) é ilustrado as cargas aplicadas na estrutura metálica dos pontos B até N, todavia, observa-se que as cargas dos pontos denominados de K, L, M e N, não aparece a letra indicando, contudo, os pontos K e L são iguais aos pontos F e G, enquanto, que os pontos M e N são iguais ao H e I.

Figura 41 - Apoio restritivo e as cargas aplicadas na estrutura metálica sem o vidro



Fonte: Autoria própria

De acordo com a figura (41), dar a entender que a restrição de deslocamento (assinalado pela letra A) está aplicado em apenas um suporte, no entanto, é aplicado essa restrição em todos os suportes que estão em contato com o solo.

4.5.1.3 Solução da simulação

A partir da aplicação das restrições de apoio e das cargas ao qual a estrutura metálica sem o vidro está submetida, é necessário escolher os esforços, no qual, deseja-se obter na simulação. Os esforços que são desejados na simulação são os seguintes:

- ✓ Deformação total e
- ✓ Tensões equivalentes (Von Mises)

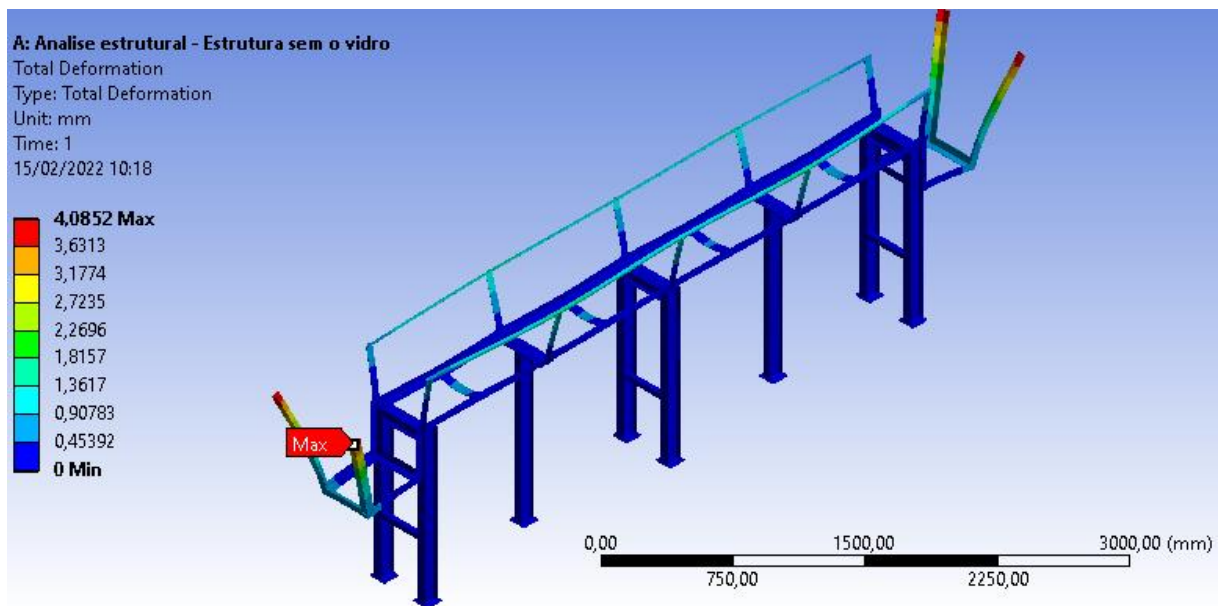
4.5.1.4 Resultados e discussões

Como dito que os esforços desejados são as deformações totais e as tensões de Von Mises, dessa maneira, estes serão detalhados.

4.5.1.4.1 Deformação total

Na figura (42) é ilustrado a deformação total ao longo da estrutura metálica sem o vidro.

Figura 42 - Deformação total na estrutura metálica sem o vidro



Fonte: Autoria própria

Percebe-se que a deformação máxima acontece na parte designada de reservatório (1 e 2), mais especificamente na parte superior do mesmo. Já era esperado em decorrência da estrutura metálica se comportar como uma viga em balanço. Como a pressão que age nos reservatórios são maiores, dessa maneira, as deformações tendem a serem superiores ao segmento designado de canal principal.

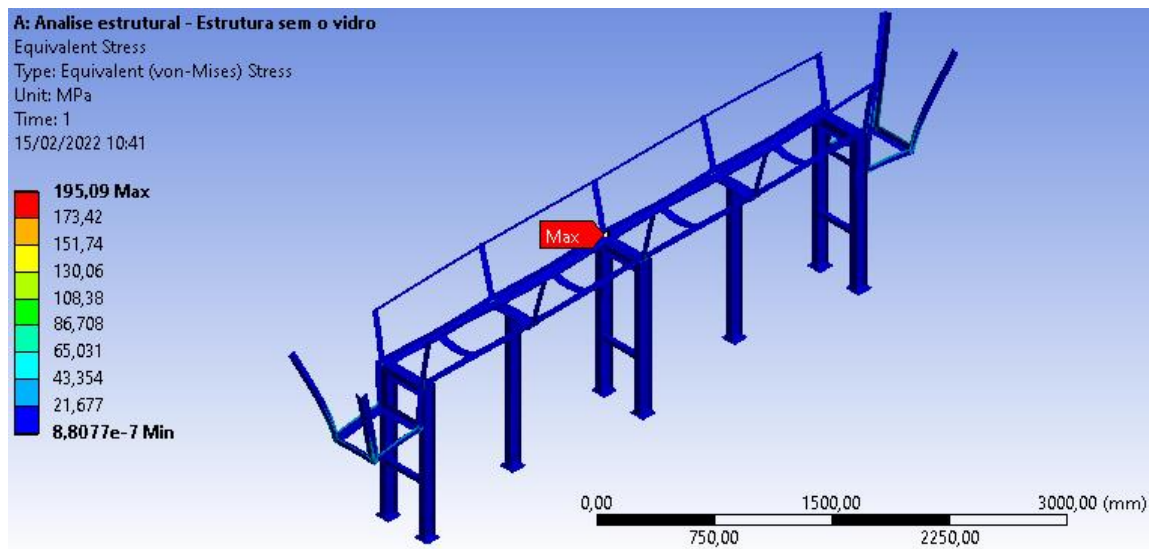
A situação mais crítica ao longo de toda a estrutura metálica é quando ocorre uma deformação máxima de aproximadamente de 4,08 mm (parte superior dos reservatórios), todavia, como a estrutura metálica é feita de aço estrutural, dessa forma, essa deformação é consideravelmente pequena.

Em relação ao segmento designado de canal principal, é notório que a deformação nessa região é inferior à dos reservatórios (1 e 2), porém, vale destacar que as deformações maiores acontecem na parte superior das mesmas. Em virtude, desta se comportar como uma viga em balanço.

4.5.1.4.2 Tensão equivalente (Von Mises)

Na figura (43) é ilustrado a tensão equivalente (Von Mises) ao longo da estrutura metálica sem o vidro.

Figura 43 - Tensão equivalente (Von Mises) ao longo da estrutura metálica sem o vidro



Fonte: Autoria própria

A tensão de Von Mises máxima é de aproximadamente $195,09 \text{ MPa}$ e encontra-se na parte designada de canal principal, como pode ser visto na figura (43), sendo assim, conclui-se que a estrutura metálica não irá falhar, por conta, do material utilizado na estrutura metálica ser o aço estrutural com tensão de escoamento de 250 MPa .

É notório que boa parte da estrutura metálica possui tensão de Von Mises relativamente baixas (predominância da cor azul).

4.5.2 Estrutura metálica com o vidro

Dar mesma maneira que foi efetuado uma análise estrutural para a estrutura metálica sem o vidro, será executado para a estrutura metálica com o vidro.

4.5.2.1 Material

A parte metálica é aço estrutural, enquanto, que a parte onde o fluido escoar é vidro temperado, dessa forma, é necessário adicionar esse material com suas respectivas propriedades e aplicar na peça desejado.

A tabela (25) mostra as propriedades que foram adicionados para o vidro temperado, estas foram extraídas da tabela (1).

Tabela 25 - Propriedades do vidro utilizadas no software Workbench (Ansys)

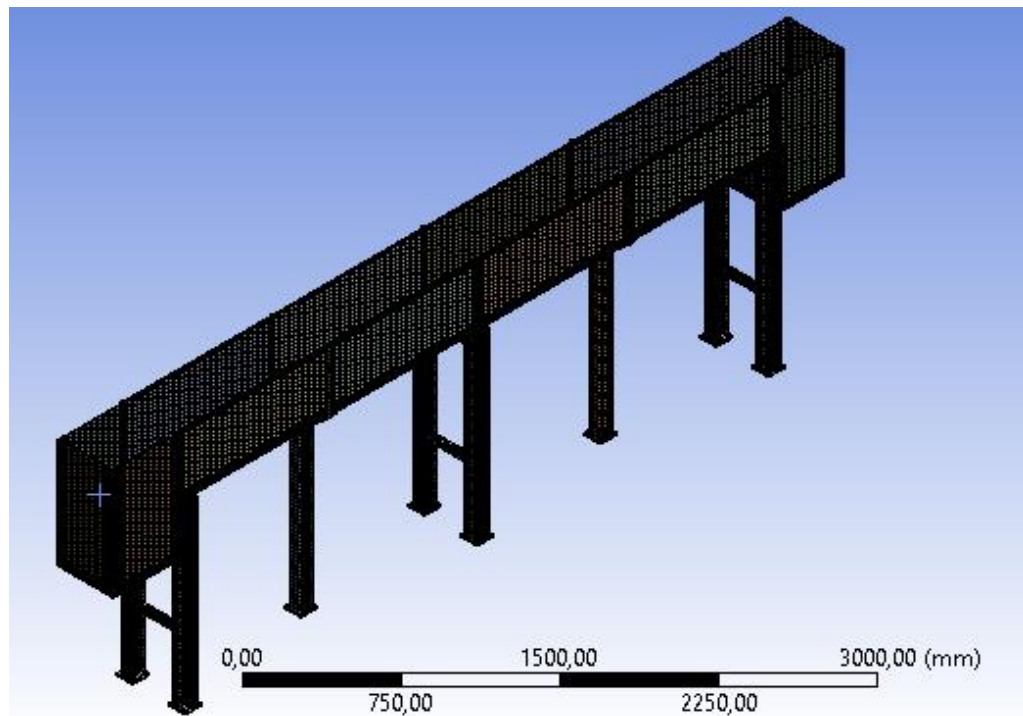
Propriedades	Valor
Densidade	2500 kg/m ³
Módulo de Young	70 GPa
Coefficiente de Poisson	0,2
Resistência a Tração	20 MPa
Resistência a compressão	400 MPa

Fonte: Autoria própria

4.5.2.2 Geração da malha

A malha da figura (44) possui 271622 e 61063 elementos, a malha está bem refinada. Foi realizado uma segunda malha com 222678 e 54567 elementos e a partir comparou-se os valores obtidos e deram muito próximos. Na figura (44) é ilustrada a malha gerada da estrutura metálica com o vidro.

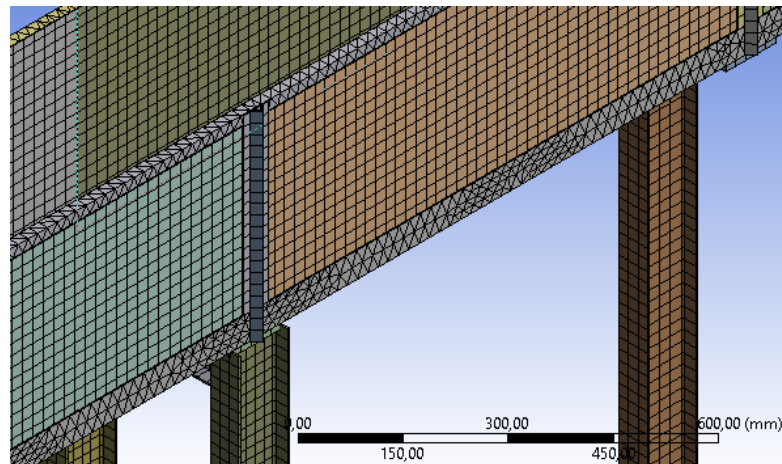
Figura 44 - Geração da malha da estrutura metálica com o vidro



Fonte: Autoria própria

Por meio da figura (44) não é possível ver com detalhes os elementos que compõem a malha, sendo assim, a figura (45) mostra essa malha ampliada.

Figura 45 - Ampliação da malha na estrutura metálica com o vidro

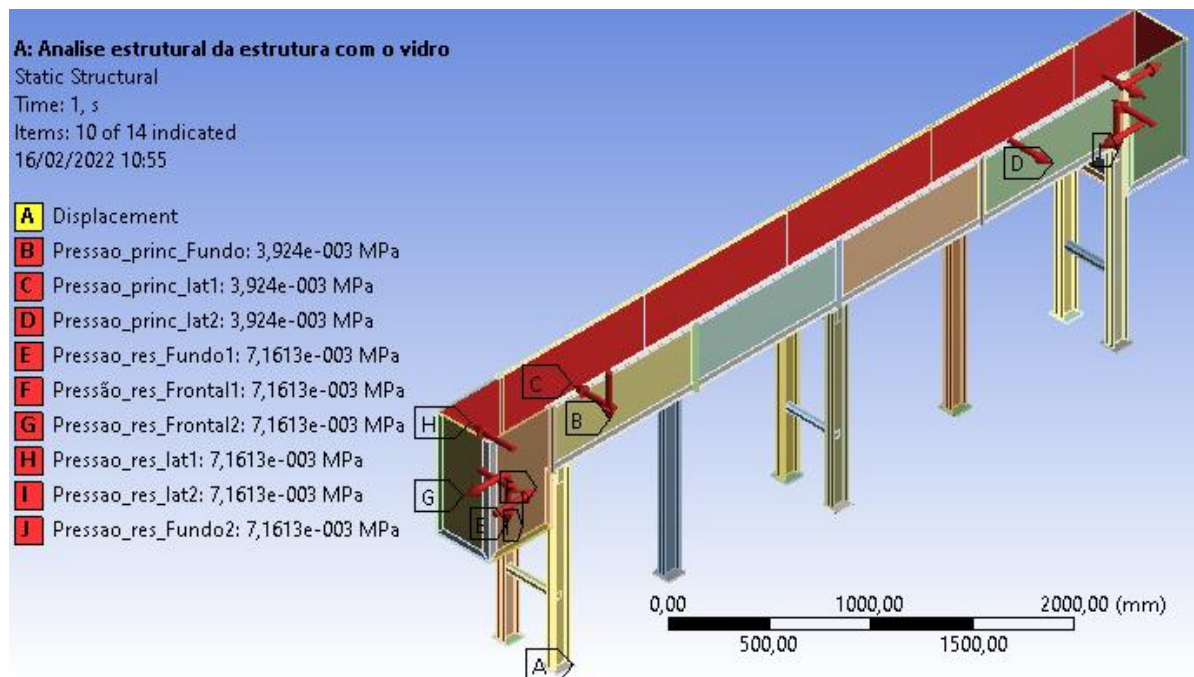


Fonte: Autoria própria

4.5.2.3 Condição de contorno

São aplicadas as mesmas restrições de deslocamento e cargas utilizadas na estrutura metálica com o vidro. Na figura (46) é ilustrada as restrições e as cargas aplicadas na estrutura metálica com o vidro.

Figura 46 - Apoio restritivo e as cargas aplicadas na estrutura metálica com o vidro



Fonte: Autoria própria

4.5.2.4 Solução da simulação

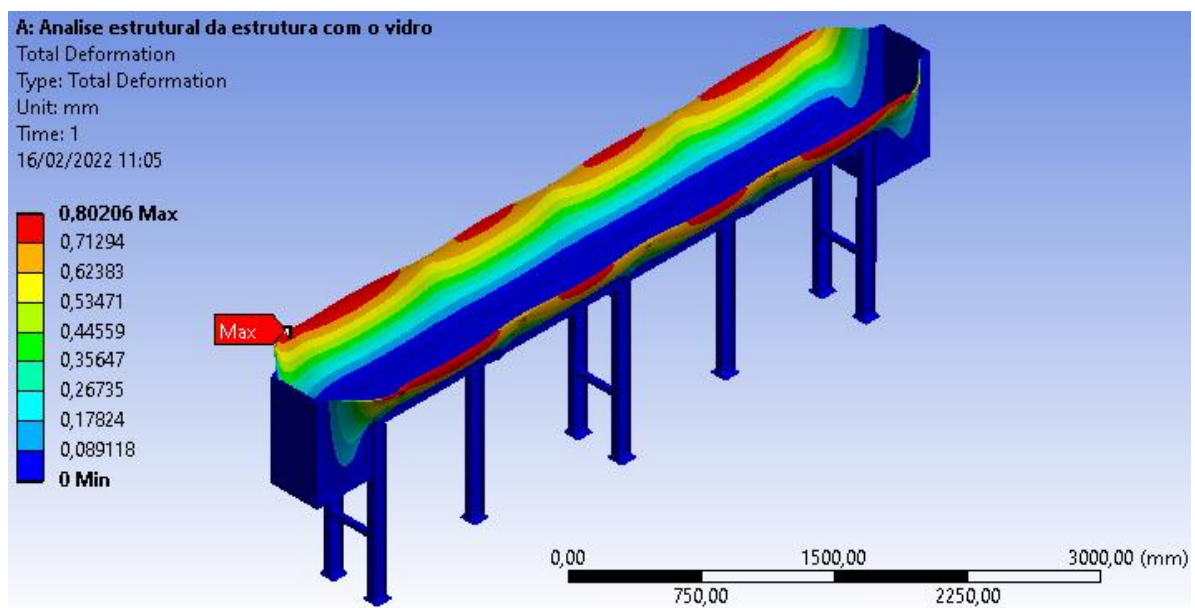
São obtidos os mesmos esforços (deformação total e tensão de Von Mises) da estrutura metálica sem o vidro.

4.5.2.5 Resultados e discussões

4.5.2.5.1 Deformação total

Na figura (47) é ilustrada a deformação total ao longo da estrutura metálica com o vidro.

Figura 47 - Deformação total ao longo da estrutura metálica com o vidro



Fonte: Autoria própria

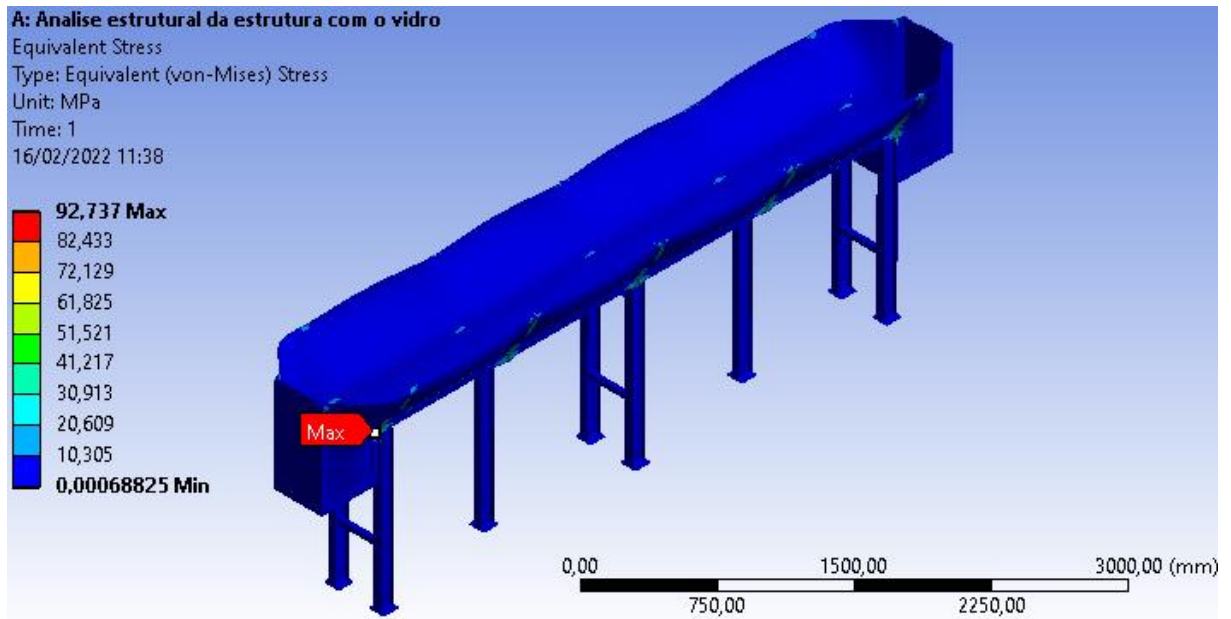
Observa-se que a deformação máxima acontece no segmento designado de canal principal, que é a parte no qual concentra-se grande parte do volume de água, mais especificamente nos vidros laterais na parte superior como pode ser visto na figura (47). A deformação máxima é aproximadamente igual a 0,80mm.

As maiores deformações aparecem na parte superior, já era esperado em virtude da estrutura como um todo se comportar como uma viga em balanço, no qual, a base inferior dos vidros laterais está apoiada na estrutura metálica, enquanto, a parte superior está livre.

4.5.2.5.2 Tensão equivalente (Von Mises)

Na figura (48) é mostrado a tensão de Von Mises ao longo da estrutura metálica com o vidro.

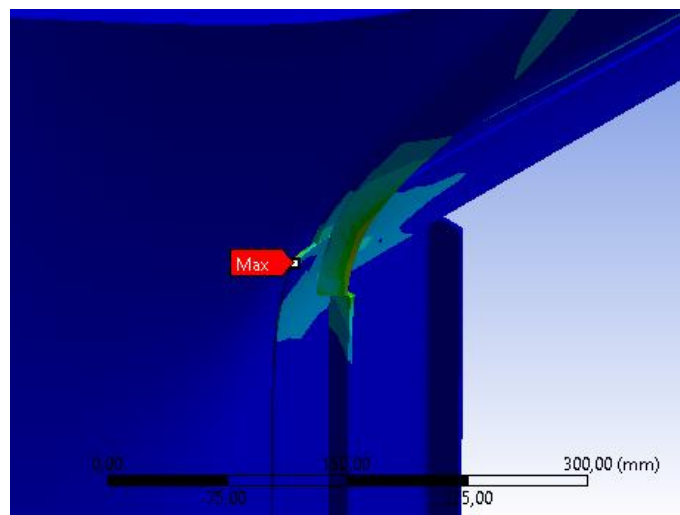
Figura 48 - Tensão de Von Mises ao longo da estrutura metálica com o vidro



Fonte: Autoria própria

É notório que a tensão de Von Mises máxima acontece em um região entre o segmento canal principal e o reservatório (1 e 2). A tensão de Von Mises máxima é aproximadamente igual a 92,7 MPa, para visualizar este ponto é aproximado o máximo para identificar onde está esse ponto. Na figura (49) é mostrado esse ponto máximo.

Figura 49 - Ponto onde a tensão de Von Mises é máxima



Fonte: Autoria própria

Essa tensão de Von Mises máxima acontece na estrutura metálica e não no vidro como pode ser visto na figura (49). Como esta tensão é aproximadamente igual a 92,7 MPa e a tensão de escoamento do aço estrutural é 250 MPa, sendo assim, a estrutura metálica não irá falhar.

Em relação a estrutura vidro é notório que há predominância da cor azul com tensões de Von Mises abaixo de 10 MPa, dessa maneira, como a tensão de ruptura do vidro temperado é 120 MPa, o vidro não irá romper.

5. CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo em canais abertos é de fundamental importância, em virtude, de muitos fenômenos observado na natureza, como o regime de escoamentos em rios, canais e cursos d'água naturais, que acontece nesse tipo de canal passarem despercebido por muitos indivíduos, porém por trás desses fenômenos hidráulicos tem leis físicas que governam estes, e a engenharia entra para estudar e controlar variáveis como velocidade de escoamento, regime, pressão, vazão entre outros com o objetivo de estudar o efeito de cada parâmetro no movimento do fluido, além de buscar os parâmetros ideais para a aplicação desejada.

Com a bancada hidráulica disponível no laboratório de engenharia mecânica (LABMEC), está auxiliará os docentes que ministram a disciplina de mecânica dos fluídos no estudo prático, além da mesma poder ser utilizada no desenvolvimentos de projetos. De forma, a concretizar melhor o entendimento dos fenômenos hidráulicos visto na teoria, dessa maneira, preparará o discente para as possíveis situações no qual encontrará quando estiver atuando na área.

A bancada didática para o estudo do escoamento em canal aberto possui dimensões razoáveis sendo possível realizar testes com objetos de dimensões consideráveis, de forma a se aproximar mais da realidade. A partir do momento que esta estiver disponível no LABMEC aproximará o discente do laboratório, isto aumentará o interesse do aluno pela área de mecânica dos fluídos, conseqüentemente, aumentarão as pesquisas nessa área.

O cálculo analítico realizado para estrutura vidro foi possível atestar a integridade dessa estrutura quando submetido as cargas que são derivadas da pressão exercida pela coluna d'água.

Na simulação numérica da estrutura metálica com o vidro e sem o vidro, atestou-se a integridade estrutural destas. Na estrutura metálica sem o vidro, observou-se que a tensão de Von Mises é inferior a tensão de escoamento do aço estrutural (250 MPa), sendo assim, esta é segura e em relação a estrutura metálica com o vidro notou-se que a tensão de Von Mises é muito inferior a tensão de ruptura do vidro temperado (120 MPa), ou seja, o vidro não irá falhar.

Dessa forma, o objetivo principal do presente trabalho foi alcançado que era desenvolver o projeto estrutural de uma bancada didática de um canal d'água multifuncional, além disso, através da análise estrutural atestar a segurança da estrutura metálica com e, sem o vidro.

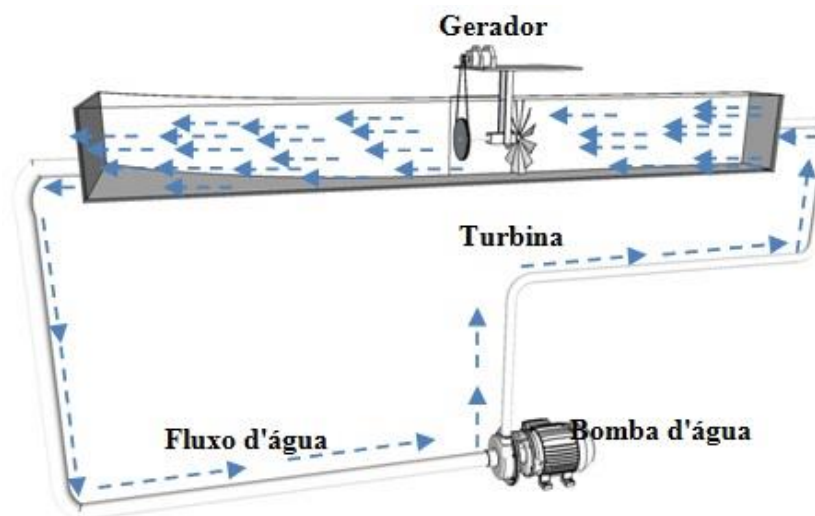
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em virtude da considerável capacidade de armazenamento da seção de escoamento, em decorrência, das dimensões da bancada seria interessante fazer uma adaptação na bancada para o estudo de associação de bombas hidráulicas e uma outra adaptação para o estudo de turbinas hidrocínética, fazendo essas modificações pode-se afirmar que esta seria do tipo 3 em 1, sendo possível auxiliar nos seguintes estudos:

- Estudos dos fenômenos hidráulicos que acontecem em canal aberto
- Estudo de associação de bomba hidráulica
- Estudo dos escoamentos em turbinas hidrocínéticas

Dessa maneira, a bancada iria auxiliar o docente na parte prática do que é ministrado na área da mecânica dos fluidos e turbomáquinas. A figura (50) exemplifica uma possível adaptação para o estudo de turbina hidrocínética.

Figura 50 - Ilustração do sistema hidrocínético utilizada na bancada



Fonte: FIGUEREDO, S.; SILVA, T. e VAZ, P. (2013).

Foi realizado apenas uma análise estrutural da parte metálica com o vidro e sem o vidro, sendo assim, é interessante executar uma análise Fluidodinâmica Computacional (CFD) da seção de escoamento do fluido. A colmeia não foi escolhida, dessa forma, é interessante realizar os cálculos de maneira a selecionar a colmeia adequada para o canal de escoamento.

As peças do desenho da bancada hidráulica não foram detalhadas, foi cotado apenas as dimensões totais, desta forma é recomendável que seja feito o detalhamento de todas as peças.

REFERÊNCIAS

- ALGETEC. **Bancada didática para estudo do escoamento em canal aberto**. Disponível em: <https://www.algetec.com.br/br/bancada-didatica-para-estudo-do-escoamento-em-canal-aberto>. Acesso em: 30/10/2021.
- ANDERLE, B. P. **Dimensionamento de uma bancada didática de Hidráulica**. 2017. 64 p., (TCC) – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, Horizontina-RS, 2017.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1ª edição. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Portugal, 2003.
- AZEVEDO, D. F. O. **Análise estrutural com Ansys Workbench: Static Structural**. Mogi das Cruzes-SP, 2016.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.
- BECHTOLD, I. H.; BRANCO, N. S. **Física Básica C-II**. 2ª edição. Florianópolis, 2011.
- BUDYNAS, R.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8ª edição. Editora McGrawHill, 2008.
- CERQUEIRA, W. **Rio Amazonas**. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/brasil/rio-amazonas.htm>. Acesso em: 15/12/2021.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações**. Editora McGrawHill, 2007.
- CURY, A. A. **Critérios de falha**. Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional, 2015.
- DOLCE, O.; POMPEO, J. N. **Fundamentos de Matemática Elementar**. 5ª edição. Editora ATUAL, 2014.
- FERRAZ, D. **Engenheiro do Aço: Estruturas de aço**. Disponível em: <https://www.engenheirodoaco.com.br/2018/03/05/lendo-e-entendendo-uma-tabela-de-perfis-de-acos-estruturais/>. Acesso em: 31/10/2021.
- FIGUEIREDO, S.; SILVA, T.; VAZ, J. R. P. **Protótipo Hidrocinético para Geração de Energia Elétrica Aplicado à Educação em Engenharia**. RESEARCHGATE, 2013.

Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ilustracao-do-sistema-hidrocinetico-utilizado-na-bancada-A-construcao-da_fig1_273222799. Acesso em 29/12/2021.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 6ª Edição. Editora Érica, 2013.

FONTANA, A. R. L. **Projeto e Análise do Fluxo de um Túnel de água circulante horizontal**. (TCC) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Tucuruí-Pa, 2019.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8ª edição. Editora LTC, 2014

GUILHERME, J. **Análise de Tensões**. ENSUS, 2016. Disponível em: <https://ensus.com.br/analise-de-tensoes/>. Acesso em 23/12/2021.

HIBELLER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7ª edição. Editora Pearson Education, 2010.

JUNIOR, J. R. N. **Projeto de uma bancada didática para determinar o número de Reynolds**. 2018. 74 p., (TCC) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco-PR, 2018.

GIORDANI, R. E.; JURACH, P. J. RODRIGUES, M. J. **Bancada Didática de Pneumática**. CEFET. Rio Grande do Sul, 2003.

LIBOS, I. L. S. **Análise estrutural e de viabilidade de fachada em vidro estrutural**. (TCC) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2017.

LOPES, M. S. **Montagem de um canal retangular hidráulico para o estudo experimental da dispersão de um traçador conservativo**. 2016. 70 p., Tese (Mestrado) – Curso de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira-SP, 2016.

LOPEZ, R. H. **ECV5220: Estruturas estaticamente indeterminadas**. Brasil, 2018.

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas**. Editora Elsevier, 2010.

MANCHESTER SCHOLL OF ENGINEER. **Escoamento Laminar e Escoamento Turbulento**. Disponível em: http://meusite.mackenzie.com.br/eangelo/Exp_Reynolds.pdf. Acesso em: 15/12/2021.

MÉRITO COMERCIAL. **Bomba Monoestágio Thebe Th-16 1,5 Cv Monofásica 110v/220v**. Disponível em: <https://www.meritocomercial.com.br/bomba-monoestagio-thebe-th-16-15-cv->

monofasica-110v220v-5001001001497-

p1047549?tsid=42&pht=21031544106926877&gclid=Cj0KCQiA2sqOBhCGARIsAPuPK0hIB86WXzslGyvl0HRkxeKULRAINJLV1Brc_MNdmVJeO7iQ0o92P_oaArDLEALw_wcB.

Acesso em: 01/11/2021.

MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é?**. ESSS, 2016. Disponível em: Método dos Elementos Finitos: o que é? (esss.co). Acesso em: 23/12/2021.

PEREIRA, Sónia Marisa M. **Estudo do Comportamento Estrutural de Fachadas em Vidro**. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2012. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

SHOPTIME. **Motobomba Centrífuga Monoestágio Trifásica 1,5 Cv 220/380v Schneider**.

Disponível em:

https://www.shoptime.com.br/produto/3050835284?epar=bp_pl_dr_go_sscasaeconst_geral_gmv&opn=GOOGLEXML&WT.srch=1&epar=bp_pl_dr_go_sscasaeconst_geral_gmv&utm_medium=buscappc&utm_source=google&utm_campaign=marca:shop%3Bmidia:buscappc%3Bformato:pla%3Bsubformato:dra%3Bidcampanha:sscasaeconst_geral_gmv&gclid=Cj0KCQiA2sqOBhCGARIsAPuPK0heeEeVn9IpFojFfGvjQ8-jOZ1NSwpeh7mHJphH0zmVrA0uwrAQ_MMaAkIdEALw_wcB. Acesso em 05/11/2011.

SILVA, J. P. V. S. **Vidro Estrutural: Caracterização do material e Estudo de caso**. (TCC) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB

VAZ, L. E. **Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Editora Elsevier, 2011.

APÊNDICE A – Detalhamento do dimensionamento

3.4 MEMORIAL DE CÁLCULO

3.4.1 Canal principal

3.4.1.1 Volume

$$V_{canal_principal} = a \cdot b \cdot c \rightarrow V_{canal_principal} = 0,4m \cdot 0,35m \cdot 4m \cdot \left(\frac{1000L}{1m^3}\right)$$

$$V_{canal_principal} = 560 L$$

3.4.1.2 Vidro da base do canal principal

3.4.1.2.1 Força exercida pela água

$$P_{H_2O} = P_{atm} + \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{H_2O} \rightarrow P_{H_2O} = \gamma_{H_2O} \cdot h_{H_2O}$$

$$F_{H_2O} = P_{H_2O} \cdot A \rightarrow F_{H_2O} = (\gamma_{H_2O} \cdot h_{H_2O}) \cdot (b \cdot c_o)$$

$$F_{H_2O} = \frac{9810N \cdot 0,4m}{m^3} \cdot (0,35m \cdot 1m) \rightarrow F_{H_2O} = 1373,40 N$$

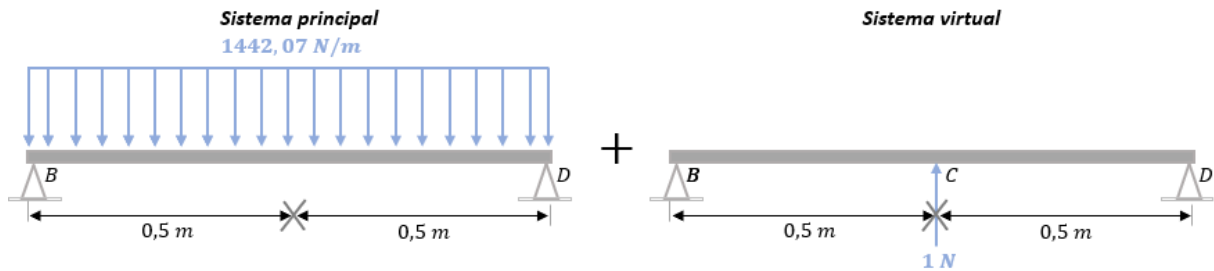
3.4.1.2.2 Força peso do vidro

$$m_{vidro} = \rho_{vidro} \cdot V_{vidro} \rightarrow m_{vidro} = \rho_{vidro} \cdot (b \cdot c_o \cdot e)$$

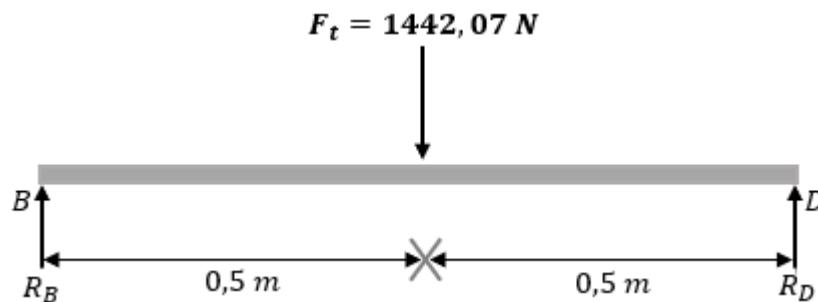
$$F_{vidro} = m_{vidro} \cdot g \rightarrow F_{vidro} = [\rho_{vidro} \cdot (b \cdot c_o \cdot e)] \cdot g$$

$$F_{vidro} = \frac{2500 kg}{m^3} \cdot (0,35m \cdot 1m \cdot 0,008m) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \rightarrow F_{vidro} = 68,67 N$$

3.4.1.2.3 Reações de apoio



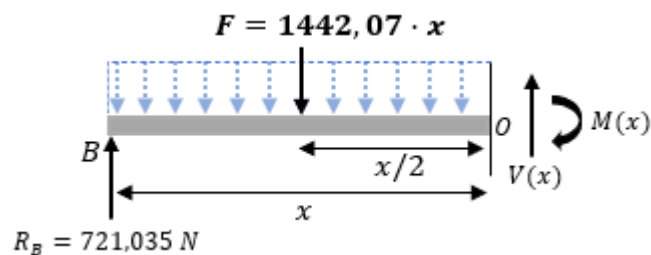
➤ Para o sistema principal (Caso 0)



$$\curvearrowleft + \sum M_B = 0; -1442,07 \text{ N} \cdot 0,5 \text{ m} + R_D \cdot 1 \text{ m} = 0 \rightarrow R_D = 721,035 \text{ N}$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0; R_B - 1442,07 \text{ N} + 721,035 \text{ N} = 0 \rightarrow R_B = 721,035 \text{ N}$$

- Aplicando o “corte imaginário” na seção, é preciso aplicar apenas um corte, em virtude, do carregamento ser uniforme ao longo da viga.

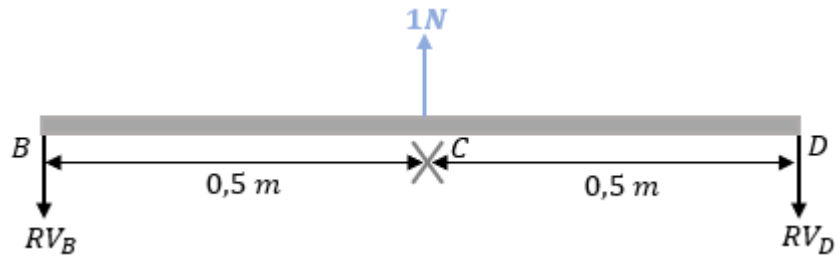


$$\curvearrowleft + \sum M_O = 0; -721,35 \cdot x + 1442,07 \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2}\right) - M(x) = 0$$

$$M^{(1)} = M^{(2)} = 721,035 \cdot x^2 - 721,035 \cdot x$$

➤ Para o sistema virtual (Caso 1)

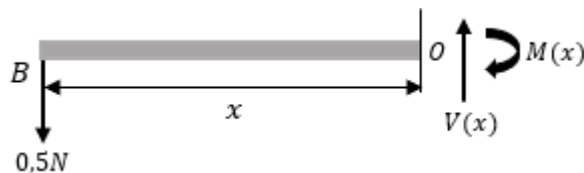
No sistema virtual é aplicada uma carga unitária (1 N) no ponto C, que é o procedimento a ser adotado na resolução de uma viga hiperestática utilizando o método das forças



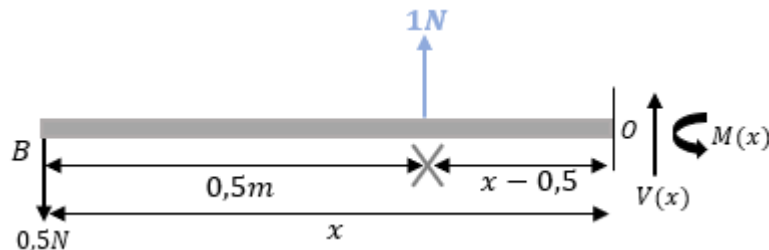
$$\curvearrowright + \sum M_B = 0; 1N \cdot 0,5m - RV_D \cdot 1m = 0 \rightarrow RV_D = 0,5 N$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0; -RV_B + 1 - RV_D = 0 \rightarrow RV_B = 0,5 N$$

- É necessário aplicar dois “cortes imaginários”, um antes e outro depois da força unitária



$$\curvearrowright + \sum M_O = 0; 0,5 \cdot x - M(x) = 0 \rightarrow \bar{M}^{(1)} = 0,5 \cdot x$$



$$\curvearrowright + \sum M_O = 0; 0,5 \cdot x - 1 \cdot (x - 0,5) + M(x) = 0 \rightarrow \bar{M}^{(2)} = 0,5 \cdot x - 0,5$$

- Determinando δ_{10}

$$\delta_{10} = \int_0^{0,5} \left(\frac{M^{(1)} \cdot \bar{M}^{(1)}}{EI} \right) dx + \int_{0,5}^{0,5} \left(\frac{M^{(2)} \cdot \bar{M}^{(2)}}{EI} \right) dx$$

$$\delta_{10} = \frac{1}{EI} \int_0^{0,5} (721,035x^2 - 721,035x) \cdot (0,5x) dx + \frac{1}{EI} \int_{0,5}^{0,5} (721,035x^2 - 721,035x) \cdot (0,5x - 0,5) dx$$

$$\delta_{10} = \frac{1}{EI} \cdot (-9,388476563)$$

- Determinando δ_{11}

$$\delta_{11} = \int_0^{0,5} \left(\frac{\bar{M}^{(1)}}{EI} \right)^2 dx + \int_{0,5}^{1,0} \left(\frac{\bar{M}^{(2)}}{EI} \right)^2 dx$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \int_0^{0,5} (0,5x)^2 dx + \frac{1}{EI} \int_{0,5}^{1,0} (0,5x - 0,5)^2 dx$$

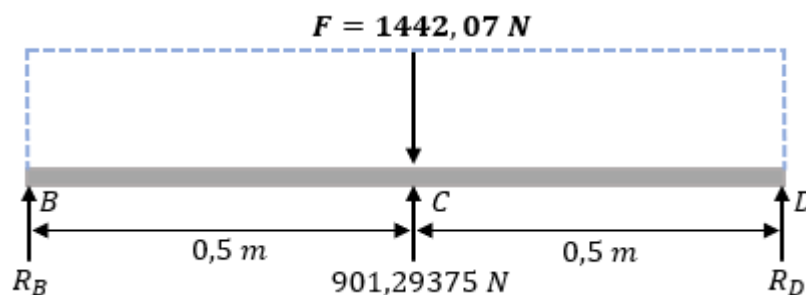
$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \cdot (0,01041666667)$$

- Determinando a Reação no ponto C

$$\delta_{10} + R_C \cdot \delta_{11} = 0$$

$$\frac{1}{EI} \cdot -9,388476563 + R_C \cdot \frac{1}{EI} \cdot 0,01041666667 = 0 \rightarrow R_C \cong 901,29375 \text{ N}$$

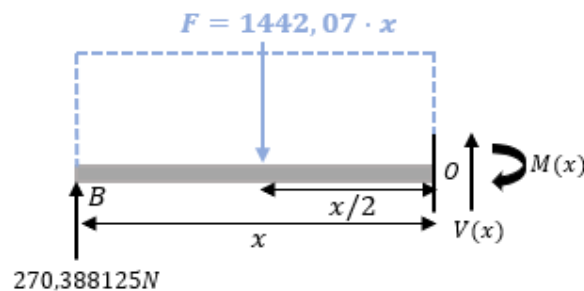
- Determinando as reações nos pontos B e D



$$\curvearrowleft \sum M_B = 0; (-1442,07 \text{ N} + 901,29375 \text{ N}) \cdot 0,5 \text{ m} + R_D \cdot 1 \text{ m} \rightarrow R_D = 270,388125 \text{ N}$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0; R_B - 1442,07 \text{ N} + 901,29375 \text{ N} + R_D = 0 \rightarrow R_B = 270,388125 \text{ N}$$

- Como a força encontra-se concentrada no meio da viga de forma simétrica, dessa forma, é necessário aplicar apenas um "corte imaginário".



$$+\uparrow \sum F_y = 0; 270,388125 - 1442,07 \cdot x + V(x) = 0$$

$$V(x) = 1442,07 \cdot x - 270,388125 \rightarrow V_{m\acute{a}x}(0,5) = 450,646875 \text{ N}$$

$$\curvearrowleft + \sum M_O = 0; -270,388125 \cdot x + 1442,07 \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2}\right) - M(x) = 0$$

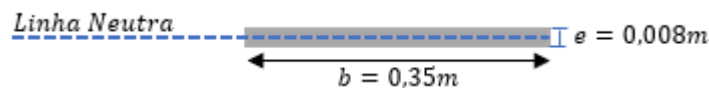
$$M(x) = 721,035 \cdot x^2 - 270,388125 \cdot x \rightarrow M_{m\acute{a}x}(0,5) \cong 45,06 \text{ N} \cdot \text{m}$$

3.4.1.2.4 Tensão de flexão

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_F \cdot c_e}{I} \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_F \cdot \left(\frac{e}{2}\right)}{\left(\frac{b \cdot e^3}{12}\right)} \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot M_F}{b \cdot e^2} \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot 45,06 \text{ N} \cdot \text{m}}{0,35\text{m} \cdot (0,008\text{m})^2}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} \cong 12,07 \text{ MPa}$$

3.4.1.2.5 Tensão de cisalhamento



$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot Q}{I \cdot t} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot \left[\left(\frac{e}{4}\right) \cdot \left(\frac{e}{2} \cdot b\right)\right]}{\left(\frac{b \cdot e^3}{12}\right) \cdot b} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = \frac{1,5 \cdot V_{m\acute{a}x}}{e \cdot b}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1,5 \cdot 450,646875 \text{ N}}{0,008\text{m} \cdot 0,35\text{m}} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} \cong 0,24 \text{ MPa}$$

3.4.1.2.6 Fator de segurança

$$FS = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{adm}} \rightarrow FS = \frac{120 \text{ MPa}}{12,07 \text{ MPa}} \rightarrow FS \cong 9,94$$

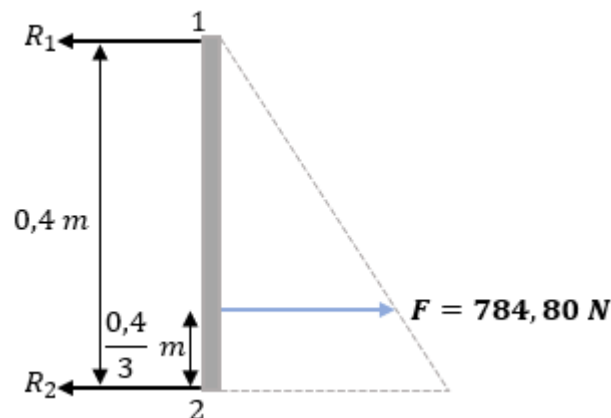
3.4.1.3 Vidro lateral do canal principal

3.4.1.3.1 Força exercida pela água

$$F_{H_2O(Lateral)} = \frac{\rho g L H^2}{2} \rightarrow F_{H_2O(Lateral)} = \frac{1000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot (0,4 \text{ m})^2}{(2)\text{m}^3 \cdot \text{s}^2}$$

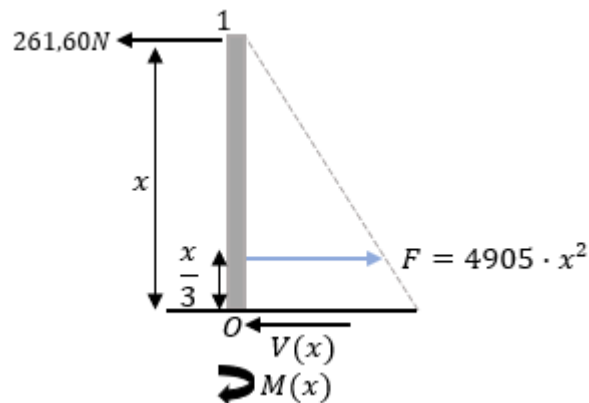
$$F_{H_2O(Lateral)} = 784,80 \text{ N}$$

3.4.1.3.2 Reações de apoio



$$\curvearrowleft + \sum M_1 = 0; 784,80N \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,4m\right) - R_2 \cdot 0,4m = 0 \rightarrow R_2 = 523,20 N$$

$$+\rightarrow \sum F_x = 0; -R_1 + 784,80N - R_2 = 0 \rightarrow R_1 = 261,60 N$$



$$+\rightarrow \sum F_x = 0; -261,60 + 4905 \cdot x^2 - V(x) = 0 \rightarrow V(x) = 4905 \cdot x^2 - 261,60$$

$$V(0,4) = 523,20 N$$

$$\curvearrowleft + \sum M_O = 0; 261,60 \cdot x - 4905 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{x}{3}\right) - M(x) = 0$$

$$M(x) = -1635 \cdot x^3 + 261,60 \cdot x \rightarrow M(0,23) = 40,27 N \cdot m$$

3.4.1.3.3 Tensão de flexão

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M \cdot c}{I} \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M \cdot \left(\frac{e}{2}\right)}{\left(\frac{a \cdot e^3}{12}\right)} \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot M}{a \cdot e^2} \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot 40,27 N \cdot m}{0,40m \cdot (0,008m)^2}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} \cong 9,44 \text{ MPa}$$

3.4.1.3.4 Tensão de cisalhamento

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot Q}{I \cdot t} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot \left[\left(\frac{e}{4} \right) \cdot \left(\frac{e}{2} \cdot a \right) \right]}{\left(\frac{a \cdot e^3}{12} \right) \cdot a} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = \frac{1,5 \cdot V_{m\acute{a}x}}{e \cdot a}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1,5 \cdot 523,20 \text{ N}}{0,008 \text{ m} \cdot 0,40 \text{ m}} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} \cong 0,24 \text{ MPa}$$

3.4.1.3.5 Fator de segurança

$$FS = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{adm}} \rightarrow FS = \frac{120 \text{ MPa}}{9,44 \text{ MPa}} \rightarrow FS \cong 12,7$$

3.4.2 Reservatórios

3.4.2.1 Volume

$$V_{reservat\acute{o}rio1_2} = a \cdot b \cdot c \rightarrow V_{reservat\acute{o}rio1_2} = 0,4 \text{ m} \cdot 0,35 \text{ m} \cdot 0,4 \cdot \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right)$$

$$V_{reservat\acute{o}rio1_2} = 102,2 \text{ L}$$

3.4.2.2 Vidro da base do reservatório

3.4.2.2.1 Força exercida pela água

$$P_{H_2O} = P_{atm} + \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{H_2O} \rightarrow P_{H_2O} = \gamma_{H_2O} \cdot h_{H_2O}$$

$$F_{H_2O} = P_{H_2O} \cdot A \rightarrow F_{H_2O} = (\gamma_{H_2O} \cdot h_{H_2O}) \cdot (b \cdot c_{o1})$$

$$F_{H_2O} = \frac{9810 \text{ N} \cdot 0,73 \text{ m}}{\text{m}^3} \cdot (0,35 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m}) \rightarrow F_{H_2O} = 1002,582 \text{ N}$$

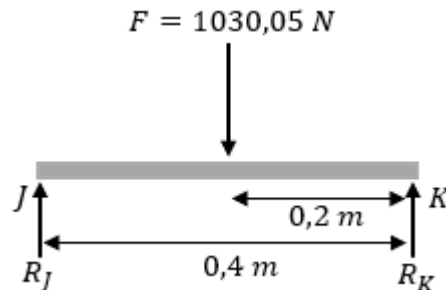
3.4.2.2.2 Força peso do vidro

$$m_{vidro} = \rho_{vidro} \cdot V_{vidro} \rightarrow m_{vidro} = \rho_{vidro} \cdot (b \cdot c_{o1} \cdot e)$$

$$F_{vidro} = m_{vidro} \cdot g \rightarrow F_{vidro} = [\rho_{vidro} \cdot (b \cdot c_{o1} \cdot e)] \cdot g$$

$$F_{vidro} = \frac{2500 \text{ kg}}{m^3} \cdot (0,35m \cdot 0,4m \cdot 0,008m) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \rightarrow F_{vidro} = 27,468 \text{ N}$$

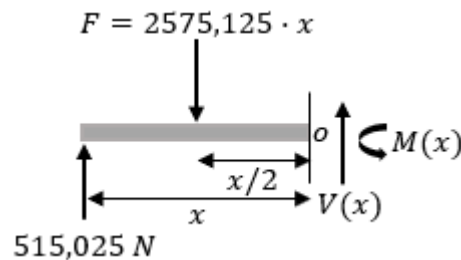
3.4.2.2.3 Reações de apoio



$$\curvearrowright +\sum M_J = 0; -1030,05 \cdot (0,2) + R_K \cdot 0,4 = 0 \rightarrow R_K = 515,025 \text{ N}$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0; R_J - 1030,05 + 515,025 = 0 \rightarrow R_J = 515,025 \text{ N}$$

- Aplicando um “corte imaginário” no trecho J-K



$$+\uparrow \sum F_y = 0; 515,025 - 2575,125 \cdot x + V(x) = 0 \rightarrow V(x) = 2575,125 \cdot x - 515,025$$

$$V_{m\acute{a}x}(0,4) = 515,025 \text{ N}$$

$$\curvearrowright +\sum M_o = 0; -515,025 \cdot x + 2575,125 \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2}\right) + M(x) = 0$$

$$M(x) = -1287,5625 \cdot x^2 + 515,025 \cdot x$$

$$M_{m\acute{a}x}(0,2) = 51,5025 \text{ N} \cdot m$$

3.4.2.2.4 Tensão de flexão

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M \cdot c}{I} \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M \cdot \left(\frac{e}{2}\right)}{\left(\frac{b \cdot e^3}{12}\right)} \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot e^2} \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot 51,5025 \text{ N} \cdot m}{0,35m \cdot (0,008m)^2}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} \cong 13,80 \text{ MPa}$$

3.4.2.2.5 Tensão de cisalhamento

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot Q}{I \cdot t} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot \left[\left(\frac{e}{4} \right) \cdot \left(\frac{e}{2} \cdot b \right) \right]}{\left(\frac{b \cdot e^3}{12} \right) \cdot b} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = \frac{1,5 \cdot V_{m\acute{a}x}}{e \cdot b}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1,5 \cdot 515,025 \text{ N}}{0,008 \text{ m} \cdot 0,35 \text{ m}} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} \cong \mathbf{0,28 \text{ MPa}}$$

3.4.2.2.6 Fator de segurança

$$FS = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{adm}} \rightarrow FS = \frac{120 \text{ MPa}}{13,80 \text{ MPa}} \rightarrow FS \cong \mathbf{8,70}$$

3.4.2.3 Vidro lateral e Vidro frontal

3.4.2.3.1 Força exercida pela água

- Vidro Lateral

$$F_{H_2O(Lateral)} = \frac{\rho g L H^2}{2} \rightarrow F_{H_2O(Lateral)} = \frac{1000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m} \cdot (0,73 \text{ m})^2}{(2) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^2}$$

$$F_{H_2O(Lateral)} = \mathbf{1045,4598 \text{ N}}$$

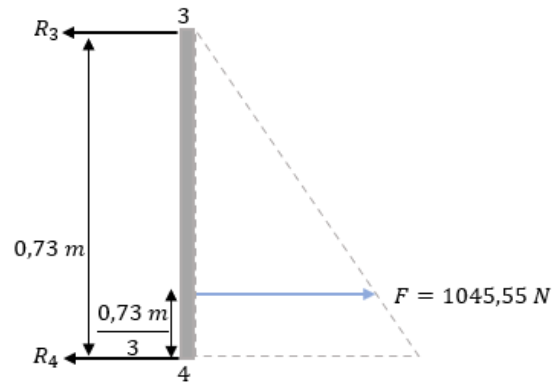
- Vidro Frontal

$$F_{H_2O(Lateral)} = \frac{\rho g L H^2}{2} \rightarrow F_{H_2O(Lateral)} = \frac{1000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot 0,35 \text{ m} \cdot (0,73 \text{ m})^2}{(2) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^2}$$

$$F_{H_2O(Lateral)} = \mathbf{914,8561 \text{ N}}$$

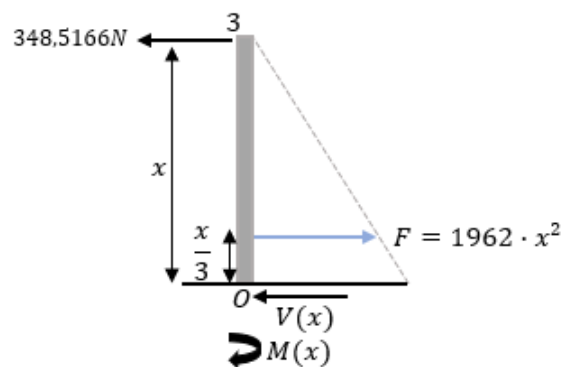
3.4.2.3.2 Reações de apoio

- Vidro Lateral



$$\curvearrowright \sum M_3 = 0; 1045,5498N \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,73m\right) - R_2 \cdot 0,73m = 0 \rightarrow R_2 = 697,0302 N$$

$$+\rightarrow \sum F_x = 0; -R_1 + 1045,5498N - R_2 = 0 \rightarrow R_1 = 348,5166 N$$



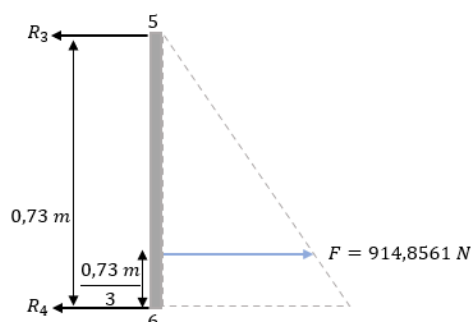
$$+\rightarrow \sum F_x = 0; -348,5166 + 1962 \cdot x^2 - V(x) = 0 \rightarrow V(x) = 1962 \cdot x^2 - 348,5166$$

$$V_{\text{máx}}(0,73) = 697,0332 N$$

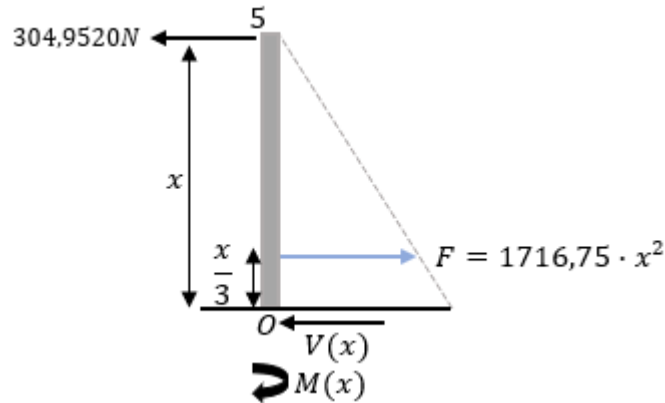
$$\curvearrowright \sum M_O = 0; 348,5166 \cdot x - 1962 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{x}{3}\right) - M(x) = 0$$

$$M(x) = -654 \cdot x^3 + 348,5166 \cdot x \rightarrow M_{\text{máx}}(0,42) = 97,92342 N \cdot m$$

- Vidro frontal



$$\begin{aligned} \curvearrowright + \sum M_5 = 0; 914,8561N \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,73m\right) - R_2 \cdot 0,73m = 0 \rightarrow R_2 = 609,9041 N \\ + \rightarrow \sum F_x = 0; -R_1 + 914,8561N - R_2 = 0 \rightarrow R_1 = 304,9520 N \end{aligned}$$



$$+ \rightarrow \sum F_x = 0; -304,9520 + 1716,75 \cdot x^2 - V(x) = 0 \rightarrow V(x) = 1716,75 \cdot x^2 - 304,952$$

$$V_{\text{máx}}(0,73) = 609,9041 N$$

$$\curvearrowright + \sum M_O = 0; 304,9520 \cdot x - 1716,75 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{x}{3}\right) - M(x) = 0$$

$$M(x) = -572,25 \cdot x^3 + 304,9520 \cdot x \rightarrow M_{\text{máx}}(0,42) = 85,6829 N \cdot m$$

3.4.2.3.3 Tensão de flexão

$$\sigma_{\text{máx}}(\text{lateral}) = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{M \cdot \left(\frac{e}{2}\right)}{\left(\frac{a_1 \cdot e^3}{12}\right)} \rightarrow \sigma_{\text{máx}} = \frac{6 \cdot M}{a_1 \cdot e^2} \rightarrow \sigma_{\text{máx}}(\text{lateral}) = \frac{6 \cdot 97,92342 N \cdot m}{0,73m \cdot (0,008m)^2}$$

$$\sigma_{\text{máx}}(\text{lateral}) \cong 12,58 MPa$$

$$\sigma_{\text{máx}}(\text{frontal}) = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{M \cdot \left(\frac{e}{2}\right)}{\left(\frac{a_1 \cdot e^3}{12}\right)} \rightarrow \sigma_{\text{máx}} = \frac{6 \cdot M}{a_1 \cdot e^2} \rightarrow \sigma_{\text{máx}}(\text{frontal}) = \frac{6 \cdot 85,6829 N \cdot m}{0,73m \cdot (0,008m)^2}$$

$$\sigma_{\text{máx}}(\text{frontal}) \cong 11,00 MPa$$

3.4.2.3.4 Tensão de cisalhamento

$$\tau_{\text{máx(lateral)}} = \frac{V_{\text{máx}} \cdot Q}{I \cdot t} \rightarrow \tau_{\text{máx}} = \frac{V_{\text{máx}} \cdot \left[\left(\frac{e}{4} \right) \cdot \left(\frac{e}{2} \cdot a_1 \right) \right]}{\left(\frac{a_1 \cdot e^3}{12} \right) \cdot a_1} \rightarrow \tau_{\text{máx}} = \frac{1,5 \cdot V_{\text{máx}}}{e \cdot a_1}$$

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{1,5 \cdot 697,0332N}{0,008m \cdot 0,73m} \rightarrow \tau_{\text{máx(lateral)}} \cong \mathbf{0,18 MPa}$$

$$\tau_{\text{máx(frontal)}} = \frac{V_{\text{máx}} \cdot Q}{I \cdot t} \rightarrow \tau_{\text{máx}} = \frac{V_{\text{máx}} \cdot \left[\left(\frac{e}{4} \right) \cdot \left(\frac{e}{2} \cdot a_1 \right) \right]}{\left(\frac{a_1 \cdot e^3}{12} \right) \cdot a_1} \rightarrow \tau_{\text{máx}} = \frac{1,5 \cdot V_{\text{máx}}}{e \cdot a_1}$$

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{1,5 \cdot 609,9041N}{0,008m \cdot 0,73m} \rightarrow \tau_{\text{máx(frontal)}} \cong \mathbf{0,16 MPa}$$

3.4.2.3.5 Fator de segurança

$$FS_{\text{(lateral)}} = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{adm}} \rightarrow FS = \frac{120 MPa}{12,58 MPa} \rightarrow \mathbf{FS_{\text{(lateral)}} \cong 9,54}$$

$$FS_{\text{(frontal)}} = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{adm}} \rightarrow FS = \frac{120 MPa}{11 MPa} \rightarrow \mathbf{FS_{\text{(frontal)}} \cong 10,91}$$

3.5 COMPONENTES DA BANCADA

3.5.1 Seleção da bomba d'água

3.5.1.2 Memorial de cálculo

3.5.1.2.1 Número de Reynolds

- Determinando o raio hidráulico (R_H), aplicando a equação (3.28) encontra-se que o R_H é aproximadamente igual a:

$$R_H = \frac{(H \cdot B)}{(B + 2 \cdot H)} \rightarrow R_H = \frac{(0,4m \cdot 0,35m)}{(0,35m + 2 \cdot 0,4m)} \rightarrow R_H = 0,1217391304m$$

$$\mathbf{R_H \cong 0,122 m}$$

- Determinando a velocidade média do fluido para o regime laminar ($Re = 450$), aplicando a Equação (3.27), chega ao seguinte valor:

$$Re = \frac{VR_H}{\nu} \rightarrow V = \frac{Re \cdot \nu}{R_H} \rightarrow V = \frac{450 \cdot 1,004 \cdot 10^{-6} m^2/s}{0,1217391304m} \rightarrow V = 3,7112 \cdot 10^{-3} m/s$$

$$V(\text{laminar}) \cong 0,0037 m/s$$

- Determinando a velocidade média do fluido para o regime turbulento ($Re = 2600$), aplicando a Equação (3.27), chegando ao seguinte valor:

$$Re = \frac{VR_H}{\nu} \rightarrow V = \frac{Re \cdot \nu}{R_H} \rightarrow V = \frac{2600 \cdot 1,004 \cdot 10^{-6} m^2/s}{0,1217391304m} \rightarrow V = 0,0214 m/s$$

$$V(\text{turbulento}) \cong 0,021 m/s$$

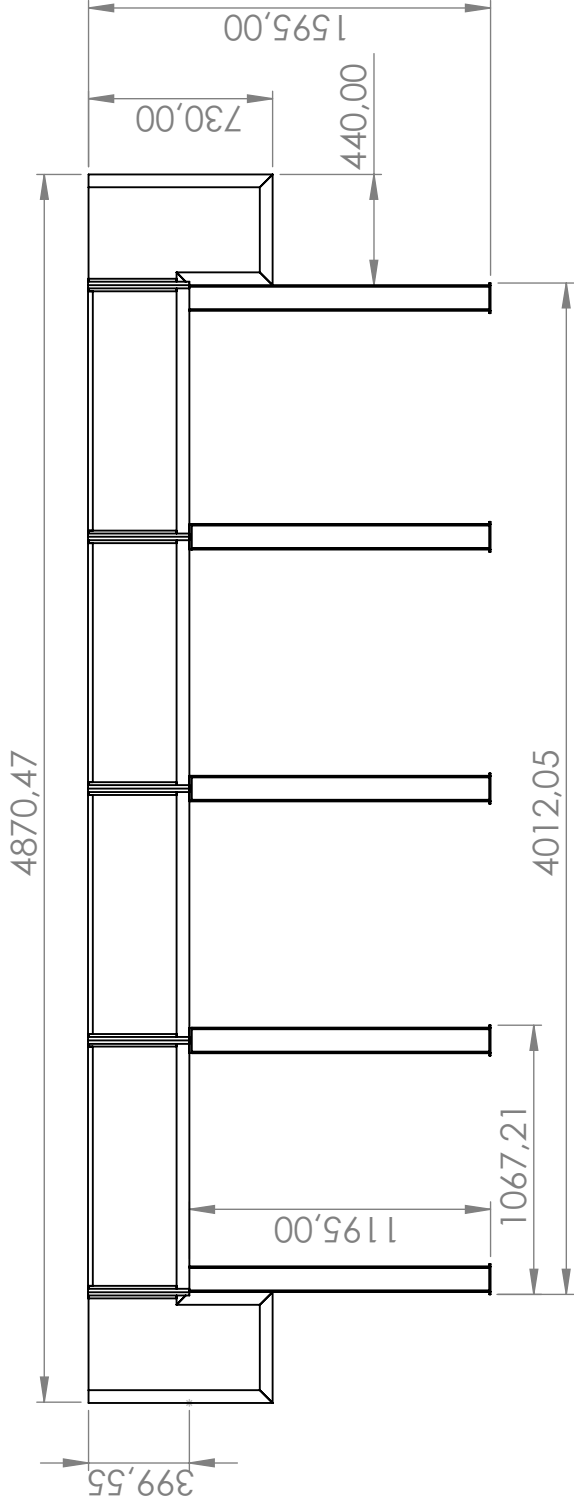
3.5.1.2.2 Vazão

Determinando a vazão requerida, para isto, aplica – se a Equação (3.30) encontrando que a vazão é aproximadamente igual a:

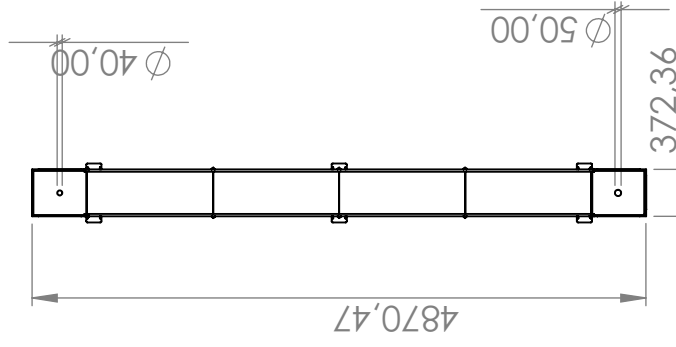
$$Q = V_{\text{fluido}} \cdot A_{\text{esc}} \rightarrow Q = V(\text{turbulento}) \cdot (b \cdot a) \rightarrow Q = 0,021 m/s \cdot (0,35 \cdot 0,4) m^2$$

$$Q = 2,94 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} \cdot \left(\frac{1000L}{1m^3} \right) \rightarrow Q(\text{requerida}) \cong 2,94 L/s$$

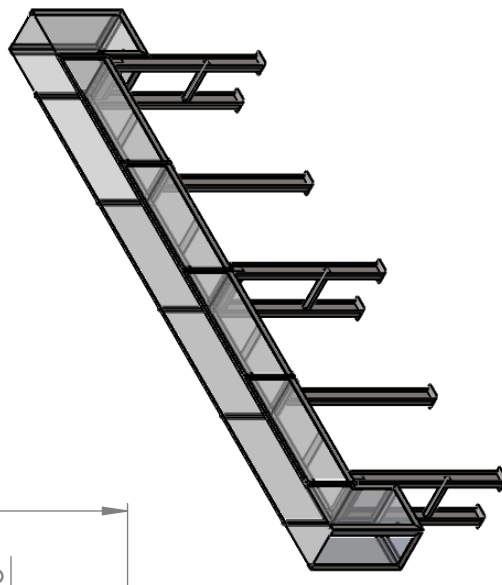
APÊNDICE B – Desenho técnico da bancada hidráulica




LATERAL DIREITA
ESCALA: 1:30



SUPERIOR
ESCALA: 1:60



ISOMÉTRICA

	Desenhado:	Rafael de S. Araújo	Data	14/02/2022	Desenho: Bancada Hidráulica
	Revisado:	Rafael de S. Araújo	14/02/2022		
	Aprovado:	Francisco Jarmeson S. B.	14/02/2022		
Folha:	Quantidade:				MATERIAL:
Notas:	Massa:				
1. DIMENSÕES EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÕES CONTRÁRIAS; 2. VISTAS DE DESENHO DISTRIBUÍDAS CONFORME 1º DIEDRO.					
Escala: 1:50					

6 5 4 3 2 1

D C B A

6 5 4 3 2 1