ANGELO AUGUSTO NEGRÃO DA SILVA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM UM TÚNEL DE
CAVITAÇÃO**

**SÃO PAULO
2015**

ANGELO AUGUSTO NEGRÃO DA SILVA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM UM TÚNEL DE
CAVITAÇÃO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**SÃO PAULO
2015**

ANGELO AUGUSTO NEGRÃO DA SILVA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM UM TÚNEL DE
CAVITAÇÃO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Naval**

**Orientador:
Gustavo Roque da Silva Assi**

**SÃO PAULO
2015**

Catálogo-na-publicação

da Silva, Angelo Augusto Negrão
Simulação numérica do escoamento em um túnel de cavitação / A. A. N.
da Silva -- São Paulo, 2015.
93 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Hidrodinâmica 2.Túneis 3.Dinâmica do Fluido 4.Escoamento
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Naval e Oceânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Dedico esse trabalho a minha família por acreditarem na minha capacidade em superar esse desafio. Sou grato pela companhia de minha esposa nesse momento e motivação.

Agradeço a todos que colaboraram para o desenvolvimento desse trabalho, em especial ao comandante Ricardo Sbragio, professor Gustavo Assi e a toda equipe do LABHIDRO pelo apoio técnico e suporte.

RESUMO

A presente dissertação investiga o comportamento do escoamento em um túnel de cavitação, através de simulações fluidodinâmicas computacionais, excluindo a bomba de circulação. Para tanto um extenso estudo buscou selecionar a abordagem numérica e configurações de simulação mais adequadas, de uma forma a reproduzir as características hidrodinâmica inerentes à operação do túnel. Portanto, as informações referentes à perda de carga, uniformidade no perfil de velocidade, tendência de cavitação, descolamento e altura da camada limite foram apreciadas. Esse estudo foi direcionado por dados provenientes de métodos empíricos da literatura, resultados experimentais do próprio túnel pesquisado e de outros túneis. Em geral, os resultados foram satisfatórios, pois a perda de carga estimada foi semelhante ao obtido experimentalmente. Além de serem identificados os trechos com efeito desfavorável na uniformidade do escoamento, foram determinadas a distribuição de pressão nas aletas e o perfil de velocidade incidente na bomba.

Palavras-chave: Hidrodinâmica. Simulação fluidodinâmica computacional. Túnel de cavitação.

ABSTRACT

This study deals with a cavitation tunnel flow (except the pump region) through computational fluid dynamic simulations. Therefore, previously one made a literature survey to aid the selection of the most appropriate techniques and simulation settings to simulate the hydrodynamic characteristics of the tunnel. The pressure drop, uniformity of the velocity profile, existence of cavitation, detachment and height of the boundary layer were evaluated. This study used empirical methods and also experimental results. The results were satisfactory, as long as the estimated pressure drop was close to the one obtained experimentally. In addition, it was forecasted low flow uniformity in some parts of the tunnel, the pressure distribution on the fins and the incident velocity profile at the pump.

Keywords: Hydrodynamics. Computational fluid dynamics. Cavitation tunnel.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1.	Motivação	1
1.2.	Objetivo	3
1.3.	Abordagem da pesquisa	4
2.	Revisão Bibliográfica	8
2.1.	Aspectos Históricos	8
2.2.	Operação	11
2.3.	Estudos Aplicados em Túneis de Cavitação	12
2.3.1.	Contração	12
2.3.2.	Seção de Teste	14
2.3.3.	Difusor	16
2.3.4.	Curva	16
2.3.5.	Câmara de Estabilização – Colmeia e Telas	18
3.	Revisão Teórica	21
3.1.	Equações de Governo	21
3.2.	Métodos Computacionais	23
3.3.	Modelagens dos Efeitos Turbulentos	25
3.4.	Modelos de Turbulência	26
3.4.1.	Modelo $k-\epsilon$	27
3.4.2.	Modelo $k-\omega$	30
3.4.3.	Modelo shear stress transport (SST)	30
3.5.	Simulações de CFD em túneis de cavitação.	32
4.	Método de Pesquisa	37
4.1.	Geometria do Túnel	38
4.2.	Geração da Malha	39

4.3.	Avaliação dos Resultados	43
5.	Resultados e Discussões	45
5.1.	Estudos Iniciais.	45
5.1.1.	Variação do comprimento do domínio	46
5.1.2.	Variação do modelo de turbulência	48
5.2.	Estudos dos trechos característicos	53
5.2.1.	Câmara de Estabilização.....	53
5.2.2.	Contração.....	55
5.2.3.	Seção de Teste	58
5.2.4.	Difusor.....	59
5.3.	Curva.....	63
5.4.	Estudos do circuito completo.....	73
5.4.1.	Perfil de Velocidade	75
5.4.2.	Fator de qualidade	82
5.4.3.	Perda de Carga.....	83
6.	Conclusão	86
7.	Referências	88

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Permeabilidade da superfície
μ	Viscosidade [Pa.s]
B_0	Constante empírica para cálculo de número de aletas
c	Corda [m]
C_p	Coefficiente de Pressão
C_v	Coefficiente de Velocidade
FQ	Fator de qualidade
h	Tamanho característico da malha
H	Altura da Seção [m]
K	Energia cinética turbulenta por unidade de massa
L	Comprimento da seção [m]
F_s	Fator de segurança
n_{nor}	Número de aletas
Q_{inf}	Vazão trecho inferior [m³/s]
Q_{sup}	Vazão trecho superior [m³/s]
k	Energia cinética turbulenta
r	Raio Médio das Curvas [m]
R	Ponto de recolamento da camada limite
Re	Número de Reynolds
Re_x	Número de Reynolds Local
Re_t	Número de Reynolds Turbulento
RQ	Razão entre vazões do trecho inferior e superior de um conduto
S	Ponto de separação da camada limite
u	Velocidade [m/s]
u	Velocidade de atrito [m/s]

U	Velocidade média [m/s]
U_{ϕ}	Incerteza de malha
U_{∞}	Velocidade média fora da camada limite [m/s]
δ	Altura da camada limite [mm]
δ_{ij}	Delta de Kronecker
ΔP	Queda de pressão [Pa]
Δp	Diferença de pressão [Pa]
ϵ_{ϕ}	Erro de malha
ϵ	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta
ω	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta
f_i	Força de corpo
Z	Perda de carga
ρ	Massa específica [kg/m ³]
τ_{ij}	Tensor de tensão
t_1	Corda da aleta [m]
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]
ν_t	Viscosidade turbulenta
y	Dimensão vertical da seção [m]
y_0	Altura total da contração [m]
y^+	Distância adimensional da parede
x_i	Ponto de inflexão da curvatura da contração [m]
x_{TS}	Distância de entrada da seção de teste [m]

LISTA DE SIGLAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
CTMSP	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
FLUENT	Código do desenvolvedor Ansys para CFD
GTH	Grand Tunnel Hydrodynamics
HYKAT	Hydrodynamics and Cavitation Tunnel
LABHIDRO	Laboratório de Hidrodinâmica do CTMSP
LCC	Large Cavitation Channel
MOERI	Maritime and Ocean Engineering Research Institute
PROSUB	Programa de Desenvolvimento do Submarino com Propulsão Nuclear
SN-BR	Submarino Nuclear Brasileiro

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Motivação

O programa de desenvolvimento de submarinos da Marinha do Brasil (PROSUB) é baseado na transferência de tecnologia, nacionalização e capacitação de pessoal e está em curso desde dezembro de 2008, quando Brasil e França assinaram o Acordo de Cooperação na área de submarinos. O Almirante-de-Esquadra Gilberto Max Roffé Hirschfeld, Coordenador-Geral da Coordenadoria do Programa de Desenvolvimento do Submarino com Propulsão Nuclear, ratifica que “A construção do submarino com propulsão nuclear (SN-BR) é o objetivo principal do PROSUB, porém, o grande diferencial do programa está na obtenção do conhecimento e da tecnologia que permita projetar e construir submarinos, de forma independente. Além disso, outros resultados de relevância do PROSUB são obtidos ao capacitar a indústria brasileira para fabricar novos equipamentos e sistemas, e envolver uma enorme quantidade de pessoas, direta e indiretamente, no programa” (Techno News, 2014).

Pereira (1996) compreende a atuação dos submarinos com o seguinte ponto de vista: “A estratégia naval se utiliza dos submarinos para que suas ações no mar produzam efeitos materiais ou psicológicos favoráveis, cabendo à Marinha de Guerra controlar a área marítima, projetar poder sobre a terra, negar o uso de área marítima cujo controle pleno seja impossível ou desnecessário, e fazer-se presente. É na negação do uso do mar que o submarino se destaca, dissuadindo o oponente pelo elevado risco a

que estará exposto ou obrigando-o a imenso esforço para manter o controle da área de seu interesse”.

O submarino é um armamento de defesa em que a ocultação é sua principal vantagem sobre o oponente, portanto, a sua detecção por sistemas de sonares é um aspecto de grande relevância. Andersen (2009) ressalta que a eficácia de um submarino é altamente dependente de sua assinatura acústica, diretamente influenciada pelo ruído gerado pelo escoamento hidrodinâmico. Em aspectos específicos, o projeto e desenvolvimento de propulsores para submarinos e navios de superfície são diferentes. Pois, o requisito mais importante é a baixa emissão de ruído que tem prioridade sobre a eficiência propulsiva nos submarinos.

A Arquitetura Naval utiliza muitos recursos para determinar, da melhor forma possível, as características de manobrabilidade e propulsiva do navio previamente à construção. Testes de resistência ao avanço e de autopropulsão em tanques de reboque, testes de manobrabilidade em tanques de manobras e testes de modelo do propulsor em túneis de cavitação são exemplos de testes experimentais com esta finalidade. Coxon (1989) destaca a relevância dos resultados de testes hidrodinâmicos de modelos em escala como base de muitas das principais decisões de projeto de um submarino.

Dentro deste contexto, o Laboratório de Hidrodinâmica (LABHIDRO) da Marinha é fundamental para o projeto de futuros submarinos brasileiros. Esse laboratório será constituído por um tanque de reboque, um tanque de manobra e um túnel de cavitação, todos de grande porte. O LABHIDRO tem como um dos objetivos prover suporte técnico e científico à indústria naval através de ensaios hidrodinâmicos em instalações de grande porte, onde se destaca o túnel de cavitação pela complexidade de seus requisitos. Essa instalação é uma ferramenta que permite estudos do escoamento ao redor de embarcações de superfície e submarinos, operação de propulsores e desempenho do leme. As investigações podem envolver o estudo de cavitação, escoamento permanente (solução baseada na média temporal) e transiente, turbulência, hidroacústica e hidroelasticidade.

A construção de um túnel de cavitação de grandes dimensões e capaz de produzir resultados confiáveis é um empreendimento que exige grandes investimentos. O projeto do túnel e sistemas auxiliares necessita atender a uma série de requisitos, pois não atendê-los pode ocasionar alteração de resultados ou inviabilizar a realização de

ensaios. Grande parte desses requisitos são restritivos e de relativa complexidade, como as específicas para a seção de teste: não uniformidade da velocidade longitudinal do escoamento menor que 1% , baixo nível de turbulência, não ocorrência de cavitação e separação, de acordo com Wetzel (1994) e Wosnik (2006).

Para a operação de um túnel de cavitação moderno é necessário o controle da pressão e da velocidade na seção de teste, do ar dissolvido na água, conhecer a espessura da camada limite na seção de teste, baixo ruído de fundo e níveis de vibração. Manter constante o número de cavitação é um parâmetro necessário, mas insuficiente para os testes de cavitação, os quais exigem a redução da pressão estática quando a velocidade no modelo em escala é reduzida, tal como afirma Brandner (2007).

Visando atender aos requisitos expostos, o estudo do comportamento fluidodinâmico nos trechos do túnel é fundamental para a correta operação dessa instalação. Para isso, o projeto hidrodinâmico de cada seção se vale de diferentes abordagens para a avaliação do escoamento. Uma das alternativas é a simulação fluidodinâmica computacional (CFD – *Computation Fluid Dynamics*). Atualmente as ferramentas computacionais disponíveis possuem a capacidade de calcular numericamente equações de fluidodinâmica de relativa complexidade, as quais podem auxiliar no projeto de um túnel de cavitação reduzindo o investimento de recursos e tempo.

Este trabalho possui como principal motivação adquirir o conhecimento técnico e teórico para aplicar ferramentas computacionais na compreensão dos fenômenos fluidodinâmicos no interior de um túnel de cavitação. Através do domínio desta competência, será possível prover suporte para análise do projeto do Túnel de Cavitação de grande porte do LABHIDRO, instalação de grande relevância no desenvolvimento tecnológico da indústria naval nacional.

1.2. Objetivo

Este trabalho objetiva aplicar as ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD), para a simulação do escoamento em regime permanente, por meio de um software comercial, ao longo de um túnel de cavitação. Os resultados obtidos, associados a ensaios experimentais, serão a base para determinação da perda de carga

do túnel, pontos de descolamento da camada limite, avaliação da uniformidade do escoamento, tendência à ocorrência de cavitação e distribuição da pressão em regiões de interesse. Apesar das simulações desta pesquisa não abordarem a determinação das características hidroacústicas do túnel, algumas das grandezas estudadas influenciam diretamente esse aspecto, como a ocorrência de cavitação.

O projeto de uma instalação como um túnel de cavitação de grande porte pode ser considerado de alta complexidade, exigindo equipe e investimento dedicados a esse fim. Portanto, o presente trabalho não pretende resultar no projeto de um túnel, mas apenas fornecer uma contribuição para tal. O projeto desse tipo de instalação envolve diversas abordagens e ferramentas, não se limitando à simulação numérica do escoamento.

1.3. Abordagem da pesquisa

Buscando a adequada aplicação das ferramentas de simulação computacional, as etapas de pesquisa seguiram uma lógica crescente de complexidade, com a discussão dos resultados sempre embasados por dados consolidados na literatura e por ensaios experimentais. A fim de possibilitar a validação e comparação com resultados experimentais disponíveis, optou-se por simular o escoamento em um túnel de cavitação já existente. A instalação selecionada pertence ao Laboratório de Hidrodinâmica (LABHIDRO) que está inserido no Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP). O arranjo esquemático desse túnel de cavitação está representado na Figura 1, com exceção do trecho da bomba de circulação, e as seções descritas na Tabela 1.

Figura 1: Desenho esquemático do túnel de cavitação LABHIDRO/CTMSP.

Tabela 1: Descrição das seções do túnel de cavitação do LABHIDRO/CTMSP.

Nº	Descrição	Comentários
1	Difusor Inferior	Recebe o escoamento proveniente da Bomba.
2	Convergente Inferior	Transição entre seção circular e retangular.
3	Curva 1	Seção onde se localizam aletas direcionadoras de escoamento.
4	Curva 2	Seção onde se localizam aletas direcionadoras de escoamento.
5 e 6	Câmara de Estabilização	Seção onde se encontram se encontram colmeia e tela, dispositivos utilizados na uniformização do fluxo.
7	Contração	Acelera o escoamento para entrada na seção de testes.
8	Seção de Teste	Seção que comporta os modelos e grande parte da instrumentação.
9	Difusor	Tende a reduzir a velocidade do escoamento.
10	Entrada Curva 3	Transição entre o difusor e a Curva 3.
11	Curva 3	Seção onde se localizam aletas direcionadoras de escoamento.
12	Saída Curva 3	Difusor descendente.
13	Curva 4	Seção onde se localizam aletas direcionadoras de escoamento.
14	Transição seção quadrada para circular	Seção anterior ao trecho da bomba.

O referido túnel do LABHIDRO/CTMSP pode ser observado na Figura 2. O objetivo principal desse túnel de pequeno porte é auxiliar no projeto e validação da bomba

de circulação interna (impelidor), além de permitir o estudo do escoamento ao longo do circuito. Logo, as seções 05 a 10 e parte das seções 04 e 11 (de acordo com a Tabela 1) foram construídas em acrílico de forma a permitir a visualização do escoamento. A velocidade máxima na seção de teste é 6,7m/s, com área transversal de 0,045m².

Figura 2: Túnel de cavitação de pequeno porte LABHIDRO/CTMSP, antes da reforma no trecho inferior.

Através de análise da Tabela 1 é evidente que cada trecho e componente desse circuito possui uma função específica. Logo, em cada um ocorrem fenômenos hidrodinâmicos característicos. Levando em conta essa observação, a estratégia de simulações passou por três etapas: (I) simulações preliminares, (II) simulação individual das seções características e (III) simulação do circuito completo.

- I. Inicialmente, foram necessárias simulações preliminares com o objetivo de definir a abordagem do método numérico mais adequado e melhor compreensão da técnica de simulação em CFD. Para tanto, simulações individuais da seção de teste foram realizadas, pois essa seção possui uma geometria simples, trecho paralelo com perfil transversal retangular de 250mm por 180mm internamente.
- II. Posteriormente, com a definição da abordagem numérica, o estudo de outros trechos do túnel foi realizado. As seções simuladas foram selecionadas de forma

a abranger os principais fenômenos fluidodinâmicos no túnel de cavitação. Os trechos individualmente simulados foram: seção de teste nº 08, difusor nº 09, contração nº07, câmara de estabilização nº 05 onde se encontra a colmeia (nº 06) e curva após a seção de teste nº10, 11 e 12 (conforme a numeração da Tabela 1). Essa etapa teve também como meta o estudo da influência da malha, a avaliação comparativa dos resultados com dados experimentais e análise do efeito particular de cada seção no comportamento do túnel.

- III. A partir do conhecimento prévio adquirido, a simulação do circuito completo se baseou nas configurações de simulação e de malha encontradas nas etapas anteriores, as quais reproduziram o comportamento fluidodinâmico observado no túnel. Assim resultando em dados de relevância para projeto, como a perda de carga e uniformidade do escoamento nas seções, além do conhecimento adquirido com grande aplicação na operação e concepção dessa instalação.

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica se baseou em publicações referentes ao *Hydrodynamics and Cavitation Tunnel* (HYKAT), túnel de cavitação pertencente à instituição de pesquisa alemã *Hamburg Ship Model Basin* (*Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt* - HSVA), devido à disponibilidade de dados.

2.1. Aspectos Históricos

O túnel de cavitação é um sistema de circulação forçada de água, aplicado em pesquisas de sistemas fluido mecânicos. Apresenta uma disposição que permite a instalação de modelos em escala reduzida de propulsores, embarcações submersíveis ou de superfície em sua seção de testes. Os ensaios experimentais de propulsores, por exemplo, abordam os efeitos da cavitação, hidroacústica, caracterização do escoamento sobre corpos submersos e operação de propulsores com o levantamento de parâmetros de operação do hélice (empuxo e torque).

Charles Parsons desenvolveu o primeiro túnel em 1895, representado na Figura 3, o qual já continha a maior parte dos componentes de um túnel de cavitação moderno, exceto o rotor responsável pela circulação da água (Weitendorf - 2001). Um espelho curvo foi utilizado para obter fotografias estroboscópicas de um propulsor de 2 polegadas de diâmetro, como pode ser visto na Figura 4. Um filamento de circuito de lâmpada aquecia a água do túnel e a pressão atmosférica dentro do túnel foi reduzida

por uma bomba de ar. Esse túnel contribuiu enormemente para o esclarecimento do problema de cavitação, segundo Weitendorf (2001).

Figura 3: Primeiro Túnel de Cavitação desenvolvido por Parsons, segundo Weitendorf (2001).

Figura 4: Uma das primeiras fotografias de cavitação de propulsor no túnel de cavitação desenvolvido por Parsons em 1895, de acordo com Burril (1955).

Ao longo dos anos, os túneis evoluíram seguindo as demandas de pesquisa e o conhecimento sobre o fenômeno da cavitação. Os estudos sobre o assunto foram difundidos mundialmente e assim surgiram diversas instalações com essa finalidade. Estima-se que exista oitenta instalações desta natureza, segundo ITTC (1995). A partir de problemas com ruídos e condições livres de cavitação envolvendo navios militares, requisitos acústicos se tornaram importantes. Assim, os túneis de cavitação modernos

receberam tratamento especial em suas características hidroacústicas, de acordo com ETTER (2000). A Tabela 2 exemplifica os túneis de grande porte, mais recentes, e expõe suas principais características.

Tabela 2: Principais túneis de cavitação, de acordo com Atlar (2001).

Instituição do Túnel	Ano	Altura ou Diâmetro da ST (m)	Veloc. Máx. (m/s)	Pressão Max. /Min. (bar)	Área da Seção de Teste (m²)
<i>Grand Tunnel Hydrodynamic – GTH</i> Nº1 (França)	1988	1,14	20	5/0,05	1,3
<i>Grand Tunnel Hydrodynamic – GTH</i> Nº2 (França)		2	12	2/0,05	4,0
Hydrodynamics and Cavitation Tunnel - HYKAT (Alemanha)	1990	1,6	12,6	2,5/0,15	4,48
David Taylor Model Basin - Large Cavitation Channel (EUA)	1991	3,0	18,0	4,14/0,04	9,0
Universidade de Genova (Itália)	1992	0,570	8,5	- /-	0,325
Indonesian Hydrodynamic Laboratory (Indonésia)	1994	0,850	12,0	2/0,2	0,723
Samsung Ship Model Basin-SSMB Nº. 1 (Coréia do Sul)	1996	1,2	28,0	4/0,05	1,44
Samsung Ship Model Basin-SSMB Nº. 2 (Coréia do Sul)	1996	1,4	12,0	4/0,05	4,2

Maritime and Ocean Engineering Research Institute – MOERI (Coréia do Sul)	2009	1,8	15,0	3,0/ 0,1	5,04
--	------	-----	------	----------	------

2.2. Operação

O fenômeno da cavitação é fundamentalmente dependente do conteúdo de gás presente no volume total de água, dissolvido ou em forma de bolhas. A importância prática do conteúdo de gás tem sido considerada a partir do início do desenvolvimento de instalações de ensaio em grande escala. Como consequência, os túneis de cavitação têm sido projetados com sistemas para desgaseificar a água, evitando a liberação de gás, além de evitar grandes quantidades de bolhas que podem atrapalhar na execução dos ensaios. O conteúdo de gás pode possuir uma importância especial na modelagem física da cavitação e é crítico no controle de sua formação inicial.

Em geral, não existe uma especificação para os níveis de vibração e ruído aceitáveis; a estratégia ou filosofia de projeto adotada é pela minimização de tais níveis. Para tanto, vários fatores são levados em consideração como: as excitações externas, influenciando a fundação que suporta o túnel; a emissão de ruídos pelo maquinário dos sistemas auxiliares; excitações internas ao túnel devido ao escoamento; e a bomba principal de circulação, que é potencialmente um dos grandes geradores de ruídos no circuito.

Dentre os principais estudos realizados em um túnel de cavitação, têm-se: a caracterização da esteira de corpos submersos; teste de cavitação; a determinação da curva característica de um propulsor; detecção de fonte de ruído associado ao escoamento; a influência do conteúdo do ar na água relacionado à cavitação; e a medição de forças no leme e nos apêndices. A Figura 5 representa o *Low-Noise Large Cavitation Tunnel* (LCT), pertencente ao MOERI. Na imagem superior à direita, é possível observar um ensaio de cavitação. Em ambas as imagens inferiores estão representado um ensaio do propulsor na esteira de um casco e, na imagem superior à esquerda, uma visão externa do túnel durante sua construção.

Figura 5: Low-Noise Large Cavitation Tunnel (LCT) pertencente ao MOERI, KIM (2010).

2.3. Estudos Aplicados em Túneis de Cavitação

Essa seção possui como objetivo destacar as abordagens matemáticas que balizaram o desenvolvimento de projetos de túneis de cavitação e foram levadas em consideração nesse trabalho, principalmente nas fases preliminares, para definir as características geométricas gerais, parâmetros de simulação e variáveis de interesse.

2.3.1. Contração

A forma da contração do LCC possui como referência as curvas descritas pela formulação (2.1), visando melhorar as características geométricas evitando a separação da camada limite (Wetzel, 1994). A variação do ponto de inflexão x_i , posição em que a forma muda de côncava para convexa, é determinante na geometria da contração, como é possível observar na Figura 6.

$$\frac{y}{y_o} = A \left(\frac{x}{L} \right)^3 + B \left(\frac{x}{L} \right)^4 + C \left(\frac{x}{L} \right)^5, \quad (2.1)$$

onde A , B , C e D são determinadas abaixo:

$$A = 10x_i \frac{(4x_i - 3)}{D}; \quad (2.2)$$

$$B = -2A + 5; \quad (2.3)$$

$$C = A - 4; \quad (2.4)$$

$$D = 10x_i^2 - 12x_i + 3. \quad (2.5)$$

A posição adimensional do ponto de inflexão é x_i . De acordo a formulação apresentada, a segunda derivada de y/y_o em relação à x/x_o no ponto $x = L$ é zero, ou seja, não ocorre variação na inclinação e a contração termina alinhada ao início da seção de teste. A posição do ponto de inflexão utilizado no LCC é $x_i = 0.5$, mas não significa que em todos os casos essa condição apresentará os melhores resultados (Wetzel, 1994). Segundo essa referência, a formulação tem validade para a faixa $0.5 < x_i < 0.7$, porém variações fora desse intervalo são possíveis, como na inversão da geometria que altera o ponto de inflexão de 0.7 para 0.3 de x_i .

Figura 6: Formas da contração descritas pela equação 2.1, Wetzel (1994)

Devido à redução no diâmetro hidráulico ao longo da contração ocorre o aumento na velocidade e, conseqüentemente, a queda de pressão. Portanto, existem estudos que buscam avaliar esse comportamento através da modelagem numérica, assim como é observado na Figura 7, que representa a variação do coeficiente da pressão no fundo da contração do túnel LCC no plano central.

Figura 7: Coeficiente de pressão medida (círculos vazados) e modelada (linha contínua) ao longo do comprimento adimensional da contração, Wetzel (1994).

2.3.2. Seção de Teste

O fenômeno hidrodinâmico de maior relevância na seção de teste do túnel é o crescimento da espessura da camada limite adjacente às paredes paralelas. Dependendo do tamanho da camada limite e o perfil do escoamento nessa seção alguns testes hidrodinâmicos podem se tornar inviáveis. Outro fator importante é a possibilidade de ocorrência de cavitação na parede superior no trecho final da seção de teste, principalmente em túneis com altas velocidades de operação. De acordo com dados experimentais do túnel LCC obtidas de Wetzel (1994), o perfil de velocidade na posição central longitudinal e transversal da seção de teste apresentou variação dentro do limite de $\pm 1\%$ fora da região da camada limite, dentro das especificações exigidas para esse trecho. Esses dados foram comparados com um estudo numérico que teve como objetivo modelar esse comportamento como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8: Perfil de velocidade medida (círculos vazados) e modelada (linha contínua). A abcissa contém velocidade adimensional e a ordenada representa a distância da parede em porcentagem, Wetzel (1994).

Fundamentada na formulação apresentada por Schlichting (2000) para um conduto quadrado, a espessura da camada limite na linha de centro de uma seção de teste pode ser estimada pela seguinte formulação:

$$\frac{\delta U_{\infty}}{v} = 0,14 \frac{Re_x}{\ln Re_x} G(\ln Re_x), \quad (2.6)$$

onde U_{∞} é a velocidade fora da camada limite, v a viscosidade cinemática, Re_x é o número de Reynolds local e δ é espessura da camada limite. O Reynolds local é dependente da distância de entrada da seção de teste x_{TS} .

$$Re_x = \frac{U_{\infty} x_{TS}}{v} \quad (2.7)$$

A função $G(\ln Re_x)$ é dependente de $\ln Re_x$, em que é estabelecido um valor limite de 1 no intervalo $10^5 < Re_x < 10^6$.

2.3.3. Difusor

O escoamento no difusor é influenciado por diversos fatores como: o perfil de velocidade incidente, o número de Reynolds, a distribuição de pressão em sua parte inferior, a difusão lateral e o nível de turbulência. Entre esses fatores, o efeito do perfil de velocidade na entrada e a distribuição de pressão em sua parte inferior são considerados os mais relevantes. Devido à expansão no difusor ocorre a redução na velocidade do escoamento e a formação de um gradiente adverso de pressão, assim favorecendo o descolamento da camada limite.

Song (1988) propõe uma formulação que representa o perfil de velocidade na entrada do difusor (2.8), validadas com experimentos com modelos em escala do túnel HYKAT.

$$u = u_m - \Delta u \left(\frac{y}{H} - 0.5 \right), \quad (2.8)$$

onde $\Delta u = 0,025$ para esse túnel, u_m é o valor da velocidade medida, y é a distância a partir da parede inferior e H é altura total da seção.

Outro dado importante obtido por esse estudo foi à distribuição de pressão na saída do difusor (apesar de muitas modelagens considerarem a saída do difusor como pressão total constante) contribuindo também na modelagem das aletas direcionadoras de fluxo como dado de entrada.

Song (1988) propõe que

$$P_d = \bar{P}_d + d_p \left(\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 \right) \left[3 \left(\frac{y}{H_d} \right)^2 - 2 \left(\frac{y}{H_d} \right)^3 \right], \quad (2.9)$$

onde $\bar{P}_d$ é a pressão média, $\bar{U}$ é a velocidade média, y/H_d é a altura relativa e d_p é a diferença máxima em uma pressão adimensional na seção transversal.

2.3.4. Curva

Normalmente, as curvas de um túnel de cavitação são equipadas com aletas direcionadoras de escoamento com a finalidade de se evitar separação nas superfícies interna e externa da curva.

As aletas possuem, usualmente, perfis de dimensões idênticas que são instaladas alinhadas na curvatura. O parâmetro geométrico utilizado para representar as dimensões das aletas é a sua corda. Para uma curva com segmento de arco de 90°, a corda (t_1) pode ser estimada a partir do raio médio (r) pela formulação (2.10) proveniente de Idelchik (1986).

$$t_1 = r\sqrt{2} \quad (2.10)$$

O número de aletas (n_{nor}) pode ser estimado a partir do raio médio das curvas, conforme formulação 2.11 apresentada por Idelchik (1986). Conceitualmente essa referência se baseia em dados empíricos de perda de carga, indicados pela constante B_0 , dessa forma o arranjo com menor perda de carga é o objetivo desse tipo de abordagem.

$$n_{nor} = 2.13 \left(\frac{r}{B_0} \right)^{-1} - 1 \quad (2.11)$$

O túnel HYKAT utiliza outro método para este dimensionamento, a qual busca maior uniformidade na distribuição de velocidade à jusante (esteira) das aletas, assim resultando em uma maior quantidade e menor espaçamento entre aletas.

A distribuição de pressão nas aletas é um dado de relevância para o projeto de um túnel de cavitação. Song (1988) apresenta um estudo numérico para essa grandeza ao longo das superfícies externa e interna da aleta central em uma curva do túnel HYKAT, representado na Figura 9. Esse estudo visa avaliar a ocorrência de cavitação e consequentemente o surgimento de uma fonte de ruído interno ao túnel.

Figura 9: Distribuição de pressão ao longo da superfície externa (quadrados) e interna (círculos), Song (1988).

2.3.5. Câmara de Estabilização – Colmeia e Telas

Telas são amplamente usadas para uniformizar o perfil do escoamento. Mas, devido às suas pequenas espessuras, não são eficientes em remover vórtices e podem ser fonte de ruído em túneis de cavitação. Para evitar esse problema, usualmente as telas são combinadas com colmeias, formando um dispositivo para controle da turbulência. As colmeias reduzem a escala e a intensidade da turbulência, devido à restrição de escoamentos rotacionais por orifícios de dimensões reduzidas comparadas ao diâmetro hidráulico, de acordo com Farell (1992). Esse comportamento foi comprovado por ensaios experimentais que relacionaram a velocidade na seção de teste com o nível de turbulência para configurações com e sem colmeia, expresso na Figura 10 de Basil (1978). O nível de turbulência é quantificado percentualmente através da relação entre a flutuação média da velocidade e a velocidade média. As configurações testadas foram com colmeia, sem colmeia em diferentes em condições de operação da bomba de circulação e seus respectivos valores médios.

Figura 10: Nível de turbulência (%) pela velocidade na seção de teste para as condições com colmeia (*) e sem colmeia para diferentes níveis de número de Reynolds (círculos, quadrados e triângulos), Basil (1978).

Contudo, é inerente a perda de carga associada a esse tipo de artifício. No presente estudo, optou-se por modelar os efeitos da colmeia por uma superfície porosa com mesma perda de carga associada. Para tanto, a formulação proveniente da lei de Darcy (2.12) foi aplicada para atribuir a queda de pressão referente à perda de carga na superfície porosa.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{a} \vec{v}, \quad (2.12)$$

onde a é a permeabilidade da superfície, μ é a viscosidade do escoamento e $\vec{v}$ é a velocidade do escoamento através da superfície.

Os estudos apresentados nesse capítulo não encerram as discussões sobre as características hidrodinâmicas das seções de um túnel de cavitação, porém demonstram a profundidade e o vasto campo de estudo disponível no circuito de um túnel. Logo, uma ferramenta de simulação fluidodinâmica computacional possui grande aplicação nesse caso, como será discutido no próximo capítulo.

Capítulo 3

3. Revisão Teórica

A abordagem fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) possui ampla aplicação em projetos de aeronaves, automóveis, embarcações, turbomáquinas, sendo que seu emprego pode se estender às áreas de meteorologia, oceanografia, biologia, entre outras. Essa é uma ferramenta usada na simulação do escoamento de diferentes fluidos, da transferência de calor e outros processos físicos.

A metodologia de CFD resolve equações que representam o comportamento do escoamento de um fluido em um domínio com condições de contorno determinadas. Recentemente, o desenvolvimento da capacidade computacional no processamento de dados e na representação de geometrias permitiu a solução de problemas complexos de forma eficiente, ou seja, com precisão adequada dos resultados e relativa rapidez. Portanto, esse capítulo tem a finalidade de expor brevemente os conceitos que embasam a técnica de simulação fluidodinâmica adotada, bem como o procedimento para implementação e aplicação no estudo do escoamento em um túnel de cavitação.

3.1. Equações de Governo

O escoamento do fluido no interior do túnel de cavitação, nessa pesquisa, foi considerado como: permanente, tridimensional, turbulento, incompressível e viscoso. Usualmente, as equações de Navier-Stokes são utilizadas para descrever esse fenômeno, essas equações se baseiam nas leis de conservação da massa, da quantidade de

movimento linear, da quantidade de movimento angular e da energia no escoamento. Para um fluido incompressível a quantidade de movimento linear pode ser expressa pela formulação 3.1.

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2\mu e_{ij} - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\delta_{ij} \right] \quad (3.1)$$

O princípio de conservação de massa na forma diferencial é representado pela equação da continuidade (3.2).

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (3.2)$$

onde

$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho \quad (3.3)$$

é a derivada material da densidade.

O princípio da conservação da quantidade de movimento angular afirma que a resultante da soma de todos os torques externos agindo sobre o fluido é igual à taxa de variação no tempo da quantidade de movimento angular. A equação que representa esse princípio é obtida através do produto vetorial do vetor $\vec{r}$ com a equação de conservação de quantidade de movimento linear, assim representado pela formulação (3.4).

$$\vec{r} \times \left[\rho \frac{Du_i}{Dt} \right] = \vec{r} \times \left[- \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2\mu e_{ij} - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\delta_{ij} \right] \right] \quad (3.4)$$

A taxa de variação da energia armazenada é igual ao somatório da taxa de trabalho realizado com a taxa de calor adicionado a um volume material, de acordo com Kundu (2004), assim a forma diferencial é dada pela formulação (3.5).

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{1}{2} u_i u_i \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} u_i) + \rho f_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}, \quad (3.5)$$

onde e é a energia interna específica total, f_i é a força de corpo e q_i a troca de calor específico. Nesse estudo foi adotado que não ocorrem variações de massa (densidade) e energia térmica (transferência de calor), ou seja, as leis de conservação de massa e energia são dispensadas.

3.2. Métodos Computacionais

Os códigos de CFD possibilitam simular o comportamento fluidodinâmico de um sistema na fase de projeto inicial ou no sistema já existente, assim permitindo uma análise local ou global, a otimização da geometria e das condições de operação.

O CFD é baseado em métodos numéricos que adotam modelos matemáticos, esses consistem em equações, condições iniciais e de contorno. Usualmente é aplicada uma técnica de discretização, uma forma de aproximar as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas, assim obtendo as variáveis do problema em localizações discretas no espaço e no tempo, de acordo com Blasek (2001).

Em geral, os programas comerciais possuem interface para que o usuário possa introduzir os parâmetros do problema e analisar seus resultados. Independentemente do programa adotado, as etapas principais são comuns para simulação dos casos estudados.

I. Inicialmente é necessária a modelagem da geometria estudada, para tanto são utilizados softwares de desenho computacional conhecido como *Computer Aided Design* (CAD). A geometria reproduzida deve ser um sólido inteiro sem falhas ou descontinuidades em sua superfície, assim possibilitando definir o volume de controle. O escoamento pode ser externo ou interno ao sólido e é limitado por paredes, regiões de entrada ou saída do fluido e superfícies de repetição quando o domínio é periódico ou simétrico. Essa etapa é conhecida como pré-processamento e consiste na definição do domínio computacional adequado para processamento dos dados e solução das equações fluidodinâmicas.

II. Posteriormente, a geração da malha é uma etapa que consiste na discretização do domínio em uma malha de células (elementos) ou subdomínios. A solução do problema de escoamento e obtenção das grandezas de interesse como velocidade, pressão e temperatura são calculadas nos nós de cada elemento. Em geral, quanto maior o número de elementos, maior será a acurácia, porém maior será o custo computacional e o tempo de processamento. O maior refinamento da malha, concentração de elementos com dimensões reduzidas, deve se localizar em regiões onde

são esperadas altas variações das grandezas do escoamento. Assim, facilitando a representação dos fenômenos associados a essas variações.

III. Por fim, a etapa referente à configuração da simulação, compreendendo a seleção dos parâmetros fundamentais para a solução do escoamento como as propriedades do fluido, especificação das condições de contorno, discretização das equações fluidodinâmicas e modelos de turbulência. O código de CFD aplicado adota o método de volumes finitos (MVF), o qual define como as variáveis do escoamento são aproximadas nas equações e modo de discretização do domínio (malha). Em geral, o método numérico segue uma sequência para solução do escoamento que se inicia com a aproximação das variáveis desconhecidas através de funções simples.

O MVF utiliza como ponto de partida a forma integral da equação de conservação. O domínio é dividido em número finito de volumes de controle (VC) adjacentes, e a equação de conservação é aplicada a cada VC. No centroide de cada VC localiza-se um nó computacional, onde são calculados os valores das variáveis, sendo os valores das variáveis nas superfícies dos VC obtidos por interpolação. As integrais de volume e de superfície são aproximadas usando fórmulas apropriadas, de acordo com Gonçalves (2007). O MVF pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, por isso adapta-se a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controle e não necessita esta relacionada com um sistema de coordenadas.

A solução das equações de conservação em cada um dos volumes de controle da malha envolve a solução de um sistema linear. Em CFD emprega-se a solução iterativa do sistema de equações, o qual resulta em um sistema dependente de um resíduo em uma determinada iteração. Diz-se que uma solução convergiu quando o resíduo atinge um valor abaixo de um critério previamente especificado, que implique que a solução não mude significativamente entre uma iteração e outra. Deve-se observar que estes critérios podem mudar de problema para problema, de acordo com Maliska (2009).

Os métodos numéricos, usualmente, empregados em CFD são conservativos em nível discreto, ou seja, balanços das propriedades são forçados em nível discreto. A conservação em nível discreto acontece apenas quando a solução está convergida dentro de um critério especificado. Portanto, medir como os balanços em cada volume de controle estão satisfeitos é um bom critério para medir a convergência da solução.

3.3. Modelagens dos Efeitos Turbulentos

Em geral, o escoamento em um túnel de cavitação é um fenômeno turbulento. De acordo com Kundu e Cohen (2004), não é possível um estudo analítico estrito. As principais características de um escoamento turbulento são a não linearidade, presença de vorticidade, difusão da quantidade de movimento, dissipação de energia e comportamento caótico. O escoamento turbulento contém diversas estruturas coalescentes, irregulares e rotatórias como os vórtices.

Normalmente, é inviável modelar o escoamento turbulento em todos os detalhes, já que há uma grande faixa de escalas para serem resolvidas, desde as menores escalas espaciais na ordem de milímetros, como as menores escalas de tempo da ordem de milissegundos. Apesar do atual desenvolvimento computacional, a solução detalhada de um escoamento turbulento ordinário, resolver todas as escalas mais finas, demandaria tempo e recursos que inviabilizam a maioria das aplicações. Contudo, o foco da maioria dos estudos é avaliar as características gerais do escoamento, tais como as temperaturas médias, distribuição de velocidade e pressão.

As variáveis em um escoamento turbulento são randômicas, portanto existe a necessidade de técnicas para se definir um valor médio destas. De acordo com Kundu e Cohen (2004), um escoamento turbulento satisfaz instantaneamente as equações de Navier-Stokes. Assim, é necessária a derivação das equações de movimento para um comportamento médio em um escoamento turbulento e avaliar o efeito das flutuações turbulentas no escoamento.

Portanto, nesse estudo a abordagem numérica selecionada para modelagem da turbulência foram as equações médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes* - RANS), as quais são baseadas na média temporal das equações de Navier-Stokes e da continuidade. Essa abordagem é fundamentada na decomposição de Reynolds, em que uma grandeza instantânea é decomposta em uma média temporal e grandezas oscilatórias, proposto inicialmente por Osborne Reynolds. As equações do método RANS são baseadas no conhecimento de propriedades do escoamento turbulento e podem fornecer soluções de média temporal aproximadas das equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis Newtonianos, sendo possível ser escrita na notação de Einstein de acordo a formulação abaixo.

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (3.6)$$

Observando a equação (3.6) é notória a tensão adicional $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ atuando sobre a média do escoamento turbulento. Efetivamente, a parcela referente a essa tensão adicional no campo médio de um escoamento turbulento é maior do que os efeitos viscosos $\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$, a não ser próximo de superfícies sólidas (parede), onde as flutuações são pequenas e os gradientes do escoamento médio são de grande relevância.

A média temporal da equação de Navier-Stokes é obtida através da inserção de seis incógnitas adicionais, assim caracterizando um problema indeterminado ou de fechamento. Devido a essa condição as tensões de Reynolds demandam modelagem por equações adicionais de modo a solucionar esse problema, algumas demonstradas na próxima seção.

3.4. Modelos de Turbulência

O presente estudo testou os modelos de viscosidade turbulenta para modelagem da turbulência, aplicando duas equações parciais diferenciais, para fluidos incompressíveis com diferentes tratamentos próximos a parede para definir as escalas turbulentas. Na etapa preliminar desse estudo, os modelos de turbulência $k-\omega$, $k-\varepsilon$ e SST foram testados e comparados, assim com o objetivo de selecionar aquele com melhor desempenho. Logo, se faz necessário expor o conceito que respalda essas diferentes abordagens.

Considerando os modelos baseados no conceito de viscosidade turbulenta, o tensor de tensões turbulentas é formado por um tensor de segunda ordem simétrico, pois $\overline{u'_i u'_j} = \overline{u'_j u'_i}$, de acordo com Silva Freire (2006). Para tanto Boussinesq propôs uma hipótese para modelagem dos termos de tensões turbulentas inserindo o conceito de viscosidade turbulenta ν_t . Diferente da viscosidade molecular, que está associada ao tipo de fluido, a viscosidade turbulenta é uma propriedade do escoamento, dessa forma considerando as tensões turbulentas. A partir desta hipótese, Kolmogorov (1942)

sugeriu uma forma generalizada para modelagem de escoamentos turbulentos, a qual considera o tensor de Reynolds pela formulação.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{ij}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3.7)$$

Onde k é a energia cinética turbulenta por unidade de massa e energia, corresponde a $\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$, e δ_{ij} é o delta de Kronecker. Nas modelagens com duas equações, descritas a seguir, foi adicionado uma parcela dissipativa dessa energia para melhor descrever esse fenômeno.

3.4.1. Modelo k - ϵ

É um modelo de duas equações diferenciais de transporte, energia cinética turbulenta (k) e taxa de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa (ϵ), a qual possui amplo emprego em casos difundidos na indústria. Launder e Spalding propuseram em 1972 o modelo k - ϵ conhecido como padrão, essa proposta se baseia nos processos físicos de maior relevância que afetam as equações de transporte para k e ϵ .

A partir da equação de Navier-Stokes a equação de k pode ser obtida com exatidão, através do produto com u'_i e considerando a média temporal dos termos da equação, assim resultando na seguinte formulação:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\overline{p' u'_j}}{\rho} + \frac{1}{2} \rho \overline{k u'_j} - \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \quad (3.8)$$

O escoamento próximo às superfícies de sólidos é caracterizado por intensos gradientes de suas propriedades. Para altos números de Reynolds, é possível considerar a hipótese de camada limite turbulenta completamente desenvolvida, e, assim, evitar a demanda pela apurada resolução das equações governantes nas regiões próximas. Nessa condição, o campo de velocidades na região logarítmica, que é estimado na distância da parede (y^+) maior que 30 e menor que 100 de acordo com a Figura 11, permite descrevê-lo pela lei de parede clássica.

$$\frac{u}{u_\tau} = A \ln y^+ + B \quad (3.9)$$

Onde u_τ é a velocidade de atrito, y^+ a distância adimensional a partir da parede, A e B são coeficientes descritos como:

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (3.10)$$

$$A = \frac{1}{k_*} \quad (3.11)$$

$$B = \frac{1}{k_*} \ln E \quad (3.12)$$

Onde k_* indica a constante de Von Kármán, y , a distância normal à parede, e E é um termo associado à rugosidade, o qual para paredes lisas corresponde a 9,8.

Figura 11: As diferentes regiões de um escoamento próximo à parede de acordo com Silva Freire (2006).

Adotando-se a hipótese de camada limite turbulenta completamente desenvolvida, k e ε na superfície são atribuídos de acordo com as formulações (3.13) e (3.14).

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_{mu}}} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon = \frac{u_\tau^2}{k_* y} \quad (3.14)$$

No trecho da subcamada viscosa e camada tampão ($y^+ < 30$), o transporte difusivo molecular não pode ser desconsiderado, portanto, seu efeito deve ser incluído nas equações de transporte. Para tanto é atribuído à condição de não escorregamento na

superfície das paredes, assim k tende para zero quando y^+ se aproxima de zero, ou seja, Reynolds Turbulento (Re_t) tende a zero.

$$Re_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon} \quad (3.15)$$

Em geral, o transporte difusivo molecular possui efeitos consideráveis para Re_t menores que 100. Dentro desse contexto, a dissipação da energia cinética turbulenta próximo da parede ($y \approx 0$) possui um comportamento específico (ε_w), o qual pode ser expresso pela seguinte formulação:

$$\varepsilon_w = \nu \left[\overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial y}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'}{\partial y}\right)^2} \right] = 2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y}\right)^2 \quad (3.16)$$

Logo é possível observar que na parede ($y = 0$) a taxa de dissipação de energia cinética não é nula ($\varepsilon \neq 0$). Assim é interessante atribuir um comportamento mais realista permitindo que essa grandeza na parede ($\tilde{\varepsilon}$) seja nula.

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y}\right)^2 \quad (3.17)$$

A proposta feita por Launder e Sharma em 1974 tem o objetivo de adaptar o modelo $k - \varepsilon$ clássico de acordo formulações (3.18) e (3.19), dessa forma considerando os efeitos nas regiões de baixo Reynolds ($k \rightarrow 0$).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \tilde{\varepsilon} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + 2\nu \nu_t \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (3.19)$$

Onde a viscosidade turbulenta (ν_t) é reformulada como:

$$\nu_t = c_\mu f_\mu \frac{k^2}{\tilde{\varepsilon}} \quad (3.20)$$

Levando em conta as regiões onde os efeitos viscosos são expressivos, o termo f_μ é uma função de amortecimento no intuito de contribuir para representação do comportamento difusivo.

$$f_\mu = [1 - \exp(-0,0165 Re_t)]^2 \left(1 + \frac{20,5}{Re_t} \right) \quad (3.21)$$

3.4.2. Modelo $k-\omega$

O modelo de turbulência $k-\omega$ adota como componente de dissipação de energia cinética turbulenta uma taxa baseada no volume e no tempo (ω). Segundo Kolmogorov (1942) a forma original desse modelo é descrita por (3.22), em que sugere ω como uma frequência média.

$$\omega = C \frac{k^{1/2}}{L} \quad (3.22)$$

Onde C é uma constante, $\frac{1}{\omega}$ retrata uma escala de tempo e analogamente $k^{1/2}/\omega$ se traduz no comprimento de mistura.

Levando em conta que k se dissipa em energia interna nas pequenas escalas, ω considera a taxa de transformação da energia cinética turbulenta para energia interna das grandes escalas para as pequenas escalas. Por isso, ω se relaciona com as escalas de k e L de acordo com a hipótese de Boussinesq, que define a viscosidade turbulenta como um produto entre escalas características de velocidade e comprimento. A equação diferencial de ω original é representada na formulação (3.23).

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = -\beta \omega^2 + \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.23)$$

De acordo essa abordagem, Wilcox (1988) propôs a reformulação de k para uma versão mais ampla do modelo, tomando a forma de acordo com a equação (3.24).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma^* v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.24)$$

Os coeficientes dessas expressões são $\alpha = 5/9$; $\beta = 3/40$; $\beta^* = 9/100$; $\sigma = 1/2$; $\sigma^* = 1/2$.

3.4.3. Modelo shear stress transport (SST).

É reconhecido que o modelo $k-\omega$ possui deficiências quanto às condições em corrente livre. Uma proposta para mudar essa condição foi a alteração desse modelo, assim, foi estabelecido o modelo Baseline $k-\omega$ (BSL $k-\omega$). As alterações sugeridas consistiram no acoplamento dos modelos $k-\omega$ e $k-\epsilon$, o qual foi desenvolvido por Menter

(2003), além da alteração da equação de transporte de ε em uma formulação semelhante à de $k-\omega$.

O conjunto de duas equações de transporte é dividido nas equações de $k-\omega$ para região próxima a parede e $k-\varepsilon$ para o escoamento livre. O equilíbrio entre a atuação de cada modelo é ditada por uma função de mistura (F_1), como pode ser observado em seguida. Essa função tende para a unidade quando se aproxima da parede e é nula fora da camada limite.

$$\Phi_3 = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2 \quad (3.25)$$

As componentes Φ_1 e Φ_2 são a parcela de contribuição de cada modelo, respectivamente $k-\omega$ e $k-\varepsilon$.

$$F_1 = \tanh(\arg) \quad (3.26)$$

$$\arg = \min \left(\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y'}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right) \quad (3.27)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1.0 \times 10^{-10} \right) \quad (3.28)$$

Levando em conta essa teoria, as equações de transporte de $k-\omega$ são expressas como:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta' k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k2}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.29)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha_2 \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta_2 \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 2}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.30)$$

Onde as constantes são $\alpha_2 = 0,44$; $\beta_{\omega 2} = 0,0828$; $\sigma_{k2} = 1,0$; $\sigma_{\omega 2} = 1/0,856$.

Apesar das vantagens apresentadas pelo modelo Baseline, a falha no cálculo do ponto de separação do escoamento em superfícies lisas é característica, Menter (2003). Visando eliminar essa limitação, Menter (2003) propõe um limitador para a viscosidade turbulenta, mudança que caracteriza a concepção do modelo shear stress transport (SST). Um adequado equacionamento do transporte das tensões cisalhantes permitiu

melhor estimativa do ponto de separação em escoamentos sob gradientes adversos de pressão.

$$\nu_t = \frac{\alpha k}{\max(\alpha\omega, SF_2)} \quad (3.31)$$

As equações de transporte do modelo SST são representadas na forma indicial de acordo as formulações a seguir:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta' k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.32)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha_3 \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta_3 \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.33)$$

A validação desse modelo seguiu baseado em um amplo estudo de validação, descrito por Bardina et al. (1997).

3.5. Simulações de CFD em túneis de cavitação.

Em geral, as simulações de CFD envolvendo túneis de cavitação são direcionadas em reproduzir ensaios experimentais, como a modelagem de um ensaio de cavitação de um propulsor descrita por Bertetta (2011) na Figura 12.

Figura 12: Comparativo entre simulação numérica (esquerda) e experimento (direita) de ensaio de cavitação em um túnel de cavitação, Bertetta (2011).

Portanto, a investigação do escoamento ao longo do túnel aplicando simulação de CFD ainda é restrita, devido a grande particularidade do estudo.

Nedyalkov (2012) expõe uma análise comparativa entre duas abordagens de simulação no projeto da contração de um túnel (Figura 13). Assim, as simulações foram realizadas adotando o escoamento viscoso e invíscido combinada com cálculo de camada limite baseada em dados experimentais. Ambas as simulações aplicaram a mesma malha (Figura 13), com as seguintes configurações: equações com discretização de segunda ordem, método de solução acoplada pressão-velocidade com algoritmo SIMPLE, fator de relaxação abaixo de 0,7 e critério de convergência 10^{-3} . As condições de contorno também foram semelhantes, considerando na saída da seção a pressão relativa nula e velocidade uniformemente distribuída na entrada.

Figura 13: Malha superficial da contração projetada, Nedyalkov (2012).

O modelo de turbulência adotado foi o *SST* na simulação com escoamento viscoso através do software FLUENT, as demais condições de simulação foram iguais, assim permitindo uma comparação. Dessa forma os gráficos de perfil de velocidade em três diferentes posições da contração: na saída (*), a 0,3142m da saída (.) e a 1.3142m da saída (x) estão representados na Figura 14.

Figura 14: Perfis de velocidade calculados para escoamento viscoso (esquerda) e escoamento invíscido (direita), Nedyalkov (2012).

Logo, foi observado que o código adotando um escoamento viscoso apresentou maior aderência ao caso estudado, assim representando melhor o perfil de velocidade ao longo da contração. Isso é esperado, pois os efeitos viscosos nesse trecho do túnel são relevantes, essencialmente próximos da região das paredes.

Estudos adicionais foram aplicados na caracterização do escoamento na seção de teste, levantando a distribuição de velocidade na seção transversal, como pode ser observada na Figura 15. As configurações de simulação adotadas previamente para o escoamento viscoso foram repetidas, com adição da condição de simetria, ou seja, o escoamento de apenas um quarto da geometria original foi reproduzido.

Figura 15: Contorno de velocidade na seção de teste com condição de simetria, Nedyalkov (2012).

O escoamento no difusor do túnel de cavitação também foi investigado, avaliando a ocorrência de descolamento da camada limite. Observando os resultados de vetores velocidade (Figura 16) esse comportamento não ocorre, pois nenhum vetor com direção contrária ao escoamento ou região de velocidade nula foi identificado.

Figura 16: Vista no plano diametral dos vetores velocidade, Nedyalkov (2012).

Outro método que avalia o descolamento é a análise da tensão de cisalhamento na superfície (parede). Em regiões em que a tensão é nula, ou seja, não ocorre cisalhamento, possivelmente a camada limite adjacente à parede se desprende formando um campo de velocidade estagnado ou com recirculação.

Baseado no conhecimento exposto, as simulações em CFD demandam um estudo criterioso sobre suas configurações e escolha da melhor abordagem. Portanto, o próximo capítulo retrata a metodologia adotada nessa pesquisa, de maneira a reduzir as incertezas do processo.

Capítulo 4

4. Método de Pesquisa

A pesquisa se baseou em simulações fluidodinâmicas de um túnel de cavitação em uma condição de operação. A instalação adotada nessa pesquisa é pertencente ao LABHIDRO, como descrito no capítulo de introdução. Este túnel possui como principal aplicação o estudo dos fenômenos fluidodinâmicos e hidroacústicos ao longo do seu circuito. Diversos testes experimentais foram realizados, dessa forma, investigando as principais características associadas ao escoamento nesse túnel, assim resultando em uma fonte de dados importante para as simulações de CFD.

Esse capítulo descreve as diferentes abordagens e peculiaridades das etapas das simulações, assim destacando o método para reprodução da geometria do túnel, geração das malhas, configurações das simulações e parâmetros de análise. Para tanto, é interessante ressaltar novamente as diferentes fases de simulações. Essa divisão se deu da seguinte forma:

I. Inicialmente, as simulações foram focadas na seção de teste individualmente, buscando verificar diferentes configurações de simulação e compreensão do funcionamento do software.

II. Em seguida, os trechos superiores do túnel como o difusor, contração, câmara de estabilização (colmeia) e curva após a seção de teste foram simulados individualmente.

III. Por fim, fundamentado no conhecimento previamente adquirido, a última etapa consistiu na simulação do circuito completo do túnel.

4.1. Geometria do Túnel

Levando em conta que as simulações foram de um sistema pré-existente, essa etapa se concentrou na reprodução da geometria em ambiente computacional através do software de CAD denominado Rhinoceros versão 4.0, fundamentado em documentos técnicos e medições no próprio do túnel (Figura 17).

Figura 17: Arranjo da estrutura e principais dimensões do túnel modelado em mm.

As geometrias de interesse foram os volumes internos do túnel, desconsiderando detalhes estruturais, pois nos casos estudados apenas estes volumes compõem o domínio fluido simulado. Adaptações na geometria foram adotadas visando garantir um estudo factível e com resultados acurados, como a utilização da condição de simetria e o prolongamento dos domínios em simulações individuais dos trechos, dessa forma distanciando as condições de contorno das regiões de interesse (Figura 18). Por exemplo na simulação da contração, apenas o trecho de 1,005 m está relacionado à geometria de interesse, porém foram adicionados prolongamentos na entrada (1m) e saída (0,5m) para condicionar o escoamento.

Figura 18: Geometria simulada da contração.

4.2. Geração da Malha

Em uma simulação de CFD, o volume do fluido é discretizado em uma malha composta de elementos. Para cada um desses são realizados os cálculos das equações de governo. Essa etapa é de fundamental importância em simulações de CFD, com influência direta no sucesso de suas aplicações.

O software Ansys-Meshing versão 13.0 foi adotado para geração de malha. Apesar de existirem diversas opções de softwares para geração da malha, essa escolha foi baseada na disponibilidade dessa ferramenta e facilidade em sua operação. As malhas geradas são do tipo não-estruturada, tridimensionais e misturando elementos tetraédricos (escoamento desenvolvido) e hexaédricos (próximo das paredes).

De uma forma geral, quanto menores esses elementos, mais acurados são os resultados e maior o tempo de processamento numérico demandado pela simulação. Assim, o correto dimensionamento e distribuição dos elementos são fundamentais nesse processo, onde o equilíbrio entre a quantidade de elementos de malha e a acurácia dos resultados é perseguido.

Logo, a simulação de CFD deve buscar independência do resultado obtido em relação à densidade da malha adotada. A malha deve ser tal que seu refinamento não

cause alteração significativa do resultado encontrado. Para assegurar essa independência, deve-se proceder com um teste de convergência de malha. Dentro desse contexto, um método baseado na expansão da série de potências foi aplicado para a análise de convergência de malha, de acordo com Eça e Hoekstra (2014). O qual adota o tamanho característico de malha (h) de acordo com a formulação (4.1).

$$h_i = [(\sum_{i=1}^N \Delta V)/N]^{1/3} \quad (4.1)$$

A equação que estima o erro (ϵ_ϕ) é dada por:

$$\epsilon_\phi \simeq \delta_{RE} = \Phi_i - \Phi_0 = \alpha h_i^p, \quad (4.2)$$

onde Φ_i é uma grandeza de interesse particular ao escoamento avaliado (por exemplo, a altura da camada limite na seção de teste), Φ_0 é uma estimativa da solução exata, α é uma constante a ser determinada e p é a ordem da função que descreve convergência de malha. A estimativa de ϵ_ϕ requer a determinação de α , p e Φ_0 . Logo, pelo menos três malhas são requeridas para esse método, conforme as seguintes diretrizes:

- Os refinamentos das malhas devem seguir um comportamento assintótico para garantir que o termo principal da expansão da série de potências seja suficiente para estimar o erro, os termos de alta ordem são negligenciados.
- O aumento na densidade de elementos deve seguir um padrão, assim mantendo as mesmas propriedades dos elementos de malha como a ortogonalidade e assimetria (*skewness*).

Considerando as etapas anteriores, a incerteza da solução associada à malha é calculada pela seguinte formulação:

$$U_\phi = F_s |\epsilon_\phi|, \quad (4.3)$$

Onde F_s é um fator de segurança, usualmente com o valor de 1,25.

Outro fator de grande importância é o correto dimensionamento dos elementos próximos à superfície de sólidos, pois a altura das células adjacentes às paredes deve estar de acordo com o tratamento numérico atribuído a essa região, dependendo do modelo de turbulência aplicado. Para tanto, o parâmetro de malha y^+ é usado como referência, demandando atender os requisitos de $30 < y^+ < 300$ para o modelo $k-\epsilon$ e $0,1 < y^+ < 2$ para os modelos $k-\omega$ e SST.

Com exceção da malha do túnel completo, o método de geração das malhas foi semelhante para as seções simuladas individualmente. Primeiramente, a configuração global dos elementos, máximo e mínimo tamanho dos elementos, foi variada para gerar diversas malhas com diferentes densidades de elementos. Em seguida, a definição da altura dos elementos próximos à parede foi adequada ao modelo de turbulência, gerando uma camada de elementos hexagonais. É relevante observar que essa camada deve apresentar uma transição suave para os demais elementos (tetraedros), ou seja, elementos de dimensões semelhantes na fronteira entre as regiões dos diferentes elementos, assim evitando problemas na solução numérica. Dessa forma, foi elaborado um conjunto de malhas necessárias para análise de convergência de malhas.

A geometria influencia diretamente na geração de malha. Por exemplo, em uma geometria sem variação brusca de forma, como na seção de teste, as gerações das malhas foram mais simples (Figura 19).

Figura 19: Malha da seção de teste com condição de simetria no plano diametral.

No entanto, na elaboração das malhas para o trecho da curva o processo foi consideravelmente mais complexo, pois existem corpos sólidos (aletas) no centro dessa seção, além da mudança brusca na forma (Figura 20).

Figura 20: Malha da Curva.

No caso da malha para simulação do circuito completo do túnel, a abordagem adotada foi a de reproduzir as malhas ideais provenientes do estudo dos trechos individualmente, assim compondo uma malha única. Para as seções não estudadas individualmente, as configurações para geração de malha foram reproduzidas de uma seção semelhante estudada em particular. Por exemplo, as malhas das curvas ao longo do túnel foram embasadas no estudo apenas da curva após a seção de teste.

4.3 Configurações das Simulações

As simulações fluidodinâmicas foram realizadas no software comercial FLUENT versão 14.5, fornecido pelo desenvolvedor de programas ANSYS, na condição de velocidade média de 5 m/s na seção de teste. Em relação às condições de contorno, a vazão da seção de teste ($0,225\text{m}^3/\text{s}$) foi teoricamente mantida ao longo do túnel e adotada como referência, assim a condição de entrada foi a velocidade uniformemente distribuída de acordo com a vazão definida. Nas paredes a condição atribuída foi a de não escorregamento e a condição de saída foi a de pressão relativa nula, além da condição de simetria.

Todas as simulações tiveram uma abordagem de escoamento permanente (RANS), com método de solução acoplada do tipo SIMPLE. A discretização das equações de energia cinética turbulência, taxa de dissipação, pressão e quantidade de movimento foram de segunda ordem. A inicialização do cálculo padrão e o critério de convergência para o RMS (*Root Mean Square*) foi de 10^{-4} . Nas simulações iniciais da seção de teste o modelo de turbulência foi variado entre o $k-\epsilon$, $k-\omega$ e SST, para as demais simulações o modelo SST foi adotado, como será discutido no próximo capítulo.

4.3. Avaliação dos Resultados

É notório que cada trecho do túnel de cavitação possua um fenômeno fluidodinâmico dominante característico, portanto as grandezas de interesse e análise dos resultados diferem entre as simulações. Dessa forma podemos citar os fatores de interesse que são: na câmara de estabilização, a perda de carga; na contração, a queda de pressão; na seção de teste, o crescimento da camada limite, no difusor e na curva, o descolamento da camada limite, respectivamente na parede do fundo e nas aletas.

Comum a todas as simulações, existe o particular interesse pela uniformidade no perfil de velocidade (FQ) e a perda de carga (ζ), pois esses dados são relevantes no projeto e operação do túnel. Para tanto foram adotados os seguintes parâmetros de avaliação:

$$FQ = 1 - \left(\frac{\sigma(|U|)}{w} \right) \quad (4.10)$$

Onde σ é o desvio padrão da velocidade, sem considerar a camada limite, ao longo da seção e w é a velocidade média incidente na seção, usada como condição de contorno nas simulações individuais dos trechos do túnel. Para esse parâmetro de avaliação, quanto maior sua grandeza mais uniforme será o escoamento, sendo que $FQ = 1$ representa um perfil plano de velocidade.

De acordo com Idelchik (1986), o parâmetro que descreve a perda de carga é dado por:

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\rho w^2 / 2} \quad (4.11)$$

No qual Δp é a diferença de pressão total entre os trechos avaliados. Quanto maior essa variação maior é a perda de carga.

A seguir, são discutidos os resultados mais relevantes das simulações como os parâmetros FQ e ζ , porém os dados obtidos não se limitam aos apresentados.

Capítulo 5

5. Resultados e Discussões

Esse capítulo apresenta os resultados provenientes das simulações de CFD, os quais foram divididos em três etapas que são os estudos iniciais, estudo dos trechos característicos e estudo do circuito completo.

5.1. Estudos Iniciais.

Antes das simulações fornecerem resultados definitivos com os trechos do túnel fizeram-se necessárias simulações de testes para a seleção das configurações e parâmetros mais adequados. Esses testes se concentraram na simulação da seção de teste, pois esse trecho é um dos mais importantes do túnel, apresenta geometria simplificada e possui dados teóricos e experimentais de referência. Assim, esses estudos iniciais tiveram como objetivo selecionar o modelo de turbulência e condições de contorno mais adequadas, além de auxiliar na criação de um método para geração de malha, aplicar o estudo de convergência de malha e compreender o funcionamento do software.

O critério de seleção das configurações de simulação foi a comparação dos resultados obtidos com dados de referência. Logo os resultados para as diferentes configurações testadas estão descritos nos tópicos em seguida:

5.1.1. Variação do comprimento do domínio

O domínio foi testado em três diferentes comprimentos adicionais a montante (0m, 1m e 2m), além do tamanho original da seção de teste (figura 21), buscando avaliar a influência da distância das condições de contorno sobre o escoamento na região de interesse, além de aspectos ligados a solução numérica como convergência e tempo de processamento.

Figura 21: Dimensões originais da seção de teste (acréscimo 0m), posição de avaliação dos resultados 1175.0 mm da entrada, sentido escoamento esquerda para direita.

A altura da camada limite é a grandeza de interesse, essa foi estimada pela distância normal à parede em que a velocidade se iguala a 99% da velocidade do fluxo livre. Apesar do aumento do domínio os perfis de velocidade foram medidos na mesma posição longitudinal das dimensões originais da seção de teste. As alturas das camadas limites resultantes foram comparados com resultados provenientes da formulação de Schlichting (2000), de acordo com o mencionado no capítulo de revisão bibliográfica (Cap.2). A condição de contorno de entrada foi a de velocidade uniformemente distribuída em todos os casos.

A mesma malha e configurações (modelo de turbulência e condições contorno) de simulação foram aplicadas nas simulações, de forma a permitir um comparativo, dessa forma os dados obtidos estão representados na tabela 4. As diferenças entre as alturas das camadas limites (δ) obtidas pelas simulações e referência teórica também

constam nessa tabela (Erro de comparação), as quais foram descritas percentualmente em relação à referência adotada.

Tabela 4: Variação do tamanho do domínio.

Comprimento acrescido a montante (m)	0 m (Dimensões Originais)	1 m	2 m
Altura da camada limite fonte CFD - δ (mm)	15,34	27,52	33,38
Altura da camada limite fonte Schlichting - δ (mm)	18,26	31,92	40,50
Erro de comparação- δ (%)	19,07	16,00	21,36
Nº elementos	5.607,495	9.654,692	13.448,760
Nº de camadas de hexaedros na parede	25	25	25
Dimensão máx. dos elementos (m)	0,02	0,02	0,02
Tempo de processamento numérico (h)	8	12	18

A expectativa de aumento na altura da camada limite com o acréscimo do comprimento do domínio foi confirmado, pois o escoamento percorrendo uma superfície plana, a tendência natural é de que a camada limite se desenvolva. Dessa forma, no caso com maior extensão (2m de acréscimo) os efeitos viscosos próximos às paredes atuam por uma dimensão mais prolongada, assim resultando na maior altura de camada limite.

Não foi possível observar grandes efeitos nos resultados com o aumento ou redução do domínio. Uma das consequências foi o aumento do tempo no processamento numérico com a quantidade de elementos. Porém se entende que o aumento do domínio é necessário, visando afastar as condições de contorno de entrada e saída da região de interesse e desenvolvimento da camada limite. Assim assemelhando mais a simulação das condições reais do estudo, ou seja, condicionar o escoamento com um perfil de velocidade desenvolvido.

5.1.2. Variação do modelo de turbulência

Diferentes modelos de turbulência foram testados na simulação do escoamento da seção de teste, são esses: k- ϵ (padrão), k- ϵ (realizável), k- ω e SST. A mesma malha e condições de contorno foram aplicadas nas simulações, assim permitindo uma análise comparativa. A perda de carga (ζ) foi utilizada como parâmetro de comparação, a qual é uma função complexa entre diversos elementos, tais como: viscosidade e densidade do fluido, velocidade e nível de turbulência do escoamento, rugosidade e comprimento do conduto.

Adotando as mesmas condições utilizadas nas simulações de CFD, a perda de carga foi estimada também pelo método exposto por Idelchik (1986), esse relaciona a diferença de pressão entre dois trechos do conduto com a velocidade e densidade do fluido. O resultado obtido desse método foi selecionado como referência, logo o erro de comparação é atribuído percentualmente a esse dado, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados da variação modelo de turbulência em simulações da seção de teste.

Modelo de Turbulência	ΔP total (Pa)	ζ	Erro comparativo %
k-ϵ (padrão)	1226,88	0,10	95,09
k-ϵ (realizável)	1163,92	0,09	85,08
k-ω	729,45	0,06	15,99
SST	738,02	0,06	17,35
Idelchik (1986)	628,89	0,05	-

Apreciando os resultados expostos na Tabela 5, as simulações com modelos k- ω e SST apresentaram perda de carga com menores erros comparativos em relação à referência, respectivamente 15,99% e 17,35%. Conceitualmente isso é justificado, pois a perda de carga é predominante gerada por atrito na parede, nesse trecho do túnel simulado, e esses modelos de turbulência descrevem com maior acurácia o escoamento próximo à parede. O modelo k- ϵ superestima a escala de comprimento da turbulência nesta região, logo também superestima a viscosidade turbulenta, porém tem melhor desempenho em regiões completamente turbulentas afastadas da superfície do perfil (corrente livre).

É válido recordar que o modelo SST se baseia na combinação de modelos $k-\epsilon$ longe das paredes e $k-\omega$ na região próxima da parede, assim explorando as vantagens de ambos os modelos. Levando em conta os diferentes casos abordados por esse estudo, variação na geometria das seções do túnel, optou-se por adotar o modelo de turbulência SST nas simulações.

5.1.1 Variação da malha

Essa etapa visa estabelecer um método para criação e avaliação das malhas, através da comparação dos resultados proveniente de simulações adotando malhas com diferentes distribuição e densidades de elementos.

Inicialmente, essa variação foi realizada a partir da modificação do tamanho global dos elementos, ajuste do número de camadas de elementos hexaédricos adjacentes à parede evitando uma transição brusca, mantendo fixa a altura do primeiro elemento na parede e o tamanho do domínio. Dessa forma, foram criadas diferentes malhas adotadas nos casos nomeados como DP_0, DP_1 e DP_2 descritas na tabela 6.

Após análise mais detalhada do caso estudado, foi verificado que o desempenho das simulações, referente ao tempo de processamento e à acurácia dos resultados, seriam aperfeiçoados com a mudança do método de geração de malha. Considerando que o crescimento da camada limite é o fenômeno de interesse, a concentração de elementos refinados próximo às paredes melhor representa esse fenômeno. Dessa forma, a malha nomeada L_35layer foi criada, onde os elementos adjacentes às paredes possuem dimensões consideravelmente menores comparados aos outros casos. Assim atendendo o modelo de turbulência aplicado, pois a altura do primeiro elemento próximo à parede é essencial no desempenho do modelo de turbulência. Os casos simulados adotaram o modelo SST, o qual requer $0,1 < y^+ < 2$ para solucionar o escoamento na subcamada viscosa.

Tabela 6: Variação das malhas aplicadas às simulações.

Nome caso	DP_0	DP_1	DP_2	L_35layer
Nº elementos	228,080	850,049	3.424,683	1.053,704
Nº camadas de hexaedros na parede	34	30	26	35
Altura 1º elemento na parede (m)	0.029	0.029	0.029	0.006
Dimensão máx. dos elementos (m)	0.014	0.007	0.0035	0.02

A partir das configurações de malhas descritas na tabela 6, simulações foram processadas com as mesmas condições de contorno e resultaram nos dados expostos na Figura 22. A qual representa o perfil de velocidade axial para os diferentes casos na metade da altura da seção de teste (y/R), a velocidade adimensional (u/U) é relativa à velocidade adotada como condição de entrada. Esses dados foram adquiridos na mesma posição longitudinal, de forma a permitir o crescimento da camada limite e análise comparativa, e no plano diametral da seção de teste.

Figura 22: Perfil de velocidade adimensional.

Apreciando os resultados da Figura 22, é possível observar como a malha impacta nos resultados. De uma maneira geral não são observadas alterações significativas, no perfil de velocidade, a partir das densidades de malha do caso DP_1.

Com exceção no caso DP_0, o qual não demonstrou um resultado coerente, pois o perfil de velocidade não corresponde o esperado para um escoamento em um duto reto, ou seja, permaneceu alterando a velocidade mesmo longe dos efeitos da camada limite ($y/R = 1$). É provável que isso ocorra devido a uma malha inadequada (grosseira) para esse tipo de simulação.

Outra observação importante, é que os resultados obtidos entre as malhas L_35layer e DP_2 são muito semelhantes, apesar da grande diferença na quantidade de elementos. Pois o caso L_35layer utiliza uma maior discretização de malha próxima à parede, onde ocorre o crescimento da camada limite, diferente do caso DP_2 que adota uma malha mais discreta em todo domínio fora da camada limite.

Considerando estas constatações, foi elaborado um estudo de convergência de malha baseado no método proposto por Eça e Hoekstra (2014) envolvendo quatro diferentes malhas, as quais tiveram origem nas configurações de malha e simulação adotadas no caso L_35layer. Assim nessa etapa, a geração das malhas se baseou na variação do tamanho dos elementos adjacentes à parede, de uma forma a atender o requisito do modelo de turbulência adotado (SST). Outro fator considerado foi o crescimento dos elementos na camada prismática próxima as paredes, pois os elementos na transição da camada prismática para demais elementos (tetraedros) devem apresentar dimensões semelhantes. Logo o número de camadas de elementos prismáticos foi manipulado para garantir essa característica.

A qualidade da malha foi avaliada pela assimetria (skewness), que leva em consideração a relação dos ângulos entre as arestas dos elementos, essa foi limitada em todas as simulações a 0,95. Uma malha com baixa qualidade pode inserir erros numéricos e dificultar a convergência da solução.

Os resultados do método de convergência estão expostos na Figura 23, onde a abscissa representa o tamanho característico da malha (h) e a ordenada à grandeza de interesse (d), nesse caso altura da camada limite. Cada círculo representa um caso simulado, a barra vertical é a incerteza associado à malha e a curva indica a convergência para um resultado, nesse caso é descrita por uma função de segunda ordem (p). O caso com malha mais refinada, elementos com menores dimensões, possui $h=1$, enquanto a mais grosseira apresenta $h=2,32$. A altura da camada limite proveniente

da referência Schlichting (2000) é indicado por um quadrado (exp) no eixo das ordenadas.

Figura 23: Estudo de convergência de malha.

A incerteza de malha resulta em 1,9% (U), ou seja, a solução pode variar dentro de um intervalo que é $17,2\text{mm} < d < 17,9\text{mm}$. A extrapolação dos resultados indica uma camada limite de 17,67mm, logo o erro de comparação é de 6,75% em relação ao dado de referência (18,95mm).

Este método foi adotado no estudo dos trechos característicos, portanto simulações com diferentes malhas foram testadas, as quais somente uma parte dos casos foi selecionada para representar os efeitos dessa variação e ratificar os resultados. Os casos são identificados de acordo com as malhas empregadas como: grosseira, ideal e refinada, respectivamente em ordem crescente de discretização do domínio. O caso nomeado “Malha_Ideal” é uma condição intermediária, entre a condição mais grosseira e a mais refinada da malha, em que esta variação não apresenta grandes alterações nos resultados.

5.2. Estudos dos trechos característicos

Esta seção apresenta a investigação do escoamento em cinco trechos do túnel, os quais apresentam os principais fenômenos fluidodinâmicos pertencentes a esse circuito. As simulações das seções individuais são de grande relevância, pois fundamentam a simulação do circuito completo, garantindo que o método adotado reproduza o comportamento do escoamento ao longo do túnel. Todas as simulações foram permanentes aplicando o modelo de turbulência SST, condição de contorno na entrada velocidade uniformemente distribuída (mantendo a mesma vazão da seção de teste) com exceção da câmara de estabilização, condição de contorno na saída como pressão relativa nula e não escorregamento nas paredes. Os resultados foram fundamentados em dados disponíveis na literatura para casos análogos e são discutidos em seguida.

5.2.1. Câmara de Estabilização

A câmara de estabilização sucede uma curva do túnel, logo a tendência é de que o escoamento incidente não apresente uniformidade no perfil de velocidade. O fato de este trecho ser o primeiro componente da parte superior do túnel, antes da seção de teste, implica em razoável influência no escoamento aplicado nos testes. Portanto, são adotados artifícios para alterar o escoamento, visando aumentar a uniformidade no perfil de velocidade (grade) e reduzir as componentes secundárias do escoamento (colmeia). Nas simulações desse trecho, o fenômeno de interesse foi o efeito da câmara de estabilização na uniformidade do perfil de velocidade, logo foi necessário reproduzir o comportamento da grade no escoamento. Para tanto foi adotado uma superfície porosa no centro da câmara, artifício computacional que implica em uma resistência local ao escoamento, com perda de carga igual à grade pertencente ao túnel estudado, levantada através de formulação empírica (Idelchick, 1986). Além dessa consideração, foi atribuída uma condição de entrada com perfil de velocidade parabólica, visando destacar os efeitos de uniformização do escoamento da câmara, como apresentado na Figura 24. A qual representa o perfil de velocidade axial em três diferentes posições longitudinais da câmara: à entrada da câmara ($x/L = 0$), posição média entre a entrada e a superfície porosa ($x/L = 0.25$) e a posição média entre a superfície porosa e a saída da câmara ($x/L = 0.75$). A velocidade adimensional (u/U) é relativa à velocidade incidente

na câmara e a posição vertical adimensionalizada pela altura da câmara de estabilização (y/H).

Figura 24: Perfil de velocidade em três posições da câmara de estabilização.

Avaliando os resultados é possível confirmar que o escoamento se uniformiza ao longo dessa seção, intensificado pela influência da grade. Porém, é notório também que mesmo antes dessa existe uma tendência natural do escoamento de se uniformizar, junto da presença restritiva da grade. Verifica-se que a qualidade do escoamento (FQ), definido no capítulo 4, após a tela apresenta aumento para 0,92 de acordo com a Figura 25. Essa figura representa o fator de qualidade, que relaciona o desvio padrão da velocidade com a velocidade média, ao longo do comprimento da câmara adimensional (x/L), na qual grade está localizada no centro ($x/L = 0.5$).

Figura 25: Fator de qualidade ao longo da câmara de estabilização (sentido do escoamento da esquerda para direita). Posição da superfície porosa marcada com reta vermelha

5.2.2. Contração

A contração é o trecho do túnel que antecede a seção de teste, portanto deve produzir o escoamento mais bem comportado possível, ou seja, sem descolamento da camada limite ou qualquer efeito que prejudique a uniformidade do perfil de velocidade na seção de teste. Levando-se em conta esse aspecto, a investigação nessa seção abordou a queda de pressão e tensão de cisalhamento na parede do fundo da contração.

Devido ao perfil da geometria desse trecho, com redução contínua da seção hidráulica, a velocidade tende a aumentar e a pressão a diminuir (Figura 26), seguido por uma recuperação de pressão. Esse comportamento é propício para a separação da camada limite. Portanto, o coeficiente de pressão na linha de centro da parede do fundo é levantado (Figura 27), o qual indica uma queda de pressão no final da contração ($x/L = 1$), coincidindo com o pico de velocidade (região vermelha) do coeficiente de velocidade.

Figura 26: Coeficiente de Velocidade no plano diametral da contração (sentido do escoamento da esquerda para direita).

Figura 27: Coeficiente de pressão no centro da parede do fundo da contração, o comprimento da contração é $0 < x/L < 1$.

As simulações realizadas, apesar de superestimar a queda de pressão em relação aos dados experimentais do HYKAT de acordo com Wetzel (1994), reproduziram o comportamento do coeficiente de pressão com razoável semelhança. Os dados adotados como referência são somente para demonstrar a tendência de queda de pressão, pois a contração estudada pertence ao túnel HYKAT, ou seja, possui geometria diferente. As

diferentes malhas simuladas não demonstraram mudanças consideráveis nos resultados obtidos.

Em relação à avaliação do descolamento da camada limite, o aspecto de avaliação foi a tensão de cisalhamento na parede do fundo (Figura 28). Pois a tensão possui valor nulo na região de descolamento, ou seja, não ocorre cisalhamento devido à camada limite ter se desprendido da parede.

Figura 28: Tensão de cisalhamento na parede do fundo (sentido do escoamento da esquerda para direita).

No entanto não ocorreu separação da camada limite, de acordo os resultados apresentados na figura 21. A tensão tende à zero em uma pequena região, mas a separação completa não foi identificada em nenhum trecho da contração. Dessa forma, é possível inferir que essa seção não representa um fator de grande preocupação, ou seja, nela o escoamento não sofre efeitos consideráveis que possam prejudicar a uniformidade do escoamento na seção de teste.

5.2.3. Seção de Teste

De acordo com Wetzel (1994) em um bom túnel a uniformidade da velocidade desenvolvida, fora da camada limite, não deve apresentar variação maior do que 1% da velocidade média. Logo, as características de maior interesse nesse trecho são a altura da camada limite e o perfil de velocidade. Para tanto, esses dados foram levantados nas simulações e comparados com dados experimentais do próprio túnel estudado (Labhidro_Experimento), além do comparativo com dados da literatura referente ao túnel LCC (Wetzel / LCC -1994). Logo, a Figura 29 representa o perfil de velocidade axial (u/U) adimensionalizado pela velocidade média incidente (U) ao longo da metade da altura da seção de teste (y/R), no plano diametral da seção de teste.

Figura 29: Perfil de velocidade da seção de teste no plano diametral.

Os resultados obtidos demonstram uma boa aderência das simulações aos dados experimentais, atendendo ao critério de 1% de não uniformidade de velocidade, de acordo com os dados expostos na Tabela 7. A qual apresenta a variação máxima de velocidade, fora da camada limite, em relação à velocidade média para os diferentes casos.

Tabela 7: Uniformidade da Velocidade para os casos estudados.

Caso	Máxima Não Uniformidade (%)
Malha_Ideal	0,870
Malha_Refinada	0,505
Labhidro_Experimento	0,904
Wetzel/ LCC (1994)	0,306

5.2.4. Difusor

Teoricamente, o difusor é o trecho que apresenta a maior perda de carga associada, isso se deve ao fato de possuir grande gradiente adverso de pressão associado a sua forma. O aumento do diâmetro hidráulico ao longo de seu comprimento tende a reduzir a velocidade do escoamento, favorecendo o aumento de pressão contrária ao deslocamento do fluido e aumentando a possibilidade de descolamento da camada limite e recirculação. Esse comportamento não é interessante para o desempenho do túnel, por demandar mais potência da bomba para suprir essa energia perdida. Além do que a flutuação de pressão e velocidade inerente a esse fenômeno pode embutir uma fonte de ruído no circuito em um nível considerável, prejudicando possíveis testes hidroacústicos.

Dentro do contexto apresentado foi avaliada a tensão de cisalhamento na parede do fundo do difusor, de uma forma a identificar o descolamento da camada limite pelo valor nulo dessa tensão que ocorreu, aproximadamente, em 0,25m após o início da do difusor (10% de L), assim podemos observar na figura 30.

Figura 30: Tensão de Cisalhamento na direção x na superfície do fundo do difusor (sentido do escoamento da esquerda para direita).

Apesar do escoamento no centro do difusor não se descolar (Figura 31), esse comportamento é evidenciado nas laterais, condição verificada nos perfis de velocidade expostos nas figuras 32 e 33. Avaliando a distribuição de velocidade no centro do difusor, apesar da redução no trecho final, não é observado nenhuma região com velocidade nula ou negativa, ou seja, contrária ao escoamento principal.

Figura 31: Perfil de velocidade no plano diametral do difusor (sentido do escoamento da esquerda para direita).

Figura 32: Perfil de velocidade próximo a lateral do difusor (sentido do escoamento da esquerda para direita).

Figura 33: Vista isométrica do perfil de velocidade próximo a lateral do difusor (sentido do escoamento da esquerda para direita).

Em relação à distribuição de velocidade no perfil longitudinal próximo às paredes, é evidente uma região de velocidade baixa e negativa que podem ser interpretadas como recirculação, como pode ser verificada na figura 34.

Figura 34: Vetores velocidade próximo da região de recirculação (sentido do escoamento da direita para esquerda).

Acredita-se que esse comportamento tenha ocorrido devido ao ângulo de abertura das laterais em relação à seção de teste, os quais são diferentes do ângulo de abertura do fundo. Fundamentado nos resultados apresentados, é de grande relevância destacar a importância do correto projeto da geometria do difusor, não somente o ângulo da parede do fundo como geralmente é discutido, mas também o arranjo em que as laterais estão dispostas.

5.3. Curva

O estudo da curva concentrou-se em avaliar a influência das aletas no escoamento, assim analisando a esteira à jusante das aletas, distribuição de pressão e tensão de cisalhamento na superfície das aletas. Cada um desses fatores representa um aspecto importante para o comportamento do túnel, pois a esteira criada pelas aletas pode influenciar no comportamento da bomba de circulação, a queda de pressão pode gerar cavitação e a separação da camada limite possibilita a criação de uma fonte de ruído no circuito, devido à expressiva flutuação no campo de pressão.

A extensão da esteira, perturbação no escoamento à jusante das aletas, criada pelo arranjo das aletas ao longo da seção das curvas é um fator relevante. Principalmente na curva anterior à bomba, pois essa seção influencia diretamente o escoamento incidente na bomba, o qual pode impor uma condição inadequada de operação ao túnel. Para tanto o campo de velocidade no plano diametral da curva foi obtido e está representado na Figura 35.

Figura 35: Coeficiente de Velocidade no plano diametral de uma seção curva.

É possível observar que a distribuição de velocidade à jusante e próximo das aletas não é uniforme, apesar da condição de entrada com velocidade uniforme. É visível a aceleração do escoamento no trecho interno e desaceleração no trecho externo da curva, isso é afetado pela a distância percorrida pelo escoamento nesses trechos, além da distinção entre os raios interno e externo da curva. Visando avaliar a extensão (S) que a presença das aletas impõe relevante influência no escoamento, a razão (RQ) entre as vazões inferior (Q_{INF}) e superior (Q_{SUP}) no trecho descendente da curva foi observado, de acordo com o esquema representado na Figura36.

Figura 36: Desenho esquemático da relação entre vazão (RQ).

As vazões nos dois trechos observados (inferior e superior) foram obtidas ao longo de diferentes distâncias (S), de uma forma a buscar a posição em que o escoamento se uniformiza, ou seja, a vazão no trecho inferior é igual ao superior ($RQ = 1$). Portanto, a Figura 37 relaciona a razão entre vazões (RQ) com a distância vertical (S) adimensionalizada pelo diâmetro hidráulico (H) da curva.

Figura 37: Razão entre vazões (RQ) ao longo da distância adimensional (S/H). A condição com simetria entre as vazões ($RQ=1$) é marcada com a reta vermelha.

Apreciando os dados expostos, é possível verificar que a partir de determinada distância ($S/H=1,7$) a razão entre vazões é aproximadamente constante, ou seja, a disposição das aletas não influencia no escoamento. Dados provenientes do túnel HYKAT também são representados neste gráfico de forma apenas a demonstrar uma tendência, pois as curvas são diferentes.

Apreciando o fator de qualidade (FQ) ao longo da distância adimensional (S/H) esta constatação é reforçada, os dados dessa análise estão expostos na Figura 38, a qual representa o FQ (razão do desvio padrão da velocidade com a velocidade média) em diferentes posições à jusante das aletas.

**Figura 38: Fator de qualidade (FQ) ao longo da distância adimensional (S/H).
Posição $S/H=1,7$ marcada com linha vermelha.**

Na distância das aletas de $S/H=1,7$ o fator de qualidade tende a permanecer constante semelhante a razão entre vazões (RQ). Assim, para essa curva, a posição ideal para a instalação de uma bomba ou componente que demanda uniformidade no escoamento seria a uma distância $S/H=1,7$ das aletas.

Visualizando as linhas de corrente próximo as aletas (Figura 39), é possível observar duas regiões de velocidades nulas adjacentes às superfícies, uma destas no trecho inicial intradorso e outra no trecho final do extradorso. Esse comportamento indica a possibilidade de separação da camada limite, portanto se faz necessária uma investigação mais detalhada desse aspecto. Além dessa constatação, foi verificado no intradorso um possível recolamento da camada limite, representada pelo alinhamento

das linhas de corrente a superfície da aleta. As posições aproximadas de separação (S) e recolamento (R) são indicadas com as respectivas letras na Figura 39.

Figura 39: Linhas de corrente no plano diametral da curva próximo as aletas.

A tensão de cisalhamento na superfície das aletas foi investigada, de forma a buscar a posição em que essa tensão é nula. Essa característica representa um perfil de velocidade específico na camada limite, no qual ocorre a variação nula da velocidade com a variação da distância normal a superfície, ou seja, a condição eminente para o descolamento da camada limite. Levando em consideração esse argumento, uma aleta central foi selecionada para análise do comportamento da tensão em sua superfície, essa é destacada com um círculo vermelho na Figura 40.

Figura 40: Aleta selecionada para análise da tensão de cisalhamento.

Os dados obtidos foram divididos em duas partes, as tensões resultantes ao longo do intradorso (Figura 41) e extradorso (Figura 42) no trecho médio da envergadura das aletas. Assim a distribuição dessa tensão foi representada em relação a uma distância (s), adimensionalizada pela corda da aleta (s/C), a partir do bordo de ataque ($s/C=0$) até o bordo de fuga ($s/C=1$).

Figura 41: Distribuição da tensão de cisalhamento no intradorso de uma aleta.

Observando os dados representados na Figura 41 e 40, é possível constatar que ocorre a separação da camada limite próximo ao bordo de ataque ($s/C=0,03$). Da mesma forma, foi possível observar o recolamento da camada limite na posição $s/C=0,41$, onde tensão de cisalhamento muda de sentido. Outro aspecto verificado é a intensa variação da tensão próximo ao bordo de ataque ($s/C=0$), isso se deve a passagem do escoamento de uma região com baixa velocidade (ponto de estagnação) para outro com maior velocidade e acelerado. Semelhante a essa análise, os dados de distribuição de tensão de cisalhamento no extradorso da aleta selecionada foram obtidos e representados na Figura 42.

Figura 42: Distribuição da tensão de cisalhamento no extradorso de uma aleta.

Avaliando resultados expostos na Figura 42, o descolamento da camada limite nesse trecho da aleta é próximo ao bordo de fuga ($s/C=0,79$), coincidindo com a região de velocidade nula representada na Figura 39. Nesse trecho avaliado a variação da tensão adjacente ao bordo de ataque é mais intensa, assim a variação do campo de pressão e perfil de velocidade acompanham essa tendência. Portanto, é necessária a investigação mais detalhada dessas características e atenção para tendência de ocorrência de cavitação.

Atento as considerações feitas, a distribuição de pressão (Figura 43) e velocidade (Figura 44) próximas ao bordo de ataque foram obtidas no plano diametral da curva. O campo de pressão é representado pelo coeficiente de pressão, a qual é relativa à pressão atmosférica. Analogamente, a distribuição de velocidade é expressa pelo coeficiente de velocidade que é relativa à velocidade média incidente na curva.

Figura 43: Coeficiente de pressão próximo ao bordo de ataque da aleta.

Figura 44: Coeficiente de velocidade próximo ao bordo de ataque da aleta.

Observando essas figuras é notório um pico de pressão (Figura 43) e região de velocidade nula (Figura 44), a qual é conhecida como ponto de estagnação, formado pela desaceleração do escoamento devido à presença da aleta. Também é uma constatação relevante, a localização do ponto de estagnação ligeiramente deslocado para o extradorso. Muito provavelmente, isso é consequência do ângulo de inclinação da aleta em relação ao escoamento, dessa forma influenciando o perfil de velocidade e distribuição de pressão ao longo da superfície da aleta.

Considerando essas peculiaridades observadas, assim como a possibilidade de cavitação e comportamento de separação da camada limite, foi obtida a distribuição de pressão adjacente à superfície no trecho médio da envergadura da aleta. Portanto, a Figura 45 representa o coeficiente de pressão no intradorso (traçado preto) e extradorso (traçado vermelho), distribuído ao longo do perfil transversal da aleta, em que a referência de posição é à distância que segue a partir do bordo de ataque ($s/C=0$) até o bordo de fuga ($s/C=1$) em relação a corda. Os dados extraídos de Wetzel (1994) para um estudo semelhante aplicado ao túnel HYKAT, apesar de adotar a geometria da aleta diferente, também foram representados de forma a fornecer um indicativo.

Figura 45: Distribuição da pressão ao longo superfície de uma aleta.

Verificando os resultados expostos na Figura 38, é possível visualizar o pico e a queda de pressão, próximo ao bordo de ataque, assim como a diferença na distribuição de pressão entre o intradorso e o extradorso. Logo, no extradorso o escoamento é submetido a um pico de pressão, percorrendo esse trecho em direção ao bordo de fuga o coeficiente se torna negativo em $s/C=0,1$, possivelmente influenciado pela forma da aleta que tende a acelerar o escoamento. Na posição $s/C=0,8$, coincidindo com a separação da camada limite, o coeficiente de pressão se torna positivo novamente. A queda de pressão e variações de pressão no intradorso são menos acentuadas do que extradorso, mas sem reduzir sua relevância.

Apreciando os dados de Wetzel (1994), é possível verificar uma distribuição da pressão mais simétrica entre ambos os trechos (intradorso e extradorso), ou seja, a parcela de coeficiente de pressão negativa e positiva são semelhantes, assim tendendo a gerar uma força de sustentação com menor intensidade.

5.4. Estudos do circuito completo

Levando em consideração o conhecimento adquirido nas etapas anteriores, a simulação completa do túnel de cavitação seguiu os parâmetros estabelecidos no estudo dos trechos característicos. Logo, as configurações de simulação (condições de contorno e modelo de turbulência) e técnica de geração de malha foram semelhantes.

Observando a grande dificuldade em gerar uma malha contínua ao longo do circuito, devido conflito no arranjo dos elementos de malha entre alguns trechos do túnel e o maior custo computacional, optou-se por adotar malhas não conforme, ou seja, foram geradas malhas independentes para as seções do túnel. Dessa forma, as malhas concebidas na seção anterior (estudo dos trechos característicos) com menor demanda por custo computacional e resultados com acurácia foram reproduzidas, de acordo com a Figura 46, onde é possível observar as diferenças entre as malhas. Os elementos de malha não conforme entre essas seções, porém foi estabelecida uma condição de interface, assim mantendo a continuidade nos dados do escoamento. As seções não simuladas previamente (trechos verticais, inferiores, curvas com exceção da posterior ao difusor) seguiram a mesma técnica de geração de malha aplicada a trechos semelhantes

estudados individualmente, como no caso do difusor inferior que adotou a mesmas configurações do difusor do trecho superior.

Figura 46: Malha da simulação do Túnel de Cavitação

A seção da bomba não foi reproduzida nessa simulação, apenas uma condição de contorno de velocidade constante foi atribuída, equivalente à vazão gerada pela bomba de $0,225 \text{ m}^3/\text{s}$, assim resultando em uma velocidade média na seção de teste de 5 m/s . As demais condições de contorno seguiram a prática dos estudos anteriores, com destaque para a condição de simetria estabelecida no plano diametral do túnel, dessa forma reduzindo a demanda por recursos computacionais.

Para análise particular dos efeitos de cada trecho do túnel, o mesmo foi dividido em diferentes trechos de acordo com a Figura 47, em que o fator de qualidade (FQ) e o perfil de velocidade na saída foram levantados. A perda de carga foi obtida relacionando a diferença de pressão total entre a entrada e saída de cada trecho.

Figura 47: Arranjo da divisão em trechos do túnel de cavitação.

O trecho 6 retrata o efeito da colmeia localmente e o trecho 5 o efeito somente do duto, explicitado como câmara de estabilização na Tabela 8, a qual nomeia os

trechos representados na Figura 47. O sentido do escoamento se inicia no trecho e segue o circuito até o trecho 14.

Tabela 8: Descrição dos trechos estudados.

Nº	Sigla	Descrição
1	Dif_INF	Difusor Inferior
2	Conv_INF	Convergente Inferior
3	CV1	Curva 1
4	CV2	Curva 2
5 e 6	CAM	Câmara de Estabilização
7	CT	Contração
8	ST	Seção de Teste
9	DF	Difusor
10	inletCV3	Entrada Curva 3
11	CV_3	Curva 3
12	OutCV3	Saída Curva 3
13	CV4	Curva 4
14	Trans	Transição seção quadrada para circular

A curva logo após o difusor foi analisada em mais trechos que as demais curvas (trechos 10, 11 e 12), isso porque é uma demanda compreender melhor o comportamento do escoamento ao longo desse trecho.

5.4.1. Perfil de Velocidade

Os resultados foram representados em forma de contornos de cores, de acordo com a escala do coeficiente de velocidade que é a razão entre o módulo da velocidade e uma velocidade de referência. Na Figura 48 é observado o coeficiente de velocidade no plano de simetria, adotando como referência a velocidade média na seção de teste.

Figura 48: Coeficiente de velocidade no plano de simetria do Túnel.

Verificando os resultados é visível que o escoamento se inicia em uma velocidade regular até a contração, a partir desse trecho o escoamento é acelerado para a entrada na seção de teste, devido à redução na área transversal do conduto. Destaca-se nessa figura o efeito do difusor, criando uma região de baixa velocidade, a qual influencia o escoamento até o fim do circuito.

Com o objetivo de ilustrar melhor o comportamento do campo de velocidade ao longo do circuito, o perfil de velocidade foi representado em seções transversais ao duto. Assim, a Figura 49 demonstra o coeficiente de velocidade axial na parte inferior do túnel (trechos 1 e 2), adotando a velocidade da condição de contorno de entrada como referência (1,02 m/s).

Figura 49: Coeficiente de velocidade axial na parcela inferior do túnel, sentido do escoamento da esquerda para a direita.

De acordo a condição de contorno na entrada, velocidade constante, o primeiro contorno de velocidade é retratado somente em vermelho. O perfil posterior é observado à redução da velocidade, consequência da forma do difusor (trecho 1). Por fim, ocorre a aceleração do escoamento motivado pela geometria convergente do trecho 2, resultando em um contorno de velocidade mais intensa.

Nos trechos localizados na parcela superior do túnel são notórias as grandes variações na escala de velocidade e uniformidade do escoamento, conforme retratado na Figura 50, a qual admite a velocidade média na seção de teste como referência para representar o coeficiente de velocidade axial. Essa figura está orientada da curva 2 (trecho 4) para a curva 3 (trecho 11), assim o escoamento possui o sentido da esquerda para a direita.

Figura 50: Coeficiente de velocidade axial na parcela superior do túnel, sentido do escoamento da esquerda para a direita.

O primeiro contorno demonstrado nessa figura é o perfil de velocidade proveniente da segunda curva (trecho 04), apesar dos efeitos das aletas e curva, em geral esse aparenta um escoamento uniforme. O contorno seguinte representa o campo de velocidade incidente na seção de teste, levando em conta os efeitos da contração e da câmara de estabilização. O terceiro perfil de velocidade é localizado na saída da seção de teste e demonstra uma distribuição com camada limite desenvolvida. O último perfil de velocidade corresponde à saída do difusor, o qual expressa uma intensa não uniformidade no escoamento, possível descolamento da camada limite e recirculação, devido à região de baixa velocidade. Procurando representar melhor os efeitos descritos nessa parte do túnel, o perfil de velocidade no plano de simetria foi obtido e adimensionalizado pela velocidade média do perfil correspondente. Assim, a Figura 51 e Figura 52 descrevem comparativamente essa característica para os trechos mencionados, distribuído na altura adimensional da seção.

Figura 51: Perfil de velocidade na saída da curva 2 e contração.

A esteira formada pela presença das aletas é mantida no perfil de velocidade a jusante da curva, porém o efeito da câmara de estabilização uniformiza o escoamento. A contração acelera levemente o escoamento na parte inferior do conduto.

Figura 52: Perfil de velocidade na saída da seção de teste e difusor.

A distribuição de velocidade resultante do difusor é intensamente irregular, onde é verificada uma parcela do campo de velocidade negativa, fora da camada limite. Assim, demonstrando o efeito do difusor de frear o escoamento. Esse efeito excessivo pode prejudicar a operação do túnel, como escoamento inadequado na bomba e elevada perda de carga associada. A desaceleração do escoamento ocorre essencialmente

adjacente à parede inferior, a qual possui um ângulo de inclinação, portanto formando uma abertura e aumento do diâmetro hidráulico. Verificando os resultados, muito provavelmente, a camada limite se descola ao longo do difusor.

A Figura 53 expõe os contornos de velocidade na direção vertical com escoamento descendente, a velocidade de referência utilizada foi a média na seção logo após as aletas da curva 3. Desse modo três seções foram obtidas, uma imediatamente após as aletas da curva 3 (trecho 11), na distância média entre as curvas 3 e 4 (trecho 12) e a jusante das aletas da curva 4.

Figura 53: Contornos de velocidade trecho descendente – vertical com sentido do escoamento de cima para baixo.

Apreciando os resultados, é possível inferir que os efeitos do difusor (trecho 09) permanecem influenciando o escoamento nessa parte do túnel, pois a mesma característica de diferença na intensidade de velocidade entre os extremos do contudo é constatado. Em razão de que a distribuição de velocidade incidente na curva 3 (trecho 10) transmite esse campo de velocidade irregular formado no difusor. Outro fato que reforça esse comportamento é que o trecho 12 também possui forma de um difusor, desacelerando o escoamento na parte interna desse trecho. Logo, mantendo uma região

de baixa velocidade ao longo do trecho 12 e início do trecho 13. Essa parte do túnel é extremamente desfavorável para a uniformidade do campo de velocidade.

Uma das informações de grande relevância fornecida pela simulação é a distribuição de velocidade incidente na seção da bomba (trecho 14), a qual foi representada na Figura 54. O coeficiente de velocidade utilizou como referência a velocidade média nessa seção transversal, a posição dessa seção foi ligeiramente deslocada do fim do circuito, dessa forma distanciando da condição de contorno de saída.

Figura 54: Perfil de velocidade incidente na seção da bomba.

É razoável afirmar que o campo de velocidade levantado é inadequado para operação da bomba, dado que a região inferior em vermelho ($C_v = 1$) da seção apresenta o dobro de intensidade da região superior em verde ($C_v = 0,5$). Essa característica pode induzir vibração nas pás da bomba, o ideal para esse caso é uma distribuição radial uniforme.

5.4.2. Fator de qualidade

A Figura 55 representa o comportamento do fator de qualidade (FQ) ao longo do circuito do túnel de cavitação. Julgando os perfis de velocidade na saída de cada trecho no plano de simetria, com referência da velocidade média do próprio perfil, o fator de qualidade do escoamento foi representado para posições descritas na tabela 8. Considerando que não foi possível desvincular o efeito da câmara do trecho 5 e colmeia (trecho 6), portanto ambos possuem o mesmo fator.

Figura 55: Fator de qualidade ao longo do circuito do túnel de cavitação.

Em geral, o fator de qualidade é elevado nos trechos iniciais do circuito, até a seção de teste (trecho 8), destacando a contribuição da câmara de estabilização (trecho 5 e 6) para uniformizar o escoamento.

O difusor (trecho 09) e o trecho vertical após a curva 3 (trecho 12) são os mais prejudiciais ao fator de qualidade, dessa maneira impondo uma queda brusca desse fator. Provavelmente, a ocorrência de descolamento da camada limite nesses trechos é a principal motivação para esse comportamento.

Apesar do escoamento incidente com elevada irregularidade as curvas 3 e 4 (trechos 13 e 11) tenderam a uniformizar o escoamento, amenizando o efeito do difusor

e (trechos 09 e 12). No global, as curvas não reduziram o fator de qualidade, apesar de imporem uma mudança no sentido do escoamento.

5.4.3. Perda de Carga

A princípio a perda de carga resultante da simulação completa foi comparada com dados de diferentes abordagens. Esses métodos alternativos foram a simulação individual de cada trecho, conforme estudo dos trechos característicos relatado no presente capítulo, e a metodologia estabelecida por Idelchik (1986). Nesses procedimentos é considerada uma velocidade constante na entrada de cada seção, dessa maneira diferente da simulação do circuito completo, a qual leva em consideração o efeito das seções a montante no escoamento.

A perda de carga foi representada por uma grandeza adimensional (ζ), essa utiliza uma velocidade de referência para cada seção que mantém a mesma vazão ao longo de todo circuito. Considerando que apenas as seções entre o trecho 5 e 11 foram simuladas individualmente, essa análise se limitou a essa região do túnel. Buscando melhor representar essa comparação, a perda de carga acumulada que leva em consideração a perda de carga das seções anteriores foi representada, conforme a Figura 56.

Figura 56: Perda de carga acumulada parcial do túnel.

A perda de carga calculada nas diferentes abordagens é semelhante, entre a câmara de estabilização (trechos 5 e 6) e a seção teste (trecho 8), porém a partir do

difusor (trecho 9) a diferença entre os métodos são intensificadas. A perda de carga na curva 3 (trechos 10 e 11) é consideravelmente maior na simulação completa do circuito, provavelmente, em razão de que essa abordagem considera o escoamento formado na seção a montante. Visto que os efeitos do difusor no escoamento (trecho 9) cria uma região de baixa velocidade e consequentemente de alta pressão, no trecho localizado a jusante a diferença entre pressão entre da entrada e saída da seção é intensificada.

Para estimativa da perda de carga do circuito completo, sem incluir a seção da bomba, foi considerado a soma da diferença de pressão entre a entrada e saída de cada trecho. A participação de cada trecho na perda de carga global do túnel é retratada na Figura 57, a qual representa percentualmente essa contribuição em relação à perda de carga total ao longo das seções, descritas na Tabela 8.

Figura 57: Perda de carga ao longo do circuito do túnel.

A perda de carga é concentrada em duas seções do túnel, a seção de teste (trecho 08) e difusor (trecho 09), ambas somadas correspondem a 70,7% da perda de carga total do túnel. A perda de carga no difusor é gerada excessivamente pela forma, enquanto na seção de teste o atrito nas paredes é o principal fator, intensificado pela alta velocidade nesse trecho.

Analogamente, o mesmo estudo foi realizado utilizando a técnica estabelecida por Idelchik (1986), individualmente para cada seção do túnel. Os resultados da

simulação em CFD e esse método foram comparados com os dados experimentais para a perda de carga, em uma velocidade de operação de 5 m/s na seção de teste, assim as diferenças percentuais em relação a essa referência estão destacadas na Tabela 9.

Tabela 9: Diferença Percentual da Perda de Carga do túnel em relação aos dados experimentais.

Fonte	Perda de Carga [Pa]	Diferença %
Dado Experimental	5389.82	-----
Simulação CFD	5658.88	4.99%
Idelchik (1986)	4880.79	-4.28%

A simulação em CFD superestima a perda de carga em aproximadamente 5%, em quanto o método de acordo com Idelchik (1986) subestima em 4,28% essa grandeza. Logo, ambos apresentaram acurácia aceitável nessa estiva, porém a abordagem aplicando simulações em CFD disponibiliza uma grande variedade informações sobre o escoamento. Assim, permitindo uma melhor avaliação e percepção global das características hidrodinâmicas do circuito, considerando o efeito dos trechos no escoamento em cadeia. É relevante mencionar que existem incertezas associadas a esses métodos, os quais podem aumentar ou reduzir essas diferenças, porém no presente estudo os mesmos não foram explicitados.

A potência necessária para assegurar a velocidade de 5m/s (vazão 0,225m³/s) na seção de teste é de 8.92KW, levando em consideração a perda de carga de 5389.82Pa. Essa estimativa é preliminar e necessita de verificação e dimensionamento mais apropriado da bomba de circulação.

Capítulo 6

6. Conclusão

O estudo fluidodinâmico do túnel de cavitação nesse trabalho, em caráter investigativo, buscou respaldar a aplicação de simulações em CFD no projeto desse tipo sistema. Assim, o método aplicado demonstrou resultados com acurácia satisfatória, reproduzindo fenômenos hidrodinâmicos relevantes e viabilidade em sua implementação, dessa forma, possibilitando a aplicação em projetos dessa natureza.

Dados significativos foram obtidos ao longo das simulações com abrangência global e local, como a perda de carga do túnel e a separação no difusor, respectivamente. Dentre as constatações mais relevantes é possível destacar:

- O efeito favorável da contração e câmara de estabilização para uniformidade do escoamento, sendo o correto dimensionamento dessas seções fundamentais para adequar o escoamento incidente na seção de teste, de acordo com critérios exigidos em ensaios hidrodinâmicos.
- A tendência de separação da camada limite no difusor, dessa forma criando uma região de baixa velocidade e recirculação do escoamento. Uma possível solução ou tentativa na redução desse efeito seria o aumento do comprimento do difusor e consequente redução da seção de teste.

- O ângulo das aletas em relação ao escoamento incidente pode ser a razão da distribuição de pressão inadequada entre o intradorso e extradorso. O estudo do efeito desse ângulo, geometria das aletas e da curva é um requisito importante para melhorias no túnel e em projetos futuros.

- O trecho descendente da curva, após o difusor, é extremamente desfavorável para a uniformidade do escoamento, devido à separação da camada limite e a formação de região de recirculação do escoamento. Possíveis alternativas para reduzir esses efeitos seriam alongar esse trecho, alterar a forma da seção para um difusor simétrico ou invertido da condição atual, ou seja, o maior ângulo de abertura da parede lateral coincidente com a região de maior velocidade.

Como consequência das peculiaridades citadas no tópico anterior, a bomba recebe um escoamento inadequado, excessivamente não uniforme. Assim, gerando um carregamento consideravelmente maior em uma posição radial do que em outra, o que pode causar vibração e ruído. Devido à bomba ser uma potencial fonte de ruído inserido no túnel, recomenda-se um estudo particular de seu comportamento, não somente das características hidrodinâmicas e hidroacústicas, mas também dos componentes mecânicos com objetivo da menor formação de ruído.

Uma expectativa relevante é a maior disponibilidade de dados experimentais, assim permitindo a validação das simulações realizadas e melhor consolidação dos métodos aplicados. Apesar dessa demanda, acredita-se que esse trabalho cumpriu seu propósito e contribuiu para aprimorar a percepção das características hidrodinâmicas pertencente a um túnel de cavitação.

Capítulo 7

7. Referências

Idelchik, I.E. Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd Edition, Hemisphere Publishing Corporation, 1986.

Andersen, P. Aspects of Propeller Developments for a Submarine, First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norway, June 2009.

Atlar, M.; Korkut, E. ; Paterson I. Department of Marine Technology, Report Number MT-2000-014. University of New Castle, 2001.

Basil, E. R. Water Tunnel Turbulence Measurements Behind a Honeycomb, Journal Hydronautics, Vol. 12, 1978.

Bardina, J. E., Huang, P. G., e Coakley, T. J. Turbulence modeling validation, testing, and development. Technical report, NASA TM 110446, 1997.

Bertetta, D. Numerical and Experimental Characterization of a CP Propeller Unsteady Cavitation at Different Pitch Settings, Second International Symposium on Marine Propulsor, Hamburg, Germany, June 2011.

Burrill, L. C. (1955). Propeller Cavitation: The Physical mechanism and Effects on Ship Performance, Paper of the Greenock Philosophical Society. 21st January 1955

Brandner, P. A. Design Considerations in the Development of a Modern Cavitation Tunnel, 16th Australasian Fluid Mechanics Conference Crown Plaza, Gold Coast, Australia 2-7 December 2007.

Coxon, P. J. System Identification of Submarine Hydrodynamic Coefficients from Simple Full Scale Trials, B.S. United States Coast Guard Academy, 1985.

- Eça, L.; Hoekstra, M. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. *Journal of Computational Physics* 2014.
- Etter, R.J. State of the Art - Cavitation Test Facilities and Experimental Methods, Int. Conf. on Prop. Cavit., 2000.
- Farell, C.; Youssef, S. Experiments on Turbulence Management Using Screens and Honeycombs, Project Report No. 338, University of Minnesota, 1992.
- Jiménez, J. The contributions of A. N. Kolmogorov to the theory of turbulence, 2004.
- Kim, S.K. Construction of low-noise large cavitation tunnel, MOERI, 2010.
- Kundu, P. e Cohen, I. M. *Fluid Mechanics*. Elsevier Academic Press, 2004.
- Menter, F. R. Turbulence modelling for turbomachinery. QNET-CFD Network Newsletter, 2003.
- Nedyalkov, I. Design of Contraction, Test Section, and Diffuser for a High-Speed Water Tunnel, 2012.
- Pereira, Mauro César Rodrigues. *A arma submarina*. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 1996.
- Sbragio, R. Relatório LABHIDRO, Perda de carga no modelo 1:10 do túnel de cavitação, 2011.
- Schlichting, H.; K. Gersten. *Boundary Layer Theory*. Springer-Verlag, 2000.
- Silva Freire, A. P.; Ilha, A.; Colaço, M. J. *Coleção Cadernos de Turbulência, Turbulência, Volume 5, Tomo 1*, 2006.
- Song, C.C.S.; Wetzel, J. M. Physical and Mathematical Modeling of the HYKAT, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, Minneapolis, Project Report 282, 1988.
- Techno News, Arrasto tecnológico e social do PROSUB, disponível em janeiro de 2014, <http://www.technonews.com.br/2011/newnaval.php?corpo=conteudonaval.php&tabela=tabram05&pg=1&cod=144> , visualizado em 12/01/2015.
- Weitendorf E.-A. On the History of Propeller Cavitation and Cavitation Tunnels, Hamburg Ship Model Basin, Hamburg, Germany, 2001.
- Wetzel, J.M. Hydrodynamics Considerations for Hydroacoustic Facilities, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, Minneapolis, Technical Paper 374 PTI, 1994.
- Wilcox, D. C., "Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 11, 1988, pp. 1299-1310.

Wosnik, M. Arndt, R. Testing of a 1:6 Scale Physical Model of the Large, Low-Noise Cavitation Tunnel (LOCAT), Project Report 486, St. Anthony Falls Laboratory, 2006.