

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CENTRO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

Eduarda Rosecler Busnardo

**Projeto Conceitual de um Canal de Água Circulante para Pesquisas de
Interação Fluido-Estrutura na UFSC – Campus de Joinville**

Joinville, 2015

Eduarda Rosecler Busnardo

**Projeto Conceitual de um Canal de Água Circulante para Pesquisas de
Interação Fluido-Estrutura na UFSC – Campus de Joinville**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra

Joinville, 2015

Eduarda Rosecler Busnardo

**Projeto Conceitual de um Canal de Água Circulante para Pesquisas de
Interação Fluido-Estrutura na UFSC – Campus de Joinville**

Monografia julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra
Orientador

Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha

Prof. M.e Ricardo Aurélio Quinhões Pinto

Joinville, 03 de dezembro de 2015.

Dedico àqueles que amo incondicionalmente:

meu pai, minha mãe e meu irmão.

Vocês fazem parte desta conquista.

AGRADECIMENTOS

À minha família. São muitos os que podem dizer que amam alguém. Mas são poucos os que sabem com apenas o olhar o quanto fazem bem ao outro.

Ao meu orientador, André Luís Condino Fugarra, pelo apoio, dedicação e incentivo sem igual para a concretização deste projeto.

Aos professores que me deram suporte neste trabalho, especialmente Luiz Eduardo Bueno Minioli, Thiago Pontin Tancredi, Carlos Maurício Sacchelli, Jorge Luiz Goes Oliveira e Vitor Takashi Endo.

Aqueles que são meus exemplos acadêmicos: Lucas Weihmann, Viviane Lilian Soethe, Luís Fernando Peres Calil, Ricardo Aurélio Quinhões Pinto e Tiago Vieira da Cunha. Vocês fizeram parte da minha formação tanto pessoal quanto profissional. E os considero meus conselheiros, instrutores e amigos.

Aos professores Cristiano Vasconcellos Ferreira e Tatiana Renata Garcia, por confiarem a mim o cargo de monitora de suas matérias ao longo do meu percurso acadêmico.

Aos meus professores de base: Luiza, Cida, Jane, Luciara, Fábio, Savio, Sidnei e Fernando. Cada um, a seu modo, realizou a sua arte de ensino e foram meus primeiros orientadores.

À Companhia de Navegação NORSUL, por ter me recebido muito bem como estagiária e à todas as amigas que lá constituí.

Aos meus amigos inseparáveis e inigualáveis, parceiros para a vida: Amanda, Souza, Natasha, Maira, Bruna, Juliane, Bruninha, Laiana, Dadam, Monique, Túlio, Antônio, Barbosa, Bruno, Conti, Miguel e Thales.

Aos meus amigos do mundo acadêmico, com quem convivi, aprendi, e pretendo levar comigo para a vida toda: Nicole, Rafaela, Elisa, Herlon, Matheus, Jorge, Ricardo, Ronan, Vidal e Patrício.

Aos meus amigos de intercâmbio, que se tornaram a minha família postiça nos momentos de solidão estrangeira: Mariana, Tamiris, Letícia e Pedro.

Aos amigos que felizmente as circunstâncias da vida me proporcionaram: os Sarro, os Lehmann-Aguiar, os Almeida-Aguiar, os Oliveira e os Martins.

Aqueles que se foram, mas que continuam em meu coração: O Seu Marcílio, A Dona Rainilda, A Dona Inês e o Murilo. A lembrança permanece.

RESUMO

Canais de água circulante são ferramentas essenciais usadas por especialistas na área hidrodinâmica para complementar métodos analíticos e computacionais. Existe uma variedade de instalações de testes que realizam o estudo da interação fluido-estrutura de diferentes modos, sendo estes projetados de acordo com o tipo de experimento hidrodinâmico que se deseja realizar. A instalação de testes almejada pelo cliente, a UFSC – Campus de Joinville, é um canal capaz de estudar fenômenos de interação fluido-estrutura, como as Vibrações induzidas por Vórtices (VIV). Todavia, isto não impede que o mesmo seja concebido de forma a possibilitar o emprego para outros tipos de experimentos como, por exemplo, testes de modelos em escala ou análises de comportamento do fluido em diferentes regimes de escoamento. O projeto conceitual deste canal de água circulante recorre à dois métodos para a concepção dos elementos essenciais: um dimensionamento racional de pontos específicos da instalação, em que resultados obtidos podem ser utilizados para uma estimativa de custo de construção; e uma abordagem conceitual, onde a capacidade de adaptação dos componentes procura contornar a dificuldade de dimensionamento. Os canais de água circulante são concebidos em um processo iterativo que deve atender a vários requisitos e restrições e, neste trabalho, foi desenvolvido o projeto conceitual de um canal de água circulante para o departamento de Engenharias da Mobilidade da UFSC – Campus de Joinville. Como resultados foram obtidos: uma visualização 3D CAD do projeto conceitual do canal e uma análise orçamental dos componentes projetados durante o dimensionamento racional.

Palavras-chave: Canal de água circulante; Projeto Conceitual; interação fluido-estrutura; vibração induzida pelo escoamento; vibração induzida por emissão de vórtices.

ABSTRACT

Circulating water channels are essential sources used by specialists in the hydrodynamic field to complement analytical and computational methods. There is a great diversity of test installations that execute the study of fluid-structure interaction in different manners, being designed according to the kind of hydrodynamic experiment that is wanted to execute. The test installation desired by the client, UFSC – Campus of Joinville, is a channel capable of studying the fluid-structure interactions phenomena, like Vortex Induced Vibration (VIV). However, this does not experiments such as scale model tests or analysis of the flow behavior at different flow regimes. The conceptual project of this circulating water channel appeals to two methods for the conception of its essential elements: the first one is a rational design of specific locations of the installation, in which the results can be used for a cost estimation of the construction, and the second one is a conceptual approach, where the capacity of adaption of the components attempt to circumvent the design difficulties. The circulating water channels are conceived in an iterative process that must meet several requirements and restrictions and, in this essay, was developed the conceptual design of a circulating water channel for the courses from the Mobility Engineering Department of UFSC – Campus of Joinville. As results were obtained a 3D CAD visualization of the conceptual project and a budget analysis of the components developed during the rational design.

Key-words: Circulating Water Channel; Conceptual project; fluid-structure interaction; flow-induced vibration; vortex-induced vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tanque de Gelo do HSVA.....	14
Figura 2 – Fotos da instalação de testes do LabOceano.	14
Figura 3 – Fotos dos canais de água circulante da USP (esquerda) e Universidade de Alberta (direita).	15
Figura 4 – Esboços de vórtices ocorrentes em veículos aquáticos, aéreos e automotivo; (a) vórtices de borda de fuga em uma asa delgada; (b) vórtices a sotavento em um míssil; (c) vórtices de ponta de asa em uma aeronave comercial; (d) vórtices de bordo de porão e popa em um casco de navio; (e) fluxo de vórtices em um deck de porta aviões; (f) fluxo de vórtices sob um submarino manobrando; (g) vórtices nos bordos laterais de um automóvel.	16
Figura 5 – Ilustração do canal de provas que combina ação de ventos, ondas e corrente da Universidade de Newcastle – Reino Unido.	17
Figura 6 – Modelo em escala da aeronave F/A-18 dentro do túnel de água NASA Dryden Flow Visualization Facility.	17
Figura 7 – Organograma de Dinâmicas de Vibração para escoamento uniforme.	22
Figura 8 – Fotos que ilustram a evolução do campo de escoamento à jusante de uma estrutura cilíndrica de acordo com a variação do número de Reynolds.	23
Figura 9 - Configurações comuns em túneis de circuito fechado.....	24
Figura 10 - Túnel de vento de circuito fechado e seus elementos principais.	25
Figura 11 – Representação das células que compõem a estrutura colmeia.	27
Figura 12 – Esquema representativo das informações necessárias para aplicação das equações para determinação da curvatura de superfície da contração.	30
Figura 13 – Representação do funcionamento de uma bomba centrífuga.	31
Figura 14 – Gráfico do Fator de Atrito por Número de Reynolds e Rugosidade relativa.....	33
Figura 15 – Representação esquemática do uso de aletas para corrigir a uniformidade de escoamento na seção de testes do canal de água circulante e vento da Universidade de Newcastle.	36
Figura 16 – Foto das aletas direcionadoras de fluxo do canal de água circulante da Universidade de Alberta, Canadá.....	36
Figura 17 – Etapas de projeto de um túnel de vento.....	41
Figura 18 – Ciclo do escoamento de água no canal de água circulante da UFSC – Campus de Joinville.	43
Figura 19 – Representação em SolidWorks da seção de testes.....	45
Figura 20 – Critério de falha de Mohr para o vidro simples.....	46
Figura 21 – Simulação em ABAQUS da sollicitação de carga na peça de vidro com os quatro lados apoiados (espessura de 20 mm).....	47
Figura 22 - Simulação em ABAQUS da sollicitação de carga na peça de vidro com os quatro lados engastados (espessura de 20 mm).	47
Figura 23 - Simulação em ABAQUS da sollicitação de carga na peça de vidro com os quatro lados apoiados (espessura de 25 mm).	48

Figura 24 - Simulação em ABAQUS da solicitação de carga na peça de vidro central com os quatro lados engastados (espessura de 25 mm).	49
Figura 25 - Representação em SolidWorks da viga avaliada na seção de testes.	50
Figura 26 - Gráfico do Momento Fletor na Viga	50
Figura 27 - Gráfico da Força Cortante na Viga.	50
Figura 28 – Representação em SolidWorks da Caixa de Regularização, seus componentes e a contração.	52
Figura 29 – Representação em SolidWorks do conceito flexível das aletas direcionadoras de fluxo.	53
Figura 30 – Foto da contração do canal de água circulante da Universidade de Alberta.	55
Figura 31 – Representação da curva de superfície da parede inferior da contração.	55
Figura 32 – Representação das curvas de superfície das paredes laterais da contração.	56
Figura 33 – Representação em SolidWorks da contração do CWC.	56
Figura 34 – Simulação em ABAQUS da placa de polipropileno sem reforços com o lado superior livre e três lados apoiados – deformação (esquerda) e tensão do critério de von Mises (direita).	57
Figura 35 - Simulação em ABAQUS da placa de polipropileno sem reforços com o lado superior livre e três lados engastados – deformação (esquerda) e tensão do critério de von Mises (direita).	58
Figura 36 – Representação em SolidWorks da região da placa simulada.	58
Figura 37 – Simulação em ABAQUS da placa de polipropileno com três reforços transversais na condição de contorno apoiada – deformação (esquerda) e tensão do critério de von Mises (direita).	59
Figura 38 - Simulação em ABAQUS da placa de polipropileno com três reforços transversais na condição de contorno engastada – deformação (esquerda) e tensão do critério de von Mises (direita).	59
Figura 39 – Representação em SolidWorks da caixa de regularização com os reforçadores transversais.	60
Figura 40 – Representação em SolidWorks da caixa de sucção em duas vistas laterais em ângulo.	61
Figura 41 – Representação em SolidWorks da Caixa de Sucção com os reforços transversais.	62
Figura 42 – Representação esquemática da parte hidráulica do sistema.	63
Figura 43 – Representação da vista lateral em SolidWorks do CWC proposto para a UFSC – Campus de Joinville.	68
Figura 44 - Representação da vista superior em SolidWorks do CWC proposto.	68
Figura 45 – Representação da vista superior em ângulo do CWC proposto, realizada em SolidWorks.	69
Figura 46 – Representação 2D com as dimensões principais do CWC projetado, realizada em SolidWorks.	70

Figura 47 – Representação da vista lateral em SolidWorks do CWC com visualização interna.	70
Figura 48 – Representação da vista em ângulo do CWC com foco na visualização interna da caixa de regularização, realizada em SolidWorks.	71
Figura 49 – Representação em SolidWorks da caixa de regularização com vista interna em ângulo.....	71
Figura 50 - Vista em ângulo com foco na visualização interna da caixa de sucção do CWC, realizada em SolidWorks.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perdas maiores.	65
Tabela 2 – Perdas menores.	67
Tabela 3 – Valores obtidos nos orçamentos para as estruturas em alumínio do CWC.	74
Tabela 4 – Valores obtidos nos orçamentos para as chapas de vidro da seção de testes do CWC.	75
Tabela 5 – Valores obtidos nos orçamentos para os tanques de polipropileno do CWC.....	75
Tabela 6 - Valores obtidos nos orçamentos para as bombas do CWC.	76

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Estrutura do texto	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.2. Configuração genérica de um CWC	24
2.3. Seção de Testes	25
2.4. Câmara de Estabilização	26
2.4.1. Colmeias	27
2.4.2. Telas	28
2.5. Contração	29
2.6. Difusores	30
2.7. Ventilador/Propulsor/Bomba	31
2.7.1. Perdas de Carga	32
2.7.1.1. Perdas Maiores	32
2.7.1.2. Perdas Menores	34
2.7.2. Potência da Bomba	34
2.8. Aletas	35
3. O CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE DA UFSC – CAMPUS DE JOINVILLE	37
3.1. Requisitos do Cliente	37
3.2. Metodologia do Projeto Conceitual	39
4. PROJETO CONCEITUAL DO CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE	43
4.1. Seção de Testes	44
4.1.1. Pré Dimensionamento dos Vidros Laminados de Segurança	45
4.1.2. Pré Dimensionamento da Estrutura em Perfil de Alumínio	49
4.2. Regularização e Contração	51
4.2.1. Contração	54
4.2.2. Pré Dimensionamento Estrutural da Caixa de Regularização	56
4.2.2.1. Proposta 1	57
4.2.2.2. Proposta 2	58
4.3. Sucção	60
4.3.1. Pré Dimensionamento Estrutural da Caixa de Sucção	62
4.4. Instalação Hidráulica	62
4.5. Bombas Centrífugas	64
4.5.1. Perdas de Carga	65

4.5.2. <i>Cálculo da Potência Requerida na Bomba</i>	67
5. O MODELO DO CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE	68
5.1. Considerações Futuras	72
6. AVALIAÇÃO DE CUSTOS – ORÇAMENTOS	74
6.1. Estruturas em Perfil de Alumínio	74
6.2. Vidros da Seção de Testes	75
6.3. Tanques de Polipropileno	75
6.4. Bombas Centrífugas	76
6.5. Investimento Total Estimado	76
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS	79

1. INTRODUÇÃO

A mecânica dos fluidos possui duas grandes vertentes: a hidrostática, que se refere aos fluidos que estão em equilíbrio estático, e a hidrodinâmica, que é o estudo realizado quando os fluidos estão sujeitos a forças externas, e conseqüentemente, movimento. Os progressos na mecânica dos fluidos remetem a estudos realizados a partir da época de Leonardo da Vinci (1452-1519) e, de fato, da Vinci pode ser visto como um pioneiro na abordagem moderna da engenharia hidráulica, ao realizar as primeiras documentações de mecanismos de escoamento da água com objetivos científicos (FLACHSBART, 1932 apud ERICKSON et al., 1986).

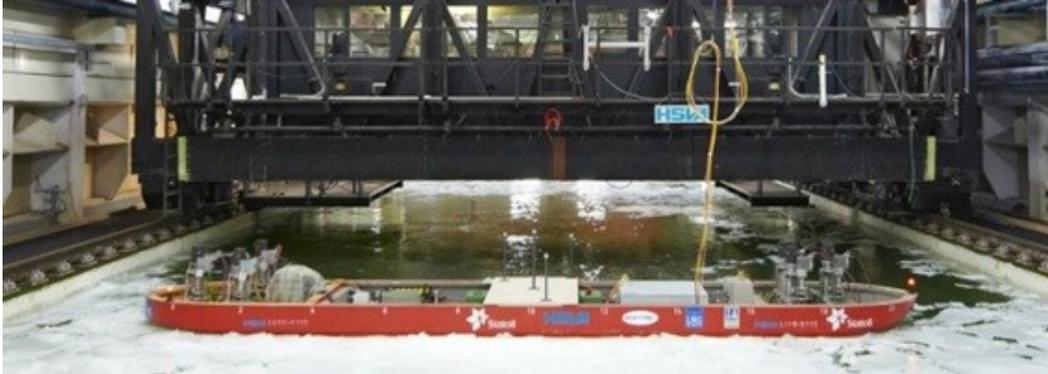
Ao se trabalhar com estudos de mecânica dos fluidos, pode-se constatar a frequente presença de experimentos físicos para ilustrar os fenômenos emulados em métodos matemáticos e modelos teóricos. Isto se deve à íntima ligação desta área as observações experimentais, presentes de maneira expressiva até o século XX, em que o uso dos mesmos possibilitava a adaptação de modelos físicos com a presença de correções empíricas (PLAUSKA, 2013). Apesar da redução do uso de técnicas experimentais na mecânica dos fluidos devido ao progresso do conhecimento na área, é possível observar o emprego frequente de instalações de testes hidrodinâmicos para os mais diversos tipos de avaliação. Dentre as necessidades mais comuns de realização de testes, pode-se citar:

- A verificação do comportamento de fluidos em diferentes regimes de escoamento;
- A realização de testes de modelos de embarcações em escala reduzida, com o objetivo de obter informações relevantes que venham a ser extrapoladas para a escala real (vale salientar que esta técnica apresenta certo grau de empirismo);
- Análise de hélices propulsores, que avalia o escoamento, o desempenho e o padrão de cavitação;
- Análise do comportamento de estruturas/produtos/equipamentos aquáticos ou não, em diferentes regimes de escoamento.

Uma vez que a natureza dos testes possui suas particularidades, não é possível projetar uma instalação economicamente viável capaz de realizar com eficiência qualquer tipo de experimento hidrodinâmico. A título de exemplo, tem-se tanques especializados em avaliação de modelos de navios na presença de gelo no

mar, como o Tanque de Gelo do *The Hamburg Ship Model Basin* (HSVA) em Hamburgo, Alemanha (Figura 1).

Figura 1 – Tanque de Gelo do HSVA.



Fonte: Página oficial do HSVA¹.

Existem também instalações que se destacam ao serem preparadas para receber uma maior possibilidade de testes como o LabOceano, no Rio de Janeiro (Figura 2). Este enorme tanque de provas possui uma profundidade de 15m (mais um poço adicional de 10m, sendo o tanque mais profundo do planeta) e ainda é equipado com um sistema de geradores de ondas multidirecionais capazes de avaliar a manobrabilidade e o comportamento de navios/estruturas no oceano. Entretanto, devido ao seu grande porte e abundante número de ferramentas disponível, o custo de operação de uma instalação como esta se limita à fins comerciais capazes de manter tal instalação.

Figura 2 – Fotos da instalação de testes do LabOceano.



Fonte: Página oficial do LabOceano².

Dentre os experimentos comumente realizados em instalações de testes hidrodinâmicos tem-se o estudo de interações fluido-estrutura (IFE), que avalia a

¹ - Disponível em: <http://www.hsva.de/our-facilities/ice-tank.html>; Acesso em out. 2015.

² - Disponível em: http://www.laboceano.coppe.ufrj.br/br/laboceano/lab_fotos.php; Acesso em out. 2015.

dinâmica de escoamentos na presença de estruturas que podem sofrer deformação e/ou vibração. Este tipo de teste exige algumas características básicas de sua instalação e, com base na análise das necessidades do cliente, foi definido que a instalação de testes hidrodinâmica que apresenta as características que melhor se enquadram é do tipo Canal de Água Circulante ou “*Circulating Water Channel*”, reconhecido internacionalmente pela sigla “CWC”. Diferentemente de túneis de água, CWC apresentam uma superfície livre permitindo, ainda, a realização de testes de superfície que estudam a interação de uma estrutura com dois fluidos diferentes. Sendo assim, fica definido o objetivo principal deste trabalho que é o desenvolvimento do projeto conceitual de um canal de água circulante que atenda às necessidades do cliente, a UFSC – Campus de Joinville, sendo esta instalação dedicada preferencialmente ao estudo fundamental de interações fluido-estrutura.

CWC estão presentes em algumas universidades nacionais e internacionais, bem como instituições governamentais estrangeiras. Exemplos de canais utilizados com finalidade acadêmica são o da Universidade de São Paulo (USP) e da Universidade de Alberta, no Canadá, apresentados na Figura 3:

Figura 3 – Fotos dos canais de água circulante da USP (esquerda) e Universidade de Alberta (direita).



Fonte: Ássi (2005, p. 268); Página da empresa COANDA³.

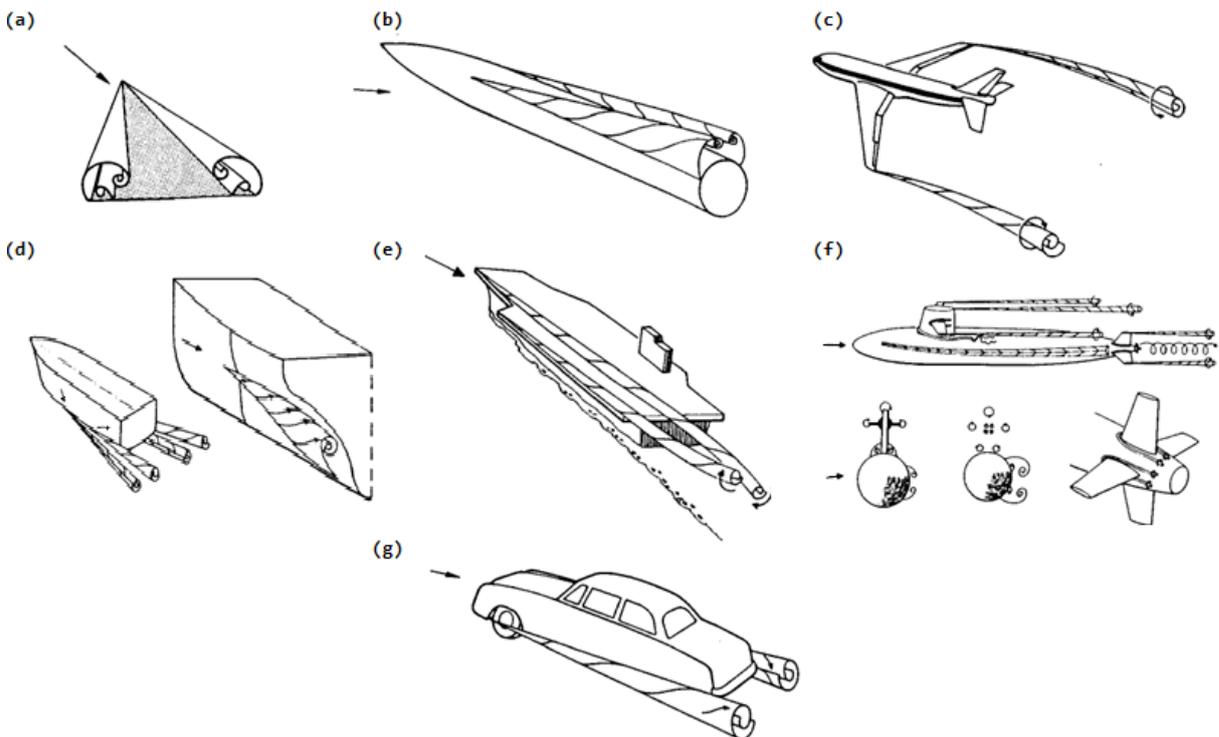
Os dois canais acima são especializados no estudo de fenômenos do tipo Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV), que é apenas uma das modalidades de interação fluido-estrutura que compõem o vastíssimo campo da dinâmica dos fluidos. Segundo Suárez et al. (1994, p. 3, tradução nossa) “túneis de água cumprem um papel único como instalação de pesquisa para compreensão de escoamentos complexos dominados por vórtices e interações vorticais” e Brent e Frate (1994)

³ - Disponível em https://www.coanda.ca/services/equipment/recirc_channel/; Acesso em set. 2015.

afirmam que fenômenos como vórtices e sua geração, interação e colapso estão na categoria de estudos que recebem grande auxílio da visualização de escoamento de testes realizados em túneis de água, confirmando a conveniência deste projeto para a realização de testes em nível acadêmico.

Certamente, muitos estudos de fenômenos do tipo VIV serão realizados neste canal, já que esta é uma vertente de aprendizado acadêmico interessante para estudantes da UFSC – Campus de Joinville de Engenharia Naval, Aeroespacial e Automotiva, bem como para aprofundar o conhecimento deste fenômeno que é presente em projetos de linhas “*offshore*”, responsáveis pelo transporte de materiais durante a produção de petróleo em grandes profundidades (FUJARRA, 2002). Em caráter ilustrativo, a Figura 4 adaptada de Lugt (1983, apud ERICKSON et al., 1986) apresenta a ilustração da formação de vórtices em diferentes estruturas.

Figura 4 – Esboços de vórtices ocorrentes em veículos aquáticos, aéreos e automotivo; (a) vórtices de borda de fuga em uma asa delgada; (b) vórtices a sotavento em um míssil; (c) vórtices de ponta de asa em uma aeronave comercial; (d) vórtices de bordo de porão e popa em um casco de navio; (e) fluxo de vórtices em um deck de porta aviões; (f) fluxo de vórtices sob um submarino manobrando; (g) vórtices nos bordos laterais de um automóvel.

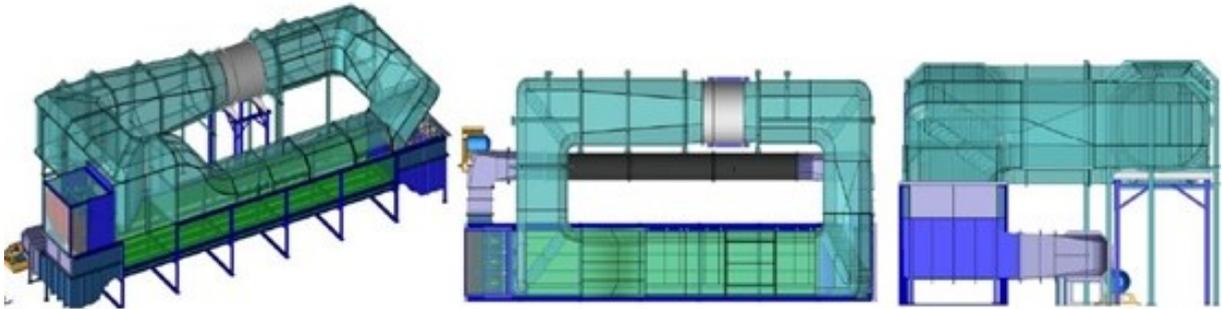


Fonte: Adaptada de Lugt (1983, apud ERICKSON et al., 1986, p. 19)

Um modelo inovador de canal de água circulante é o ‘*Combined wind wave current tank*’ da Universidade de *Newcastle*, no Reino Unido, muito utilizado para avaliar embarcações e estruturas marítimas. O que torna este canal tão diferenciado

(Figura 5) é a possibilidade de seu uso integrado com um túnel de vento, permitindo o estudo da ação dos ventos, ondas e corrente.

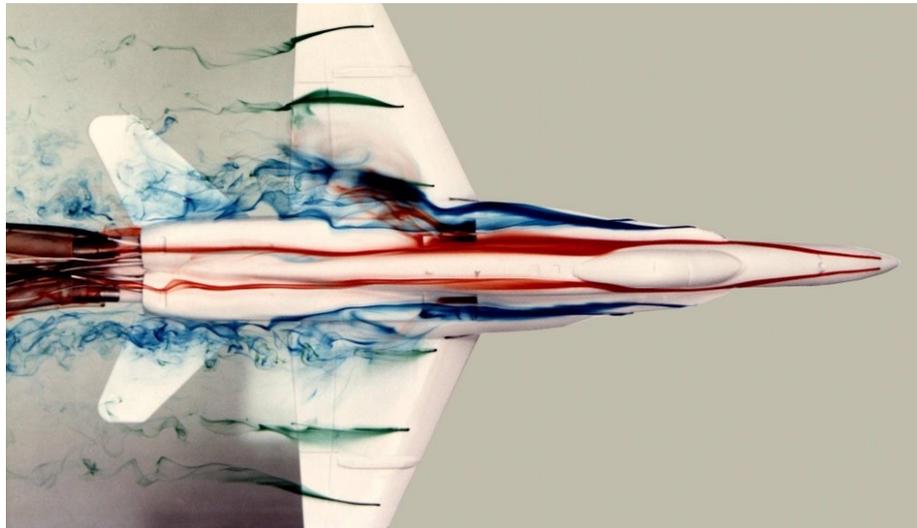
Figura 5 – Ilustração do canal de provas que combina ação de ventos, ondas e corrente da Universidade de *Newcastle* – Reino Unido.



Fonte: MEHMET (2011, p. 19)

Ainda, instituições de pesquisas militares utilizam este tipo de instalação de teste hidrodinâmico, como a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), que possui vasta pesquisa na área de estudos aero/hidrodinâmicos (Figura 6).

Figura 6 – Modelo em escala da aeronave F/A-18 dentro do túnel de água NASA Dryden Flow Visualization Facility.



Fonte: Página oficial da NASA⁴

Canais e túneis de água circulante possuem uma configuração muito próxima aos de túneis de vento. Como os princípios de trabalho de um CWC são semelhantes aos de túneis de vento de baixa velocidade e literaturas que tratem do projeto de canais são raros, é muito comum o uso de estudos da concepção de instalações aerodinâmicas em projetos de instalações hidrodinâmicas deste tipo.

⁴ - Disponível em: <http://www.nasa.gov/centers/armstrong/multimedia/imagegallery/FVF/index.html?id=36290>; Acesso em out. 2015.

Instituições como a USP em seu Canal de Água Circulante do Núcleo de Dinâmica e Fluidos e a *United States Naval Academy* (USNA) realizaram o projeto de seus canais a partir de bibliografias como: Mehta e Bradshaw (1979), Bell e Mehta (1989); que são essencialmente estudos realizados para auxiliar o projeto de túneis de vento. Já o “*Institut fur Aerodynamik und Gasdynamik*” (STRUNZ; SPETH, 1987) baseou os critérios de projeto de seu CWC naqueles usados para túneis de vento com baixa turbulência.

A interdisciplinaridade que um CWC propõe é uma grande vantagem a ser considerada em seu projeto. Não é somente a área naval que se presta ao uso deste tipo de instalação. Exemplo já citado anteriormente é a NASA, que realiza testes de superfícies aerodinâmicas para resolver problemas específicos que os túneis de vento não são capazes de apontar em sua visualização do escoamento (SUÁREZ et al., 1994). Strunz e Speth (1987) afirmam que túneis de água com superfície livre podem ser utilizados tanto para pesquisas industriais hidrodinâmicas quanto aerodinâmicas. Ainda, segundo Gad-EI-Hak (1987), o uso de canais de água e túneis de vento frequentemente se volta para a condução de experimentos controlados, dedicados à compreensão da física de um particular campo de escoamento ou, para obter dados necessários para o projeto ou melhoria de um certo produto; isto torna possível o emprego deste canal disponível para qualquer um dos cursos especializados do departamento de Engenharias da UFSC – Campus de Joinville.

1.1. Estrutura do texto

Motivado pela apresentação inicial do trabalho, entre outras informações composta pelo objetivo principal e pelas justificativas de sua proposição, segue uma breve explicação de cada um dos capítulos elaborados a fim de ilustrar o desenvolvimento deste projeto.

O início do trabalho conta com o embasamento teórico entorno do desenvolvimento de um projeto conceitual de CWC. Neste momento serão apresentados os elementos que constituem uma instalação de testes típica, bem como quais características estes elementos devem possuir para que possam cumprir sua função no canal.

O capítulo seguinte lista as necessidades do cliente, a UFSC – Campus de Joinville, onde são expostos todos os requisitos a serem atendidos para o projeto do canal. É ainda neste capítulo que a metodologia aplicada para este trabalho será apresentada.

O quarto capítulo relaciona todos os resultados referentes ao projeto conceitual de acordo com a metodologia proposta. É neste capítulo que o canal toma uma forma mais exclusiva, se desviando do modelo genérico retratado no segundo capítulo.

O quinto capítulo é composto por uma seleção de figuras obtidas a partir *software* 3D CAD *SolidWorks* para ilustrar de maneira mais inteligível o projeto conceitual como um todo.

Por fim, uma seção que trata especificamente do valor médio orçado dos materiais de maior valor agregado do CWC é exposta, dando uma ideia da ordem de grandeza do custo econômico de construção deste projeto em sua versão desejável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O projeto conceitual de um CWC deve ser desenvolvido de forma que, a partir das necessidades observadas para a realização dos testes, sejam determinadas as características que darão forma ao mesmo. Todavia, para a elaboração de um projeto bem embasado, deve-se compreender com maior profundidade o funcionamento de um CWC e as suas características básicas.

Canais de água circulante apresentam configuração muito semelhante à de túneis de vento, uma vez que receberam forte influência projetual das literaturas destes, mais acessíveis e que se apresentam em quantidade considerável. Sendo respeitadas as semelhanças dinâmicas, fluidos como a água e o ar podem ser tratados de maneira semelhante (FOX; MCDONALD; PRICHTARD, 2006), o que permite a utilização do conhecimento já bem fundamentado dos projetos de túneis de vento.

De acordo com Suárez et al. (1994) muitos estudos como os de Thompson (1975), Deane (1979), Erickson et al. (1986), Davies (1986), Malcolm e Nelson (1987) e Cunningham (1990) validam o câmbio de conhecimento entre concepções destes dois tipos de instalações. Esta corroboração se deve a demonstração de que os campos de escoamento e as forças hidrodinâmicas observados em canais de água são equivalentes aos campos de escoamento aerodinâmico e forças de modelos em túneis de vento para um regime de escoamento incompressível, onde o número Mach é menor que 0,3.

Segundo Erickson (1981) e Werle (1982 apud ERICKSON, 1982) a estrutura de vórtices em um túnel de água com escoamento em baixo número de Reynolds ou em um túnel de vento com alto número de Reynolds serão muito similares. Todavia, devido a viscosidade cinemática da água ser superior à do ar, a possibilidade de emprego de velocidades mais baixas nos experimentos fornece resultados com entendimento qualitativo muito superior aos obtidos nos túneis de vento, conforme corroboram Lautenbach (1988) e Brent e Frate (1994) ao declararem que a visualização do escoamento em túneis de água de baixa velocidade têm sido um método efetivo para a análise de campos de escoamento complexos.

2.1. Testes de IFE

A análise experimental dos fenômenos de interação fluido-estrutura é muito presente na engenharia moderna em que estruturas, de uma maneira geral, aumentaram sua complexidade, reduziram seu peso, se tornaram mais flexíveis e ainda passaram por um processo de esbeltamento (SANCHES; CODA, 2009). Blevins (1990) em seu livro que trata sobre vibrações decorrentes da interação entre fluido e estrutura argumenta que, devido ao uso de materiais a sua capacidade limite, a presença de vibrações induzidas por fluidos se tornou uma situação-problema comum na engenharia atual.

Na análise de interação fluido-estrutura os modelos são gerados tanto para a estrutura quando para o fluido. Isto ocorre pois, segundo Zdravkovich:

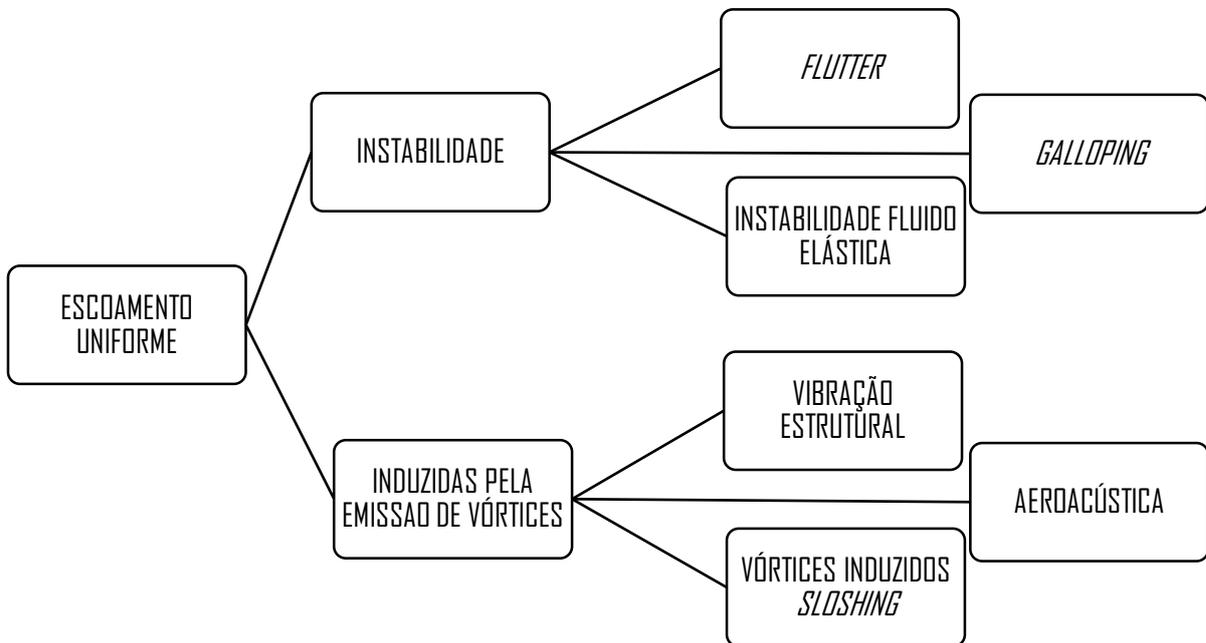
Quando o fluido escoar por um corpo estacionário ou, de maneira equivalente, quando um corpo se move em um fluido em repouso, uma região de fluxo perturbado é sempre formada ao redor do corpo. A extensão da região de escoamento perturbado é, em grande parte, dependente do formato, orientação, e tamanho do corpo, da velocidade e viscosidade do fluido, e pode ser influenciada por uma grande variedade de pequenos distúrbios. (ZDRAVKOVICH, 1997, v. 1, p. 3, tradução nossa)

Comprova, portanto, que a influência tanto da estrutura quanto do fluido pode alterar a extensão da região perturbada devido a sua interação. A parte estrutural geralmente pode ser modelada como osciladores lineares, devido a sua deformação quase linear com o acréscimo de carregamento, apresentando uma única equação linear - caso tenha um grau de liberdade excitado pela força do escoamento – ou um sistema linear de equações – caso a estrutura apresente mais de um grau de liberdade. Já o comportamento do fluido, por ser não linear e apresentar um fenômeno de múltiplos graus de liberdade, só pode ser modelado a partir da combinação de princípios básicos e dados experimentais. (BLEVINS, 1990)

É na consideração sobre o problema de análise comportamental do fluido – parágrafo anterior – que se engaja este projeto, onde o emprego de instalações dedicadas aos fenômenos do tipo IFE promove o estudo experimental parametrizado, ampliando assim o conhecimento da dinâmica dos fluidos.

Quando se fala em vibrações provocadas por IFE, essas dependem, basicamente, da natureza do escoamento e da estrutura. Para escoamentos uniformes – condição requisitada no CWC – pode-se ter as seguintes dinâmicas de vibração, conforme apresentado na Figura 7:

Figura 7 – Organograma de Dinâmicas de Vibração para escoamento uniforme.



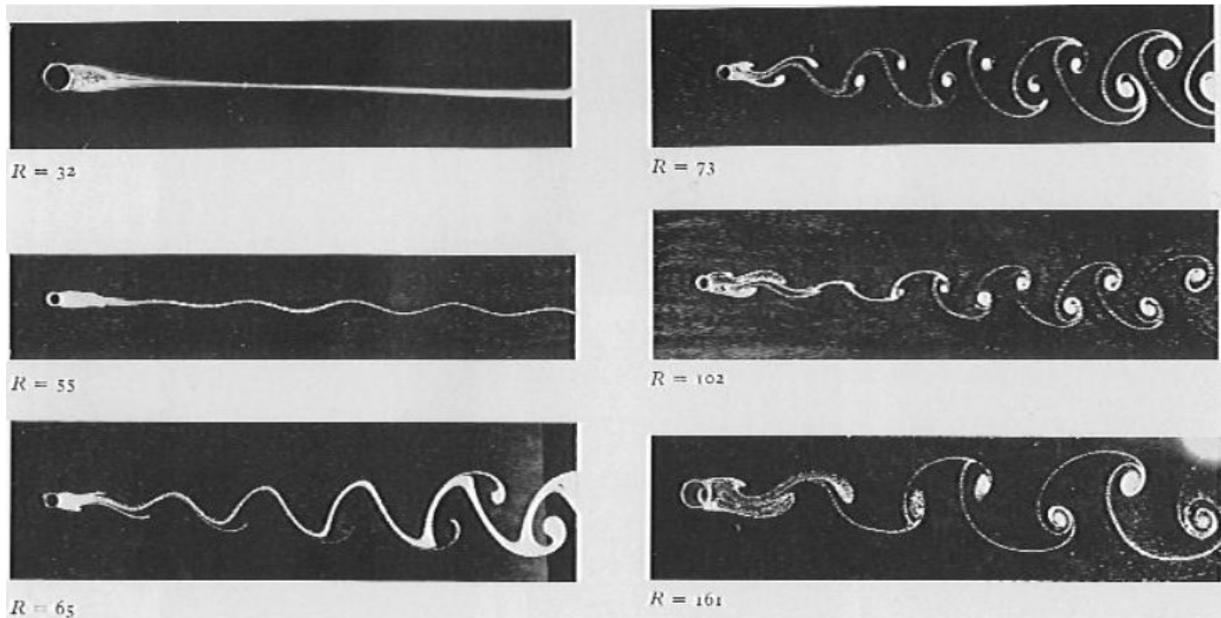
Fonte: Adaptada e traduzida de Blevins (1990, p.2).

Conforme pode-se observar na Figura 7, o fenômeno do tipo VIV (estudo que se espera realizar no CWC) está entre os tipos de vibração que ocorrem em escoamento uniforme, tratando-se de

[...] oscilações de natureza auto-excitada e autocontrolada que, desta forma, não se preocupam pela ordem de grandeza alcançada, cerca de um diâmetro em estruturas cilíndricas, mas sim por sua permanência, capaz de levar a um precoce quadro de comprometimento estrutural por fadiga. (FUJARRA, 2002, p. 3)

Dentre as interações fluido-estrutura, o estudo do comportamento do escoamento sobre estruturas cilíndricas se tornou um problema muito analisado mundialmente. Pesquisadores como Plandtl, Tietjens e Homann já apresentavam imagens do fenômeno de VIV em cilindros há oitenta anos (Figura 8) e, apesar da evolução dos estudos já realizados e publicados na área, como os dois volumes de Zdravkovich de 1997, existem ainda diversas barreiras a serem derrubadas no campo de conhecimento deste fenômeno.

Figura 8 – Fotos que ilustram a evolução do campo de escoamento à jusante de uma estrutura cilíndrica de acordo com a variação do número de Reynolds.



Fonte: Homann (1936, apud BATCHELOR, 1980)

A fim de realizar experimentos que apresentem qualidade de resultado, a infraestrutura disponível deve respeitar as condições necessárias para a aplicação dos testes de maneira bem controlada. Ássi (2005, p. 249) em um dos apêndices de sua dissertação de mestrado, onde apresentou o desenvolvimento de um CWC para realização de experimentos do fenômeno VIV, afirma que “o principal objetivo de um canal de provas é a geração de um fluxo constante e uniforme de escoamento em uma seção de testes instrumentada”. Auferir tal objetivo não é uma tarefa simples, devido principalmente a dificuldade de antever o comportamento de fluidos como a água ao passar por diversos componentes e singularidades capazes de alterar a direção e a regularidade do escoamento. Brusca, Lanzafame e Messina (2011), ao escreverem um capítulo que trata do projeto e construção de um túnel de vento de baixa velocidade no livro “*Aerodynamics, Models and Experiments*”, afirmam que, sabendo as dimensões da seção de testes e o tipo de teste a ser realizado em um túnel de vento, todos os componentes que compõem este túnel podem ser projetados.

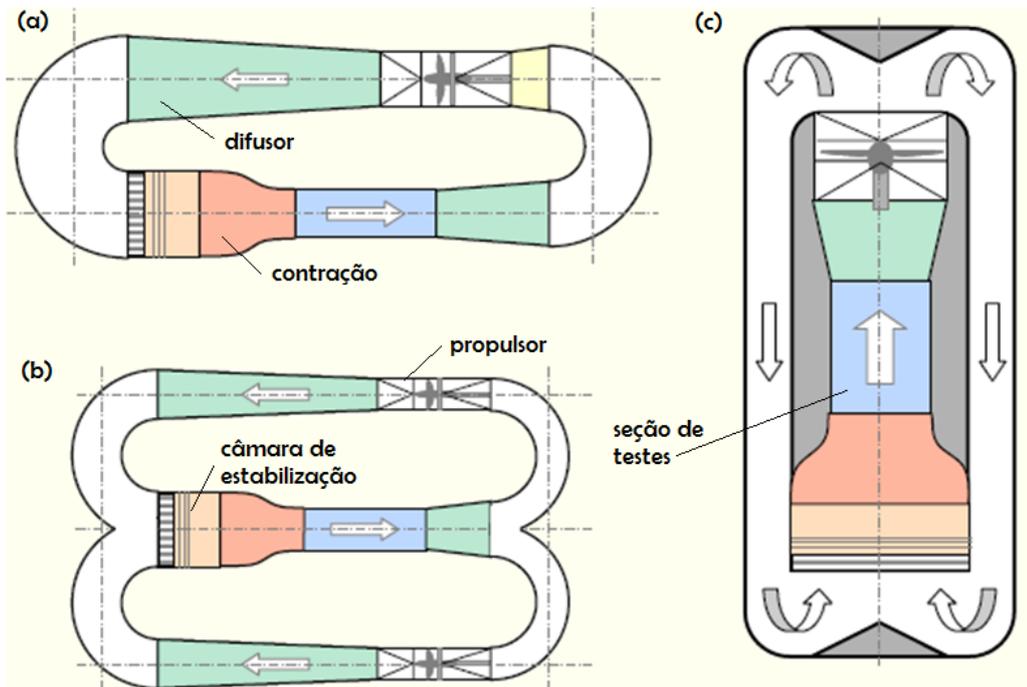
As próximas seções deste trabalho se dedicam a descrever cada um desses componentes de um CWC.

2.2. Configuração genérica de um CWC

Como a intenção do canal aqui pretendido é de executar testes de caráter IFE, entre eles o VIV, o fluido de trabalho recomendando é a água, que possui massa específica superior à do ar e um número de Reynolds 15 vezes maior que no ar em condições semelhantes.

Sendo a água o fluido empregado, o projeto do canal se limita a circuitos fechados – o que evita o desperdício que seria provocado por circuitos abertos e ainda se aproveita da inércia que os circuitos fechados portam naturalmente. Sendo assim, uma das grandes vantagens do canal de circuito fechado é a necessidade de quantidade inferior de energia quando comparado a um túnel de circuito aberto e, ainda, a produção de menos barulho (BRUSCA; LANZAFAME; MESSINA, 2011). Canais de circuito fechado podem ser encontrados em três diferentes configurações, conforme apresenta a Figura 9 de Ássi (2005):

Figura 9 - Configurações comuns em túneis de circuito fechado



Fonte: Ássi (2005, p. 252)

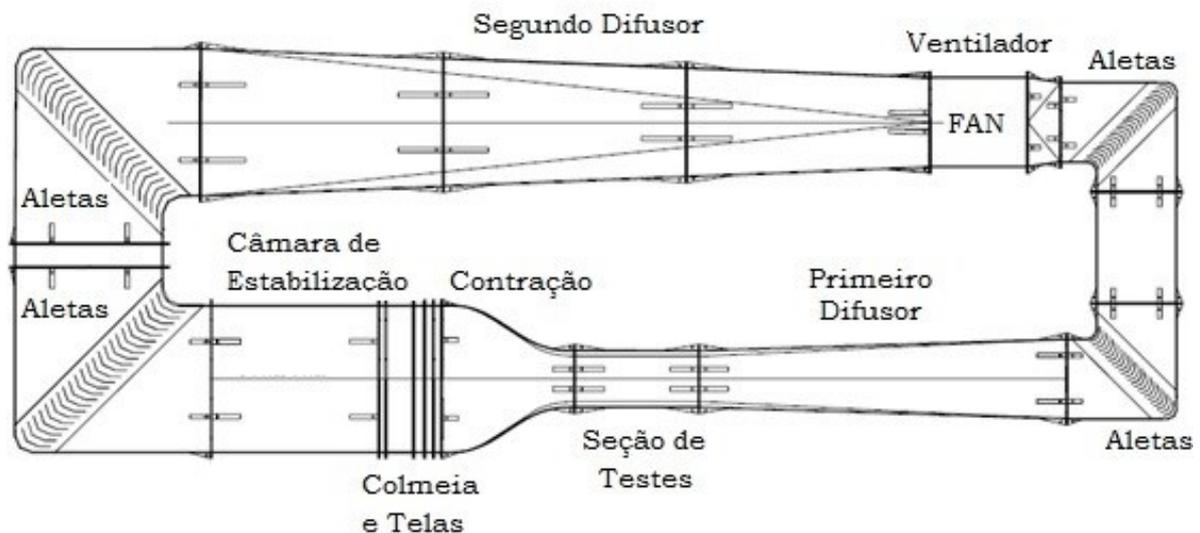
As configurações se diferenciam na maneira de retorno do fluido após passar pela seção de testes, sendo que:

- O retorno pode ser por duto simples, com a presença de um único propulsor (a);
- Dutos duplos, com a presença de dois grupos propulsores (b) ou

- Com dutos duplos e a presença de um único propulsor logo após a seção de testes (c).

Tanto os túneis de vento quanto os CWC podem ser divididos em elementos menores de acordo com a função principal destes para a funcionalidade do sistema. A Figura 10 encontrada em Brusca, Lanzafame e Messina (2011) apresenta uma configuração básica de um túnel de vento e a presença de cada um dos elementos principais também encontrados nos CWC:

Figura 10 - Túnel de vento de circuito fechado e seus elementos principais.



Fonte: Adaptada e traduzida de Brusca, Lanzafame e Messina (2011)

A fim de auxiliar na compreensão deste tipo de instalação de testes segue uma apresentação dos elementos fundamentais que compõem um canal de água circulante.

2.3. Seção de Testes

Segundo Ássi (2005, p. 249), a seção de testes é o elemento primordial em um canal e o projeto de todos os componentes adjacentes devem ser modelados com o objetivo de produzir as condições de escoamento desejadas neste elemento. Sendo o produto final as condições adequadas para a realização de testes com qualidade, cada um dos elementos adjacentes deve ser projetado tendo em vista a sua influência no escoamento da água.

Em um canal de superfície aberta, a velocidade de escoamento nas paredes laterais e no fundo é zero devido a condição de não escorregamento e, a velocidade

máxima ocorre no plano médio da superfície livre (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Ainda, a velocidade varia na direção do escoamento e, deste modo, a distribuição de velocidades em um canal com superfície aberta é, em geral, tridimensional.

Para a realização de experimentos na seção de testes, o escoamento nesta região deve ser permanente, o que significa que em um determinado local a velocidade média não deve apresentar mudanças com o tempo (podendo variar de um local para outro). O escoamento ainda deve ser uniforme, ou seja, a velocidade média na seção de testes deve permanecer constante.

Segundo Mehta e Bradshaw (1979), o escoamento leva cerca de 0,5 vezes o diâmetro hidráulico da seção para alcançar os níveis de uniformidade adequados. Çengel e Cimbala (2007) apresentam o cálculo do raio hidráulico de um canal de água aberto que pode ser determinado por

$$R_h = \frac{A}{P},$$

onde A é a área da seção transversal e P o perímetro molhado. Este valor é equivalente a um quarto do diâmetro hidráulico para tubos circulares. Logo, o escoamento levará 2 vezes o raio hidráulico para alcançar os níveis de uniformidade adequados. Uma vez que o raio hidráulico é considerado a dimensão característica para o tratamento de canais abertos, o número de Reynolds pode ser calculado, sendo que canais abertos apresentam característica laminar para $Re \leq 500$ e turbulento para $Re \geq 2500$.

Com relação ao tamanho da seção de teste, os fatores limitantes, segundo Erickson et al. (1986), são:

- O espaço físico disponível para a instalação de um CWC;
- O custo máximo viável (quanto maior o projeto, maiores os gastos com o sistema propulsor de água, por exemplo) e
- A complexidade do projeto.

2.4. Câmara de Estabilização

É na câmara de estabilização que são posicionados dois elementos importantíssimos para a redução de turbulência e das escalas de vórtices (ÁSSI, 2005; BRUSCA; LANZAFAME; MESSINA, 2011). Estes elementos, conhecidos por

colmeias e telas, são placas permeáveis com construções diferenciadas por onde a água passa e homogênea as vorticidades do escoamento, cada um a sua maneira.

2.4.1. Colmeias

As colmeias, conforme o próprio nome sugere, apresentam uma geometria na forma de favos de abelhas, ainda que possam exibir outras geometrias celulares: cilíndricas ou prismáticas. Segundo Barlow, Rae e Pope (1999 apud CATTAFESTA; BAHN; MATHEW, 2010) a geometria de células mais utilizada é a hexagonal, que possui o menor coeficiente de perda de pressão.

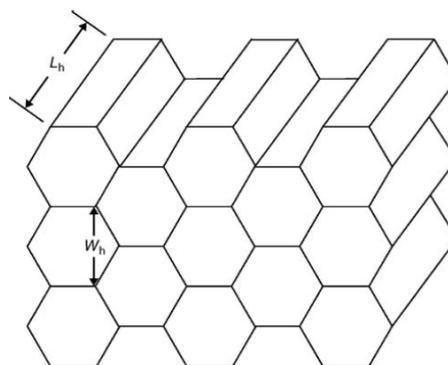
Esta peça é responsável por reduzir a presença de variações flutuantes na velocidade transversal do escoamento (PRANDTL, 1933) e, deste modo, o fluido apresentará apenas componentes axiais de velocidade. Ainda, o uso de colmeias limita as escalas de vorticidade à ordem de grandeza do diâmetro da célula.

Brusca, Lanzafame e Messina (2011) argumentam que são três os parâmetros que definem a escolha do tipo de colmeias utilizado em um túnel de vento:

- L_h - o comprimento da célula;
- W_h - o “diâmetro” da célula e
- β_h - a porosidade da célula, obtida pela razão entre a área útil da seção transversal e a área total.

A seguir, Figura 11, retirada de Cattafesta, Bahn, Mathew (2010), apresenta-se uma representação da estrutura esquemática de uma colmeia.

Figura 11 – Representação das células que compõem a estrutura colmeia.



Fonte: Cattafesta, Bahn, Mathew (2010, p. 695).

Os critérios que devem ser verificados no projeto da colmeia para garantir eficiência máxima do uso são:

- A razão L_h/W_h deve ser um valor entre 6 e 8;
- β_h deve ser maior ou igual a 0,8.

Cuidado especial se deve ter com o ângulo de incidência do escoamento nas células que, segundo Mehta e Bradshaw (1979), deve ser inferior a 10 graus.

2.4.2. Telas

As telas são malhas estruturais que tornam o campo de velocidades mais uniforme na seção transversal – reduzindo as flutuações de velocidade do escoamento (PRANDTL, 1933; MEHTA, 1989) – e amenizam a turbulência, principalmente por impor uma perda de carga proporcional à velocidade ao quadrado. Assim, a perda de carga refletirá maiores valores em locais onde a velocidade for superior e auxiliará na obtenção de uma velocidade média mais regular na seção transversal.

Schubauer, Spangenberg e Klebanoff (1950, apud CATTAFESTAM BAHN, MATHEW, 2010, p. 5, tradução nossa) afirmam que “o número de Reynolds baseado no diâmetro dos fios da tela deve ser menor que 60 para prevenir geração de turbulência adicional por conta da formação natural de vórtices”.

Geralmente a colmeia se apresenta antes das telas, reduzindo as escalas de vorticidade para depois o fluido passar por um conjunto de telas que irão fornecer uma velocidade média para o escoamento e diminuirão a camada limite. Prandtl (1933) demonstrou em seu estudo que uma série de telas de diferentes tamanhos de malha (com tramas abertas, média e fechadas) é mais eficiente que apenas um tipo de malha em todas as telas e, segundo Strunz e Speth (1987), a última tela deve ser de precisão para que sejam reduzidas as últimas não uniformidades presentes no escoamento.

Para garantir a redução da turbulência, o espaçamento mínimo entre telas deve ser da ordem da escala de energia que contém os turbilhões (MEHTA; BRADSHAW, 1979); porém, estudos realizados posteriormente, confirmam que uma distância equivalente a 0,2 do diâmetro da câmara de estabilização permite a performance adequada para as mesmas. Ainda, a distância ótima entre a última tela e a contração (seção 2.5) seria de 0,2 do diâmetro da seção transversal. Caso estas distâncias sejam inferiores espera-se distorção do escoamento na última tela;

contudo, se as distâncias forem muito maiores espera-se a ocorrência de crescimento indesejado da camada limite.

É interessante considerar, ainda, uma concepção de instalação tanto para as telas quanto para as colmeias que permita a remoção dos mesmos para limpeza e manutenção, quando necessário.

2.5. Contração

Este elemento é responsável por acelerar o fluido logo após a passagem do mesmo pela Câmara de Estabilização. Deste modo, o mesmo adquire a velocidade desejada na seção de testes e permite que os outros elementos do canal apresentem uma velocidade inferior, vantagem muito interessante devido à redução da perda de carga nas singularidades e outros elementos do canal, conforme será observado na seção 4.5.1. Outro ponto positivo da presença de contrações em túneis de teste é a redução das variações na velocidade de escoamento do fluido (BRUSCA; LANZAFAME; MESSINA, 2011).

O formato das superfícies que compõem uma contração – a partir da relação entre áreas e a seção transversal - se centra na produção de um escoamento uniforme e estável na saída da contração (BELL; MEHTA, 1988). Para atingir tal requisito o comprimento da contração deve ser suficientemente curto a fim de minimizar o crescimento da camada limite e custo, porém suficientemente longo a fim de prevenir grandes gradientes de pressão adversos ao longo das paredes, gerados pela curvatura, o que pode levar a separação do escoamento (CATTAFESTA; BAHN; MATHEW, 2010).

O principal parâmetro de projeto em uma contração é a razão de contração (r) que é a razão entre as áreas de entrada e saída da contração. Segundo Ássi (2005), esta razão representa o ganho na velocidade do escoamento e quanto maior a razão, melhor a contração devido as diminuições das perdas de carga. Apesar de ser preferível o uso de contrações circulares, seções transversais de formato quadrado ou retangular, na ausência de separação, conseguem manter os escoamentos dos cantos localizados, não prejudicando o escoamento central significativamente (BELL; MEHTA, 1988).

Segundo Bell e Mehta (1989), a geometria de uma contração, especialmente para túneis de vento, já foi tema de diversas publicações devido a sua grande

influência no escoamento na seção de testes. Foi observada a necessidade de realizar geometrias suaves que tangenciem o máximo possível as paredes dos elementos próximos à entrada e à saída da contração. Entre estes estudos tem-se o de Fang (1997, apud FANG, 2001) que estendeu o procedimento de Morel (1977) para o projeto da curvatura de contrações quadradas. O formato da contração é resultado da combinação de duas equações cúbicas descritas como:

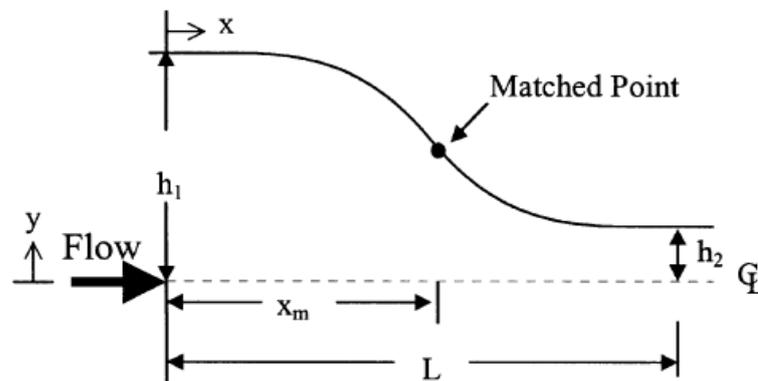
$$y \text{ (ou } z) = (h_1 - h_2) \left[1 - \frac{1}{X_m^2} \left(\frac{x}{L} \right)^3 \right] + h_2, \quad x < x_m,$$

e

$$y \text{ (ou } z) = \frac{(h_1 - h_2)}{(1 - X_m)^2} \left(1 - \frac{x}{L} \right)^3 + h_2, \quad x > x_m$$

Sendo h_1 um dos lados da seção transversal antes da contração, h_2 o mesmo lado reduzido ao final da contração, X_m equivale a x_m/L , sendo x_m o ponto de encontro entre as curvas côncava e convexa da superfície de contração e L o comprimento da contração, conforme é possível observar na Figura 12:

Figura 12 – Esquema representativo das informações necessárias para aplicação das equações para determinação da curvatura de superfície da contração.



Fonte: Fang (2001, 250)

2.6. Difusores

Estes elementos são responsáveis pela desaceleração do fluido e conseqüente aumento da pressão logo após a passagem do mesmo pela seção de testes ou ainda logo após passar pelo propulsor. Deste modo, as perdas de carga são reduzidas e a energia necessária para manter o fluido em movimento é menor (CATTAFESTA; BAHN; MATHEW, 2010).

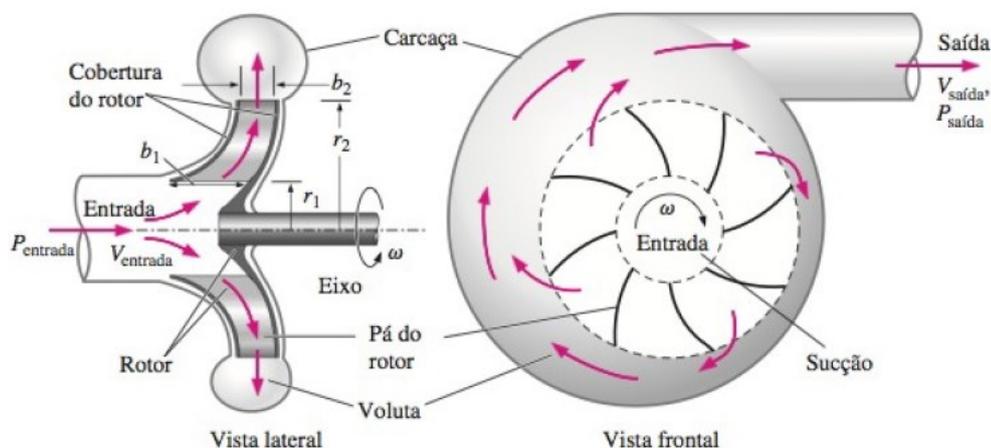
O difusor que se apresenta logo após a saída da seção de testes deve ter uma expansão suave que não permita o descolamento da camada limite e, desta maneira, não reflita no escoamento anterior que passa pela seção de testes (ÁSSI, 2005).

2.7. Ventilador/Propulsor/Bomba

Responsável por movimentar o fluido, este elemento deve ser projetado atendendo as condições de operação do canal. Bombas do tipo Kaplan geralmente atendem aos requisitos necessários, no entanto, cuidado deve ser tomado ao se utilizar um propulsor deste tipo em um canal onde se deseja o mínimo de turbulência possível. Já as bombas centrífugas podem não operar em condições ideais de projeto, contudo, o seu escoamento se apresenta de maneira mais uniforme na saída.

Conforme pode ser observado na Figura 13 – retirada de Çengel e Cimbala (2007) – o movimento do fluido para dentro de bombas centrífugas se inicia na sucção, com a sua entrada no compressor axialmente. Ao encontrar as pás giratórias, o fluido adquire velocidade radial por transferência de momento promovido pelas pás do rotor, além do aumento de velocidade devido a ausência de força centrípeta suficiente para sustentar o movimento circular. Ao ganhar velocidade, o fluido é lançado para a periferia – voluta – onde é direcionado para a saída da bomba. (ÇENGEL; CIMBALA, 2007)

Figura 13 – Representação do funcionamento de uma bomba centrífuga.



Fonte: Çengel e Cimbala (2007, p. 664)

Devido a forma de caracol apresentada pela voluta – considerado um difusor – o ganho recebido em bombas centrífugas é de aumento de pressão no fluido:

[...] se o escoamento é constante na média, se o fluido é incompressível e se os diâmetros de entrada e saída são iguais, a velocidade média do escoamento a saída é idêntica àquela da entrada. Assim, não é necessariamente a velocidade, mas sim a *pressão* que aumenta da entrada para a saída através de uma bomba centrífuga. (ÇENGEL; CIMBALA, 2007, p. 664, grifo do autor)

Outro ponto positivo para bombas centrífugas é que, devido a sua simplicidade construtiva, as bombas centrífugas podem ser fabricadas em série, o que torna os custos de produção e manutenção destas instalações mais baixos.

Com relação as exigências comuns em canais de água, as bombas devem ser capazes de atender a uma alta vazão e baixa carga manométrica devido as características comuns deste tipo de instalação. A determinação da perda de carga (que é a altura adicional à qual o fluido precisa ser elevado pela bomba para superar as perdas por atrito) de um CWC é obtida a partir do cálculo de todas as perdas de carga que ocorrem ao longo da passagem do fluido pelo sistema.

2.7.1. Perdas de Carga

A perda de carga para o CWC equivale a perda de pressão que o fluido sofre ao passar por todos os elementos do sistema e pode ser dividida, conforme Fox, McDonald e Pritchard (2006), como perdas maiores (causadas pelo atrito em trechos do sistema de água constante) e perdas menores (que resultam dos efeitos de atrito do escoamento através de trechos do sistema de área transversal variada ou acessórios como, por exemplo: válvulas, cotovelos, tês; conhecidos também como singularidades).

A perda de carga está diretamente relacionada ao número de Reynolds e, portanto, ao regime de escoamento (laminar ou turbulento). Existe ainda uma relação diretamente proporcional entre a perda de carga e o quadrado da velocidade do fluido e, portanto, quanto menor a velocidade nos outros elementos, menor será a potência requisitada para o funcionamento do canal com a velocidade desejada na seção de testes (MEHTA; BRADSHAW, 1979).

2.7.1.1. Perdas Maiores

As perdas maiores são aquelas resultantes devido aos efeitos de atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante.

A equação para calcular a altura equivalente da coluna de fluido - perda de carga - nestes elementos é dada por:

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\vec{V}^2}{2g}$$

Sendo f o fator de atrito, L e D o comprimento e o diâmetro do duto, \vec{V} a velocidade do fluido e g a aceleração da gravidade.

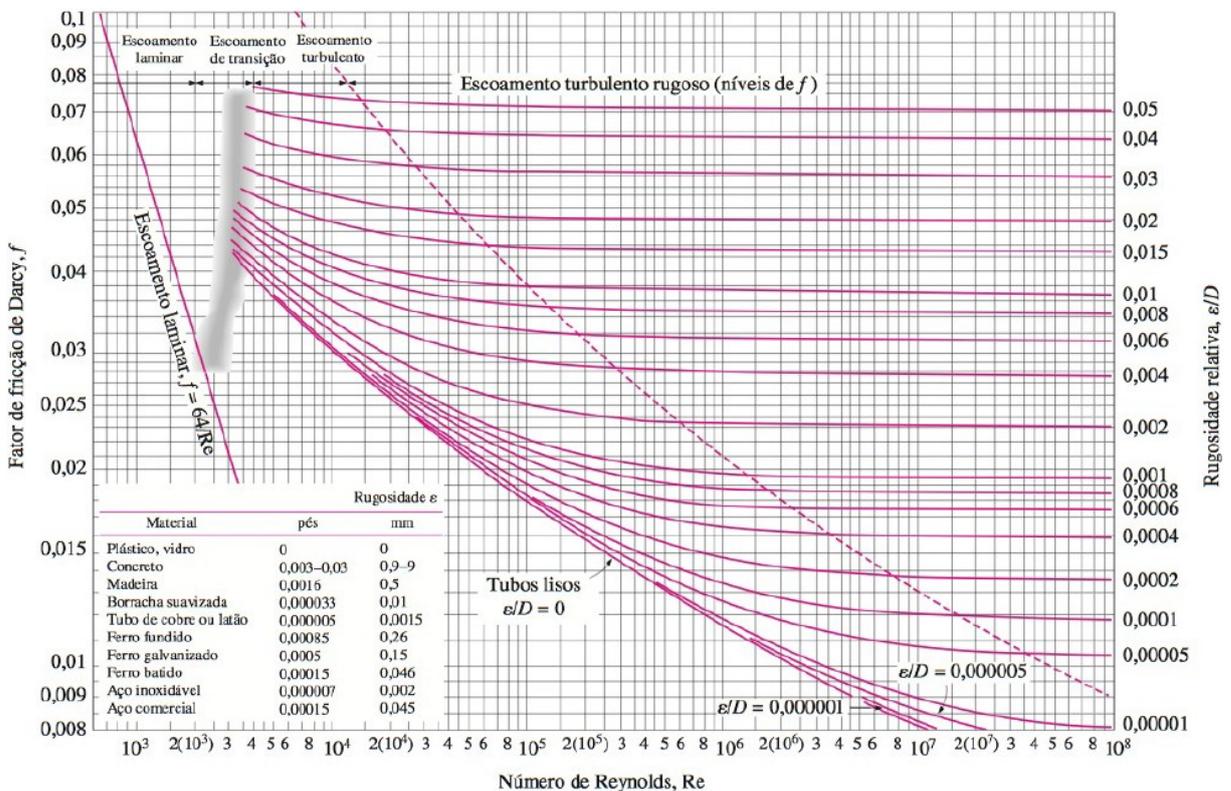
Para o caso de canais abertos – situação encontrada na seção de testes - a equação para calcular a altura equivalente da coluna de fluido é dada por:

$$h_l = f \frac{L}{R_h} \frac{\vec{V}^2}{8g}$$

Sendo R_h o raio hidráulico do canal aberto, lembrando que para canais abertos a relação entre o diâmetro hidráulico e o raio hidráulico é de $D_h = 4R_h$.

O fator de atrito pode ser obtido a partir de um gráfico (Figura 14) que apresenta a variação do fator de atrito com o número de Reynolds para valores conhecidos de ϵ/D , que é a razão entre a rugosidade do tubo e seu diâmetro.

Figura 14 – Gráfico do Fator de Atrito por Número de Reynolds e Rugosidade relativa.



Fonte: Çengel e Cimbala (2007, p. 797)

2.7.1.2. Perdas Menores

Cada um dos elementos que compõem um CWC possui singularidades que causam a perda de carga da vazão ao longo do sistema. A presença destes acessórios geralmente acresce um valor menor de perda de carga que aqueles apresentados na seção anterior, se o sistema incluir longos trechos de tubo de seção constante. Todavia, esta configuração não é encontrada em instalações deste tipo, que possuem pequenos trechos de tubulação/canais e uma quantidade considerável de singularidades e acessórios.

Assim, as perdas menores podem ser calculadas de duas maneiras, que são:

$$h_{lm} = K \frac{\bar{V}^2}{2g},$$

onde K é um coeficiente de perda de carga determinado experimentalmente para cada situação, ou seja:

$$h_{lm} = f \frac{L_e \bar{V}^2}{D 2g},$$

onde L_e é o comprimento equivalente de um tubo reto.

Cada uma das singularidades do sistema apresentará um coeficiente de perda de carga ou um comprimento equivalente. Estes dados são obtidos com base em tabelas e gráficos apresentados em literaturas como Azevedo et al. (1998), Fox, Mcdonald e Pritchard (2006) e Çengel e Cimbala (2007).

2.7.2. Potência da Bomba

Assim que a perda de carga for conhecida, a potência de bombeamento necessária para superar a perda de pressão pode ser determinada por:

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{V} \rho g h_l,$$

sendo \dot{V} a vazão em volume, ρ a densidade da água, g a aceleração da gravidade e h_l a perda de carga determinada.

Outro parâmetro importante para a escolha da bomba é o NPSHD (altura de sucção positiva líquida disponível). Este parâmetro é definido como a diferença entre

a pressão absoluta de estagnação no escoamento na sucção da bomba e a pressão de vapor do líquido (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006). Ele expressa a altura de carga máxima permitida de NPSHR (altura de sucção positiva líquida requerida) para evitar cavitação na bomba. O NPSHR é disponibilizado pelas fabricantes de bombas, já o NPSHD pode ser obtido por:

$$NPSHD = H_s + H_{atm} - H_{vp} - H_l,$$

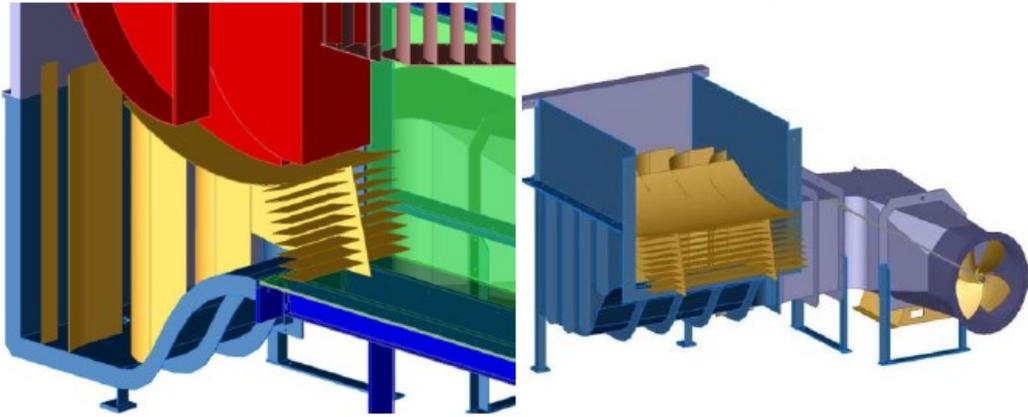
sendo H_s a altura de coluna de água entre a sucção e o eixo da bomba, H_{atm} a pressão atmosférica local em metros de coluna d'água (*mca*), H_{vp} a pressão de vapor do fluido em função da sua temperatura em *mca* e H_l a perda de carga total na linha de sucção em *mca*.

2.8. Aletas

O emprego de aletas se deve a necessidade de direcionamento do escoamento com um ângulo adequado para as células da colmeia. No caso de túneis de vento essas aletas se apresentam com um formato curvado, podendo ter um perfil semelhante a perfis de asa, a fim de direcionar o fluido nos locais onde deveria mudar a direção de escoamento como nos cantos do circuito.

O '*Combined wind wave current tank*', da Universidade de *Newcastle* apresentado na introdução, sofria de um problema no escoamento do fluido que não permitia a execução de experimentos adequadamente na seção de testes. O motivo alegado do problema era o comprimento considerado relativamente pequeno do canal para a regularização do fluido (11 metros). Com o propósito de melhorar a qualidade do escoamento na seção de testes foram instaladas aletas de direcionamento, tanto na entrada quanto na saída, que solucionaram o problema. A representação da solução utilizada pode ser observada na Figura 15 de Mehmet (2011).

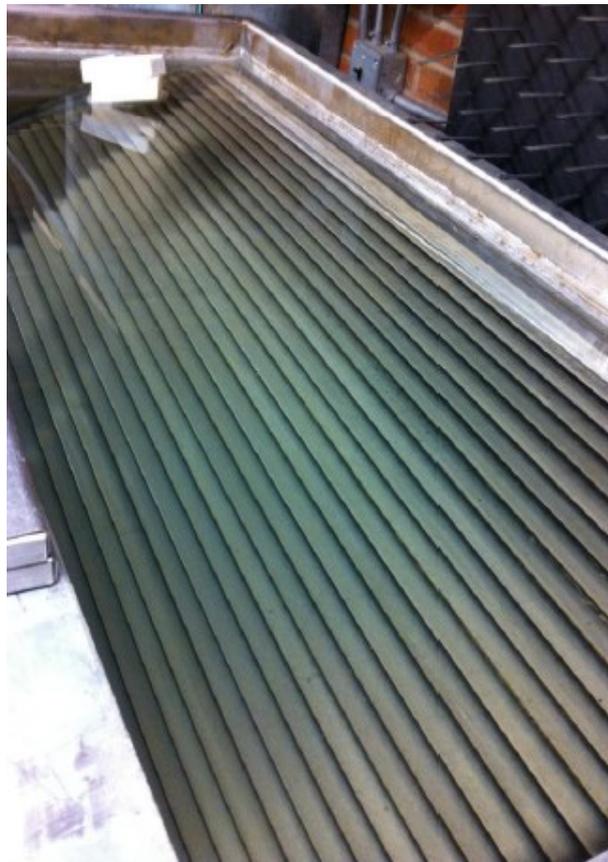
Figura 15 – Representação esquemática do uso de aletas para corrigir a uniformidade de escoamento na seção de testes do canal de água circulante e vento da Universidade de Newcastle.



Fonte: Mehmet (2011, p.20)

A Universidade de Alberta, no Canadá, utiliza aletas com o propósito de regularizar o escoamento ainda antes da contração, conforme pode ser observado na Figura 16:

Figura 16 – Foto das aletas direcionadoras de fluxo do canal de água circulante da Universidade de Alberta, Canadá.



Fonte: Bussière (2012, p.9)

3. O CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE DA UFSC – CAMPUS DE JOINVILLE

Neste capítulo serão tratadas as necessidades da instalação, permitindo assim que o projeto conceitual do CWC se distancie do modelo genérico e execute o seu papel final: o desenvolvimento de um escoamento uniforme, de modo que permita a execução de experimentos hidrodinâmicos com a apresentação de resultados úteis à pesquisa e ensino.

Além dos requisitos do cliente, neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a composição do projeto conceitual.

3.1. Requisitos do Cliente

Com a intenção de determinar as características básicas que irão compor este projeto conceitual, deve-se obter as necessidades do cliente, que serão então convertidas em requisitos do cliente, a UFSC – Campus de Joinville.

A composição dos dados para a construção das necessidades do cliente foi realizada com apoio do professor orientador deste trabalho, baseadas em sua experiência de pesquisa das IFE.

Necessidades do cliente:

- Uma instalação de testes que utilize como meio fluido a água – com principal finalidade a realização de testes do tipo IFE;
- Esta instalação deve dispor de uma seção de testes com área transversal de 1,0 x 1,0 m e ao menos 5,0 m de comprimento;
- Possibilidade de execução dos testes em diferentes regiões do canal, todavia priorizando os ensaios em sua porção média;
- A água deve se deslocar ao longo dos corpos de teste em uma velocidade média de 0,5 m/s – com a possibilidade de realização de experimentos em velocidade inferior ou superior e, neste último caso, diminuindo a lâmina d'água;
- Deve ser possível a visualização da seção de testes pelas laterais e parte inferior;

- Um dos lados da seção de testes deve ser de livre acesso, permitindo montagens experimentais;
- Deve ser apto a receber, se necessário, um *deck* de visualização no lado oposto ao lado de acesso livre da seção de testes, permitindo a instalação segura dos instrumentos de medição e/ou modelos;
- Não deve possuir limitação de tempo máximo para a execução dos experimentos;
- A instalação deve ser de fácil operação, e que seja adaptável a mudanças de configuração dos testes;
- Deve permitir a implementação em partes, dependendo do recurso financeiro obtido e que permita a reconstrução da instalação a fim de receber melhorias para execução dos testes no futuro;
- Devido ao pré-conhecimento do grande volume (vazão) exigido na circulação da água e sabendo de antemão que a propulsão é o item de maior custo no projeto, em virtude das dimensões exigidas, seria interessante a estruturação do canal com emprego de duas bombas em paralelo. Deste modo, a potência seria dividida e permitiria a construção mesmo se o recurso adquirido para implementação seja obtido em etapas ou em valor menor que o esperado.

Finalizada a etapa de aquisição das necessidades do cliente, a transformação destes itens em requisitos do cliente torna os termos utilizados para a concepção do projeto mais técnicos.

Testes de IFE exigem algumas características básicas de sua instalação para que os resultados possam ser satisfatórios. A partir da análise das necessidades requeridas para testes de IFE e das necessidades do cliente, determinou-se que a instalação que apresenta as características que melhor se enquadram é do tipo CWC. Os motivos que levam a esta escolha são:

- Permite a realização de testes por um intervalo de tempo qualquer, sem a limitação de comprimento total (como em tanques de reboque, por exemplo);

- A possibilidade de desconsiderar o inconveniente percurso inicial de aceleração para obtenção de regime estacionário e final de desaceleração para a parada dos testes;
- Escoamento na seção de teste uniforme com fluxo constante;
- A vazão de água na seção de testes será de 1800 m³/h, devido à área transversal da seção de testes e velocidade requisitados, escoando por duas bombas em paralelo;
- A seção de testes deverá ser realizada em material transparente na região de execução dos testes;
- Os elementos que compõem o canal devem ser projetados visando um conceito modular/versátil, sempre que possível.

3.2. Metodologia do Projeto Conceitual

A partir dos requisitos do cliente é possível determinar a metodologia a ser abordada no projeto conceitual. Um projeto como este será inevitavelmente composto de diversas linhas de raciocínio – o que irá depender da natureza do problema a ser resolvido – e grande quantidade de informações interdisciplinares, o que expõe a complexidade desta fase de projeto.

Segundo Welch e Dixon o projeto conceitual

[...] é o estágio inicial e mais abstrato do processo de projeto começando com as funções requeridas (o que o projeto irá fazer sem dizer como o projeto irá fazê-lo) e que resulta em conceitos (configurações preliminares do sistema). (WELCH; DIXON, 1992, p. 11 apud ALMEIDA, 2000, p. 33, tradução nossa).

Esta citação reforça a ideia de que este projeto não tem como objetivo o detalhamento de todos os componentes necessários para a construção deste canal, característica encontrada somente em um projeto detalhado. Ainda assim, deseja-se realizar o projeto de concepção de um canal de água circulante que, na medida do possível, antevêja algumas informações que seriam obtidas apenas no projeto detalhado. Este dimensionamento racional é composto de detalhamentos básicos que fazem parte da definição dos materiais que serão orçados a fim de determinar uma faixa de custo preliminar para a concretização do CWC.

Outro atributo verificado neste projeto conceitual é a existência de uma representação visual do CWC. A rigor, esta visualização realizada em um *software*

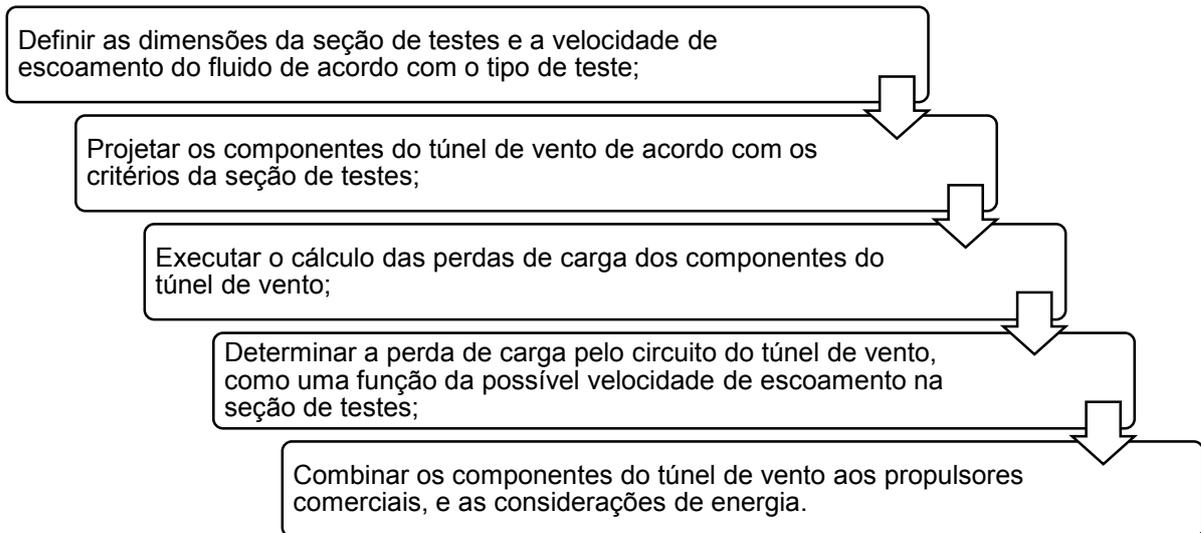
CAD também se enquadra no âmbito do projeto detalhado, mas será aqui adotada a fim de expor detalhes construtivos específicos, bem como auxiliar na compreensão do arranjo do projeto que nem sempre é passível de explicação textual.

Uma análise em CFD (*Computer Fluid Dynamics*) poderia ser realizada para o estudo do comportamento do fluido se houvesse tempo hábil para desenvolvimento computacional de um problema tão complexo como este. Devido a presença de todos os componentes presentes em um canal, todos responsáveis por alterar o escoamento fluido, a quantidade de condições de contorno necessárias para a execução do modelo matemático do problema se tornaria de difícil tratamento. Além disso, as aproximações das equações utilizadas podem simplificar o problema, mas tornam o resultado mais distante da operação real; e, ainda, o tamanho adequado da malha numérica que deve ser escolhida para fornecer um resultado satisfatório (nesta situação densa o suficiente para simulação mais próxima do problema real) exigiria uma capacidade computacional considerável e um alto nível de detalhamento do projeto. Tal abordagem, portanto, foi desconsiderada neste projeto conceitual.

Em contrapartida, a fim de compreender o funcionamento de um CWC e seus elementos básicos, realizou-se uma pesquisa aprofundada para obtenção do embasamento teórico para o projeto do mesmo. Nesta tarefa foi necessário assimilar conhecimentos referentes ao projeto de túneis de vento, devido à já mencionada dificuldade de obtenção dos escassos subsídios para os projetos de CWC. Este procedimento é usual no desenvolvimento de instalações de teste deste tipo e conclui-se que não possui influências negativas no resultado final, particularmente pela presença de uma quantidade considerável de canais de água construídos com estes conhecimentos e que, ainda assim, estão em operação gerando experimentos de boa qualidade.

Com o conhecimento adequado sobre o sistema e seu funcionamento, pode-se levantar as necessidades do cliente para cumprir a tarefa desejada, transformando-as em requisitos do produto, a fim de aplicá-las no projeto em um nível técnico. A título de exemplo, Brusca, Lanzafame e Messina (2011) propõem que as etapas do projeto de um túnel de vento sejam conforme apresenta Figura 17.

Figura 17 – Etapas de projeto de um túnel de vento



Fonte: elaborada pela autora a partir de informações de Brusca, Lanzafame e Messina (2011, p. 219, tradução nossa).

Tendo em mãos o conhecimento para a estruturação do projeto conceitual e as características que a instalação deve possuir pôde ser executada a etapa de projeto de cada um dos elementos do canal. Esta fase do presente projeto foi marcada por duas vertentes metodológicas de acordo com a natureza do problema:

- Dimensionamento racional, com apresentação de desempenhos/resultados palpáveis e que sejam passíveis de utilização direta na construção do canal. Tais dimensionamentos foram executados para as caixas regularizadora e de sucção projetadas em polipropileno; para a estrutura em perfis de alumínio da montagem da regularização por aletas (chamada aqui de gaiola), para a seção de testes com montagem proposta em perfis de alumínio e vidro laminado de segurança (onde conhecimentos de resistência dos materiais, ciência dos materiais e métodos computacionais são necessários) e nas bombas (ao aplicar conhecimentos de mecânica dos fluidos para uma estimativa de perdas de carga no sistema).
- Abordagem conceitual, onde os recursos disponíveis, dificuldade de modelamento simplificado ou o tempo de execução do projeto não são suficientes para apresentar um resultado detalhado contudo, soluções flexíveis são propostas – tais que permitem alterações de acordo com a observação de funcionamento do canal a posteriori.

Ainda com relação à apresentação visual do projeto do CWC, esta foi possível a partir do *software* 3D CAD *SolidWorks*, onde os resultados iniciais obtidos na

etapa de concepção dos elementos foram aplicados e, a partir de um processo iterativo – avaliação visual do modelo *versus* conceitos – definiu-se as melhores soluções conceituais para o CWC. O projeto de canais de água circulante, assim como o de túneis de vento, é um processo onde os objetivos de pesquisa são primeiro determinados e depois os critérios de projeto são estabelecidos, conforme pode-se constatar com a leitura de Brusca, Lanzafame e Messina (2011). Desta maneira, no projeto que envolve concepção, possibilidade de fabricação, custo, espaço e outras restrições conflitantes, o processo de realização acaba se apresentando de modo iterativo (CATTAFESTA, BAHN E MATHEW 2010), onde soluções são trabalhadas, avaliadas e reconsideradas.

Como etapa final deste projeto conceitual, portanto, foram encaminhados pedidos de orçamento a fornecedores dos produtos necessários e, em um último momento, se avaliou a ordem de grandeza do investimento que deve ser dedicado a um projeto deste nível, bem como a viabilidade de sua continuidade devido ao montante auferido.

4. PROJETO CONCEITUAL DO CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE

Assim como no capítulo 2, a fim de facilitar a compreensão da concepção do projeto do CWC, foi realizada a apresentação individual de cada um dos elementos que compõem esta instalação, cada qual com as devidas características necessárias para cumprir o objetivo principal - escoamento uniforme e na velocidade requisitada na seção de testes.

Como o canal de água circulante demandado pela UFSC – Campus de Joinville possui particularidades, estas foram consideradas de acordo com os seguintes elementos principais:

- Seção de Testes;
- Caixa de Regularização;
- Caixa de Sucção;
- Instalação Hidráulica;
- Bombas.

Para tanto, cumpre salientar que o fluido segue o seguinte percurso: após sair das bombas com o devido aumento de pressão, passa pela parte hidráulica de descarga e encontra a caixa de regularização. Esta caixa é responsável por eliminar as vorticidades que possam atrapalhar o escoamento uniforme do fluido ao chegar na seção de testes. Após escoar pela seção de testes o fluido chega a caixa de sucção, onde se prepara para entrar na parte hidráulica de sucção e, finalmente, chegar nas bombas centrífugas, onde o ciclo se reinicia (Figura 18).

Figura 18 – Ciclo do escoamento de água no canal de água circulante da UFSC – Campus de Joinville.



Fonte: elaborada pela autora.

As próximas seções deste capítulo abordam cada um desses elementos.

4.1. Seção de Testes

Para que os testes de IFE sejam realizados deseja-se que o canal opere com velocidade de $0,5 \text{ m/s}$ em uma seção de testes de $1,0 \times 1,0 \text{ m}$ gerando, conforme já relatado anteriormente, uma vazão de $1800 \text{ m}^3/\text{h}$. É interessante observar que este valor é consideravelmente alto e exige uma potência razoável para apenas uma bomba. Conforme descrito nas necessidades do cliente, pode ser interessante utilizar uma configuração em paralelo, que compreenda mais de uma bomba no sistema.

O comprimento total da seção de testes deve ser suficiente para permitir o desenvolvimento de um escoamento uniforme para que, na região central deste elemento, sejam realizados os testes adequadamente. Sabendo que escoamento levará 2 vezes o raio hidráulico (seção 2.3) para alcançar os níveis de uniformidade adequados, tem-se que este elemento já apresenta condições satisfatórias de escoamento a partir de $0,66 \text{ m}$. Assim, almejando um dimensionamento apropriado para a realização dos experimentos, foi estipulado um comprimento total de $5,9 \text{ m}$ neste elemento, não apenas para a regularização, mas também para se obter uma boa extensão linear livre para os testes de IFE.

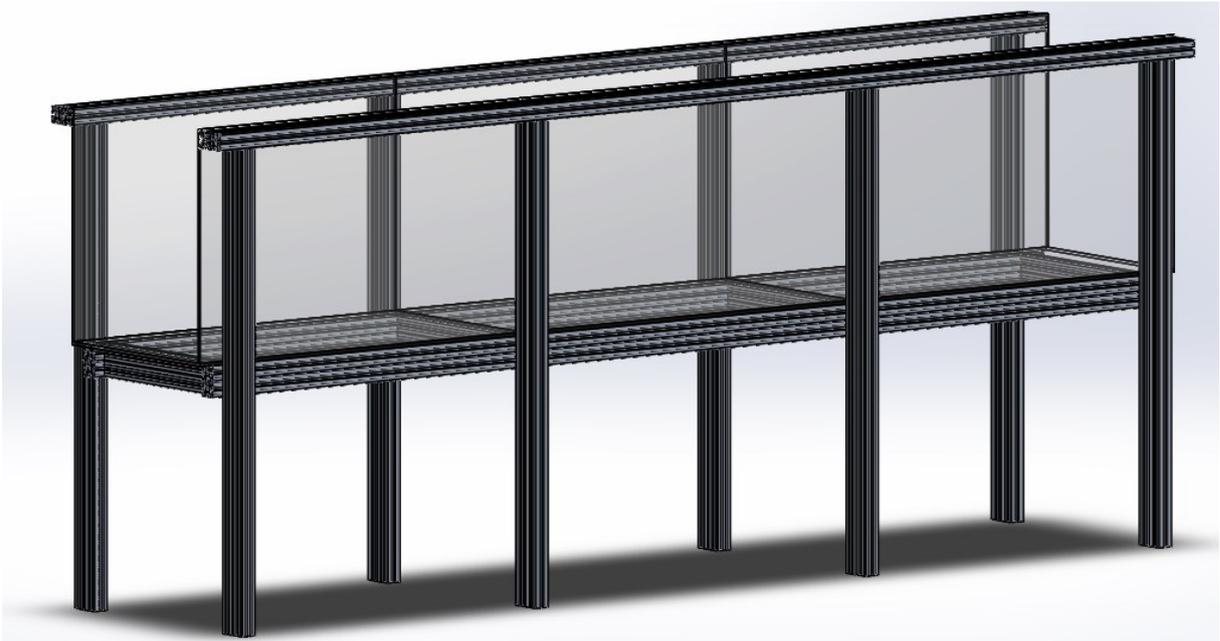
Ainda com relação à seção de testes, a fim de tornar a visualização possível, esta foi projetada em vidro laminado, conhecido como um vidro de segurança, que possui ótimas propriedades ópticas, dureza e transparência. Feito com a sobreposição de placas de vidro e aplicação de resina, película ou plástico Polivinil Butiral (PVB), a união causada por este processo torna o material mais resistente e seguro, devido a laminação que não permite a quebra instantânea do vidro caso ocorra algum acidente de trabalho. Diferente de materiais como o acrílico, o vidro não perde a sua qualidade com o tempo (não deteriora) e possui um bom nível de resistência a abrasão, diferenciais que justificam ainda mais a escolha por este material.

Já a parte de sustentação da seção de testes foi projetada utilizando estruturas em perfil de alumínio. Este produto foi selecionado devido a sua flexibilidade de utilização, permitindo a configuração desejada no canal e a possibilidade de desmontá-lo quando necessário (estrutura de montagem simples e peso relativamente inferior quando comparado ao de materiais utilizados em estruturas semelhantes). Ainda, devido a proposta versátil oferecida, o emprego

deste material torna a construção da estrutura de instalação dos corpos de teste e de instrumentos de medição muito mais simples e adaptável, evitando assim a necessidade de criação de novas estruturas de instalação complexas sempre que um novo tipo de teste venha a ser realizado.

A proposta conceitual da seção de testes pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 19 – Representação em *SolidWorks* da seção de testes.



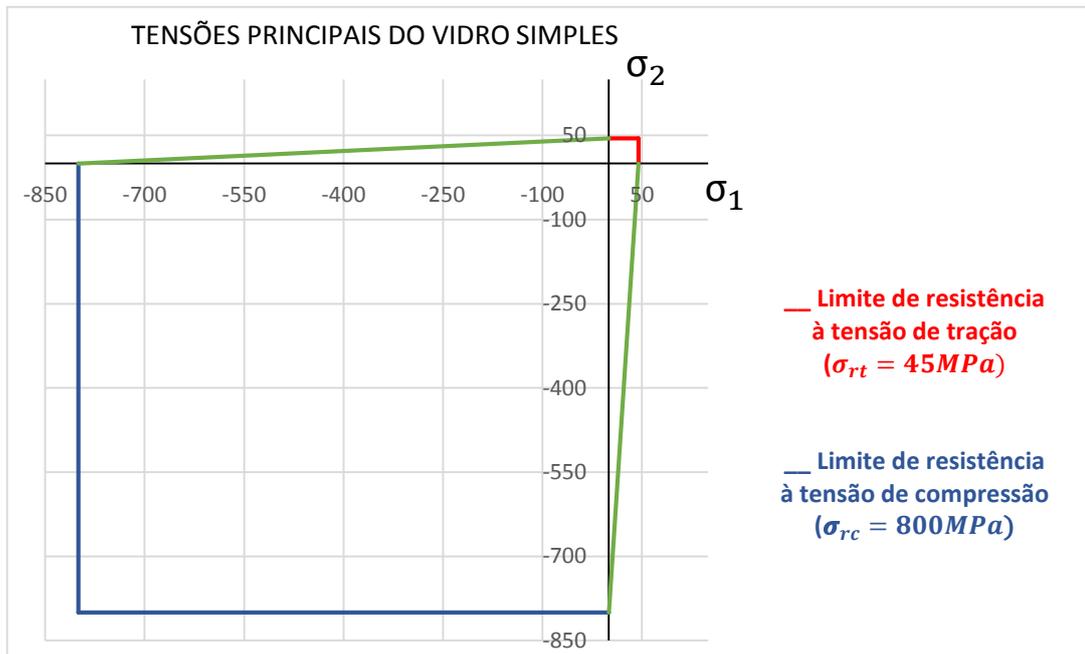
Fonte: elaborada pela autora.

4.1.1. Pré Dimensionamento dos Vidros Laminados de Segurança

Devido ao grande volume de água que o canal comporta na seção de testes, o cálculo da espessura do vidro deve ser realizado para que seja possível o dimensionamento da parte estrutural, bem como orçar o preço deste material.

O vidro, sendo um material frágil, tende a falhar repentinamente por ruptura, sem nenhum escoamento aparente. Esta ruptura, de acordo com Hibbeler (2009), ocorre quando qualquer uma das tensões normais atingem um valor igual ou maior que o limite de resistência σ_r para tração ou compressão, ou ainda, se o estado de tensão em um ponto for definido pela coordenada da tensão (σ_1, σ_2) , marcada sobre o contorno ou fora do mesmo, conforme Figura 20.

Figura 20 – Critério de falha de Mohr para o vidro simples.



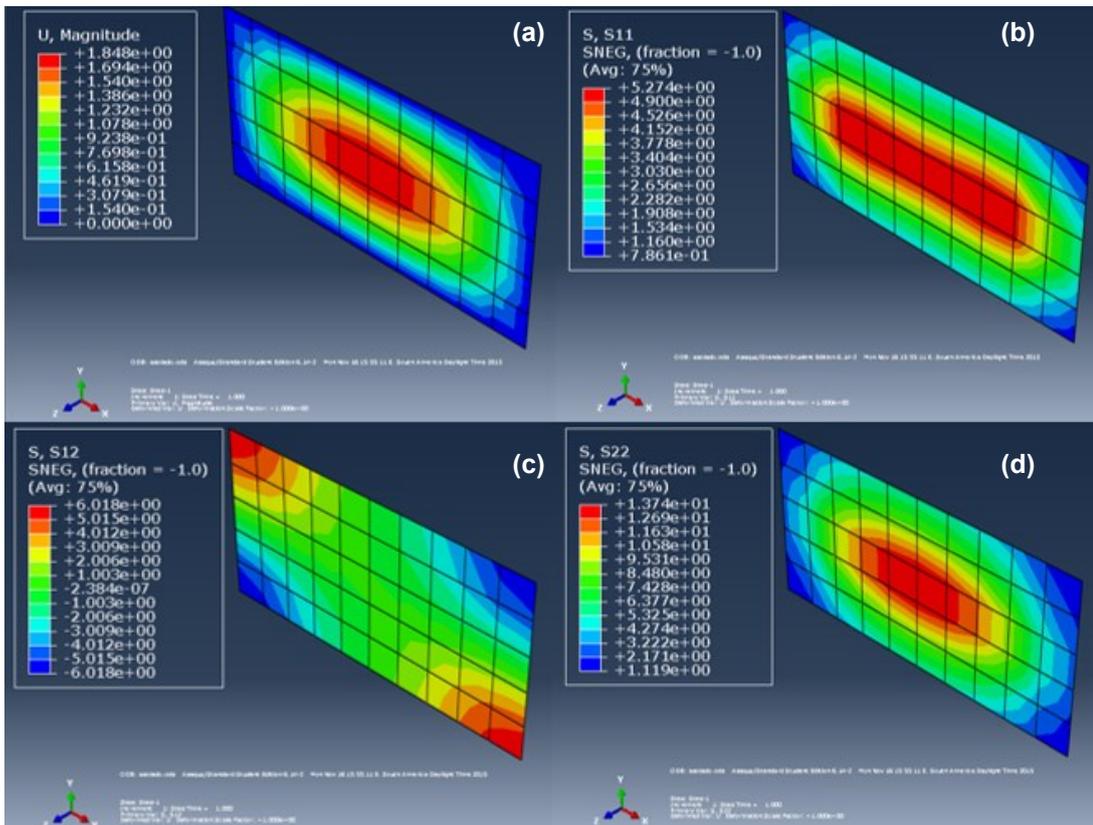
Fonte: elaborada pela autora.

Com relação aos dados aqui utilizados, foram considerados vidros simples para a definição de um critério conservador. Esta escolha advém de diferentes características mecânicas do vidro laminado de segurança, definidas de acordo com o método de produção, número de placas e material intermediário utilizado para a união das mesmas. Deste modo, ao realizar o projeto com o laminado, a espessura utilizada poderá ser igual, ou ainda inferior àquela do vidro simples, devido à resistência superior de um vidro de segurança laminado, que é igual a soma das resistências de cada chapa de vidro individualmente (NBR7199, 1989, p. 5).

Foram realizadas simulações no *software ABAQUS* para a chapa de vidro que sofre a maior solicitação (peça central na posição horizontal), selecionada para análise devido às suas dimensões superiores e à carga uniforme aplicada na direção normal – e não hidrostática como nas peças em posição vertical. Como não é possível projetar com exatidão as condições reais de solicitação dessa peça, considerou-se duas condições de contorno distintas: com os quatro lados apoiados (Figura 21) e os quatro lados engastados (Figura 22). A espessura inicial considerada foi de 20 mm.

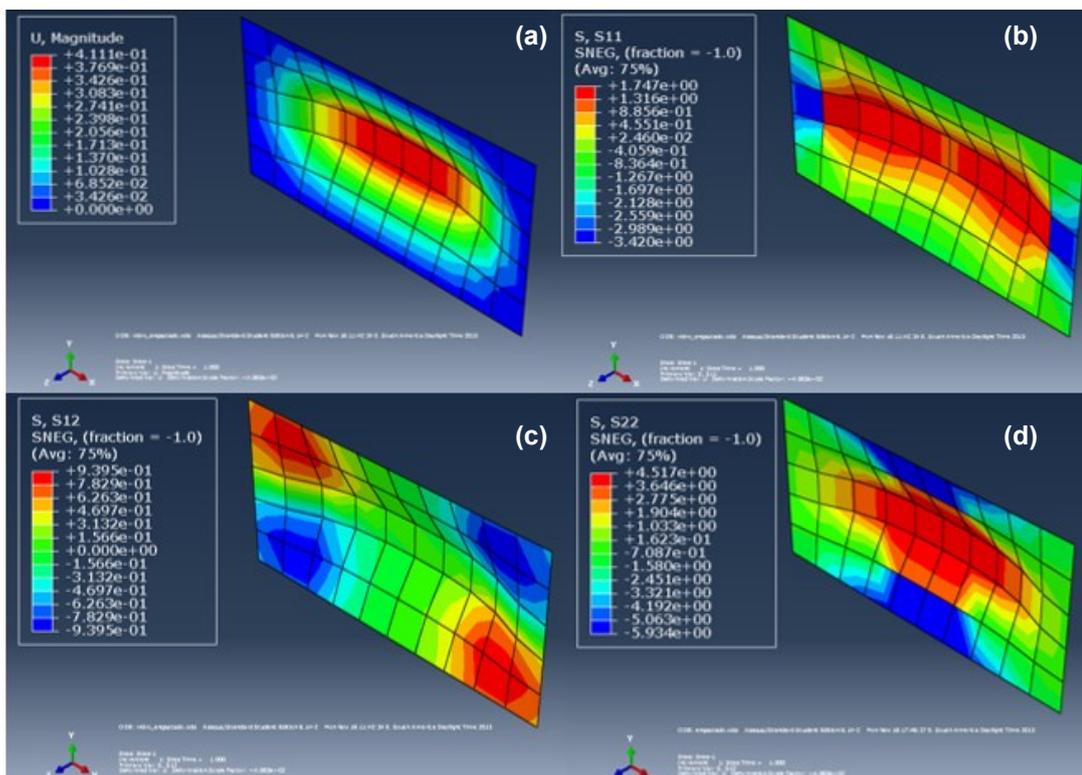
Tanto na Figura 21, quanto Figura 22, tem-se a imagem superior esquerda que apresenta a deformação da peça de vidro (a), a superior direita a tensão normal máxima σ_1 (b), a inferior direita a tensão normal máxima σ_2 (c) e a inferior esquerda a tensão cisalhante σ_{12} (d).

Figura 21 – Simulação em ABAQUS da solicitação de carga na peça de vidro com os quatro lados apoiados (espessura de 20 mm).



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 22 - Simulação em ABAQUS da solicitação de carga na peça de vidro com os quatro lados engastados (espessura de 20 mm).

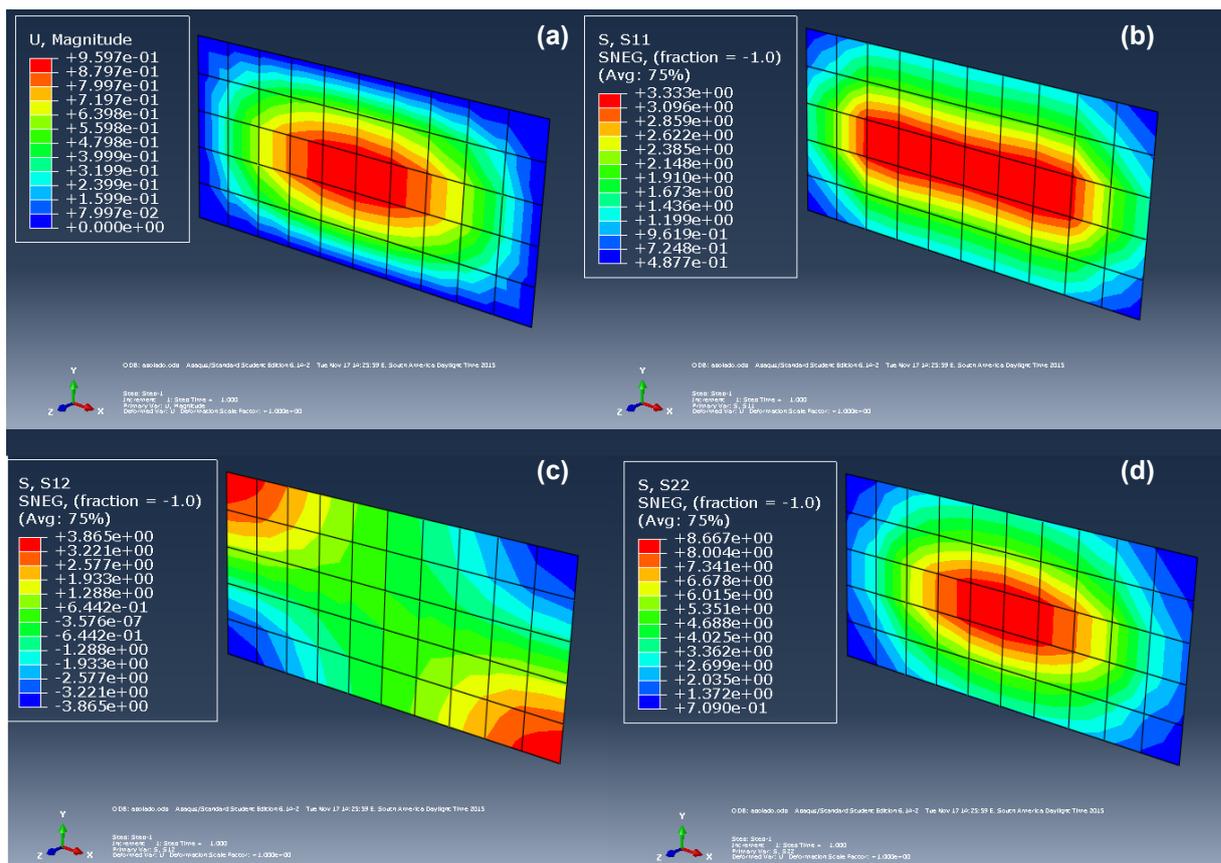


Fonte: elaborada pela autora.

Pode-se observar que as condições mais severas de solicitação foram na condição de contorno com os quatro lados apoiados. A maior tensão normal apresentada, $\sigma_2 = 13,74 MPa$, se encontra dentro da área delimita pelo critério de falha de Mohr ($\sigma_{rt} = 45 MPa$) porém, ao considerar que o cálculo de espessura de vidros para aquários e piscinas (tanto no Brasil quanto no exterior) geralmente se apresenta com um fator de segurança da ordem de 3,5 em estabelecimentos públicos, a espessura utilizada não se torna aceitável para vidros simples.

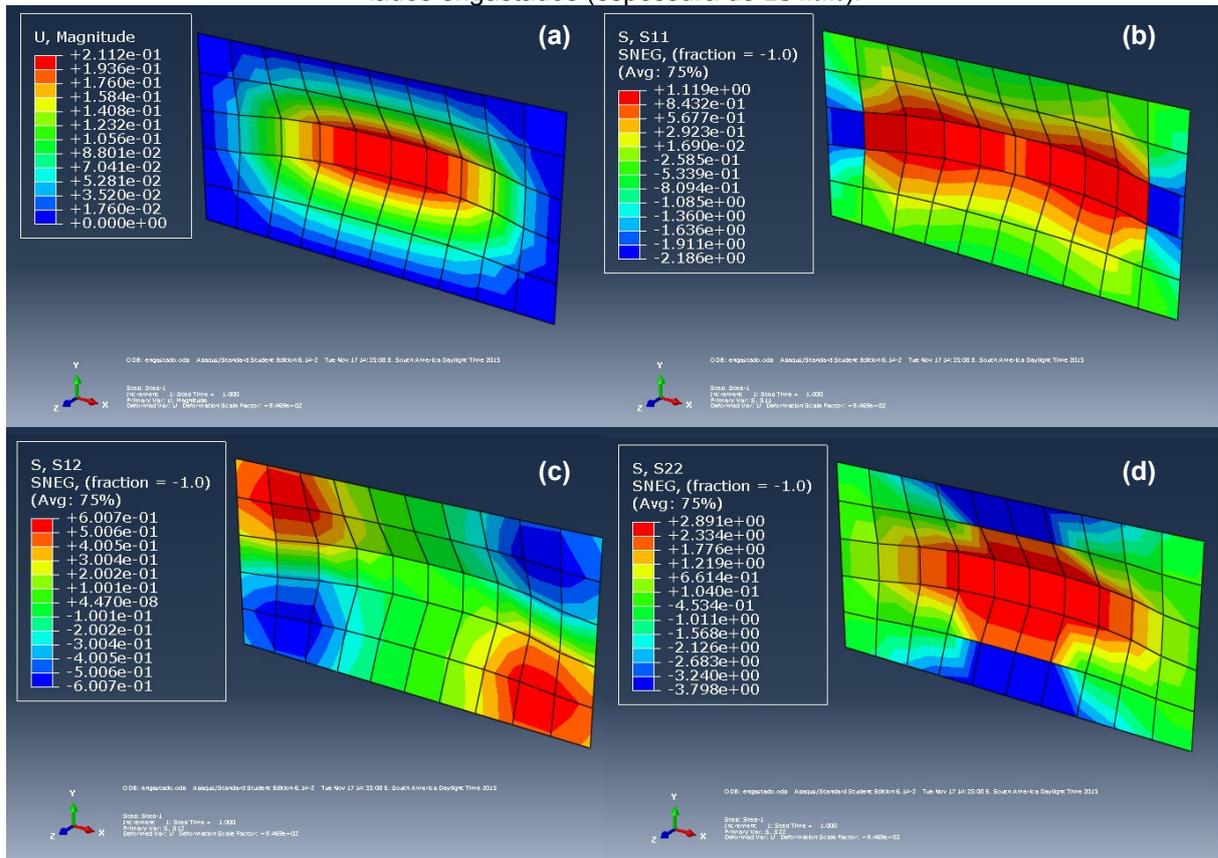
Assim, novas simulações foram realizadas para uma espessura de 25 mm, tornando a peça mais resistente, como pode-se observar na Figura 23 e na Figura 24, em que a imagem superior esquerda apresenta a deformação da peça de vidro (a), a superior direita a tensão normal máxima σ_1 (b), a inferior direita a tensão normal máxima σ_2 (c) e a inferior esquerda a tensão cisalhante σ_{12} (d).

Figura 23 - Simulação em ABAQUS da solicitação de carga na peça de vidro com os quatro lados apoiados (espessura de 25 mm).



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 24 - Simulação em ABAQUS da solicitação de carga na peça de vidro central com os quatro lados engastados (espessura de 25 mm).



Fonte: elaborada pela autora.

Novamente, a tensão normal máxima σ_2 na condição de contorno com os quatro lados apoiados foi a maior solicitante com 8,67 MPa. Todavia, utilizando o fator de segurança de 3,5 nesta espessura de vidro, o critério de falha de Mohr é satisfeito.

Deste modo, ao solicitar o pedido de orçamento para os vidros da seção de testes, foram requeridos vidros laminados de segurança que tenham resistência equivalente ao de vidros simples com 25mm de espessura.

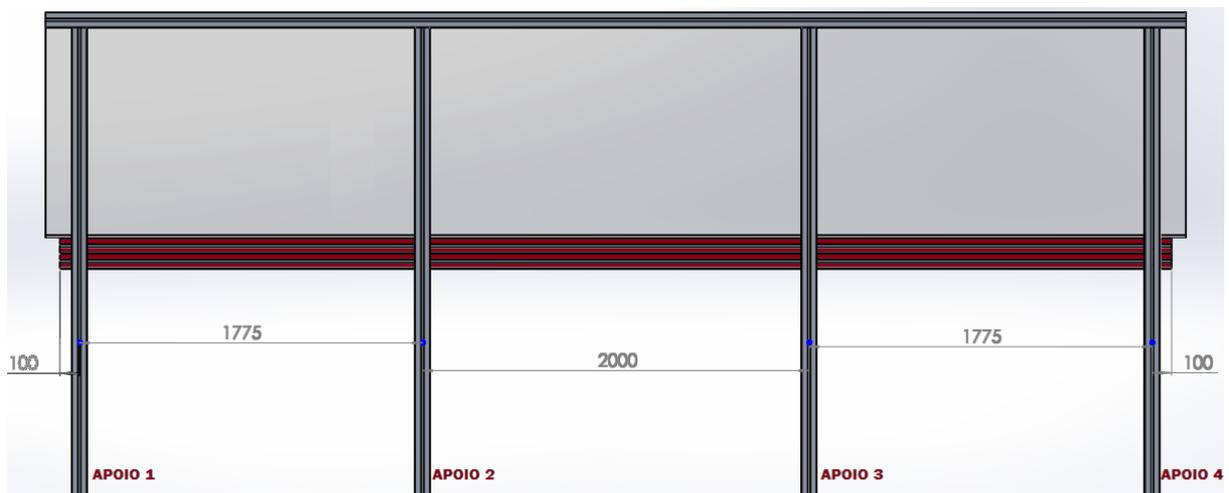
4.1.2. Pré Dimensionamento da Estrutura em Perfil de Alumínio

O dimensionamento da estrutura em perfil de alumínio deve ser aplicado a fim de garantir a resistência do material às cargas aplicadas.

Sendo o alumínio um material dúctil, pode-se fazer a avaliação do material de acordo com a teoria da energia de distorção máxima, conhecido também por critério de *von Mises*. Esta teoria utiliza a tensão de escoamento do material para determinar se a estrutura avaliada irá resistir ou não ao carregamento aplicado.

A fim de qualificar a estrutura, foi avaliado o elemento mais carregado da estrutura (destacado em vermelho na Figura 25), que seria o perfil de alumínio horizontal central, que suporta as cargas distribuídas exercidas tanto pela água quanto pelos vidros da seção central de testes. Esta viga está essencialmente sob efeito de uma tensão provocada nos elementos por conta da flexão. A Figura 25 também apresenta os apoios e dimensionamentos utilizados nos cálculos de avaliação da estrutura.

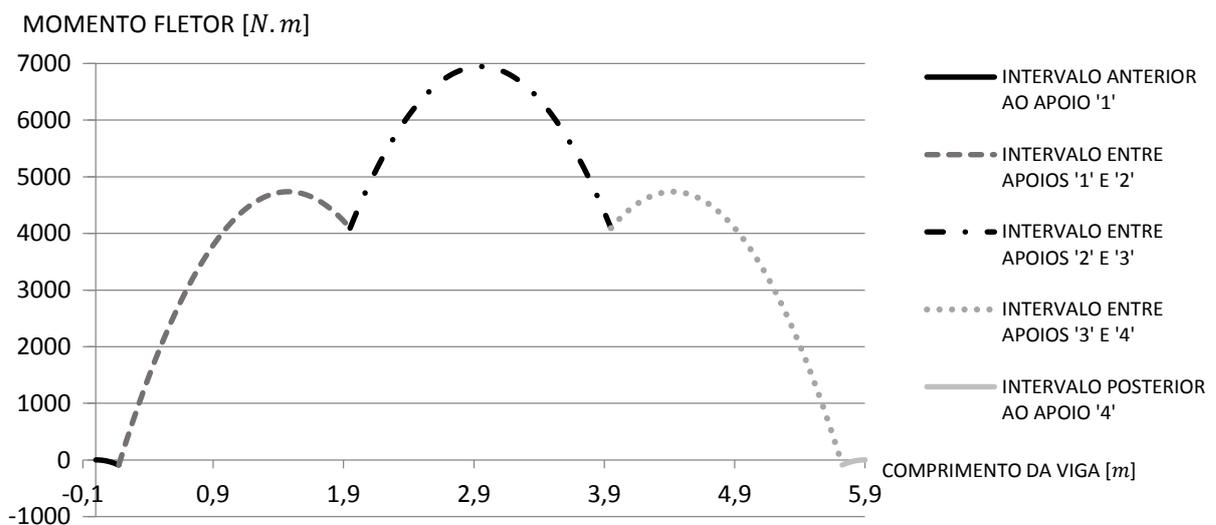
Figura 25 - Representação em *SolidWorks* da viga avaliada na seção de testes.



Fonte: elaborada pela autora.

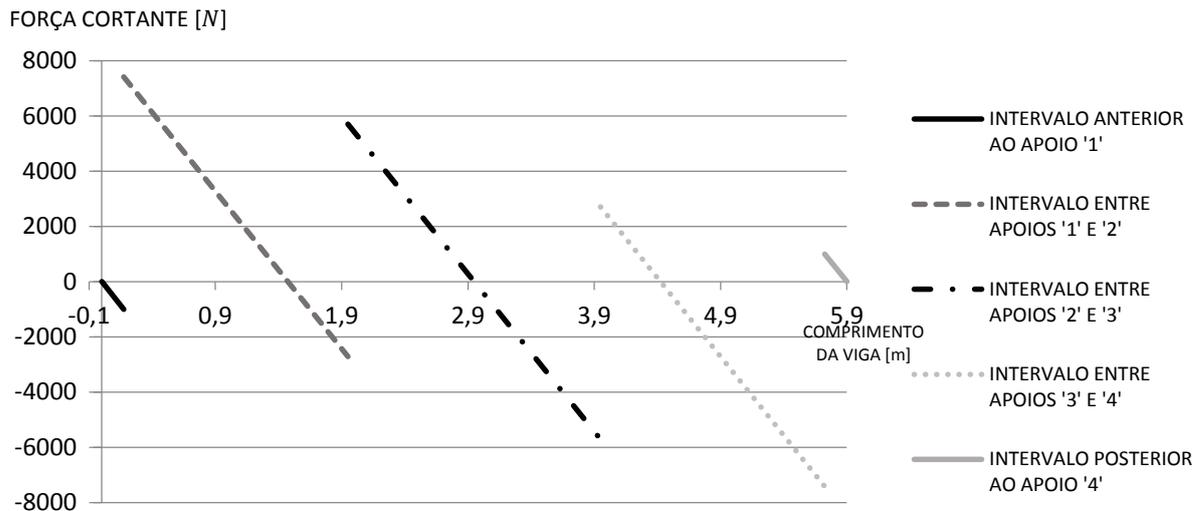
Assim, os gráficos de momento fletor e força cortante foram desenvolvidos, conforme apresentam as Figura 26 e Figura 27.

Figura 26 - Gráfico do Momento Fletor na Viga



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 27 - Gráfico da Força Cortante na Viga



Fonte: elaborada pela autora.

Deste modo, a partir dos gráficos gerados, pode-se obter o momento fletor e a força cisalhante ao longo do elemento. Pode-se observar que o ponto de máximo momento fletor ocorre no semicomprimento da viga central. De posse destes dados, os cálculos de tensão de flexão e de cisalhamento foram realizados, a fim de determinar se a estrutura suportará as cargas aplicadas.

Após o estudo de resistência mecânica do elemento determinou-se que:

- A tensão normal máxima (σ_{max}) é de 57,03 MPa e
- A tensão máxima de cisalhamento (τ_{max}) é de 28,52 MPa.

A tensão de escoamento do material comumente utilizado nestas estruturas – Alumínio 6063 T5 – é de 110 MPa. Desta forma, tem-se que o coeficiente de segurança da estrutura será 1,93. Teoricamente a estrutura poderia suportar uma carga com quase o dobro do valor aqui determinado, que a mesma não sofreria deformações permanentes. No entanto, devido a restrição de tensão permitida a um nível seguro e o uso contínuo da mesma para realização de testes, deve-se considerar uma tensão segura e, portanto, um fator de segurança da ordem do aqui obtido.

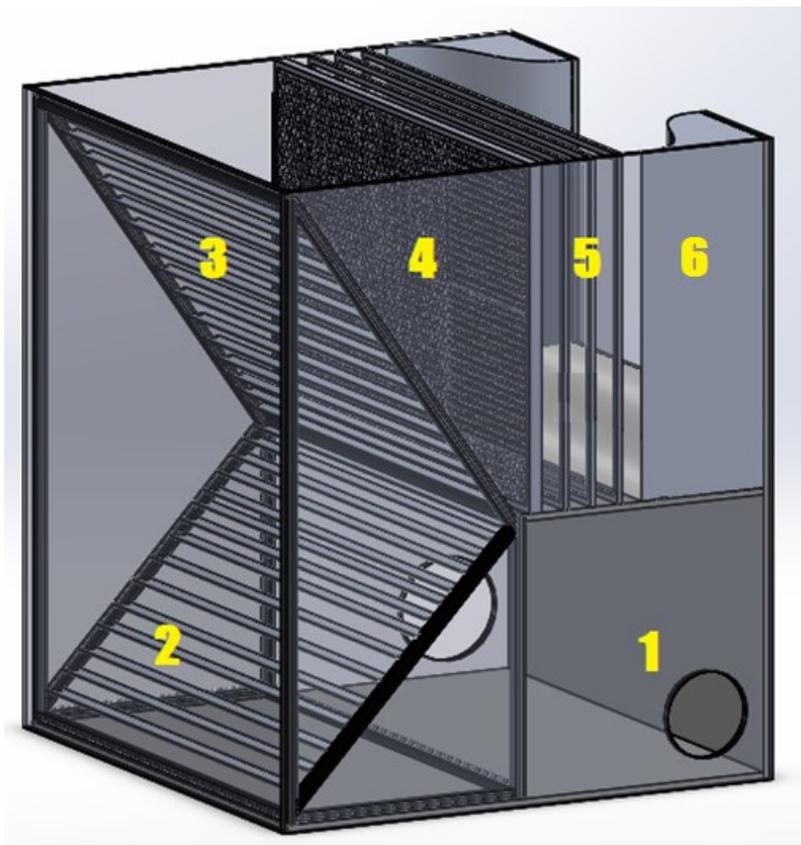
4.2. Regularização e Contração

Estes elementos são responsáveis pela regularização do escoamento na entrada da seção de testes garantindo a velocidade e uniformidade requisitados. Cada um dos componentes presentes nesta região do canal tem por objetivo

atender a estas necessidades ao evitar turbilhionamento, reduzir as escalas de vorticidade e promover a aceleração do fluido até a velocidade adequada.

Devido a já citada dificuldade de antever o comportamento real do escoamento do fluido pelos elementos do canal, estes componentes responsáveis pela regularização do escoamento foram projetados de maneira a serem flexíveis em sua função. Conforme será possível observar ao longo deste tópico, cada um dos elementos regularizadores foi projetado de maneira que possam sofrer modificações caso necessário, ou ainda, foram esboçados tendo em vista a fácil troca de componente em caso de observação do não cumprimento da sua função adequadamente. A Figura 28 apresenta o projeto da caixa de regularização e seus componentes.

Figura 28 – Representação em *SolidWorks* da Caixa de Regularização, seus componentes e a contração.



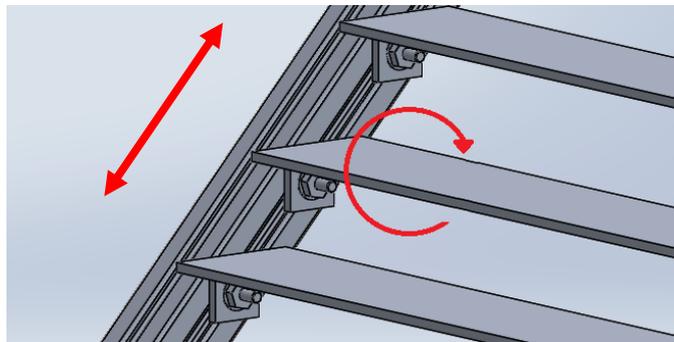
Fonte: elaborada pela autora.

Deste modo, a regularização foi projetada da seguinte forma: inicialmente a água escoará para dentro da caixa de regularização a partir das tomadas de conexão com a parte hidráulica de descarga (posição 1 na Figura 28). Estas tomadas se localizam em posições opostas da caixa de regularização para que ambos os escoamentos provenientes das tubulações se interajam na parte inferior

deste componente, evitando assim uma grande escala de vorticidade que poderia se fazer presente – devido a rotação do fluido na caixa durante a subida da água.

Após este encontro dos escoamentos, ainda na parte inferior da regularização, o fluido se deparará com um conjunto de aletas direcionadoras de fluxo, dispostas diagonalmente (posição 2 na Figura 28), quebrando as escalas de turbulência a dimensões menores que a distância disponível para a passagem do fluido. Estas aletas foram projetadas num contexto muito versátil, conforme é possível observar na Figura 29. Cada uma das aletas direcionadoras permite o seu posicionamento individual ao longo da estrutura de encaixe (a gaiola), bem como determinação de um ângulo de ataque devido a possibilidade de rotação no seu eixo. Deste modo, de acordo com a necessidade observada do escoamento, o número de aletas pode ser maior em determinada região da gaiola, bem como o ângulo de cada uma das aletas pode ser diferenciado. Ainda, caso seja observada a necessidade de uso de maior número de aletas na gaiola, basta acrescentar peças extras.

Figura 29 – Representação em *SolidWorks* do conceito flexível das aletas direcionadoras de fluxo.



Fonte: elaborada pela autora.

A medida que o fluido ascende na caixa de regularização, este encontra a diagonal superior da gaiola (posição 3 na Figura 28), onde novamente existe a possibilidade de configuração do arranjo das aletas direcionadoras de fluxo de acordo com o escoamento observado neste elemento.

Na posição 4 da Figura 28 pode-se observar a presença de uma colmeia para a redução das vorticidades ao tamanho da dimensão da célula e redução das eventuais flutuações na velocidade transversal do escoamento. Na proposta construída em *SolidWorks* utilizou-se uma colmeia com 50 mm de espessura; se as recomendações da literatura forem seguidas o diâmetro de cada célula W_h deve ser

entre 6,25 e 8,33 *mm* para esta condição e a porosidade deve ser maior ou igual a 0,8; se necessário, rever definições na seção 2.4.1.

Após a passagem do fluido pela colmeia, o escoamento se depara com um conjunto de três telas de diferentes malhas estruturais (posição 5 na Figura 28, onde apesar da perda de carga inevitável, o fluido apresenta redução de turbulência e uma velocidade média mais regular. Cada uma destas telas deve apresentar porosidades diferentes, sendo que os melhores resultados da redução de turbulência na seção de testes em túneis de vento foram obtidos ao posicionar as telas mais finas próximas a seção de testes, sendo que “a última tela deve ser de precisão para reduzir as não uniformidades” (STRUNZ; SPETH, 1987, p. 25-1).

Seguindo o conceito de adaptabilidade, tanto as telas quanto as colmeias poderão ser substituídas devido a forma de encaixe das mesmas na caixa de regularização. A não fixação permanente destes componentes na regularização garante a possibilidade de troca das peças caso seja vantajoso o uso de uma tela de malha mais densa, ou até mesmo a não presença de um destes itens na composição da regularização.

Finalmente, após passagem do fluido por todos estes componentes este se depara com a contração (posição 6 na Figura 28).

4.2.1. *Contração*

Devido a limitação de espaço, a contração não pôde tomar o comprimento ideal para a sua máxima eficiência de acordo com as referências bibliográficas dedicadas à tuneis de vento, nem valores de razão de contração superiores ao valor definido de 2,5 – devido a limitação do dimensionamento da caixa de regularização. Entretanto, ao se estudar os canais de água circulante presentes em outras instituições, notou-se que um canal de características semelhantes em funcionamento na Universidade de Alberta (já apresentado na Introdução – Figura 30) apresenta uma contração com superfície simples se comparado com o de túneis de vento e que, examinando visualmente, não deve apresentar uma razão de contração muito superior que a do canal aqui proposto. Ainda, o Canal de Água Circulante do Núcleo de Dinâmica e Fluidos da USP apresenta uma razão de contração de aproximadamente 3,11, não sendo um valor muito distante daquele

proposto. A Figura 30 de Bussière (2012), apresenta a contração do CWC da Universidade canadense.

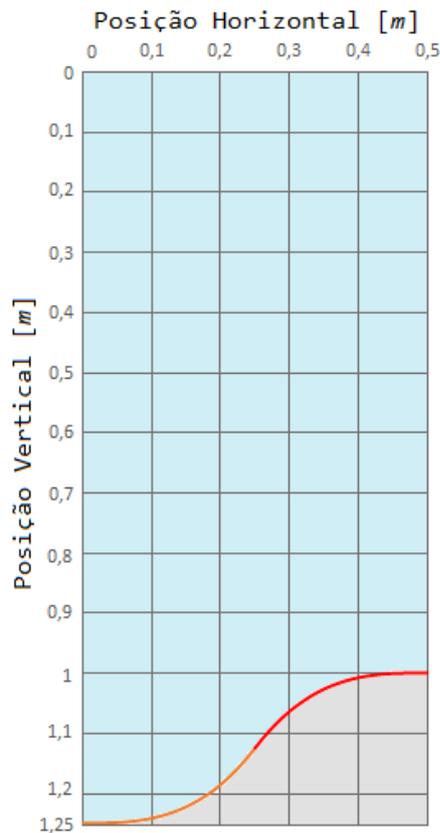
Figura 30 – Foto da contração do canal de água circulante da Universidade de Alberta.



Fonte: Bussière (2012, p. 37)

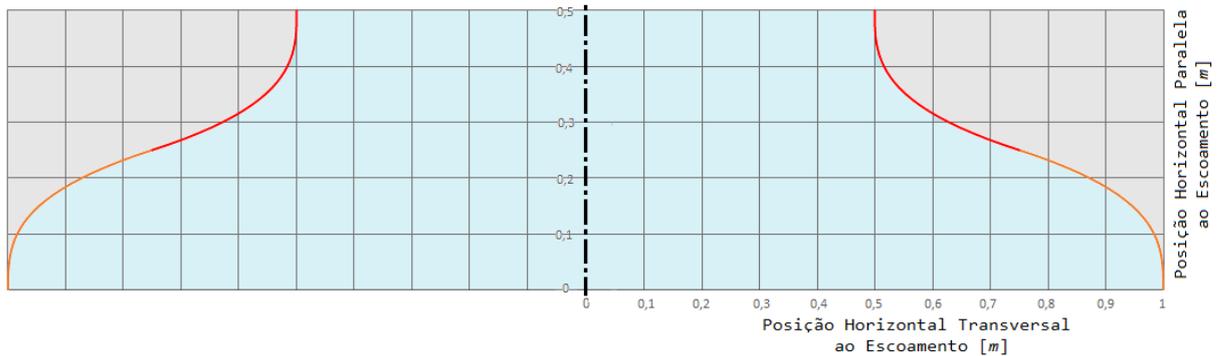
Ainda assim, com a intenção de obter uma superfície mais adequada para o CWC, foi utilizado o método de Morel modificado por Fang como uma aproximação da curvatura a ser considerada neste componente, conforme apresentado na seção 2.5. Obtém-se, então, as seguintes geometrias de superfície da Figura 31 e Figura 32.

Figura 31 – Representação da curva de superfície da parede inferior da contração.



Fonte: elaborada pela autora.

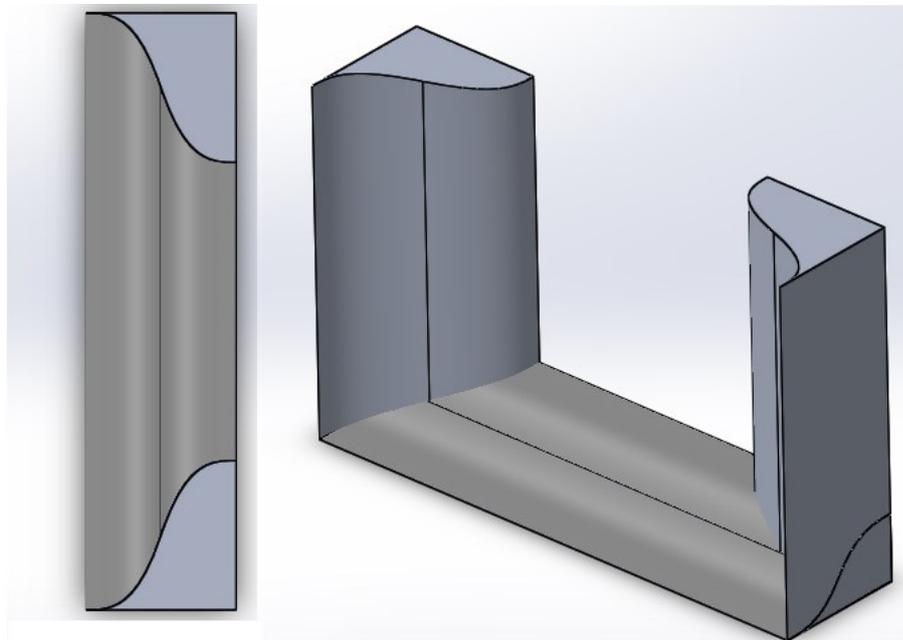
Figura 32 – Representação das curvas de superfície das paredes laterais da contração.



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 33 apresenta a contração modelada em *SolidWorks*.

Figura 33 – Representação em *SolidWorks* da contração do CWC.



Fonte: elaborada pela autora.

4.2.2. Pré Dimensionamento Estrutural da Caixa de Regularização

Strunz e Speth (1987) afirmam que materiais resistentes a corrosão aplicados na construção de CWC são vantajosos com relação a qualidade da água, evitando que impurezas circulem no canal e prejudiquem a aquisição de dados. Sendo assim, tanto a caixa de regularização quanto a de sucção foram projetadas em polipropileno homopolímero, material que possui a vantagem de não sofrer processos corrosivos com a ação do tempo. Apresentando alta resistência a fratura por flexão ou fadiga,

se bem projetados – com os devidos reforços horizontais em suas laterais - são estruturas com tempo de vida útil longa.

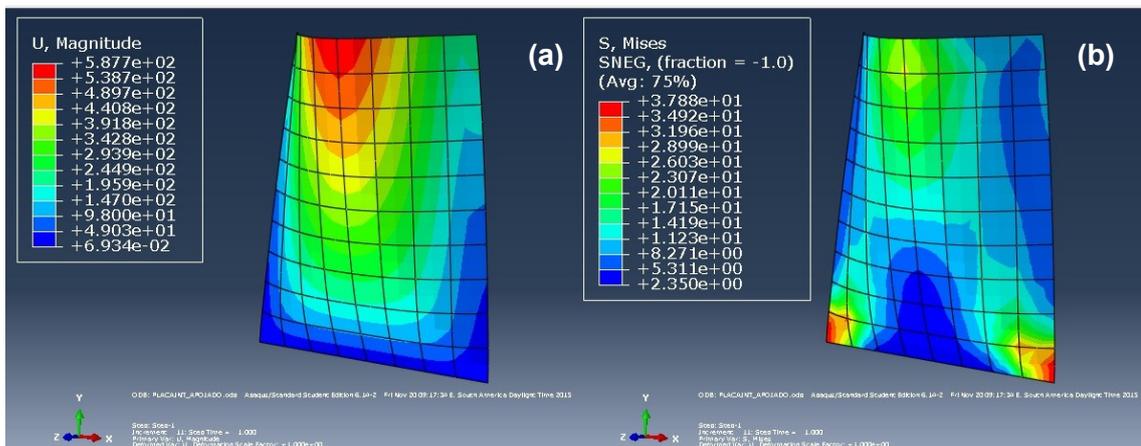
O dimensionamento destas caixas foi realizado a partir da avaliação individual das placas laterais que suportam a carga hidrostática na direção normal a sua superfície. Análises com diferentes condições de contorno foram realizadas com a intenção de simular o maior número de possibilidades possíveis – isto se deve, principalmente, a consideração de que as placas de polipropileno soldadas nas laterais não apresentam uma condição de contorno simplificada na situação real.

As caixas foram projetadas com 2,4 m de altura, 2,0 m de largura e 2,0 m de profundidade. Para as simulações apresentadas nas próximas seções foi considerada uma espessura de chapa de 20 mm.

4.2.2.1. Proposta 1

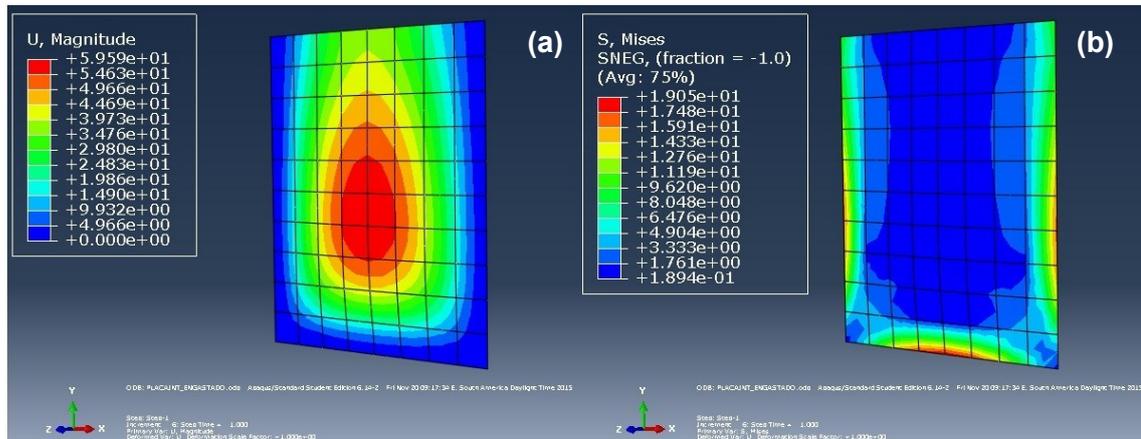
Para a primeira proposta considerou-se que as placas laterais das caixas não apresentavam reforços transversais em suas laterais. As simulações realizadas em ABAQUS – Figura 34 e Figura 35, em que se apresenta a deformação (a) e a tensão de von Mises (b) – constataram que as deformações apresentadas nesta situação chegam a 595 mm e que a tensão suportada ultrapassa a tensão de escoamento à tração do material (35 MPa), sem considerar qualquer fator de segurança. Assim, ficou comprovada a necessidade de uso de reforçadores que não permitam deformações tão grandes quanto as apresentadas nas duas condições de contorno.

Figura 34 – Simulação em ABAQUS da placa de polipropileno sem reforços com o lado superior livre e três lados apoiados – deformação (esquerda) e tensão do critério de von Mises (direita).



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 35 - Simulação em ABAQUS da placa de polipropileno sem reforços com o lado superior livre e três lados engastados – deformação (esquerda) e tensão do critério de von Mises (direita).

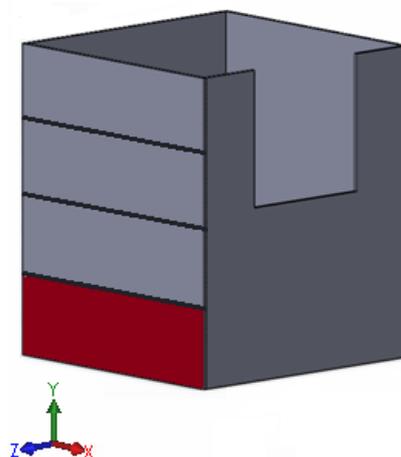


Fonte: elaborada pela autora.

4.2.2.2. Proposta 2

Devido às grandes deformações observadas na Proposta 1, simulações foram realizadas variando o número de reforçadores transversais na estrutura. Após análise das simulações conduzidas, foi selecionado o uso de três reforços transversais como o mais adequado para este projeto. Nesta segunda proposta, os reforçadores transversais passam a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ da altura da caixa, conforme apresenta Figura 36. Assim, a modelagem foi realizada na parte que sofre maior solicitação de carga para as simulações (a porção abaixo do último reforço, em vermelho na mesma figura), considerando que o reforçador transversal impede o movimento da placa na direção z e evita o indesejado abaulamento gerado pela pressão da coluna d'água na estrutura.

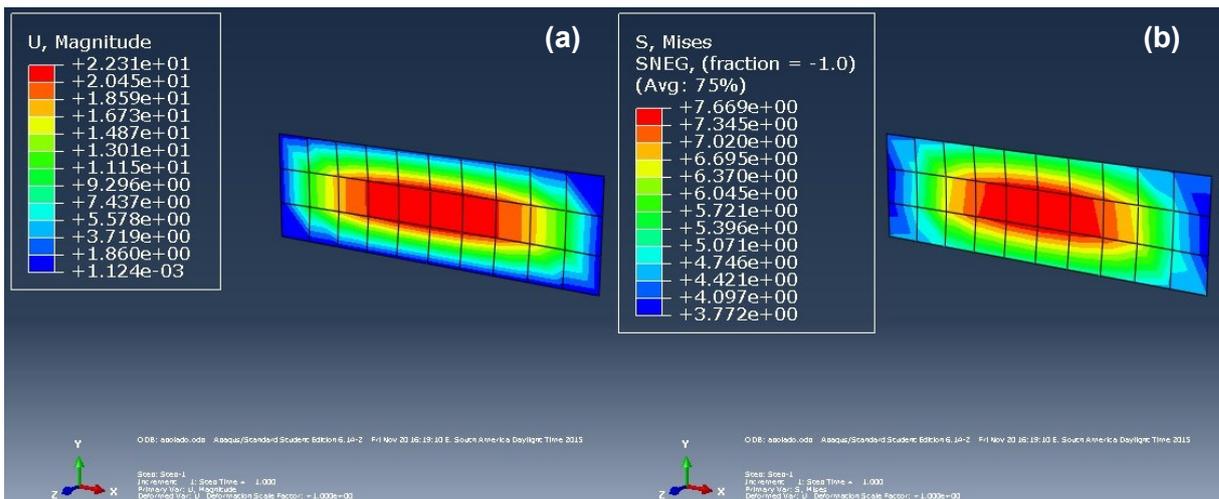
Figura 36 – Representação em SolidWorks da região da placa simulada.



Fonte: elaborada pela autora.

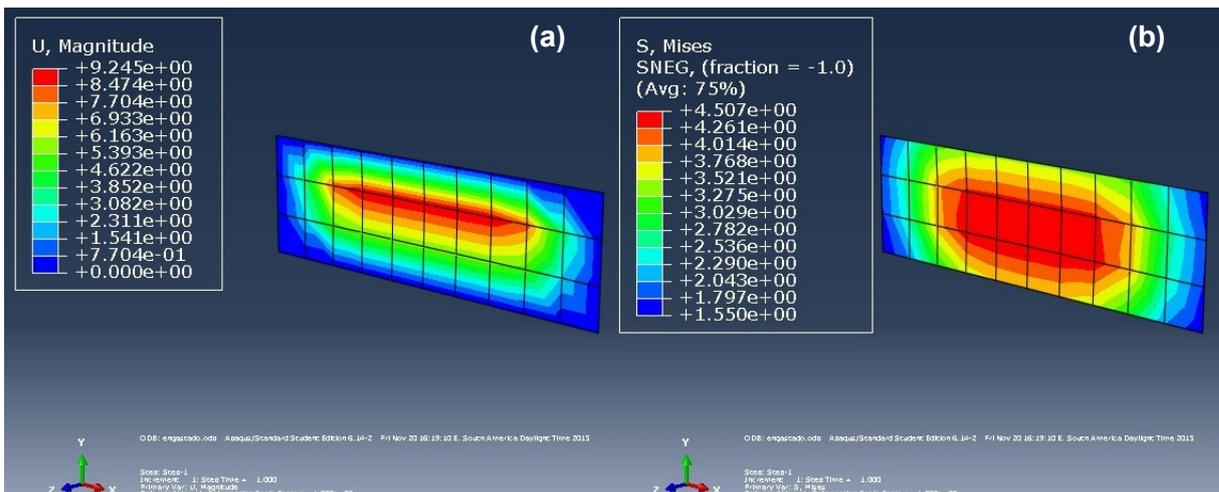
A presença destes reforços alterou consideravelmente a tensão suportada pelas placas – Figura 37 e Figura 38, em que se apresenta a deformação (a) e a tensão de von Mises (b) – passando de 37,79 MPa para 7,67 MPa (na condição apoiada) e 4,51 MPa (na condição engastada). Deste modo o material não atinge a tensão de escoamento à tração (35 MPa); permanecendo, assim, no campo elástico da curva tensão-deformação, com um coeficiente de segurança de pelo menos 4,56.

Figura 37 – Simulação em ABAQUS da placa de polipropileno com três reforços transversais na condição de contorno apoiada – deformação (esquerda) e tensão do critério de von Mises (direita).



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 38 - Simulação em ABAQUS da placa de polipropileno com três reforços transversais na condição de contorno engastada – deformação (esquerda) e tensão do critério de von Mises (direita).



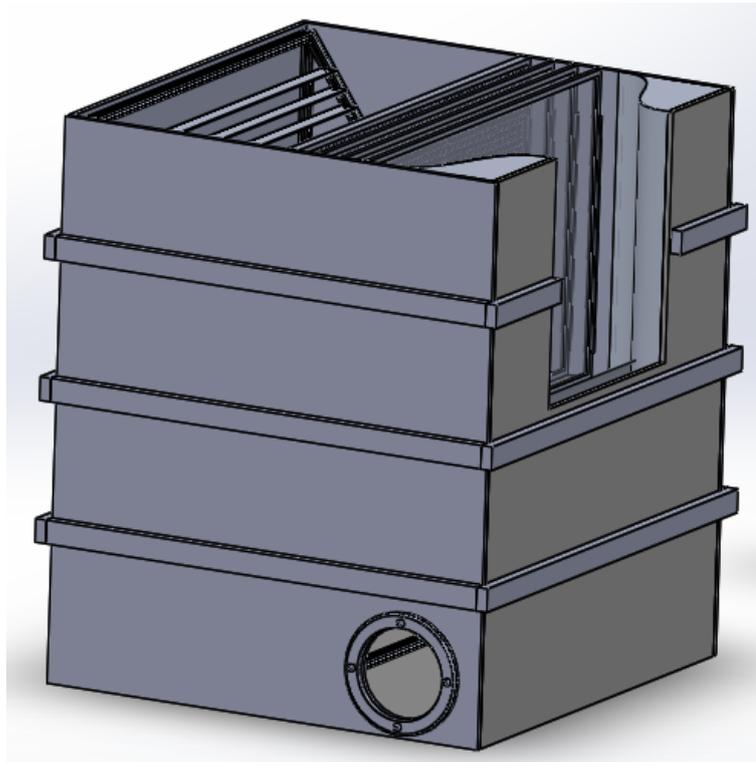
Fonte: elaborada pela autora.

Portanto, a Proposta 2 apresentou resultados satisfatórios e com um fator de segurança aceitável. Assim, a espessura de 20 mm foi validada para a etapa de avaliação de orçamentos de materiais para a construção das caixas de regularização e sucção. A ressalva é o uso obrigatório de ao menos três

reforçadores transversais, que fornecem a resistência adequada para a sustentação das chapas.

As caixas, tanto de regularização quanto de sucção possuem a mesma configuração externa, conforme apresentada na Figura 39.

Figura 39 – Representação em *SolidWorks* da caixa de regularização com os reforçadores transversais.



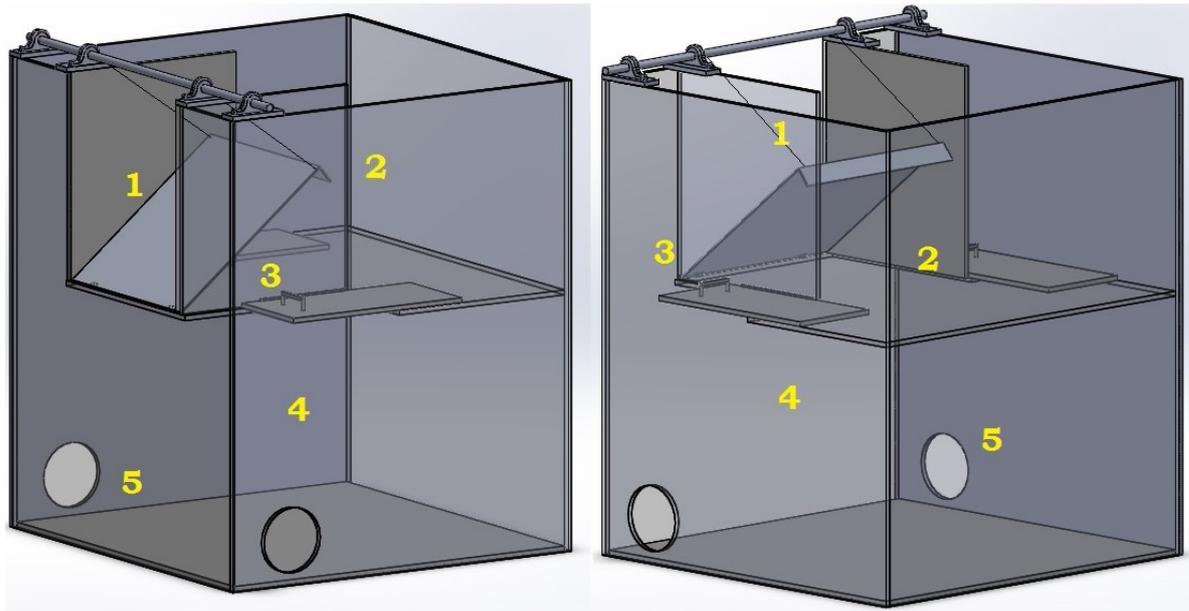
Fonte: elaborada pela autora.

4.3. Sucção

A sucção se apresenta logo após a seção de testes e tem por objetivo escoar o fluido para as bombas e evitar que qualquer tipo de influência ocorra no escoamento uniforme da região de testes. O projeto deste elemento deve garantir também que o escoamento do fluido para a parte hidráulica de sucção das bombas não apresente entrada de ar, causando efeitos de cavitação no interior da(s) bomba(s).

A caixa de sucção projetada para este canal pode ser visualizada a partir da Figura 40, apresentada segundo duas vistas laterais do elemento.

Figura 40 – Representação em *SolidWorks* da caixa de sucção em duas vistas laterais em ângulo.



Fonte: elaborada pela autora.

A entrada do fluido na caixa de sucção é proveniente da seção de testes, em que este se depara com uma porta de alumínio com regulagem angular (posição 1 na Figura 40). Esta porta cumpre um papel importante na garantia do escoamento uniforme ao evitar o retorno do fluido para seção de testes. A determinação angular da abertura da porta é proveniente da abordagem conceitual, em que a sensibilidade de seu emprego será testada até encontrar uma posição ideal de abertura para uma determinada velocidade.

Após passagem pela porta de regulagem angular o fluido deve executar uma mudança na direção do escoamento (posição 2 na Figura 40). Neste momento o fluido é conduzido para duas portas com regulagem de abertura (posição 3 na Figura 40) que se localizam em pontos opostos da caixa de sucção. Estas portas são capazes de limitar a vazão de escoamento para a parte inferior da caixa de sucção, cabendo ao responsável pelo teste a determinação da abertura adequada de acordo com a velocidade exigida na seção de testes.

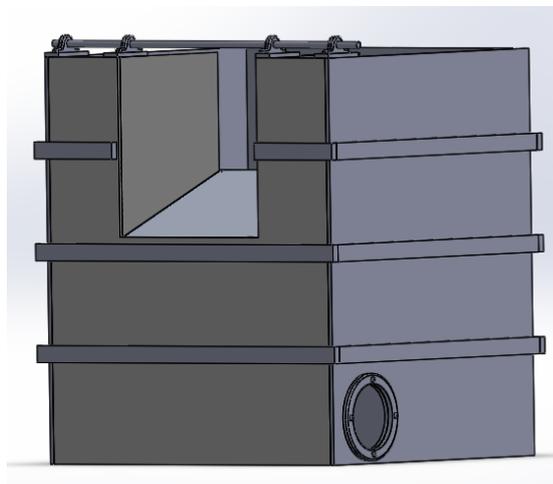
Na posição 4 da Figura 40 o fluido se encontra em um grande reservatório na parte inferior da caixa onde aguarda a sua entrada na parte hidráulica (dadas pelas tomadas, conforme posição 5 da Figura 40) onde irá ser sugado pela bomba e reiniciar a sua passagem pelo sistema.

Todo o circuito de deslocamento do fluido na sucção foi planejado tendo em vista evitar a interferência negativa deste elemento na seção de testes e impedir problemas com a entrada de ar nas bombas.

4.3.1. Pré Dimensionamento Estrutural da Caixa de Sucção

Tanto a caixa de regularização quanto a de sucção foram projetadas em material não corrosivo, o polipropileno homopolímero e com uma configuração externa idêntica. Assim, o projeto das caixas é simplificado, necessitando apenas de um dimensionamento básico para os dois elementos – conforme já apresentado na seção 4.2.2. A Figura 41 apresenta a caixa de sucção modelada no *software SolidWorks*.

Figura 41 – Representação em *SolidWorks* da Caixa de Sucção com os reforços transversais.



Fonte: elaborada pela autora.

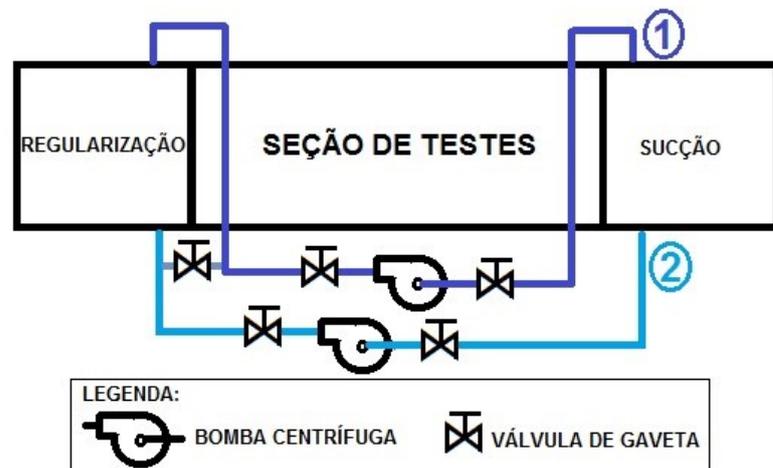
4.4. Instalação Hidráulica

A fim de atender ao requisito do cliente de um projeto com conceito modular, que possa ser desenvolvido de acordo com a disponibilidade material/econômica, o ideal para este modelo de canal seria o uso de tubos de PVC para o retorno do fluido da sucção até a regularização, passando pelas bombas que fornecem um ganho de pressão ao fluido.

Ao executar o projeto de um canal com estes materiais, apesar do aumento das perdas de carga devido a diminuição da área disponível para a mesma vazão, pode-se ter uma seção hidráulica mais versátil, com redução do espaço necessário para instalação do CWC, suscetível a mudanças caso o canal sofra alguma alteração futura e com acesso facilitado para a manutenção das bombas ou do circuito de retorno da água.

Como o uso de duas bombas para o retorno do fluido para a seção de testes foi um requisito do cliente e, a fim de manter a mesma vazão passando pelas duas tubulações independentes que levam o fluido até estas bombas, os diâmetros das tubulações devem ser diferentes, garantindo que a perda de carga nos circuitos em paralelo seja o mesmo. Isto ocorre pois o comprimento equivalente na tubulação 1 (Figura 42) possui uma perda de carga superior para um mesmo diâmetro que a tubulação 2 – devido ao maior número de curvas de 90° requisitado para permitir o acesso livre em uma das laterais da seção de testes. Assim, aumentando o diâmetro adequadamente da tubulação 1, a perda de carga no mesmo diminui, garantindo uma perda de pressão semelhante para as tubulações.

Figura 42 – Representação esquemática da parte hidráulica do sistema.



Fonte: elaborada pela autora.

Sabe-se que a velocidade econômica em tubulações deve ser menor que 3 m/s . Assim, para obter o diâmetro da tubulação 2 pode-se relacionar este parâmetro com a vazão e a velocidade do fluido. Sendo a vazão uma função da velocidade do fluido e da área, temos que o diâmetro aceitável para esta tubulação é de $0,325 \text{ m}$ ($12,8 \text{ in}$).

Já a tubulação 1 deve apresentar um diâmetro maior, garantindo que a velocidade do fluido dentro desta tubulação seja menor que 3 m/s . Aplicando os cálculos adequados para garantir que a perda de carga e vazão sejam os mesmos nas duas tubulações, tem-se que o diâmetro nesta tubulação será de $0,388 \text{ m}$ ($15,28 \text{ in}$), com uma velocidade de $2,14 \text{ m/s}$.

Para garantir que o sistema versátil de uso das bombas seja garantido, válvulas de gaveta deverão ser instalados antes e depois de cada uma das bombas a fim de permitir a diminuição de vazão sem alterar a rotação da bomba, ou ainda

para selar parte do circuito que apresente uma bomba com necessidade de manutenção externa. O uso de uma quinta válvula, presente em uma conexão estratégica entre as duas tubulações de descarga, garantirá o retorno da água para a regularização pelas duas tomadas mesmo com a ausência de uma bomba. Assim o fluido será escoado à parte inferior da regularização de maneira mais suave e evitará possíveis formações de correntes de água na parte inferior da caixa de regularização devido ao posicionamento das tomadas em extremos opostos.

4.5. Bombas Centrífugas

A opção por bombas centrífugas advém da necessidade de se evitar turbilhonamento no escoamento ao longo da seção hidráulica que poderia promover o aparecimento de grandes escalas de vorticidade na caixa de regularização. Bombas de escoamento axial apresentam pás giratórias, que transmitem momento ao fluido e introduzem vorticidades no escoamento da água diretamente na tubulação, algo que deve ser evitado no canal.

O pedido do cliente de empregar duas bombas em paralelo oferece alguns pontos positivos de projeto:

- ❖ Conforme citado anteriormente, alinhamento em paredes opostas das tomadas na caixa de regularização reduz a possibilidade de criação de correntes dentro deste elemento, evitando grandes escalas de vorticidade;
- ❖ O uso do canal mesmo que uma das bombas esteja em manutenção;
- ❖ A possibilidade de variação no regime das bombas, a fim de escolher um ponto ótimo de operação que permita uma realização adequada do experimento na seção de testes:
 - Ao reduzir o volume de água presente no canal, a área da seção transversal na seção de testes também diminuirá, permitindo a execução de experimentos com apenas uma bomba. Assim a vazão será reduzida tanto na bomba quanto na seção de testes.
 - Pode-se reduzir a área da seção transversal na região de testes e executar experimentos com as duas bombas ligadas, aumentando a velocidade média do escoamento na seção de testes;
 - Pode-se, ainda, reduzir a vazão nas duas bombas com a intenção de tornar o escoamento mais uniforme, reduzindo a velocidade média na seção de testes;

- São várias as possibilidades de variação do uso das bombas a fim de permitir uma escolha apropriada para o teste em desenvolvimento.
- ❖ O preço de cada uma das bombas será inferior devido a exigência de menor potência individual, o que torna o projeto mais viável e permite a construção do canal mesmo que o recurso inicial adquirido permita a aquisição de apenas uma das bombas.

A partir da consideração do emprego de duas bombas em paralelo, pode-se executar o cálculo das perdas de carga causadas pela água ao se movimentar dentro do sistema. A estimativa da perda de pressão foi realizada considerando o canal cheio (seção transversal com $1,0 \times 1,0 \text{ m}$) e velocidade na seção de testes de $0,5 \text{ m/s}$, conforme pedidos do cliente para operação do canal. A partir da estimativa de perdas de carga foi possível determinar a potência das bombas.

4.5.1. Perdas de Carga

Devido ao modelo desenvolvido do canal, as perdas maiores se encontram em dois elementos específicos do projeto que são:

- A tubulação hidráulica utilizada na condução da água da sucção até a regularização – passando pela(s) bomba(s);
- A seção de testes que, apesar de apresentar superfície livre, pode ser aproximada pelo escoamento em um tubo a partir da consideração do Raio Hidráulico equivalente em canais abertos.

Os valores de perda de carga maiores calculados para os dois elementos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Perdas maiores.

ELEMENTO	H_l [m]
Tubulações	0,2414
Seção de Testes	0,0009

Fonte: elaborada pela autora.

Nota-se que as perdas de carga na seção de testes são bem menores quando comparadas com as das tubulações, devido, principalmente, à velocidade do fluido apresentada nas tubulações, que está entre 4 e 6 vezes a velocidade na seção de testes e o comprimento da seção hidráulica que é aproximadamente 3,5 vezes maior.

As chamadas 'perdas menores', encontradas ao longo da passagem do fluido por todos os elementos que não sejam tubos também foram calculadas. Como algumas regiões, Regularização e Sucção, não apresentam uma forma fielmente representada nas tabelas e gráficos de singularidades, ou em qualquer outra referência encontrada, foram realizadas extrapolações de dados já conhecidos para uma previsão de perda de carga nestes elementos.

A caixa de regularização foi aproximada por uma grande curva vertical de 180°, como em tubulações, devido ao seu formato que impõe ao fluido um escoamento de maneira semelhante. A perda de carga nas telas foi aproximada pelo cálculo de perda de carga em filtros de telas metálicas⁵ e a perda de carga na colmeia (que conforme a literatura já apresenta uma pequena perda de carga) teve sua presença desconsiderada neste tópico, particularmente após observação da ordem de grandeza da perda de carga observada nas telas, que foi relativamente pequena.

Já a caixa de sucção, devido a presença de diversas mudanças na área da seção transversal e na direção do escoamento, teve sua estrutura considerada em partes para a aproximação às singularidades mais simples. Assim, o fluido ao entrar na caixa de sucção, devido a mudança de direção do escoamento, pode ser aproximado a duas grandes curvas horizontais de 180°. Logo após estas curvas, o fluido deve escoar para a parte inferior da caixa de sucção, passando por duas contrações, que são as aberturas com portas reguláveis. Junto com esta contração, o fluido também passa por uma região da sucção que se assemelha a curvas verticais de 90°. Finalmente, após esta contração, o fluido passa por uma grande expansão, onde aguarda a sua passagem pelas tomadas que se ligam a tubulação hidráulica.

Outras singularidades que apresentam perda de carga no sistema são:

- Entrada do fluido com aresta viva pelas tomadas da caixa de regularização;
- Saída do fluido com aresta viva pelas tomadas da caixa de sucção;
- Todas as válvulas de gaveta presentes no sistema hidráulico;
- Todas as curvas de 90° utilizados no sistema hidráulico;
- A contração presente na caixa de regularização.

⁵ - Disponível em: http://www.mspc.eng.br/flidetc/fluid_06A1.shtml. Acesso em out. 2015.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos da perda de carga para cada uma das singularidades e acessórios que foram utilizados na concepção deste canal.

Tabela 2 – Perdas menores.

ELEMENTO	H_l [m]	Quantidade
Entradas dos tubos	0,2314	2
Saídas dos tubos	0,4629	2
Válvulas de Gaveta	0,0444	5
Cotovelos padrão 90°	0,1666	8
Contração	0,0018	1
Caixa de Regularização	0,0014	1
Telas	0,0408	3
Caixa de Sucção	0,0918	1

Fonte: elaborada pela autora.

4.5.2. Cálculo da Potência Requerida na Bomba

Após o cálculo da perda de carga em todos os elementos, tem-se uma perda de pressão total de $5,89\text{ m}$ – considerando, ainda, a perda de carga provocada pela elevação do fluido até a altura da seção de teste. A fim de manter uma visão conservadora do sistema, e sabendo que se os cálculos de todas as perdas menores foram cuidadosamente calculados, espera-se uma previsão de incerteza de 10% das perdas reais (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006). Usou-se esta consideração como um critério de correção do cálculo do sistema como um todo. Assim, para a determinação da potência nas bombas a perda de pressão considerada foi de $6,48\text{ m}$.

Desta forma, a potência requerida pelo sistema (\dot{W}_{bomba}) é de 31.745 W - aproximadamente $42,5\text{ HP}$ – para um rendimento de bombas de 100%. Usualmente o rendimento de bombas centrífugas gira em torno de 85 a 70%, o que demanda uma potência total final de 50 a 60 HP , aproximadamente. Assim, o uso de duas bombas requer uma potência individual entre 25 e 30 HP .

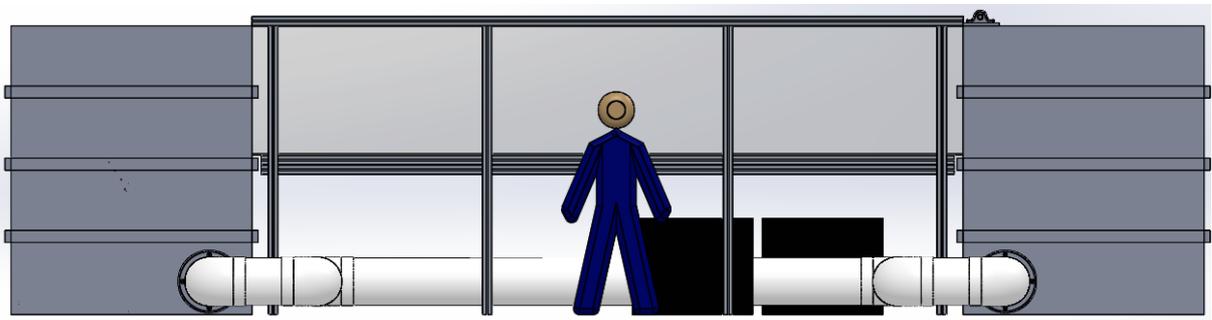
O NPSHD (altura de sucção positiva líquida disponível) para o sistema ficou estabelecido em $8,24\text{ m}$, portanto, o NPSHR deve ser um valor inferior a este para que não ocorra cavitação nas bombas.

Com base nestes dados obtidos pode-se iniciar o processo de orçamento das bombas que atendem as condições de projeto.

5. O MODELO DO CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE

Conforme já citado nos capítulos precedentes, o projeto conceitual do CWC foi realizado com o auxílio do *software* CAD *SolidWorks*, que auxiliou a compreensão do arranjo e composição do resultado concebido. Cada um dos elementos foi moldado tridimensionalmente no *software* e, a fim de compor uma visão completa do CWC para a UFSC – Campus de Joinville, resultaram nas seguintes imagens.

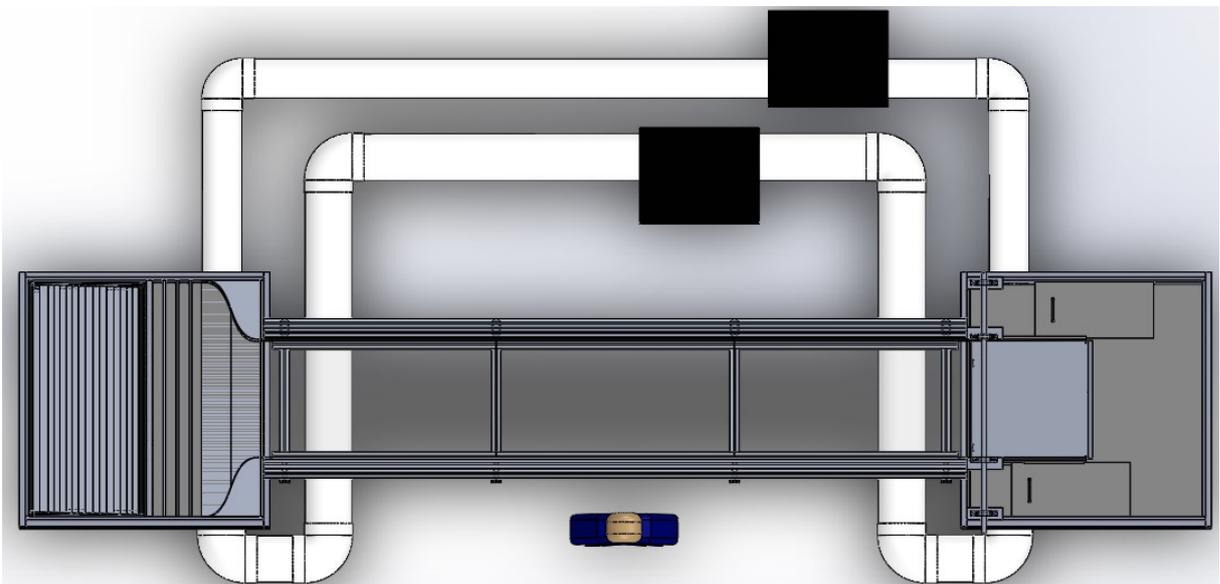
Figura 43 – Representação da vista lateral em *SolidWorks* do CWC proposto para a UFSC – Campus de Joinville.



Fonte: elaborada pela autora.

As duas caixas pretas, conforme podem ser observadas na Figura 43 e na Figura 44, apresentam o posicionamento inicial considerado para as duas bombas montadas em paralelo. Este posicionamento mais próximo a caixa de sucção possui a função de proporcionar um percurso maior para o escoamento na tubulação de descarga, auxiliando na estabilização do fluido após a saída das bombas.

Figura 44 - Representação da vista superior em *SolidWorks* do CWC proposto.



Fonte: elaborada pela autora.

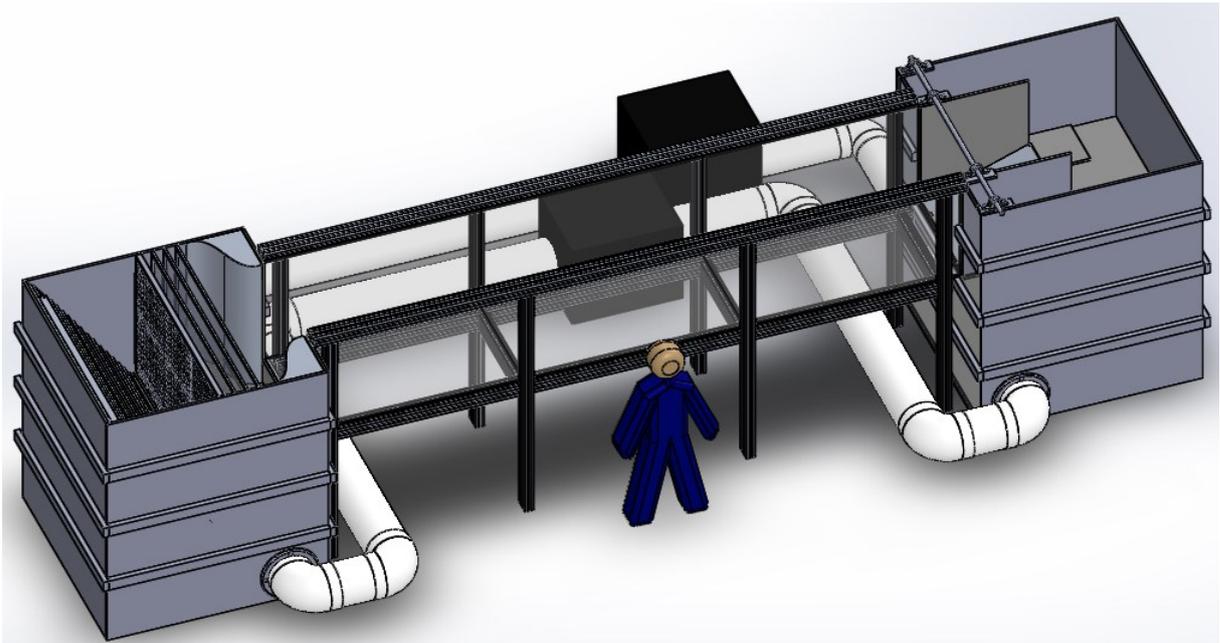
Um dos circuitos de tubulação passa por baixo da seção de testes, na região logo à entrada e saída do escoamento, a fim de não interferir na visualização em uma das laterais do canal, e também na posição inferior da parte central deste elemento, onde serão instalados os instrumentos necessários para a execução dos experimentos.

O *deck* de visualização da seção de testes poderá ser instalado acima da tubulação hidráulica e das bombas, permitindo o livre acesso em um dos lados do canal, bem como a instalação segura dos instrumentos de medição e/ou modelos.

Ainda, é possível observar nas figuras deste capítulo (especialmente na Figura 44) que as válvulas não foram representadas no *software SolidWorks*, apesar de se saber da necessidade de uso das mesmas, conforme explicado no tópico 4.4.

A Figura 45 apresenta uma vista em ângulo superior do canal.

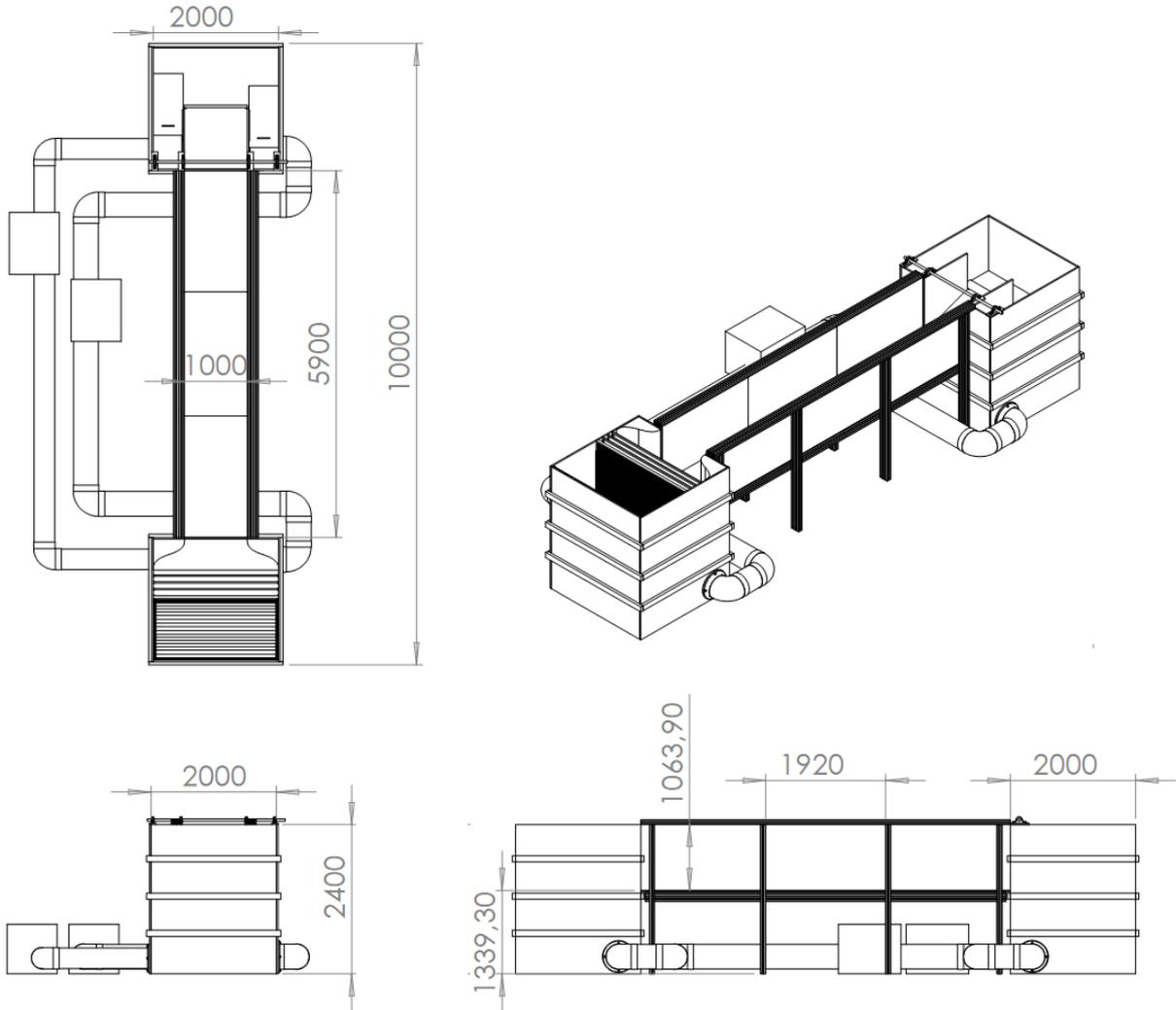
Figura 45 – Representação da vista superior em ângulo do CWC proposto, realizada em *SolidWorks*.



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 46 ilustra a representação 2D do CWC projetado. Nesta figura pode-se observar as dimensões principais do canal, como: o tamanho da seção de testes, o comprimento total da estrutura, a altura total do canal e da seção de testes (aproximadamente 1,34 m), entre outros dimensionamentos disponíveis.

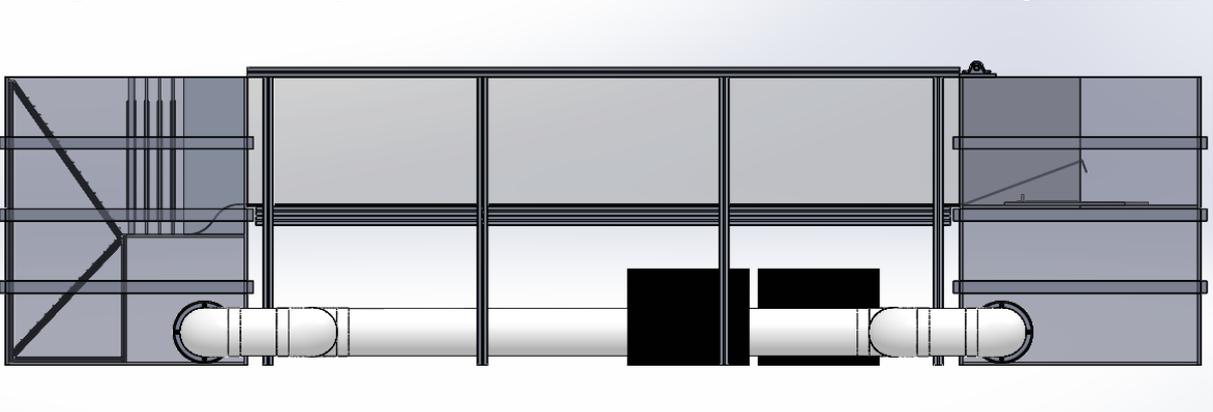
Figura 46 – Representação 2D com as dimensões principais do CWC projetado, realizada em *SolidWorks*.



Fonte: elaborada pela autora.

As próximas figuras (Figura 47, Figura 48 e Figura 50) apresentam as paredes externas em polipropileno não opacas, a fim de facilitar a visualização dos componentes internos das caixas de regularização e sucção.

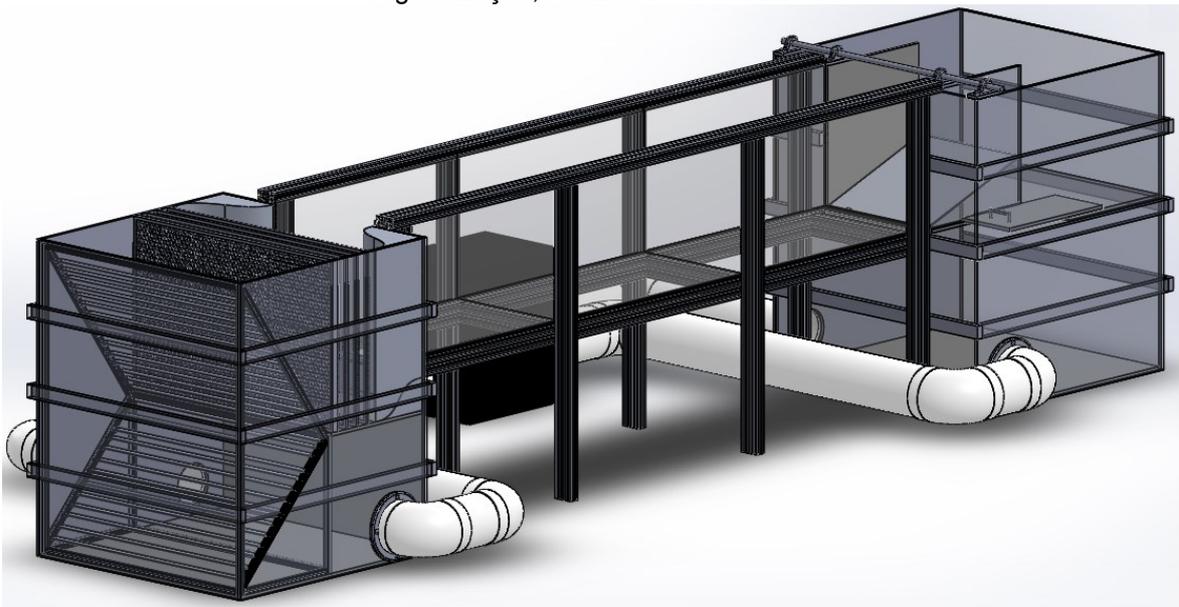
Figura 47 – Representação da vista lateral em *SolidWorks* do CWC com visualização interna.



Fonte: elaborada pela autora.

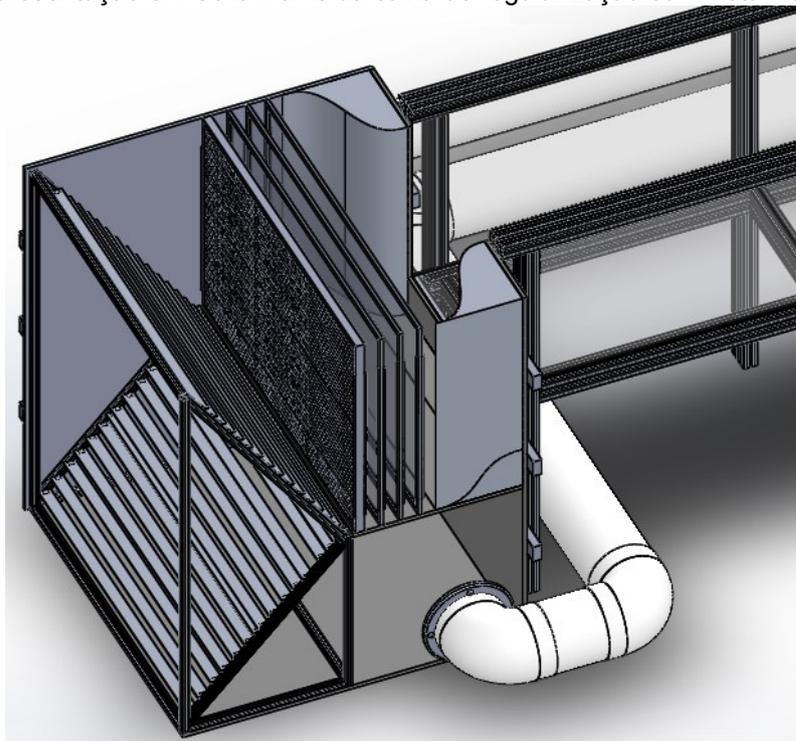
A distância entre as telas e colmeia segue a recomendação da seção 2.4.2, que é equivalente a 0,2 do diâmetro da câmara de estabilização, o que permite a performance adequada para as mesmas. Deste modo, foi possível considerar o uso de três telas e uma colmeia na caixa de regularização. A Figura 48 e a Figura 49 apresentam a visualização interna da caixa de regularização e todos os seus componentes.

Figura 48 – Representação da vista em ângulo do CWC com foco na visualização interna da caixa de regularização, realizada em *SolidWorks*.



Fonte: elaborada pela autora.

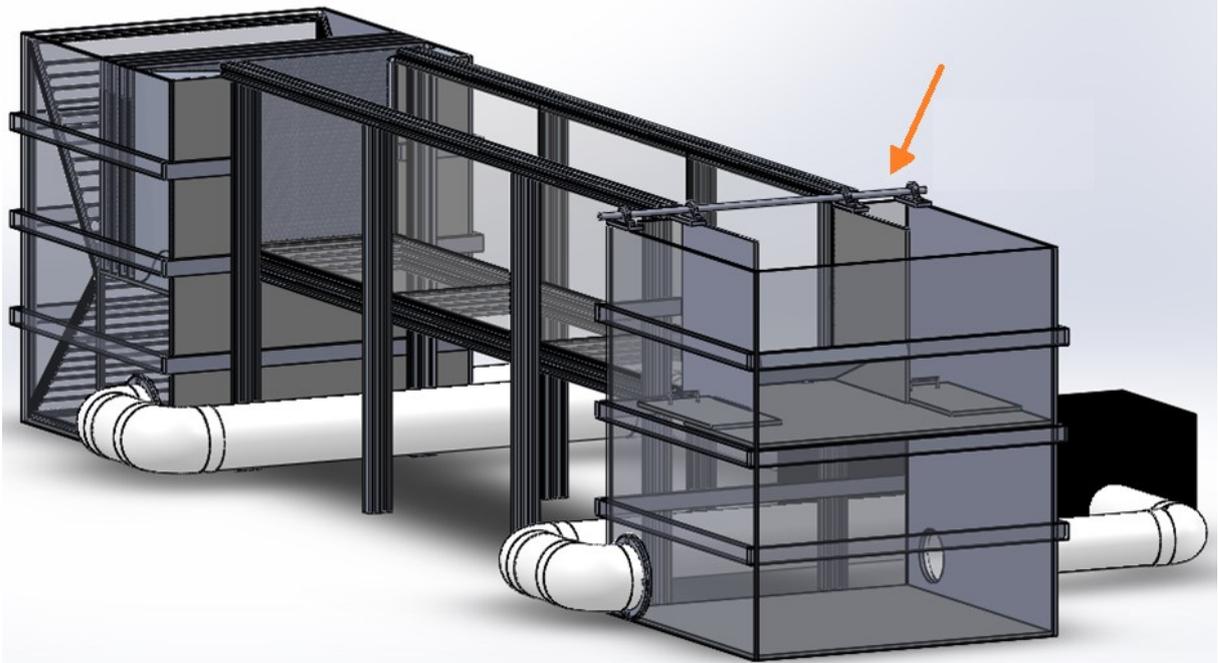
Figura 49 – Representação em *SolidWorks* da caixa de regularização com vista interna em ângulo.



Fonte: elaborada pela autora.

A roldana acima da caixa de sucção (conforme pode-se observar na Figura 50) possui como função controlar a abertura da porta de regulagem angular. Esta regulagem é dada a partir de um cabo de aço instalado nos extremos superiores da porta – cabo este que atualmente não se encontra no modelo 3D.

Figura 50 - Vista em ângulo com foco na visualização interna da caixa de sucção do CWC, realizada em *SolidWorks*.



Fonte: elaborada pela autora.

5.1. Considerações Futuras

Deseja-se, ainda neste capítulo, deixar algumas recomendações futuras para o projeto detalhado do canal. Estas recomendações foram observações relatadas por autores durante o trabalho de revisão bibliográfica, que devem ser consideradas para produzir um canal eficiente, respeitando as condições necessárias de escoamento na seção de testes.

- Segundo Ássi (2005), a fundação civil da estrutura do canal e dos motores responsáveis pela geração de torque para o sistema devem ser independentes, evitando, assim, a transmissão de vibração para a seção de testes.
- Para evitar vibração do motor nos outros elementos, ou ainda de influências externas, deve-se considerar o uso de materiais absorventes de vibrações entre as estruturas (CATTAFESTA, BAHN, MATHEW, 2010).

- Uma instrumentação extremamente necessária que deve ser instalada no canal são dois medidores de vazão hidráulica nas tubulações de descarga próximas as bombas, a fim de garantir a velocidade adequada na seção de testes. Esta instrumentação deverá passar por um processo de calibração inicial a fim de permitir relação direta com a velocidade de escoamento apresentada na seção de testes.

6. AVALIAÇÃO DE CUSTOS – ORÇAMENTOS

De acordo com os itens aptos ao dimensionamento racional, conforme já explicado no capítulo 3, uma estimativa de custos para a construção das estruturas principais pode ser realizada.

Foram encaminhados pedidos de orçamento para empresas preferencialmente da região, a fim de evitar altos custos de transporte. Ainda assim, devido às particularidades de alguns elementos, não foi possível se valer da oferta local, fazendo com que fosse necessária a solicitação de orçamentos a grandes centros (como São Paulo, por exemplo, que possui empresas qualificadas para disponibilizar os produtos requisitados).

6.1. Estruturas em Perfil de Alumínio

Nos orçamentos recebidos das empresas consultadas foram encaminhados os valores de custo de material e montagem das estruturas de alumínio que compõem a seção de testes e a gaiola que sustenta as aletas na regularização. Algumas empresas incluíram as aletas (que são itens que não apresentam um perfil de alumínio estrutural) no preço do produto. A Tabela 3 apresenta os valores finais dos orçamentos de empresas situadas a menos de 150 *km* da UFSC – Campus de Joinville.

Tabela 3 – Valores obtidos nos orçamentos para as estruturas em alumínio do CWC.

EMPRESA	OBSERVAÇÕES	VALOR FINAL
EMPRESA 1	Com aletas em aço galvanizado. JOINVILLE - FOB ⁶	33.795,43
EMPRESA 2	Com aletas em alumínio. CURITIBA - CIF ⁷	17.648,78
EMPRESA 3	Sem as aletas, com os componentes para a fixação destas. TIJUCAS - FOB	18.800,00

Fonte: elaborada pela autora.

⁶ - *Free on Board* (Livre a bordo): o comprador assume todos os riscos e custos com o transporte da mercadoria.

⁷ - *Cost, Insurance and Freight* (Custo, Seguros e Frete): o fornecedor é responsável por todos os custos e riscos com a entrega da mercadoria.

6.2. Vidros da Seção de Testes

Os orçamentos realizados foram para vidros laminados de segurança, conforme seção 4.1, que trata especificamente da seção de testes. Para o levantamento de custos foi considerada a condição que propõe toda a seção de testes composta por vidros. Ainda assim, caso seja necessário, apenas a região central do canal poderia apresentar material transparente. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos nos orçamentos de empresas situadas a menos de 150 km da UFSC – Campus de Joinville, com somente o custo do material.

Tabela 4 – Valores obtidos nos orçamentos para as chapas de vidro da seção de testes do CWC.

EMPRESA	OBSERVAÇÕES	VALOR FINAL
EMPRESA 1	JOINVILLE – FOB	13.941,00
EMPRESA 2	CURITIBA – FOB	12.986,85
EMPRESA 3	CURITIBA – FOB	15.148,24

Fonte: elaborada pela autora.

6.3. Tanques de Polipropileno

Os tanques de polipropileno foram orçados com os devidos reforços transversais para garantir a resistência adequada da estrutura. A Tabela 5 apresenta os valores orçados para a construção das duas caixas de polipropileno montadas.

Tabela 5 – Valores obtidos nos orçamentos para os tanques de polipropileno do CWC.

EMPRESA	OBSERVAÇÕES	PREÇO UNITÁRIO	VALOR FINAL
EMPRESA 1	JOINVILLE - FOB	24.810	49.620,00
EMPRESA 2	JOINVILLE – CIF	17.300	34.600,00
EMPRESA 3	SÃO PAULO - FOB	10.500 e 11.900	22.400,00
EMPRESA 4	RIO GRANDE DO SUL - FOB	20.640	41.280,00

Fonte: elaborada pela autora.

6.4. Bombas Centrífugas

As bombas, devido aos requisitos de alta vazão e baixa altura de perda de carga, não permitiram a realização de orçamentos somente na região, forçando o encaminhamento de pedidos para São Paulo. A Tabela 6 apresenta os custos obtidos nos orçamentos para as duas bombas em paralelo, que não incluem os custos de transporte.

Tabela 6 - Valores obtidos nos orçamentos para as bombas do CWC.

EMPRESA	OBSERVAÇÕES	VALOR UNITÁRIO	VALOR FINAL
EMPRESA 1	BLUMENAU - FOB	51.896,93	103.379,86
EMPRESA 2	SÃO PAULO - FOB	60.400	120.800,00
EMPRESA 3	BLUMENAU - FOB	38.856	77.712,00

Fonte: elaborada pela autora.

6.5. Investimento Total Estimado

A partir dos orçamentos recebidos um valor inicial de investimento dos componentes dimensionados racionalmente pôde ser executado. Assim, a faixa de valores para compra de material – e em alguns casos com a montagem inclusa – deste projeto se encontra entre 130.747,63 e 219.363,67 reais.

O valor médio do custo de investimos é de aproximadamente 175 mil reais.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste projeto conceitual a ausência de referências bibliográficas com foco no desenvolvimento de canais de água circulante pôde ser contornada com as devidas considerações de literaturas bem consolidadas sobre o projeto de túneis de vento. O respaldo em projetos de canais e túneis de água construídos a partir da literatura aerodinâmica permitiu o refinamento dos componentes; todavia, instituições como a NASA forneceram subsídios (ver referências bibliográficas) a partir de seu conhecimento em projetos e construções desta natureza, tanto aero quanto hidrodinâmicos.

As soluções encontradas no projeto conceitual do CWC para a UFSC – Campus de Joinville se mostraram eficientes durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao contornar os problemas com relação à impossibilidade de dimensionamento racional de alguns elementos, a abordagem conceitual demonstrou ser uma metodologia inteligente, particularmente ao disponibilizar soluções flexíveis para o projeto. Sua tolerância às novas circunstâncias impostas se torna, portanto, um método eficaz para a construção desta instalação de testes.

O projeto conceitual conseguiu contemplar as necessidades impostas pelo cliente, como ser de fácil operação, adaptável a mudanças de configuração dos testes e que permita uma implementação em partes, dependendo do recurso financeiro obtido ou a reconstrução da instalação a fim de receber melhorias para execução dos testes no futuro.

Uma análise do escoamento em CFD pode ser um recurso interessante (não excluída a possibilidade de sua execução no projeto detalhado), especialmente para a avaliação da eficiência dos componentes que constituem a regularização, seção de testes e a sucção do canal. Todavia, em virtude da execução individual deste projeto, não se mostrou compatível com esta fase eminentemente conceitual.

Como etapa final deste projeto foram encaminhados pedidos de orçamento aos fornecedores dos produtos necessários. Devido a grande variação de custos observados na análise orçamental, foi possível constatar a exigência de uma maior atenção durante a futura etapa de contratação dos serviços requisitados. Ainda assim, a ordem de grandeza do investimento estimado do projeto está de acordo com a faixa esperada para a construção da estrutura. Deste modo, confirma-se a viabilidade de continuidade do projeto.

Fica aqui proposto o seguimento da nova fase de projeto detalhado, onde os elementos que receberam uma abordagem conceitual neste trabalho sejam dimensionados de maneira mais racional possível, em concordância com os requisitos necessários. Durante as possíveis novas considerações, é provável que seja necessário retrabalhar os componentes já dimensionados racionalmente, executando uma nova etapa de pedidos de orçamentos. Assim, os valores podem ser refinados, acreditando-se na redução dos custos de investimento dos elementos já orçados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. J. **Estudo e Escolha de Metodologia para o Projeto Conceitual**. Revista de Ciência & Tecnologia, Piracicaba, v. 8, n. 16, p. 31-42, dez. 2000.
- ÁSSI, G. R. S. **Estudo Experimental do Efeito de Interferência no escoamento ao Redor de Cilindros Alinhados**. 2005. 276 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Energia e Fluidos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7199**: Projeto, execução e aplicações de vidros na construção civil. Rio de Janeiro, 1989.
- AZEVEDO, J. M., N.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1998, 669 p.
- BATCHELOR, G. K. **Introduction to Fluid Dynamics**. 1. ed. reimp. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. 615 p.
- BELL, J. H.; MEHTA, R. D. **Contraction design for small low-speed wind tunnels**. NASA Contractor Report n. 17748, Stanford, Aug. 1988. 39 p.
- BELL, J. H.; MEHTA, R. D. **Boundary-Layer Predictions for Small Low-Speed Contractions**. AIAA Journal, Stanford, Stanford University, v. 27, n. 3, p. 372-374, Mar. 1989.
- BLEVINS, R. D. **Flow Induced Vibration**. 2. ed. Florida: Krieger Publishing Company, 1990. 477 p.
- BRENT, R. C.; FRATE, J. **Water Tunnel Flow Visualization Study of a 4,4% Scale X-31 Forebody**. NASA Technical Memorandum n. 104276, Edwards, NASA Dryden Flight Research Center, Sep. 1994. 38 p.
- BRUSCA, S.; LANZAFAME, R.; MESSINA, M. **Low-Speed Wind Tunnel: Design and Build**. In: PEREIRA, J. D. Wind Tunnels – Aerodynamics, Models and Experiments, New York, 2011, cap. 7, p. 189-220.
- BUSSIÈRE, M. **The Experimental Investigation of Vortex Wakes from Oscillating Airfoils**. 2012. 246 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – University of Alberta, Edmonton, fall 2012.
- CATTAFESTA, L.; BAHR, C. J.; MATHEW, J. **Fundamentals of Wind-Tunnel Design**. In: BLOCKLEY, R.; SHYY, W. Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 978-0-470-68665-2, Chichester, Dec. 2010. p. 691-700.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill Brasil, 2007. 816 p. Tradução de: Katia Aparecida Roque e Mario Moro Fecchio.

DAVIES, A. G. **A Comparative Study of Vortex Flows in Wind and Water Tunnels**. In: AGARD Fluid Dynamics Panel Symposium, n. 413, 20-23 Oct.1986, Monterey, Aerodynamic and Related Hydrodynamic Studies Using Water Facilities June 1987. p. 26.

ERICKSON, G. E. **Vortex Flow Correlation**. NASA Technical Report AFWAL-TR-80-3143, Northrop Corporation - Aircraft Division, Hawthorne, Jan. 1981.

ERICKSON, G. E. **Water Tunnel Flow Visualization and Wind Tunnel Data Analysis of the F/A-18**. NASA Contractor Report n. 165859, Northrop Corporation - Aircraft Division, May 1982. 261 p.

ERICKSON, G. E.; PEAKE, D. J.; DEL FRATE, J.; SKOW, A. M.; MALCOLM, G. N., **Water Facilities in Retrospect and Prospect: An Illuminating Tool for Vehicle Design**. In: AGARD Fluid Dynamics Panel Symposium, n. 413, 20-23 Oct.1986, Monterey, Aerodynamic and Related Hydrodynamic Studies Using Water Facilities June 1987. p. 1. ; NASA Technical Memorandum n. 89409, Ames Research Center, Moffett Field, Nov. 1986.

FANG, F-M.; CHEN, J.C.; HONG, Y.T. **Experimental and Analytical Evaluation of Flow in a Square-to-Square Wind Tunnel Contraction**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier Science Ltd., n. 89, 2001, p. 247-262.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD P.J. **Introdução à Mecânica dos Flúidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006. 798 p.

FUJARRA, A. L. C. **Estudos Experimentais e Analíticos das vibrações induzidas pela emissão de vórtices em cilindros flexíveis e rígidos**. 2002. 235 p. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GAD-EL-HAK, M. **The Water Towing Tank as an Experimental Facility: An Overview**. Experiments in Fluids Journal, Germany, Springer-Verlag, v. 5, n. 5, p. 289-297, Jan 01, 1987.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 637 p.

LAUTENBACH, K. A. **Design of Water Tunnel to Measure Wall Pressure Signatures due to Tunne; Blockage and Wake Effects**. Tese (Mestrado em Engenharia Aeronautica) – Faculty of the Study of Engineering of the Air Force Institute of Technology Air University, Dec. 1988.

MEHMET, A. **Recent Upgrading of Marine Testing Facilities at Newcastle University**. In: AMT'11, The second Intl Conference on Advanced Model Measurement Technology for the EU Maritime Industry, 4-6th April, 2011, Newcastle, University, 32 p.

MEHTA, R. D.; BRADSHAW, P. **Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels**. Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, v. 83, n. 827, p. 443-449, Nov. 1979.

MEHTA, R. D. **Turbulent Boundary Layer Perturbed by a Screen**. In: 22nd Aerospace Sciences Meeting, n. 22, Jan. 9-12, 1984, Reno, AAIA Journal, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., v. 23, n. 9, p. 1335-1342, Sept. 1989.

PLAUSKA, G. C. **Experimento e aprendizagem: Uma aula introdutória à mecânica dos fluidos**. 2013. 96 p. Dissertação (Mestrado em Ensino em Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PRANDTL, L. **Attaining a Steady Stream in Wind Tunnel**. Technical Memorandum n. 726, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, Oct. 1933.

SANCHES, R. A. K.; CODA, H. B. **Análise de Interação Fluido Estrutura pelo Método dos Elementos Finitos**. Caderno de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 11, n. 53, p. 187-191, 2009.

STRUNZ, M.; SPETH, J.F. **A New Laminar Water Tunnel to Study the Transition Process in a Blasius Layer and in a Separation Bubble and a New Tool for Industrial Aerodynamics and Hydrodynamic Research**. In: AGARD Fluid Dynamics Panel Symposium, n. 413, 20-23 Oct. 1986, Monterey, Aerodynamic and Related Hydrodynamic Studies Using Water Facilities June 1987. p. 25.

SUÁREZ, C. J.; MALCOLM, G. N.; KRAMER, B. R.; SMITH, B. C.; AYERS, B. F. **Development of a Multicomponent Force and Moment Balance for Water Tunnel Applications, Volume I**. NASA Contractor Report n. 4642, Torrance, 1994. 132 p.

ZDRAVKOVICH, M. M., **Flow Around Circular Cylinders – Vol 1: Fundamentals**. 1. ed. New York: Oxford University Press, v. 1, 1997. 672 p.