

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Ney Neves da Silva Neto

**ONDA ESTACIONÁRIA ARTIFICIAL: PROJETO DE UMA
ESTRUTURA HIDRÁULICA PARA A PRÁTICA DO SURFE
UTILIZANDO UM MODELO REDUZIDO**

Porto Alegre
julho 2012

NEY NEVES DA SILVA NETO

**ONDA ESTACIONÁRIA ARTIFICIAL: PROJETO DE UMA
ESTRUTURA HIDRÁULICA PARA A PRÁTICA DO SURFE
UTILIZANDO UM MODELO REDUZIDO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientadora: Edith Beatriz Camaño Schettini

Porto Alegre
julho 2012

NEY NEVES DA SILVA NETO

**ONDA ESTACIONÁRIA ARTIFICIAL: PROJETO DE UMA
ESTRUTURA HIDRÁULICA PARA A PRÁTICA DO SURFE
UTILIZANDO UM MODELO REDUZIDO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2012

Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini
Dra. pelo Institute National Polytechnique de
Greenoble, França
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo Giulian Marques (UFRGS)
Dr. pela Université Laval, Canadá

**Prof.a Edith Beatriz Camaño Schettini
(UFRGS)**
Dra. pelo Institute National Polytechnique de
Greenoble, França

Prof. Alexandre Beluco (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

**Eng.a Alba Valéria Brandão Canellas
(Furnas Centrais Elétricas SA)**
MsC pela UFRJ

Dedico este trabalho a minha família, pais e irmã, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini, orientadora deste trabalho, pela sua dedicação e paciência, sempre disponibilizando tempo e idéias para o desenvolvimento do projeto.

Ao meu amigo Francisco Goulart, que ajudou a construir o modelo e deu diversas idéias para o trabalho.

A professora Carin Maria Schmitt, pelas incansáveis orientações aos meus diversos questionamentos.

Ao diretor da empresa onde trabalho, Paulo Dib, por ter me disponibilizado tempo para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos da praia, Rodrigo e Diogo Angrisani, por estarem comigo nos momentos onde aprendi a gostar do surfe de verdade.

Ao Ismael Sott, por ter me ajudado com alguns materiais que precisei em caráter de urgência.

Aos amigos que me incentivaram e demonstraram um grande interesse no projeto.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desse trabalho.

A mente que se abre a uma nova idéia, jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

RESUMO

O surfe é um esporte totalmente dependente da natureza, pois, para a sua prática, é necessário que o indivíduo aproxime-se da orla marítima e que o mar esteja oferecendo ondas úteis para o seu desenvolvimento. Este trabalho trata sobre o projeto de uma estrutura hidráulica para possibilitar a prática desse esporte sem depender das variações da natureza, para o qual foram utilizados os dados resultantes de um modelo em escala reduzida. O projeto foi baseado numa estrutura já existente, denominada *Flowbarrel Ten*, no qual uma lâmina d'água é projetada numa parede, que foi desenhada para conduzir o escoamento simulando o efeito de uma onda. Primeiramente, o estudo da teoria dos modelos físicos determinou a adoção de uma escala entre modelo e protótipo de 1:20, para que fosse possível reproduzir, no modelo físico, o movimento da água desejado no protótipo da forma mais fidedigna possível. Do mesmo modo, a literatura sobre sistemas de recalque e condutos forçados possibilitou o conhecimento das diferentes variáveis envolvidas no fluxo da água, e quais os dados coletados no modelo que seriam mais importantes para o projeto em escala real, bem como a forma que eles deveriam ser manipulados. Fez-se um esboço do projeto do modelo reduzido para definição dos seus principais componentes, necessários para o cálculo das perdas de carga e definição das bombas de recalque. Do projeto no qual o trabalho baseou-se, foi utilizado o valor da vazão máxima e o desenho da parede geradora da onda, que foi alvo de um projeto específico, da mesma forma que o difusor, responsável por garantir a uniformidade do escoamento. Definidos os materiais a serem empregados, passou-se a etapa da construção do modelo, alterando-se o esboço inicial, em parte, em função das características das peças empregadas. Com o modelo semi pronto, foram realizados testes para adequar o desenho da parede geradora da onda, para que ela conduzisse o escoamento apresentando o formato de onda desejado. Foram definidos os processos para a transposição da escala entre o modelo e o protótipo, utilizando as leis de semelhança pesquisadas, para a posterior execução do projeto do protótipo em escala real, fornecendo diversos dados para a sua aplicação prática. Por fim, foram feitas considerações sobre o trabalho desenvolvido.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Surfista em pé na prancha deslizando sobre uma onda	15
Figura 2 – Sequência das etapas da pesquisa	19
Figura 3 – Linha de energia entre dois pontos de uma tubulação	32
Figura 4 – Conduto em série e conduto equivalente	36
Figura 5 – Conduto em paralelo e conduto equivalente	37
Figura 6 – Sistema de recalque e seus elementos	40
Figura 7 – Tabela de dados e a respectiva curva característica	41
Figura 8 – Corte de uma bomba centrífuga radial	42
Figura 9 – Rotores das bombas de fluxo radial, misto e axial	43
Figura 10 – Curva característica de uma bomba	45
Figura 11 – Gráfico vazão x altura manométrica para determinação de modelos de bombas utilizáveis em instalações de recalque	46
Figura 12 – Tabelas de dados e as respectivas curvas características, determinando o ponto de operação do sistema	47
Figura 13 – Onda artificial <i>Flowbarrel Ten</i>	50
Figura 14 – Plataforma do projeto <i>Flowbarrel Ten</i>	52
Figura 15 – Plataforma do projeto em vista superior e corte com medidas indicadas	52
Figura 16 – Esboço da composição do modelo	54
Figura 17 – Esboço do modelo em vista superior	55
Figura 18 – Projeto do difusor e bocal (escala em cm)	58
Figura 19 – Posição aproximada dos cortes transversais na parede	59
Figura 20 – Cortes um ao quatro do desenho da parede (escala em cm)	60
Figura 21 – Cortes cinco ao oito do desenho da parede (escala em cm)	60
Figura 22 – Cortes nove ao onze do desenho da parede (escala em cm)	61
Figura 23 – Pés de borracha	62
Figura 24 – Tábua de madeira com os pés fixados	62
Figura 25 – Disposição das três bombas	63
Figura 26 – Difusor semi pronto recebendo acabamento em esmalte sintético	64
Figura 27 – Parede geradora da onda moldada em parafina	65
Figura 28 – Modelo reduzido com todos os seus componentes	66
Figura 29 – Modelo reduzido em vista lateral	67
Figura 30 – Modelo reduzido no detalhe da mesa	67
Figura 31 – Vista em planta indicando o sentido da declividade da mesa	68

Figura 32 – Modelo da onda estacionária artificial em funcionamento	69
Figura 33 – Projeto do difusor e do bocal em escala real (escala em cm)	73
Figura 34 – Cortes um ao cinco do desenho final da parede (escala em m)	74
Figura 35 – Cortes cinco ao oito do desenho final da parede (escala em m)	74
Figura 36 – Cortes nove ao onze do desenho final da parede (escala em m)	75
Figura 37 – Projeto da estrutura hidráulica em planta baixa (escala em m)	76
Figura 38 – Projeto da estrutura hidráulica em corte AA' (escala em m)	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de K	35
Tabela 2 – Cálculo das vazões resultantes para diferentes escalas entre modelo e protótipo	51
Tabela 3 – Dimensões da plataforma do modelo e do protótipo	53
Tabela 4 – Vazão e largura do bocal fracionadas	54
Tabela 5 – Peças e suas quantidades no modelo	55
Tabela 6 – Singularidades e seus valores para a configuração do modelo escolhida	56
Tabela 7 – Cálculo da altura manométrica para três diâmetros diferentes no modelo	57
Tabela 8 – Cálculo da vazão e velocidade do escoamento	70
Tabela 9 – Cálculo da altura manométrica para três diâmetros diferentes no protótipo ..	72

LISTA DE SÍMBOLOS

π – pi

S – distância percorrida (m)

S_o – posição inicial (m)

V_o – velocidade inicial (m/s)

T – tempo (s)

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

M – massa (kg)

F – força (N)

L – comprimento (m)

θ – temperatura ($^{\circ}C$)

Fr – número de Froude

Re – número de Reynolds

Eu – número de Euler

v – velocidade (m/s)

ρ – massa específica (kg/m^3)

μ – viscosidade dinâmica (kg/m.s)

Δp – diferença de pressão (N/m^2)

h_f – perda de carga (m)

p – pressão (N/m^2)

γ – peso específico (N/m^3)

Z – Cota (m)

Δh – perda de carga total (m)

$\Delta h'$ – perda de carga contínua (m)

$\Delta h''$ – perda de carga localizada (m)

f – coeficiente de perda de carga

U – velocidade média (m/s)

D – diâmetro interno (m)

J – perda de carga unitária (m)

K – coeficiente de singularidade

Δh_e – perda de carga equivalente (m)

Q – vazão (m³/s)

Q_e – vazão equivalente (m³/s)

H_m – altura manométrica (m)

P – potência (cv)

η – rendimento global

η_b – rendimento da bomba

η_m – rendimento do motor

λ_Q – razão entre a vazão do modelo e a vazão do protótipo

λ_l – razão entre uma dimensão no modelo e no protótipo

V – tensão elétrica (volt)

i – corrente elétrica (ampére)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	17
2.2.1 Objetivo Principal	17
2.2.2 Objetivos Secundários	17
2.3 PRESSUPOSTO	18
2.4 PREMISA	18
2.5 DELIMITAÇÕES	18
2.6 LIMITAÇÕES	18
2.7 DELINEAMENTO	18
2.7.1 Pesquisa Bibliográfica	20
2.7.2 Desenvolvimento do Projeto do Modelo Reduzido	20
2.7.3 Construção do Modelo Reduzido	20
2.7.4 Ajustes no Modelo Reduzido	20
2.7.5 Levantamento dos Dados do Modelo Reduzido	20
2.7.6 Análise dos Dados Obtidos	21
2.7.7 Desenvolvimento do Projeto do Protótipo em Escala Real, descrevendo-se todas as etapas do processo	21
2.7.8 Considerações Finais	21
3 CONCEITOS DE SEMELHANÇA E DE MECÂNICA DOS FLUIDOS	22
3.1 TEORIA DOS MODELOS FÍSICOS	22
3.1.1 Análise Dimensional	23
3.1.1.1 Princípio da Homogeneidade Dimensional	23
3.1.1.2 Teorema π de Buckingham	24
3.1.2 Números Adimensionais Importantes na Mecânica dos Fluidos	25
3.1.3 Teoria da Semelhança	27
3.1.3.1 Semelhança Geométrica	27
3.1.3.2 Semelhança Cinemática	27
3.1.3.3 Semelhança Dinâmica	28
3.1.3.3.1 <i>Definição</i>	28
3.1.3.3.2 <i>Semelhança Dinâmica em escoamentos em Canais Abertos</i>	28
3.1.3.3.3 <i>Semelhança Dinâmica em escoamentos em Conduitos Forçados</i>	28

3.1.3.4 Semelhança Incompleta	29
3.1.4 Tipos de Modelos	30
3.1.4.1 Verdadeiros	30
3.1.4.2 Adequados	30
3.1.4.3 Distorcidos	31
3.2 ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS	31
3.2.1 Perda de Carga	31
3.2.1.1 Perda de Carga Contínua	33
3.2.1.2 Perda de Carga Localizada	34
3.2.2 Condutos Equivalentes	35
3.2.2.1 Associação de Condutos em Série	36
3.2.2.2 Associação de Condutos em Paralelo	37
3.3 SISTEMAS DE RECALQUE	38
3.3.1 Elementos Típicos	38
3.3.2 Curva Característica de um Sistema de Recalque	39
3.3.3 Bombas Hidráulicas	41
3.3.3.1 Bombas Dinâmicas	41
3.3.3.2 Potência	43
3.3.3.3 Curva Característica de uma Bomba Hidráulica	43
3.3.3.4 Escolha da Bomba e Ponto de Operação	44
3.4 ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS	38
3.4.1 Número de Froude	38
3.4.2 Regimes de escoamento	39
4 MODELO EM ESCALA REDUZIDA	47
4.1 PROJETO DO MODELO REDUZIDO	47
4.1.1 Definição da escala	47
4.1.2 Composição do Modelo	49
4.1.2.1 Bombas de Recalque	52
4.1.2.2 Difusor e Bocal de Saída de Água	53
4.1.2.3 Parede Geradora da Onda	55
4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO REDUZIDO	57
4.3 TESTES E RESULTADOS DO MODELO	64
5 PROTÓTIPO DE UMA ONDA ESTACIONÁRIA ARTIFICIAL	67
5.1 TRANSPOSIÇÃO DA ESCALA	67
5.2 PROJETO DO PROTÓTIPO	68

5.2.1 Bombas e Tubulações	68
5.2.2 Difusor	69
5.2.3 Parede Geradora da Onda	70
5.2.4 Planta Geral e Corte	72
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

O surfe é um esporte amplamente difundido e praticado no Brasil. No País, existe uma grande diversidade de praias que costumam oferecer ótimas condições para sua prática. O esporte consiste, basicamente, no deslizamento de uma prancha sobre as ondas do mar, na qual o praticante encontra-se em pé ou deitado (figura 1). O tipo de prancha utilizada, variável em forma e tamanho, depende das características da onda e do surfista. Também é considerado, por muitas pessoas, muito mais do que simplesmente uma modalidade esportiva. Além de promover a interação do ser humano com a natureza, é um estilo de vida, influenciando no modo de vestir e agir. É um esporte de muita dificuldade, exigindo muita dedicação dos seus praticantes.

Figura 1 – Surfista em pé na prancha deslizando sobre uma onda



(fonte: ANDRADE, 2011)

Entretanto, o surfe praticado nos mares é um esporte totalmente dependente de variáveis ambientais, que têm muito pouco ou nenhum controle antrópico. As condições de ondas

oferecidas por cada praia não são constantes, podendo haver grandes mudanças em curtos intervalos de tempo (dias ou até mesmo horas). O relevo, a maré, a direção e intensidade do vento são algumas dessas variáveis que, em conjunto, determinam a condição das ondas em um determinado local. O acesso à praia é outro fator determinante para a prática do esporte.

Assim, é de interesse da comunidade de surfistas que haja um projeto capaz de reproduzir artificialmente o movimento das ondas consideradas boas para as diferentes modalidades de prática do surfe. Ondas pequenas, grandes, rápidas ou compridas poderão ser criadas, buscando um modelo que fique o mais próximo da realidade. Desse modo, busca-se facilitar o acesso ao esporte, para que todos tenham condições de surfar a qualquer momento e mesmo em localidades que não se situam na orla marítima, não ficando na dependência de fatores que são muito inconstantes e difíceis de serem previstos. Desta forma, neste trabalho buscar-se-á desenvolver um projeto de uma estrutura hidráulica para a prática do surfe, baseada num projeto já existente cujo nome é *Flowbarrel Ten* (WAVE LOCH INC, 2011). Para isso, será utilizado um modelo em escala reduzida, para que os custos sejam compatíveis com essa pesquisa e assim, empregando os conceitos de semelhança, seja possível aplicar os dados obtidos para o projeto de tamanho real.

Após a presente introdução, o segundo capítulo aborda as diretrizes da pesquisa, nas quais foram definidas a questão de pesquisa, objetivos, pressuposto, premissa, delimitações, limitações e o delineamento do trabalho. O terceiro capítulo tratou sobre o embasamento teórico que ofereceu o suporte para o desenvolvimento do trabalho, falando sobre as leis de semelhança para o estudo do modelo e da dinâmica dos diferentes tipos de escoamento dos fluidos. O quarto capítulo teve o título de modelo em escala reduzida, no qual foi apresentado o projeto do modelo, os passos de sua construção e os resultados obtidos com esse experimento. O quinto capítulo abordou a transposição da escala e o projeto da estrutura hidráulica para a prática do surfe, a partir dos resultados do modelo ensaiado. E o sexto capítulo, por fim, trouxe as considerações finais sobre o projeto, ressaltando os pontos mais importantes do trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: como aplicar os dados obtidos a partir da criação de um modelo reduzido para o desenvolvimento do projeto de uma estrutura hidráulica para a prática do surfe?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é a descrição do desenvolvimento de um projeto de uma estrutura hidráulica para a prática do surfe utilizando dados obtidos a partir de um modelo reduzido.

2.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) estabelecimento das leis de semelhança para o estudo em função dos parâmetros e variáveis do protótipo e da escala geométrica escolhida;
- b) projeto e dimensionamento do modelo reduzido.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que é possível o desenvolvimento de um projeto de uma estrutura hidráulica para a prática do surfe utilizando os dados obtidos de um modelo reduzido.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que a utilização de modelos reduzidos é uma solução usual para o desenvolvimento de projetos de estruturas hidráulicas.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao projeto de uma onda estacionária artificial unicamente para a prática do surfe.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) por ser impossível o teste do modelo para a prática do surfe na escala reduzida, este foi considerado pronto quando visualmente apresentou a formação necessária para a referida prática;
- b) por questões de tempo e custo, a superfície na qual a água escoava, em forma de lâmina, é rígida, tanto no modelo como no projeto, mesmo considerando que a queda de um surfista em tal superfície pode ocasionar lesões.

2.7 DELINEAMENTO

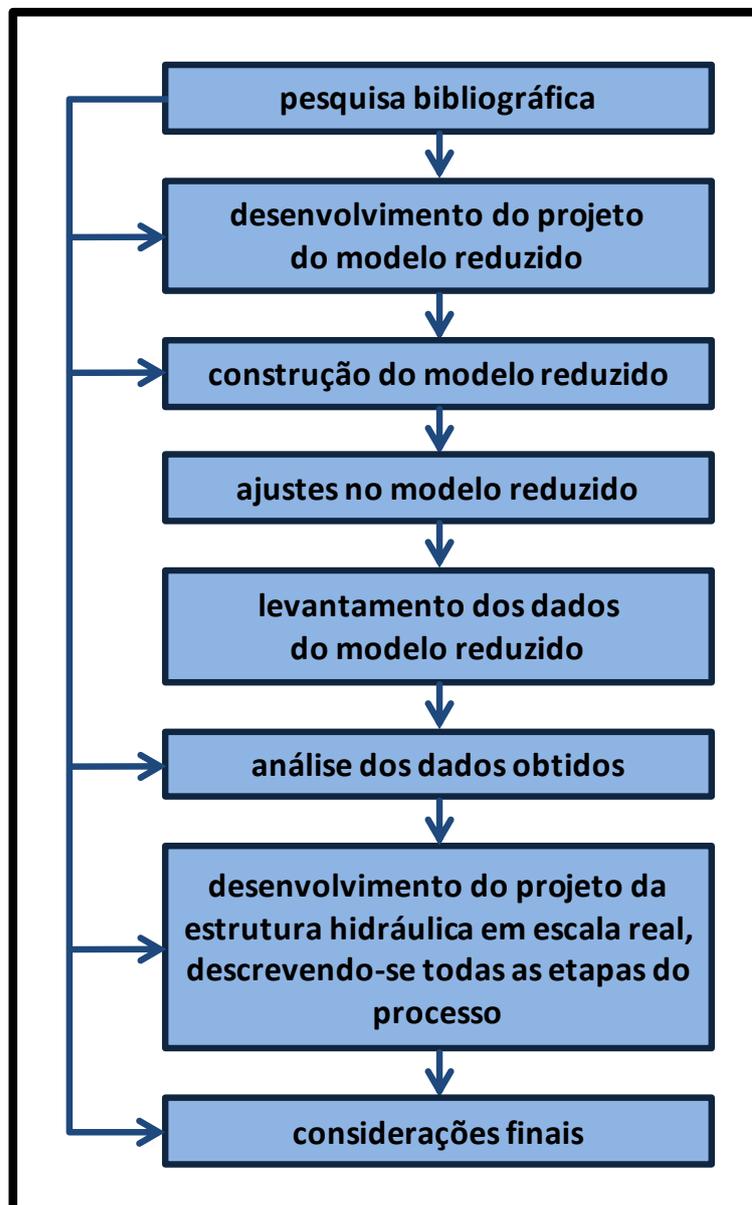
O trabalho foi realizado através das etapas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) desenvolvimento do projeto do modelo reduzido;
- c) construção do modelo reduzido;
- d) ajustes no modelo reduzido;

- e) levantamento dos dados do modelo reduzido;
- f) análise dos dados obtidos;
- g) desenvolvimento do projeto da estrutura hidráulica em escala real, descrevendo-se todas as etapas do processo;
- h) considerações finais.

A figura 2 apresenta a sequência das etapas e a descrição de cada uma delas está nos próximos itens.

Figura 2 – Sequência das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

2.7.1 Pesquisa Bibliográfica

Inicialmente, a pesquisa bibliográfica foi realizada buscando o estudo das leis de semelhança para a definição de uma escala para o modelo reduzido. Essas leis foram aprofundadas, sendo a base de todo o projeto, destacando como ponto fundamental a teoria dos modelos físicos. Paralelamente, foi necessário um estudo aprofundado das leis que regem o escoamento dos fluidos em condutos forçados, bem como a aplicação de bombas hidráulicas em sistemas de recalque. É importante salientar que a pesquisa bibliográfica continuou durante todo o projeto, dando um embasamento teórico para o desenvolvimento de cada etapa.

2.7.2 Desenvolvimento do Projeto do Modelo Reduzido

Para o desenvolvimento do projeto do modelo reduzido, os principais pontos considerados foram o custo dos equipamentos e o espaço físico do local da instalação (cobertura de uma residência no centro de Porto Alegre).

2.7.3 Construção do Modelo Reduzido

A construção do modelo reduzido resumiu-se à execução do projeto previamente desenvolvido, que contou com o auxílio constante da orientadora.

2.7.4 Ajustes no Modelo Reduzido

Após a construção do modelo reduzido, foram necessários alguns ajustes no desenho da geometria da estrutura geradora da onda, adequando-a para que o projeto apresentasse o formato esperado.

2.7.5 Levantamento dos Dados do Modelo Reduzido

Com o modelo reduzido pronto, foram coletados os dados referentes às diferentes vazões testadas e seus resultados.

2.7.6 Análise dos Dados Obtidos

Foi feita uma análise dos dados obtidos para a aplicação das leis de semelhança estabelecidas para o projeto.

2.7.7 Desenvolvimento do Projeto da Estrutura Hidráulica em Escala Real, descrevendo-se todas as etapas do processo

De posse de todas as informações necessárias, foi possível o desenvolvimento do projeto da estrutura hidráulica. Foram feitas algumas alterações em relação ao projeto do modelo reduzido, no qual se desconsiderou as restrições de equipamentos e espaço físico, adequando seus resultados para obter, no projeto da estrutura hidráulica, a mesma formação de onda observada no modelo reduzido.

2.7.8 Considerações Finais

Por fim, foram feitas considerações acerca do projeto desenvolvido.

3 CONCEITOS DE SEMELHANÇA E DE MECÂNICA DOS FLUIDOS

A mecânica dos fluidos abrange uma grande quantidade de conteúdos, dentre os quais está presente a dinâmica da formação e o desenvolvimento de ondas artificiais. Elas podem ser criadas de diversas formas, de onde se destacam três diferentes tipos: ondas geradas por recifes e bancadas artificiais, que são construídos na orla marítima e permitem a formação de uma onda mais extensa e mais adequada para a prática do surfe do que as ondas formadas naturalmente; ondas feitas em grandes piscinas, na qual é gerada uma perturbação através da abertura de comportas com o nível d'água mais alto ou pela movimentação de uma grande pá, formando a ondulação que se desenvolve e quebra com a redução da profundidade da piscina; e as ondas estacionárias, nas quais um escoamento constante é conduzido por uma estrutura fixa e côncava. Este último caso é objeto do presente trabalho, e será detalhado posteriormente.

Assim, neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos de semelhança e de mecânica dos fluidos, necessários para o entendimento da dinâmica das ondas e o desenvolvimento do projeto da estrutura hidráulica para a prática do surfe.

3.1 TEORIA DOS MODELOS FÍSICOS

Em diversas situações na mecânica dos fluidos, bem como em muitas áreas da Engenharia, verifica-se a necessidade de se fazer experimentos manipulando objetos muito grandes, tais como estádios de futebol e navios de grande porte, utilizando recursos baixos se comparados ao custo total de execução do projeto. Para isso, é utilizado o modelo físico, que é menor do que o protótipo, o aparelho real, permitindo a análise de diversas configurações ou condições de escoamento (POTTER et al., 2004, p. 194). Já Motta (1972, p. 83) destaca que a utilização de modelos físicos é necessária quando, em sistemas de verdadeira grandeza, o homem não tem controle sobre as variáveis envolvidas no processo, ou a interação entre um meio natural e uma obra a ser construída no futuro causará efeitos que se deseja medir.

Munson et al. (2004, p. 367) afirmam que, com um modelo adequado, é possível prever as características do protótipo sob determinadas condições, além de prever os efeitos de uma

possível alteração no projeto em escala real. Contudo, o mesmo autor afirma que um cuidado especial deve ser tomado na utilização de modelos, pois, na ocorrência de erros nesse estudo, seja de interpretação dos resultados ou má condução do experimento, as falhas poderão ser detectados apenas quando for analisado o comportamento do protótipo.

Nessa seção, serão apresentados os principais métodos e técnicas para a correta utilização dos modelos físicos, bem como a interpretação e correlação dos dados obtidos a partir desses experimentos.

3.1.1 Análise Dimensional

De acordo com Munson et al. (2004, p. 344), são poucos os problemas envolvendo escoamentos reais que podem ser resolvidos com os métodos analíticos existentes, sendo necessária uma combinação entre métodos analíticos e dados experimentais para que seja possível encontrar soluções para esses problemas. Potter et al. (2004, p. 194) assumem que, sendo muito caros os estudos experimentais, estes devem manter-se em níveis mínimos, indicando a utilização de uma técnica chamada análise dimensional.

Segundo White (c2002, p. 195-196), "[...] a análise dimensional é um método para se reduzir o número e a complexidade das variáveis que afetam um dado fenômeno físico, pela aplicação de uma espécie de técnica de compactação.". O mesmo autor, ainda, afirma que essa redução de variáveis diminui substancialmente o número de experimentos necessários para a coleta de dados, o que resulta num custo experimental muito mais baixo.

Assim, a análise dimensional mostra-se como uma importante ferramenta para a utilização da teoria dos modelos. A maioria dos autores fixa a base da análise dimensional no princípio da homogeneidade dimensional e no teorema π de Buckingham, os quais serão descritos nos próximos itens.

3.1.1.1 Princípio da Homogeneidade Dimensional

Segundo White (c2002, p. 197-198, grifo do autor), a definição do princípio da homogeneidade dimensional é: **"Se uma equação exprime realmente uma relação apropriada entre variáveis em um processo físico, ela será dimensionalmente**

homogênea; isto é, cada um de seus termos aditivos terá a mesma dimensão.". O mesmo autor exemplifica esta definição a partir da fórmula homogênea do deslocamento de um corpo em queda livre (fórmula 1), em que cada um dos quatro termos S , S_0 , v_0T e $gt^2/2$ representa uma distância:

$$S = S_0 + v_0T + gT^2/2 \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

S = distância percorrida (m);

S_0 = posição inicial (m);

v_0 = velocidade inicial (m/s);

T = tempo (s);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

Por fim, White (c2002, p. 198) destaca que "[...] qualquer equação dimensionalmente homogênea pode ser escrita em forma adimensional inteiramente equivalente, que é mais compacta.". O principal método utilizado para a criação de um número menor de grupos adimensionais, a partir de variáveis dimensionais, é o teorema π de Buckingham, o qual será descrito no próximo item.

3.1.1.2 Teorema π de Buckingham

Já foi afirmado que, em um determinado fenômeno sobre o qual se deseja medir o efeito das variáveis independentes sobre uma variável dependente, é possível reduzir a quantidade dessas variáveis para a simplificação do problema. O teorema π de Buckingham explica essa técnica, na qual, de acordo com Munson et al. (2004, p. 346-347), pode-se reduzir um problema de k variáveis dimensionais a um problema de $k-r$ variáveis adimensionais, chamadas de parâmetros ou grupos π , sendo que r representa o número mínimo de dimensões fundamentais para descrever cada uma das variáveis dimensionais. Os mesmos autores afirmam que as dimensões fundamentais mais utilizadas na mecânica dos fluidos são:

- a) M = massa, podendo também ser representada pela força = F ;
- b) L = comprimento;

- c) T = tempo;
- d) θ = temperatura.

A determinação dos parâmetros π é relativamente simples, desde que se conheça bem o fenômeno a ser estudado e todas as variáveis que interferem no problema. Munson et al. (2004, p. 347-348) descrevem o procedimento em alguns passos, que serão sucintamente apresentados a seguir:

- a) passo 1: listar todas as variáveis que têm influência sobre o problema, dependentes e independentes. Não deve aparecer uma variável independente que seja função de outra, por exemplo, o diâmetro e a área de uma esfera;
- b) passo 2: expressar cada uma das variáveis listadas em função das dimensões fundamentais. Para a velocidade, por exemplo, $V = L/T$;
- c) passo 3: determinar o número de grupos π , aplicando diretamente o teorema de Buckingham descrito acima;
- d) passo 4: escolher as variáveis repetitivas, dentre as independentes, de número igual ao número de dimensões de referência;
- e) passo 5: transformar cada uma das variáveis não repetitivas para a forma adimensional, utilizando, para isso, uma combinação de produtos das variáveis repetitivas, elevadas a uma potência a determinar, formando os $k-r$ grupos π ;
- f) passo 6: verificar a adimensionalidade de cada um dos grupos π .

Assim, o grupo π que contém a variável dependente é função dos outros grupos π , como apresenta a equação 1, onde f exprime a relação funcional entre eles:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{k-r}) \quad (\text{equação 1})$$

Ao estudar o método, é comum a dificuldade em escolher as variáveis repetitivas (passo 4). Munson et al. (2004, p. 347-348), ao descreverem os passos citados, não dão uma maior ênfase a esse procedimento. Diferente de Çengel e Cimbala (2007, p. 245), que descrevem alguns pontos a serem considerados nessa escolha, dentre os quais se pode destacar:

- a) as variáveis escolhidas como repetitivas não podem, a partir de uma combinação entre elas, formar um grupo adimensional;
- b) as variáveis repetitivas devem conter todas as dimensões fundamentais determinadas;

- c) variáveis adimensionais não devem ser escolhidas;
- d) nunca escolher duas ou mais variáveis com as mesmas dimensões;
- e) a escolha das variáveis mais simples devem ser priorizadas.

3.1.2 Números Adimensionais Importantes na Mecânica dos Fluidos

Existe um grande número de variáveis que são utilizadas nos problemas típicos de mecânica dos fluidos, como a velocidade e a massa específica. Algumas combinações entre essas variáveis, nos casos específicos que formam grupos adimensionais, são tão frequentemente aproveitadas que receberam nomes específicos. Munson et al. (2004, p. 359) destacam alguns desses grupos importantes, dos quais, para o presente projeto, pode-se destacar os seguintes e suas respectivas fórmulas:

- a) Fr = número de Froude;
- b) Re = número de Reynolds;
- c) Eu = número de Euler.

O número de Froude é utilizado em escoamentos à superfície livre e é expresso pela fórmula 2:

$$Fr = v/(gL)^{1/2} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

Fr = número de Froude;

v = velocidade característica (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

L = comprimento característico (m).

O número de Reynolds é importante na maioria dos problemas de mecânica dos fluidos e é descrito pela fórmula 3:

$$Re = \rho v L / \mu \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

ρ = massa específica (kg/m³);

μ = viscosidade dinâmica (kg/m.s).

O número de Euler é utilizado nos problemas nos quais a pressão é importante e é expresso pela fórmula 4:

$$Eu = \Delta p / \rho v^2 \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

Eu = número de Euler;

Δp = diferença de pressão (N/m²).

3.1.3 Teoria da Semelhança

A teoria da semelhança apresenta alguns critérios necessários para que seja possível utilizar dados obtidos em modelos para o projeto de protótipos. Esses critérios serão definidos nos próximos itens.

3.1.3.1 Semelhança Geométrica

Parece evidente que deva existir uma relação direta de proporcionalidade entre as dimensões do modelo e o protótipo. É justamente isso que define Motta (1972, p. 19, grifo do autor), quando afirma que "**Modelos geometricamente semelhantes** são aqueles cuja geometria é determinada pela redução, segundo um mesmo fator, de todas as características geométricas do protótipo.", ou seja, a razão entre a altura e comprimento de um objeto, por exemplo, deve ser constante no modelo e no protótipo.

3.1.3.2 Semelhança Cinemática

Segundo Fox et al. (2006, p. 300), para que haja semelhança cinemática é necessário que os regimes de escoamento entre o modelo e o protótipo sejam os mesmos, e que haja semelhança geométrica. Çengel e Cimbala (2007, p. 239, grifo dos autores) apresentam uma definição bastante apropriada:

[...] a **similaridade cinemática** [...] significa que a velocidade em determinado ponto de escoamento do modelo deve ser proporcional (por um fator de escala constante) à velocidade no ponto correspondente de escoamento do protótipo. Especificamente, [...] a velocidade nos pontos correspondentes deve ser proporcional em módulo e deve apontar na mesma direção relativa.

3.1.3.3 Semelhança Dinâmica

3.1.3.3.1 Definição

Ao atingir a semelhança dinâmica, é possível utilizar os dados experimentais obtidos no estudo do modelo para o protótipo, seguindo as leis já descritas no capítulo. De acordo com Potter et al. (2004, p. 202), a semelhança dinâmica é atingida quando a razão entre as forças atuantes sobre diferentes pontos do modelo tem os mesmos valores do que a razão entre as forças atuantes nos respectivos pontos do protótipo. Não é difícil compreender que, ao atingir esse critério, automaticamente também se atingirá a semelhança cinemática e a semelhança geométrica. Contudo, tanto Potter et al. (2004) quanto Çengel e Cimbala (2007, p. 239) afirmam que a semelhança cinemática e, conseqüentemente, a semelhança geométrica, são requisitos para a semelhança dinâmica, mas não são suficientes.

3.1.3.3.2 Semelhança Dinâmica em Escoamentos em Canais Abertos

Em escoamento em canais abertos, a gravidade é a força atuante de maior importância. Nesses casos, o número de Froude é o parâmetro adimensional utilizado para se obter semelhança dinâmica entre o modelo e o protótipo, sendo necessário que o número de Froude do protótipo seja igual ao número de Froude do modelo (BAPTISTA et al., 2003, p. 68-69).

Nesse contexto, a relação entre as vazões e os comprimentos para o referido escoamento é expressa pela equação 2:

$$\lambda_Q = \lambda_l^{5/2} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

λ_Q = razão entre a vazão do modelo e a vazão do protótipo;

λ_l = razão entre uma dimensão geométrica no modelo e no protótipo.

3.1.3.3 Semelhança Dinâmica em Escoamentos em Conduitos Forçados

No caso de escoamentos em condutos forçados, onde a força mais importante a ser considerada é a força viscosa, o número de Reynolds entre o modelo e o protótipo é o parâmetro a ser igualado a fim de se obter a semelhança dinâmica (BAPTISTA et al., 2003, p. 70-71). A equação 3 apresenta essa relação:

$$\lambda_Q = \lambda_l \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

λ_Q = razão entre a vazão do modelo e a vazão do protótipo;

λ_l = razão entre uma dimensão geométrica no modelo e no protótipo.

3.1.3.4 Semelhança Incompleta

Em inúmeros casos de experimentos com modelos (a rigor, na maioria das vezes), não é possível obter a semelhança dinâmica entre o modelo e o protótipo. A igualdade entre grupos adimensionais do modelo e do protótipo não pode ser satisfeita, por inúmeros motivos. Çengel e Cimbala (2007, p. 259-260) apresentam dois exemplos práticos, que demonstram de uma forma bem clara casos de semelhança incompleta, e serão descritos nos dois próximos parágrafos.

O primeiro exemplo se refere ao teste em um túnel de vento, no qual se deseja medir o efeito do arrasto do ar sobre uma carreta a uma certa velocidade. Após uma análise do experimento, concluiu-se que o número de Reynolds é o adimensional que contempla as variáveis do escoamento. Assim, procurou-se a velocidade correspondente ao modelo geometricamente

semelhante, que resultou num valor incrivelmente alto, impossível de se recriar experimentalmente. Para solucionar o problema, são enumeradas diversas saídas, das quais pode-se destacar a utilização de um modelo em maior escala, o uso de um fluido diferente ou, em último caso, extrapolar uma curva obtida fazendo-se testes próximos da máxima velocidade possível.

O segundo exemplo trata de situações um pouco mais complexas, em canais abertos, em que serão apresentados dois casos distintos. O primeiro caso trata de reproduzir um canal aberto de grande largura. Se respeitadas as proporções entre profundidade e largura, e, mesmo utilizando uma escala relativamente grande, a profundidade obtida para o modelo deverá ser muito pequena. Nela, os efeitos da tensão superficial do fundo do canal serão importantes, influenciando negativamente nos dados experimentais. Nesse caso, o aumento da profundidade do modelo pode ser uma saída. Entretanto, os dados devem ser tratados de uma forma diferente, pois se adotou uma distorção de escala. O segundo caso trata, após análise de uma determinada situação, da necessidade de se igualar, entre o modelo e o protótipo, tanto o número de Reynolds quanto o número de Froude. O resultado dessa equação obriga a utilizar, para o modelo, um líquido com uma viscosidade diferente do protótipo, o que, na maioria das vezes, não é possível. Nesse caso, utiliza-se os recursos disponíveis, e, graficamente, será novamente necessária a extrapolação da curva de dados experimentais.

Perceptivelmente, a utilização da semelhança incompleta pode ser de extrema dificuldade, mas necessária nos problemas reais, nos quais somente a prática poderá conduzir o pesquisador à obtenção de dados confiáveis.

3.1.4 Tipos de Modelos

Como visto nas seções anteriores, a utilização de modelos, na prática, nem sempre consegue recriar os fenômenos observados no protótipo de forma idêntica. Assim, os tipos de modelos são definidos de acordo com a semelhança observada entre ele e o protótipo, e são descritos a seguir.

3.1.4.1 Verdadeiros

Modelos verdadeiros são aqueles nos quais se consegue obter as condições idênticas às observadas no protótipo. Ou seja, são aqueles em que se consegue atingir a semelhança dinâmica (MOTTA, 1972, p. 96).

3.1.4.2 Adequados

Modelos adequados são aqueles em que não existe semelhança para todas as forças observadas no protótipo. Entretanto, a utilização criteriosa dos dados obtidos pode ser válida, pois as forças que não exprimem a relação de semelhança são desprezíveis ou de menor importância no estudo do protótipo. É o caso da maior parte dos modelos hidráulicos (MOTTA, 1972, p. 96).

3.1.4.3 Distorcidos

Modelos distorcidos são os típicos casos de semelhança incompleta. Nesses casos, a semelhança geométrica entre o modelo e o protótipo não pode ser atingida, conforme exemplo referente aos canais abertos anteriormente citado (MOTTA, 1972, p. 96).

3.2 ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS

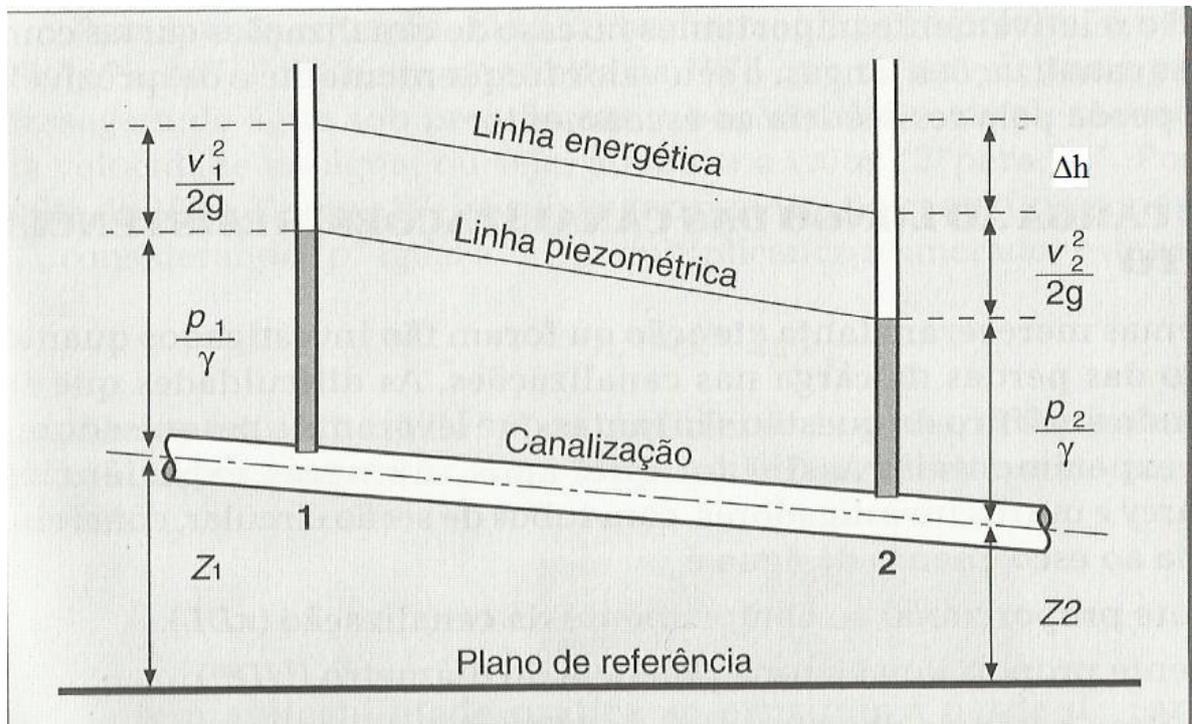
O escoamento em condutos pode ser caracterizado, intuitivamente, pelo escoamento de fluidos em seções transversais fechadas. Conforme Netto et al. (1998, p. 109), "Considera-se forçado o conduto no qual o líquido escoar sob pressão diferente da atmosférica.". Assim, nem todos os escoamentos em condutos são forçados. Se uma parte do líquido está em contato com o ar, e este está sujeito à pressão atmosférica, não se caracteriza um escoamento em conduto forçado. Um exemplo comum de escoamento em condutos forçados é a distribuição de água potável para as residências.

O estudo da dinâmica do escoamento em condutos forçados envolve diversos tópicos, que são essenciais para a sua compreensão e os principais serão descritos nas próximas seções.

3.2.1 Perda de Carga

A perda de carga é um conceito de extrema importância nas obras hidráulicas de Engenharia. A figura 3 exemplifica a declividade da linha de energia num trecho de tubulação, no qual a energia total em cada ponto é a soma das três parcelas energéticas propostas pelo teorema de Bernoulli (energia cinética, pressão e altura relativa), e o símbolo Δh representa a perda de carga. Segundo Netto et al. (1998, p. 114), quando um líquido escoar do ponto 1 até o ponto 2, uma parte da energia que existe em 1 é dissipada na forma de calor, e é definida como perda de carga.

Figura 3 – Linha de energia entre dois pontos de uma tubulação



(fonte: adaptada de NETTO et al., 1998, p. 115)

A equação 4 representa o decaimento energético entre os pontos 1 e 2:

$$U_1^2/2g + p_1/\gamma + Z_1 = U_2^2/2g + p_2/\gamma + Z_2 + \Delta h \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

U = velocidade média na seção (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

p = pressão (N/m^2);

γ = peso específico (N/m^3);

Z = cota (m);

Δh = perda de carga (m).

White (c2002, p. 238) refere-se à perda de carga como perda de carga por atrito. Entretanto, conforme Netto et al. (1998, p. 115), ao referir-se a esse decaimento energético como perda de carga por atrito, não se deve supor que ela seja devida à mesma forma de atrito que ocorre nos sólidos, pois, junto às paredes da tubulação, não há movimento de líquidos (condição de não deslizamento). O mesmo autor, ainda, afirma que, no caso de escoamentos laminares, a perda de carga ocorre, exclusivamente, por causa da viscosidade, enquanto que nos escoamentos turbulentos, é devida à viscosidade e à inércia. Entretanto, para velocidades usuais, é difícil imaginar um escoamento laminar dentro de uma tubulação. Isso só é possível em velocidades muito baixas, quando as perdas são consideravelmente pequenas.

Baptista et al. (2003, p. 83) classificam as perdas de carga como contínuas e localizadas, sendo a perda de carga total a soma das duas parcelas (fórmula 5):

$$\Delta h = \Delta h' + \Delta h'' \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

Δh = perda de carga total (m);

$\Delta h'$ = perda de carga contínua (m);

$\Delta h''$ = perda de carga localizada (m).

3.2.1.1 Perda de Carga Contínua ($\Delta h'$)

A perda de carga contínua é a perda de carga considerada ao longo dos trechos retilíneos da tubulação. É calculada pela Fórmula Universal de Perda de Carga, indicada por Baptista et al. (1998, p. 85), para condutos circulares, pela fórmula 6:

$$\Delta h' = fU^2L/D2g \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

f = coeficiente de perda de carga;

U = velocidade média do escoamento (m/s);

L = comprimento do conduto (m);

D = diâmetro interno do conduto (m);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

Para algumas situações, é recomendável dividir a perda de carga contínua $\Delta h'$ pelo comprimento da tubulação, obtendo-se a inclinação da linha de energia ao longo do conduto. Baptista et al. (2003, p. 84) identificam esse quociente como perda de carga unitária J (fórmula 7):

$$J = \Delta h'/L \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

J = perda de carga unitária (m/m);

$\Delta h'$ = perda de carga contínua (m);

L = comprimento da tubulação (m).

3.2.1.2 Perda de Carga Localizada

De acordo com Netto et al. (1998, p. 120), as perdas de carga localizadas "[...] são denominadas locais, localizadas, acidentais ou singulares, pelo fato de decorrerem especificamente de pontos ou partes bem determinadas da tubulação, [...]". Curvas, junções e válvulas são algumas das partes que causam as perdas localizadas e, conforme Baptista et al. (2003, p. 98), a importância das perdas singulares junto às perdas totais é diretamente proporcional ao número de conexões e aparelhos existentes em relação ao comprimento da tubulação, ou seja, um grande número dessas conexões num comprimento pequeno de tubulação faz com que os valores de perda localizada sejam muito maiores do que o valor de

perda contínua. Da mesma forma, quando existem tubulações de quilômetro de extensão, as perdas localizadas podem ser desconsideradas.

Define-se a perda de carga localizada pela fórmula 8, conforme Netto et al. (1998, p. 121), onde o valor de K, para cada singularidade, é praticamente constante quando o número de Reynolds se encontra acima de 50.000, de acordo com trabalhos experimentais feitos ao longo de muitos anos. Os valores de K são apresentados na tabela 1:

$$\Delta h'' = KU^2/2g \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

$\Delta h''$ = perda de carga localizada (m.c.a.);

K = coeficiente de singularidade;

U = velocidade média na seção (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

Tabela 1 – Valores de K

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15*
Controlador de vazão	2,50	Saída de canalização	1,00
Cotovelo de 90°	0,90	Tê, passagem direta	0,60
Cotovelo de 45°	0,40	Tê, saída de lado	1,30
Crivo	0,75	Tê, saída bilateral	1,80
Curva de 90°	0,40	Válvula de ângulo aberta	5,00
Curva de 45°	0,20	Válvula de gaveta aberta	0,20
Curva de 22,5°	0,10	Válvula borboleta aberta	0,30
Entrada normal em canalização	0,50	Válvula de pé	1,75
Entrada de borda	1,00	Válvula de retenção	2,50
Existência de pequena derivação	0,03	Válvula de globo aberta	10,00
*Com base na velocidade maior (seção menor)		Velocidade	1,00
** Relativa à velocidade na canalização			

(fonte: NETTO et al., 1998, p. 122)

Assim, o total das perdas localizadas entre dois pontos de uma tubulação é igual ao somatório das perdas localizadas em cada uma das singularidades.

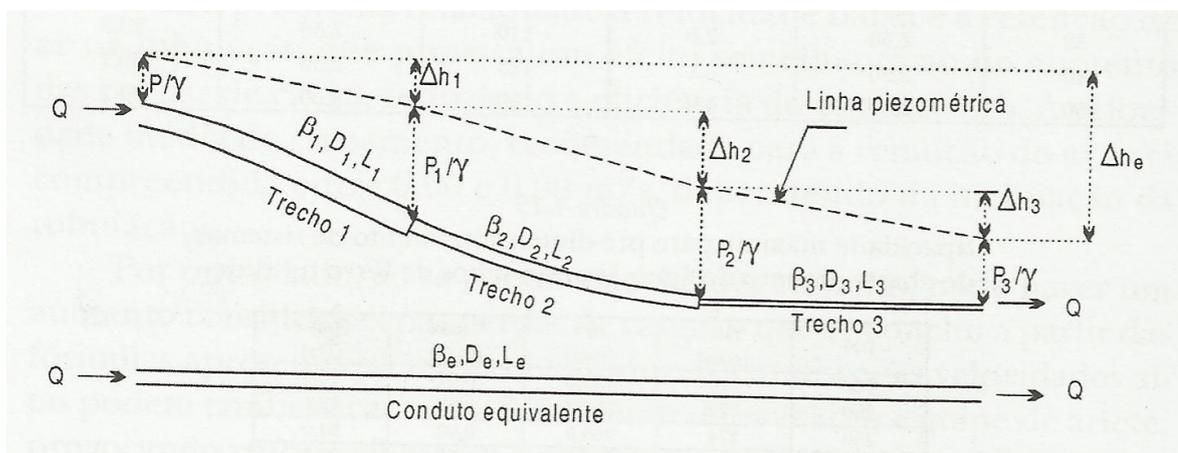
3.2.2 Condutos Equivalentes

O conceito de condutos equivalentes é essencial para a simplificação de cálculos envolvendo condutos interligados, devido à grande quantidade de variáveis existentes. São consideradas associações em paralelo e em série, nas quais condutos com características diferentes podem ser transformados, para efeito de cálculo, em condutos simples. São equivalentes os condutos que transportam a mesma vazão sob a mesma perda de carga (BAPTISTA et al., 2003, p. 107).

3.2.2.1 Associação de Condutos em Série

Netto et al. (1998, p. 345, grifo dos autores) afirmam que "**Tubulações em série** é a terminologia usada para indicar uma sequência de tubos de diferentes diâmetros acoplados entre si, [...]". A figura 4 exemplifica o caso, em que existem três condutos interligados em série, e um conduto equivalente abaixo.

Figura 4 – Condutos em série e conduto equivalente



(fonte: BAPTISTA et al., 2003, p. 108)

Assim, a perda de carga no conduto equivalente é igual a soma das perdas de carga em cada um dos trechos, conforme equação 5:

$$\Delta h_e = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

Δh_e = perda de carga no conduto equivalente;

Δh_1 = perda de carga no trecho 1;

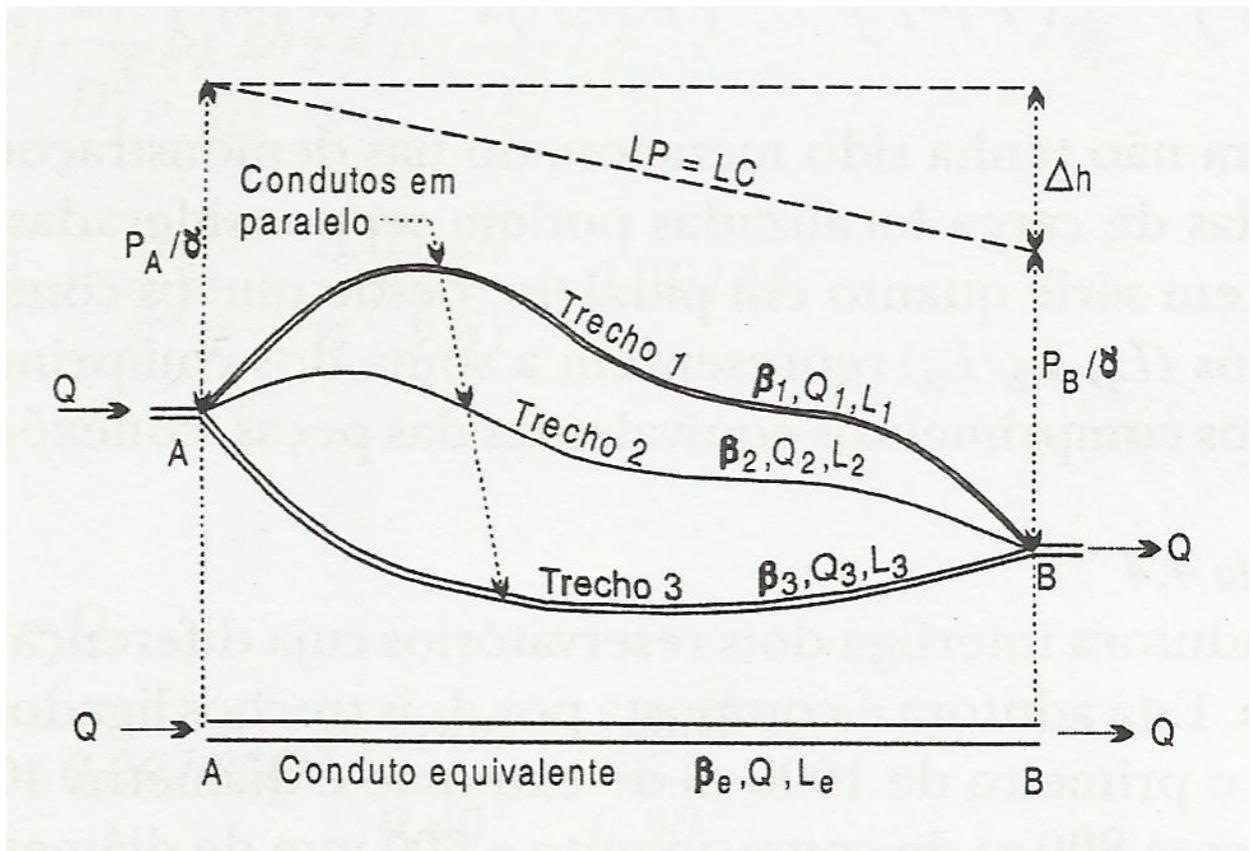
Δh_2 = perda de carga no trecho 2;

Δh_3 = perda de carga no trecho 3.

3.2.2.2 Associação de Condutos em Paralelo

De acordo com Baptista et al. (2003, p. 109-110), são considerados condutos em paralelo aqueles que se ligam em um único ponto à jusante e outro à montante (figura 5).

Figura 5 – Condutos em paralelo e conduto equivalente



(fonte: BAPTISTA et al., 2003, p. 109)

A vazão total divide-se entre os três condutos, de acordo com a equação 6:

$$Q_e = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

Q_e = Vazão no conduto equivalente;

Q_1 = Vazão no trecho 1;

Q_2 = Vazão no trecho 2;

Q_3 = Vazão no trecho 3.

A perda de carga é a mesma para os três trechos (equação 7):

$$\Delta h_e = \Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h_3 \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

Δh_e = perda de carga no conduto equivalente;

Δh_1 = perda de carga no trecho 1;

Δh_2 = perda de carga no trecho 2;

Δh_3 = perda de carga no trecho 3.

Nesse caso, essa equivalência de perda de carga existe por convenção, para facilitar os cálculos, pois, ao analisar o escoamento em cada um dos condutos em paralelo, pode-se concluir que dificilmente essa afirmação pode ser verdadeira. Da mesma forma, o comprimento equivalente pode ser arbitrado, pois não existe restrição para esse parâmetro.

3.3 SISTEMAS DE RECALQUE

A necessidade de conduzir volumes de água através de consideráveis desníveis e distâncias existe desde a antiguidade, visto que os pontos de abastecimento, como rios e lagos, geralmente estão em regiões mais baixas, e os povoados e suas atividades produtivas nem sempre estão perto dessas fontes de água. Essa é a função dos sistemas de recalque, que visam

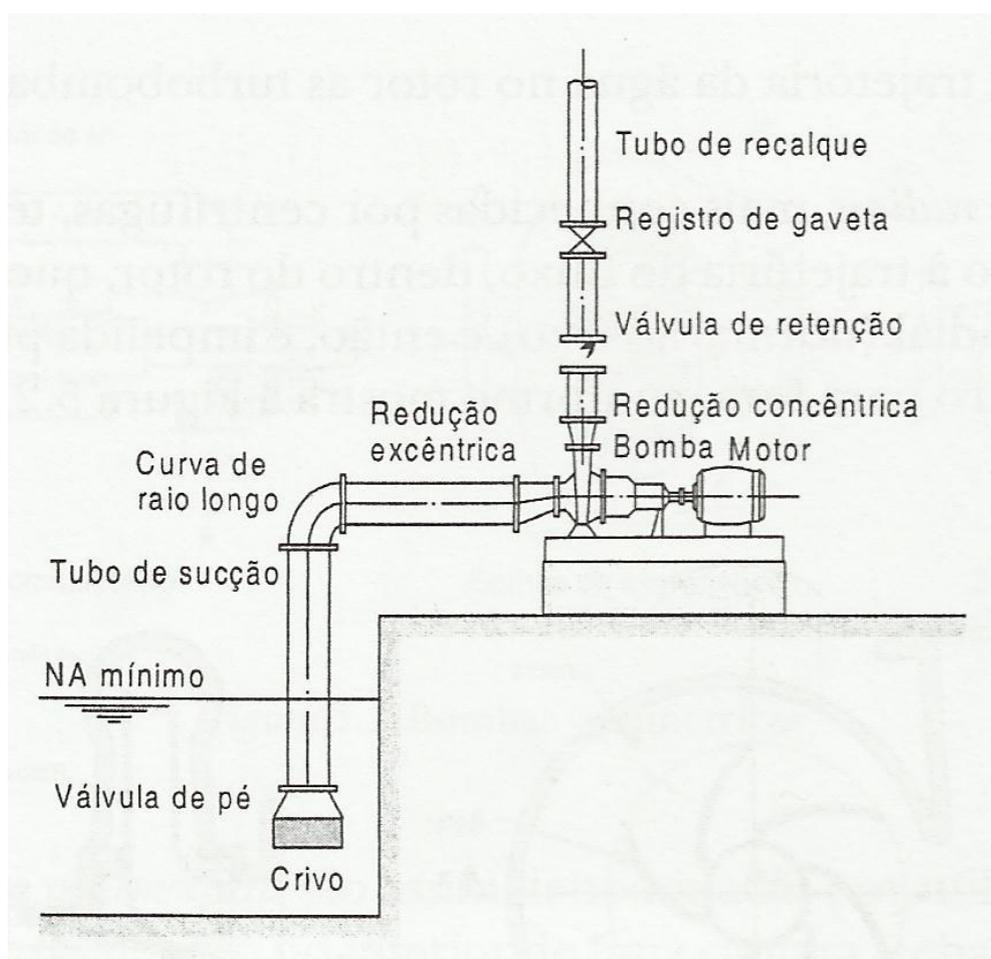
possibilitar o transporte e elevação de fluidos de um ponto a outro (BAPTISTA et al., 2003, p. 145). Assim, nessa seção, serão apresentados os elementos típicos de um sistema de recalque, bem como a definição e determinação da curva característica.

3.3.1 Elementos Típicos

Conforme Baptista et al. (2003, p. 148-149), os principais elementos e suas funções são (figura 6):

- a) crivo, que é uma espécie de grade para impedir a entrada de sólidos mais grosseiros na tubulação;
- b) válvula de pé, que é uma válvula de retenção com a finalidade de impedir que a água saia da tubulação de sucção quando a bomba pára de trabalhar;
- c) redução excêntrica, que une a tubulação de sucção, geralmente de maior diâmetro, com a entrada da bomba, de menor diâmetro, impedindo, assim, o acúmulo de bolhas na seção de entrada da bomba;
- d) motor de acionamento, que tem a função de fornecer energia mecânica à bomba;
- e) bomba, que é o dispositivo que adiciona energia ao escoamento do fluido (será tratada com mais detalhes no próximo capítulo);
- f) válvula de retenção, que tem a finalidade de manter o fluido na tubulação à jusante da bomba, no caso de uma parada do motor, bem como proteger a bomba do retorno do fluido;
- g) registro de gaveta, que visa a manutenção da bomba e o controle da vazão.

Figura 6 – Sistema de recalque e seus elementos



(fonte: BAPTISTA et al., 2003, p. 148)

3.3.2 Curva Característica de um Sistema de Recalque

A curva característica de um sistema de recalque serve para determinar variação da quantidade de energia requerida pelo sistema em função de diferentes vazões (SANTOS, 2007, p. 53). Baptista et al. (2003, p. 150) definem essa energia como altura manométrica e afirma que ela é a soma das parcelas referentes ao desnível geométrico e a perda de carga total (já determinada no item 3.2.1) entre o ponto de captação (1) e o ponto de distribuição (2) de um sistema de recalque, conforme fórmula 9:

$$H_m = (Z_2 - Z_1) + \Delta h_{1-2} \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

H_m = altura manométrica (m);

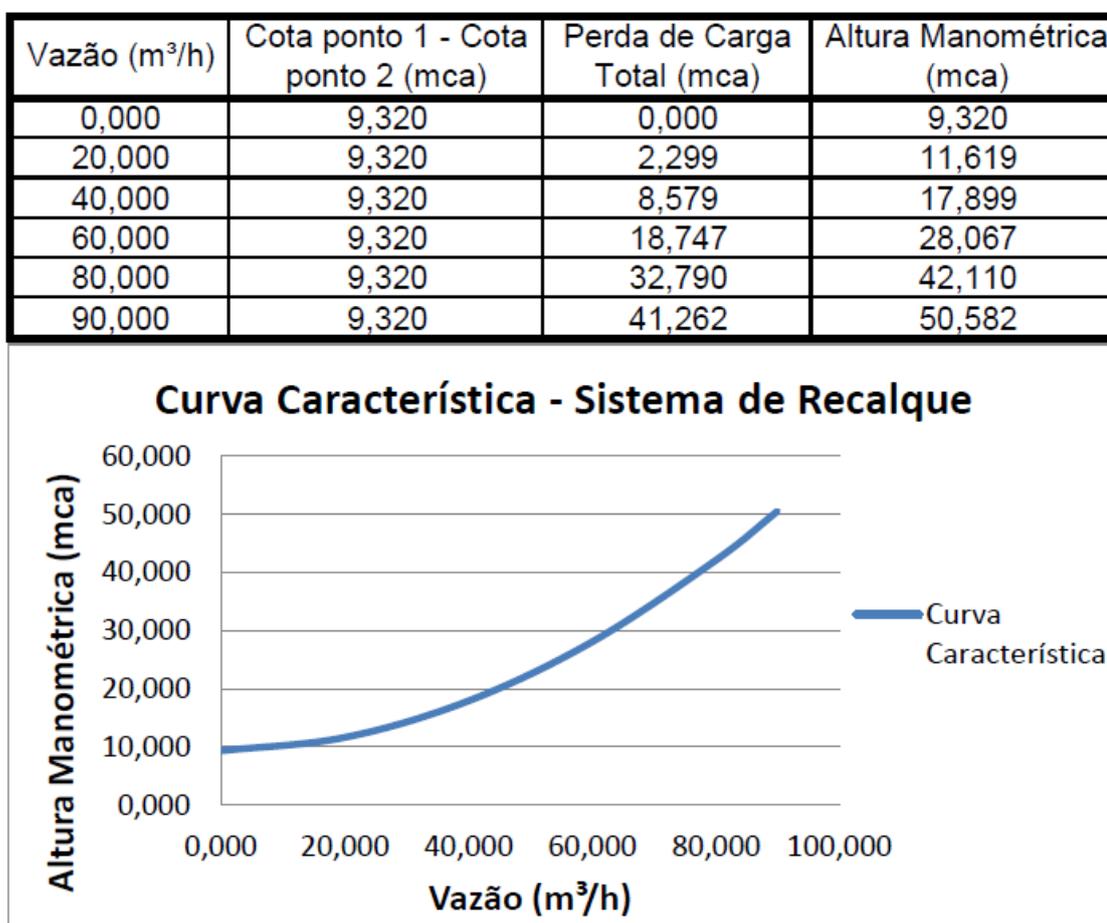
Z_1 = cota do ponto 1 (m);

Z_2 = cota do ponto 2 (m);

$\Delta h_{1,2}$ = perda de carga total entre os pontos 1 e 2 (m).

A figura 7 ilustra um exemplo de determinação da curva característica de um sistema de recalque qualquer, formada por uma tabela de dados e a respectiva curva característica.

Figura 7 – Tabela de dados e a respectiva curva característica



(fonte: elaborado pelo autor)

Para a escolha da bomba adequada à instalação, é necessário determinar o ponto de operação do sistema. Esse procedimento será tratado nos próximos itens.

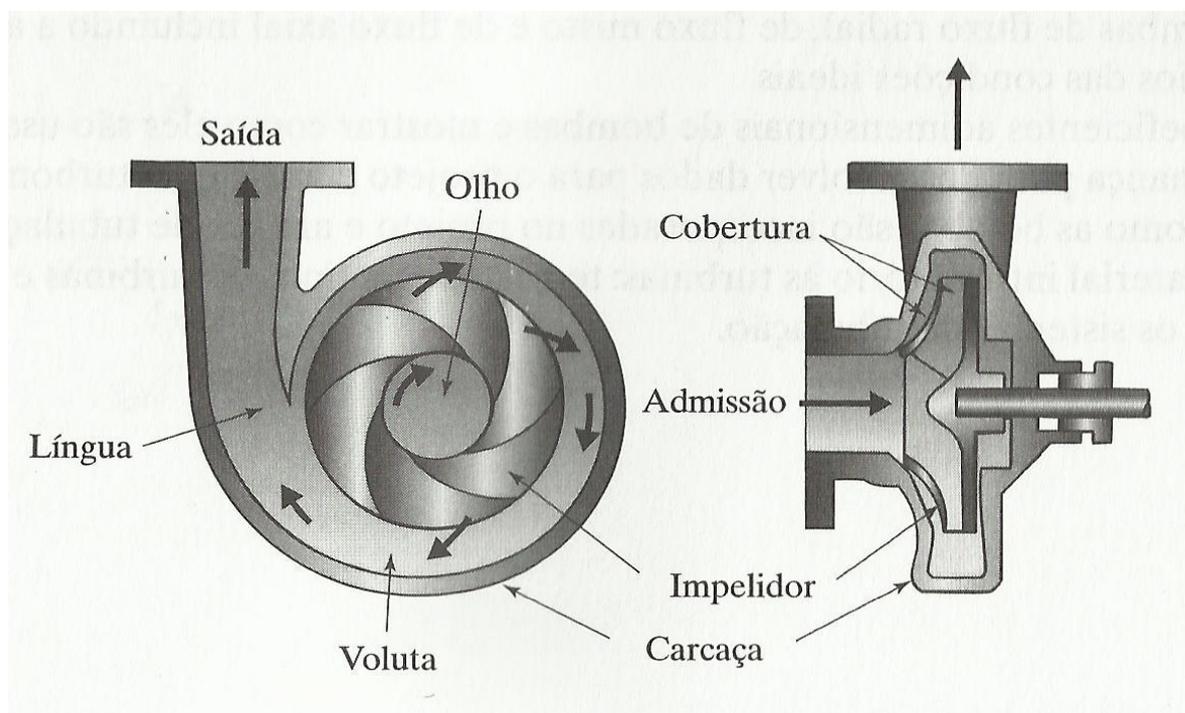
3.3.3 Bombas Hidráulicas

Conforme Santos (2007, p. 27), bombas hidráulicas são máquinas que transformam energia mecânica em energia hidráulica, acionadas por motores elétricos, estacionários, etc. Os principais conceitos relativos a essas máquinas serão vistos a seguir.

3.3.3.1 Bombas Dinâmicas

As bombas dinâmicas, também chamadas de turbobombas, são os tipos de bombas normalmente utilizadas em instalações hidráulicas comuns para o transporte de líquidos. Segundo Potter et al. (2004, p. 478, grifo dos autores), "Uma **turbobomba** consiste em duas partes principais: um **impelidor**¹, que impõe um movimento giratório ao líquido, um tubo **coletor**, ou **carcaça**, que direciona o líquido para a região do impelidor e transporta-o para fora sob uma pressão mais alta.". A figura 8 ilustra o caso de uma bomba dinâmica, mais especificamente o corte de uma bomba centrífuga radial.

Figura 8 – Corte de uma bomba centrífuga radial

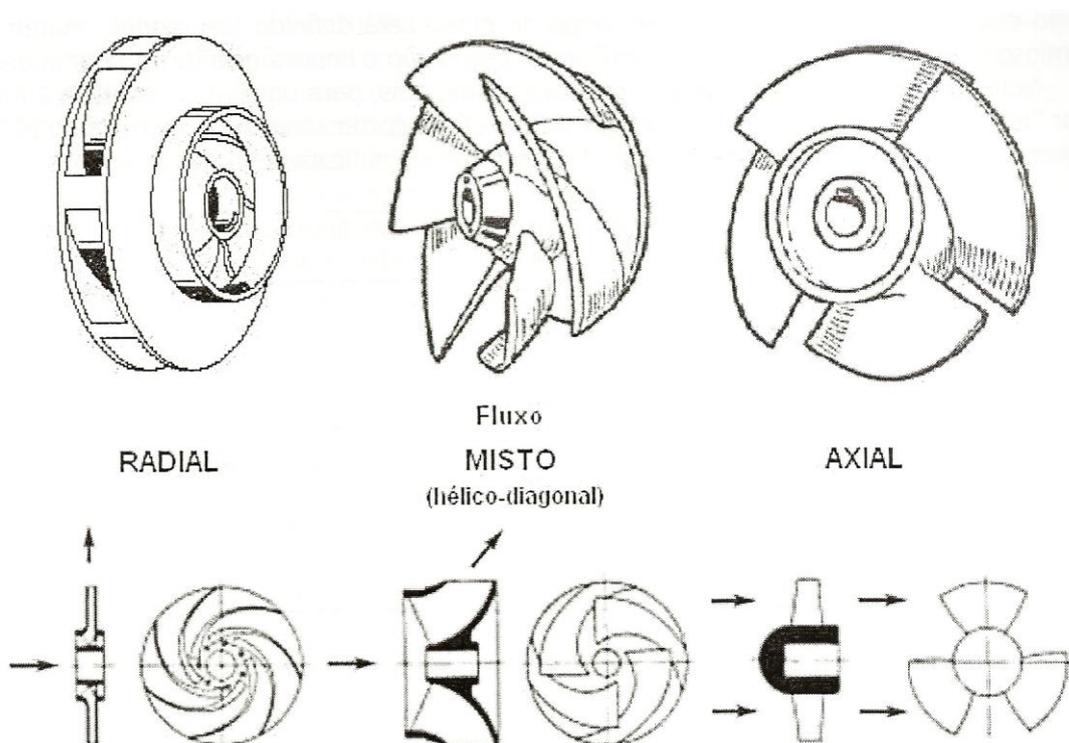


(fonte: POTTER et al., 2004, p. 478)

¹ Designado, pela maioria dos autores, como **rotor**.

Segundo Fox et al. (2006, p. 491), as bombas dinâmicas podem ser classificadas de acordo com o percurso do fluido, podendo ser de fluxo radial, axial ou misto. A figura 9 ilustra os rotores dos três casos.

Figura 9 – Rotores das bombas de fluxo radial, misto e axial



(fonte: SANTOS, 2007, p. 39)

A escolha de um modelo depende da necessidade da instalação hidráulica. Bombas de fluxo radial são preferencialmente utilizadas em sistemas em que a altura manométrica é o fator mais importante. Em contrapartida, bombas de fluxo axial tendem a ser utilizadas em sistemas em que a vazão é mais importante. Em fluxo misto, deve existir um equilíbrio entre a necessidade de alturas manométricas e vazões. Entretanto, nos três casos, uma variável sempre deve ser relacionada à outra (SANTOS, 2007, p. 39-40).

3.3.3.2 Potência

Segundo Netto et al. (1998, p. 270), a potência definida para um conjunto elevatório (bomba-motor) é função das características da instalação (altura manométrica e vazão) e do rendimento da bomba e do motor para essas determinadas características (fórmula 10):

$$P = \gamma Q H_m / 75 \eta \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

P = potência (cv);

γ = peso específico do líquido a ser elevado (N/m^3);

Q = vazão (m^3/s);

H_m = altura manométrica (m);

η = rendimento global do conjunto elevatório.

Ainda segundo Netto et al. (1998), o rendimento global do conjunto elevatório é definido pelo produto do rendimento da bomba e o rendimento do motor (fórmula 11), que devem ser fornecidos pelos respectivos fabricantes como função da vazão e da altura manométrica requeridas (será exemplificado mais adiante):

$$\eta = \eta_b \cdot \eta_m \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

η = rendimento global do conjunto elevatório;

η_b = rendimento da bomba;

η_m = rendimento do motor.

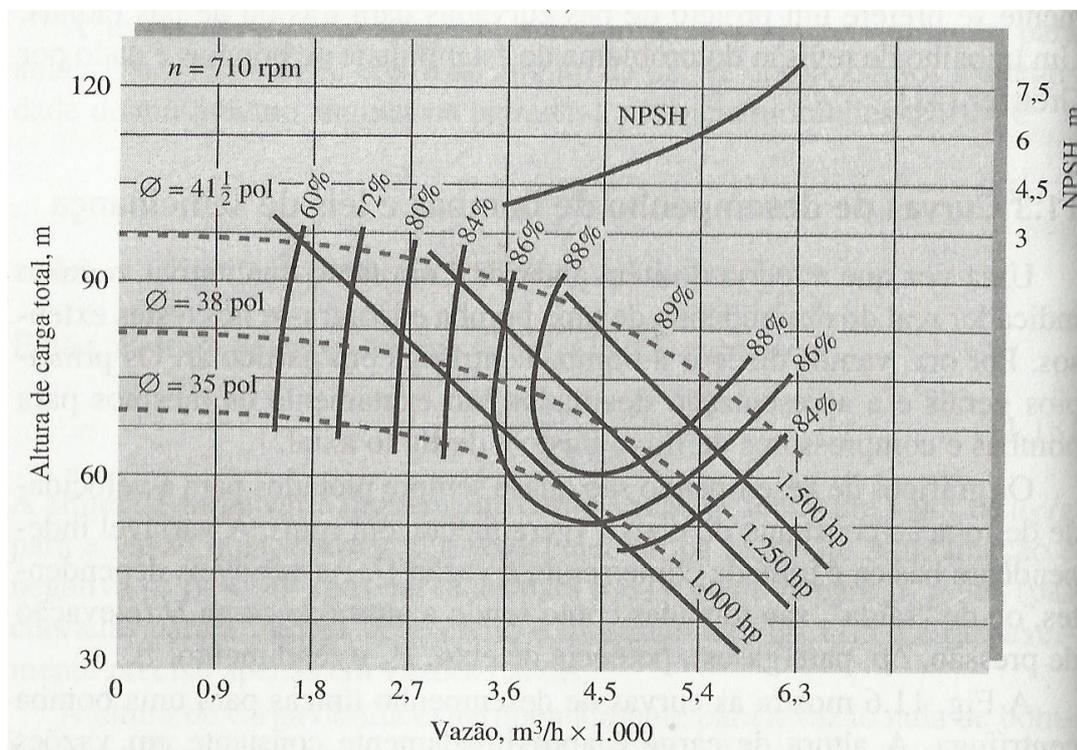
3.3.3.3 Curva Característica de uma Bomba Hidráulica

Da mesma forma que os sistemas de recalque, cada bomba fabricada tem certas características que determinam o seu desempenho em relação às diferentes vazões e alturas manométricas solicitadas. Os fabricantes dessas bombas fornecem a medida do desempenho numa curva característica, que representa a disponibilidade de energia, sendo que, à medida que a vazão aumenta, diminui a altura manométrica que a máquina poderá fornecer (SANTOS, 2007, p. 54).

A figura 10 ilustra o desempenho de uma determinada bomba, na qual cada curva característica (linhas pontilhadas) representa um diâmetro de rotor (para a mesma carcaça). É

informado o rendimento para cada ponto da curva que a bomba trabalhar, bem como uma indicação de potência para cada situação.

Figura 10 – Curva característica de uma bomba



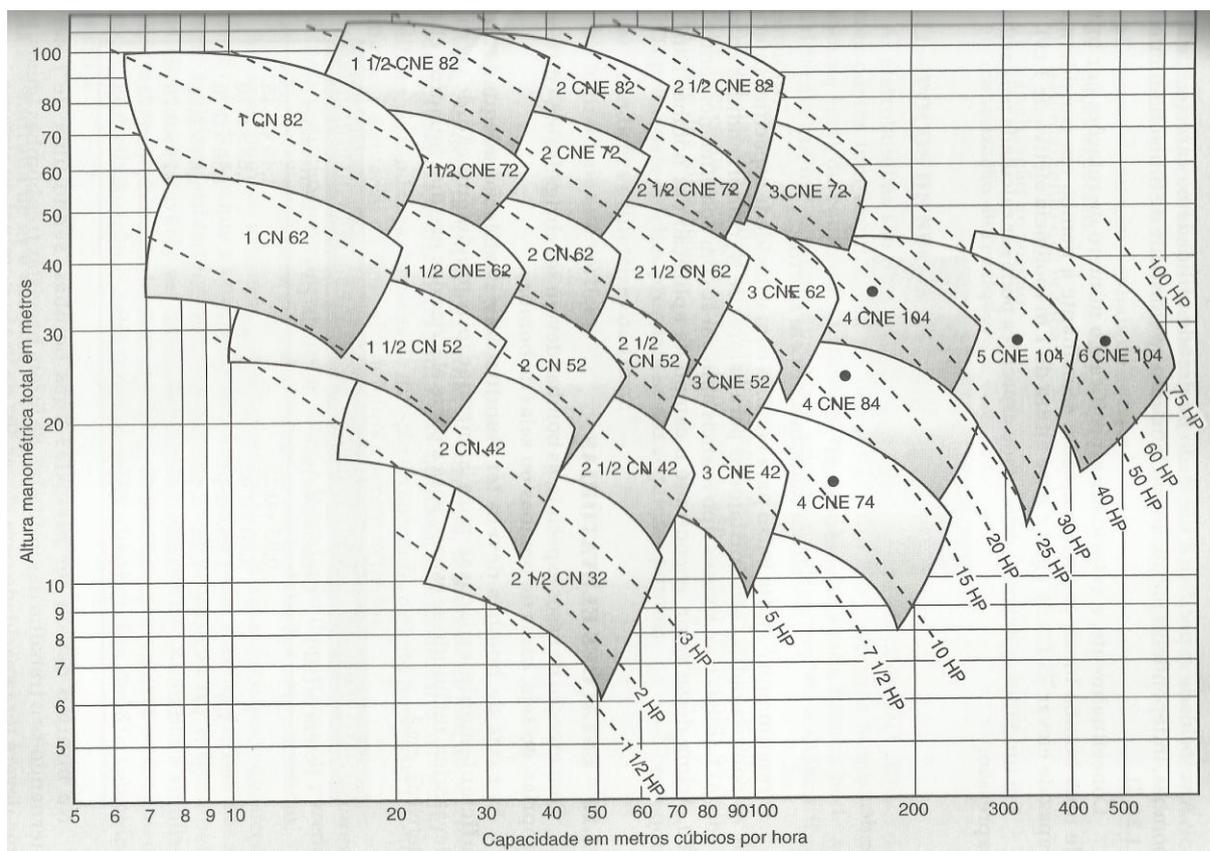
(fonte: WHITE², c2002, p. 500)

3.3.3.4 Escolha da Bomba e Ponto de Operação

Ao definir a vazão e a altura manométrica necessárias para o correto funcionamento de um determinado sistema, é possível apontar algumas bombas que atendam à instalação rapidamente através de gráficos fornecidos pelos fabricantes. Netto et al. (1998, p. 277) apresentam um desses gráficos, no qual deve-se procurar o valor correspondente da vazão requerida no eixo das abscissas, e o valor da altura manométrica no eixo das ordenadas (figura 11).

² Figura cedida para a obra por Ingersoll-Rand Corporation, Cameron Pump Division.

Figura 11 – Gráfico vazão x altura manométrica para determinação de modelos de bombas utilizáveis em instalações de recalque



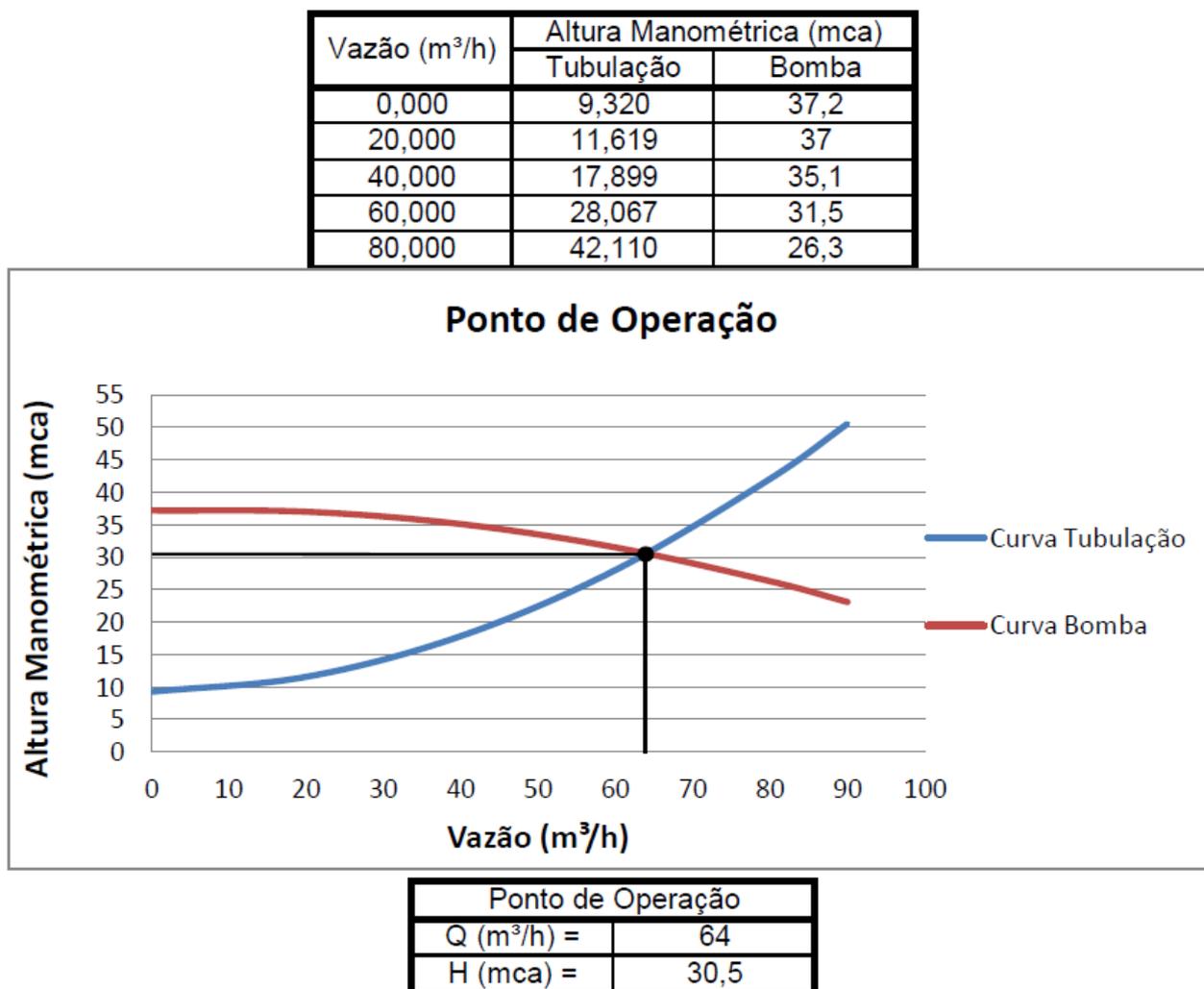
(fonte: NETTO³ et al., 1998, p. 277)

Dentre os modelos apontados por esse método, é necessário determinar qual bomba oferece o maior rendimento, utilizando, para isso, o ponto de operação⁴ da bomba no sistema. Baptista et al. (2003, p. 166), afirmam que "[...] o ponto de operação de uma bomba, num dado sistema, é a interseção da curva característica da bomba com a curva do sistema de tubulação [...]". Assim, para encontrar o ponto de operação, é necessário reproduzir as duas curvas num mesmo gráfico, conforme demonstra o exemplo da figura 12.

³ Figura cedida para a obra por bombas Worthington.

⁴ Também chamado de ponto de funcionamento ou ponto de trabalho.

Figura 12 – Tabelas de dados e as respectivas curvas características, determinando o ponto de operação do sistema



(fonte: elaborado pelo autor)

Deve-se voltar ao gráfico da curva característica de cada uma das bombas, identificar o ponto de operação e obter o respectivo rendimento. Por fim, a bomba de maior rendimento deverá ser escolhida para o sistema.

3.4 ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS

O escoamento em canais abertos é o fenômeno de escoamento que mais ocorre na superfície da Terra. São exemplos naturais as correntes dos rios e a água da chuva escorrendo sobre o solo, e, induzidos pelo homem, as galerias pluviais e drenagens sobre telhados e lajes. A

principal característica que se observa é a presença de uma interface entre a parte superior do líquido e o ar, na qual a pressão é, na maioria das vezes, igual à pressão atmosférica (POTTER et al., 2004, p. 382). Assim, mesmo alguns escoamentos em condutos de seção transversal fechada são considerados escoamentos em canais abertos, nos casos em que existe uma interface entre o líquido e o ar à pressão atmosférica.

Segundo Çengel e Cimbala (2007, p. 596):

Os escoamentos em canal aberto [...] são classificados como permanente ou não permanentes [...]. O escoamento é **permanente** se a profundidade não variar com o tempo em nenhuma posição ao longo do canal (embora ela possa variar de um local para o outro). Caso contrário, o escoamento é **não permanente**.

Os mesmos autores, ainda, afirmam que os canais abertos também podem ser classificados como uniforme ou não uniforme, sendo uniforme quando a profundidade (distância da superfície até a parte inferior do canal, medida verticalmente) não varia ao longo do seu comprimento, e não uniforme quando varia ao longo do seu comprimento. Dentro dos escoamentos não uniformes, Munson et al. (2004, p. 576) colocam que, se a variação da profundidade é brusca, ou seja, há uma grande variação em pequenas distâncias, o escoamento é de variação rápida, caso contrário, o escoamento é de variação lenta.

3.4.1 Número de Froude

De acordo com Potter et al. (2004, p. 384), o escoamento em canal aberto é comandado pelas forças gravitacionais, no qual elas são representadas por um adimensional já visto na seção 3.1.2, denominado número de Froude (fórmula 2).

Baptista et al. (2003, p. 220) descrevem o número de Froude como a relação entre as forças inerciais e gravitacionais que conduzem o escoamento. É fácil entender essa relação simplesmente olhando a fórmula: o numerador é composto pela velocidade, representando a energia do escoamento na direção horizontal (força de inércia), e o denominador é composto pelo produto da aceleração da gravidade e a profundidade do canal, representando a energia acumulada na direção vertical (força gravitacional).

3.4.2 Regimes de Escoamento

Uma análise do número de Froude permite entender e definir o regime de escoamento de um determinado canal, que, segundo Baptista et al. (2003, p. 220), pode ser fluvial, torrencial ou crítico.

O regime fluvial, também frequentemente chamado de subcrítico, representa a preponderância das forças gravitacionais sobre as forças de inércia, onde $Fr < 1$. Nesse escoamento, as perturbações no fluxo do canal propagam-se tanto à jusante quanto à montante. No regime crítico, existe um equilíbrio entre as duas forças, onde $Fr = 1$. E, por fim, no regime torrencial, $Fr > 1$ e as forças de inércia são maiores do que as gravitacionais, onde as perturbações propagam-se apenas para jusante (BAPTISTA et al., 2003, p. 220-221).

4 MODELO REDUZIDO

Neste capítulo serão descritos os procedimentos relativos ao desenvolvimento do projeto do modelo reduzido, desde a sua concepção até a execução do modelo físico.

4.1 PROJETO DO MODELO REDUZIDO

O projeto baseou-se no desenho da onda artificial denominada *Flowbarrel Ten* (figura 13), na qual uma lâmina de água é direcionada para uma parede cujo feitiço faz com que o escoamento assemelhe-se ao formato de uma onda, que é utilizada para a prática do surfe, a uma vazão máxima de 7800 L/s (WAVE LOCH INC, 2011). Essas informações possibilitaram a obtenção de parâmetros e medidas que foram utilizadas para a definição do projeto do modelo reduzido. Entretanto, o projeto inicial sofreu inúmeras alterações devido às características das peças e materiais utilizados, se adequando em função da construção e dos testes realizados, que serão descritos mais adiante.

Figura 13: Onda artificial Flowbarrel Ten



(fonte: FEDBYRONBAY.WORDPRESS.COM, 2010)

4.1.1 Definição da Escala

Por se tratar de um escoamento a céu aberto, a força mais importante a ser avaliada é a gravidade. Assim, para se obter a semelhança dinâmica entre o modelo e o protótipo, o número de Froude foi o parâmetro adimensional utilizado, e, através dele, buscou-se a vazão máxima do modelo em função da vazão máxima do protótipo. Utilizando os dados do projeto *Flowbarrel Ten*, foram analisadas possíveis escalas e suas respectivas vazões (tabela 2).

Tabela 2: Cálculo das vazões resultantes para diferentes escalas entre modelo e protótipo

Escala		Vazão (L/s)
Modelo	Protótipo	
1	1	7800
1	5	139,53
1	10	24,67
1	15	8,95
1	20	4,36
1	25	2,50
1	30	1,58

(fonte: elaborado pelo autor)

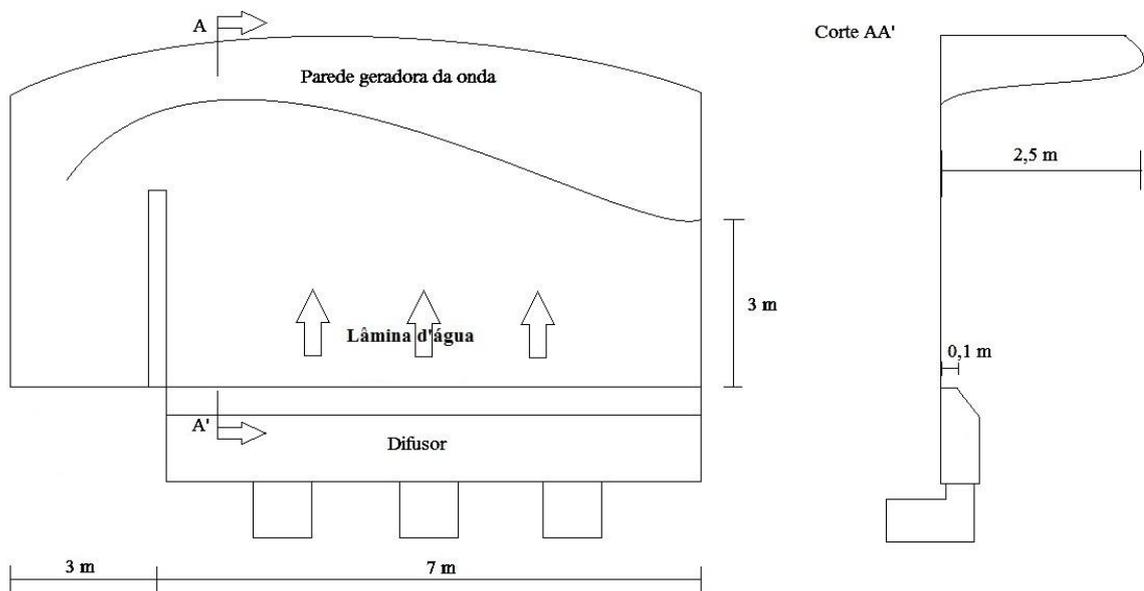
Assim, foi escolhida a escala geométrica de 1:20, para que a diferença entre o modelo e o protótipo não seja muito grande, o que prejudicaria a qualidade do experimento, nem muito pequena, o que geraria a necessidade de bombas mais robustas com um custo bem mais alto.

As dimensões da plataforma onde a água escoava em forma de lâmina no protótipo foram arbitradas, de forma visual, utilizando uma imagem da plataforma do *Flowbarrel Ten* (figura 14), bem como a altura do bocal de saída d'água. Essas dimensões são apresentadas na figura 15.

Figura 14: Plataforma do projeto *Flowbarrel Ten*

(fonte: SHORESCREW.COM, 2010)

Figura 15: Plataforma do projeto em vista superior e corte com medidas indicadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Com essas medidas, criou-se a tabela 3, indicando as dimensões da plataforma do modelo reduzido:

Tabela 3: Dimensões da plataforma do modelo e do protótipo

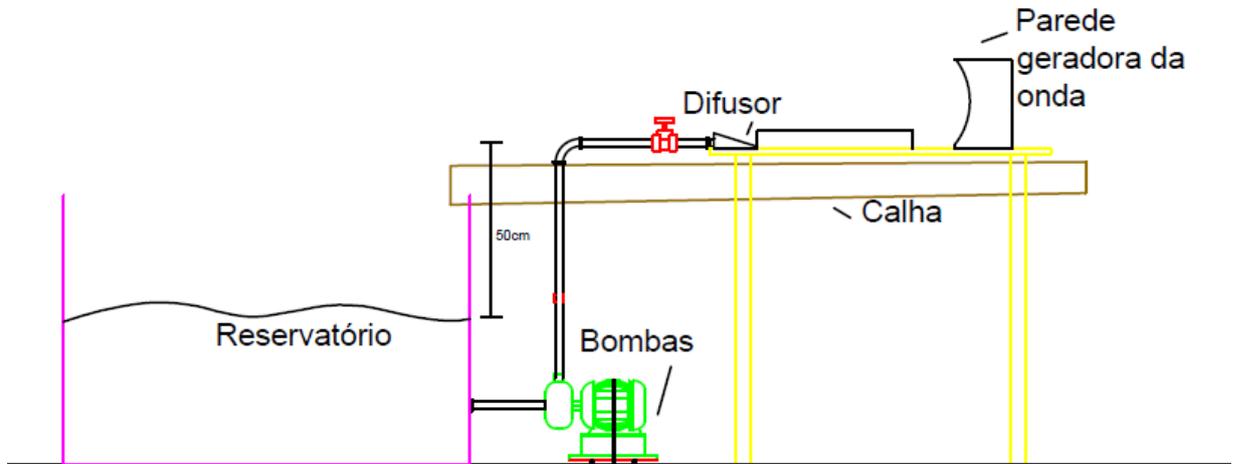
	Dimensão (m)	
	Protótipo	Modelo
Largura	7	0,35
Comprimento até início da parede	3	0,15
Altura da parede	2,5	0,125
Altura da lâmina d'água	0,1	0,005
Largura do canal	3	0,15
Velocidade da lâmina d'água (m/s)	11,14	2,49
Largura do canal	3,00	0,15
Número de Froude (adimensional)	11,25	11,25

(fonte: elaborado pelo autor)

4.1.2 Composição do Modelo

Com a escala escolhida, foi feito um esboço da estrutura do sistema em uma vista lateral (figura 16) com as peças principais, e, a partir dessas definições, foi possível a obtenção dos parâmetros necessários para o dimensionamento das bombas e das tubulações.

Figura 16: Esboço da composição do modelo



(fonte: elaborado pelo autor)

Para uniformizar o fluxo de água na lâmina projetada, determinou-se que, a montante dessa saída, a tubulação deve estar dividida em três partes, onde cada uma deve ter um terço da vazão total e da largura do bocal, como apresenta a tabela 4.

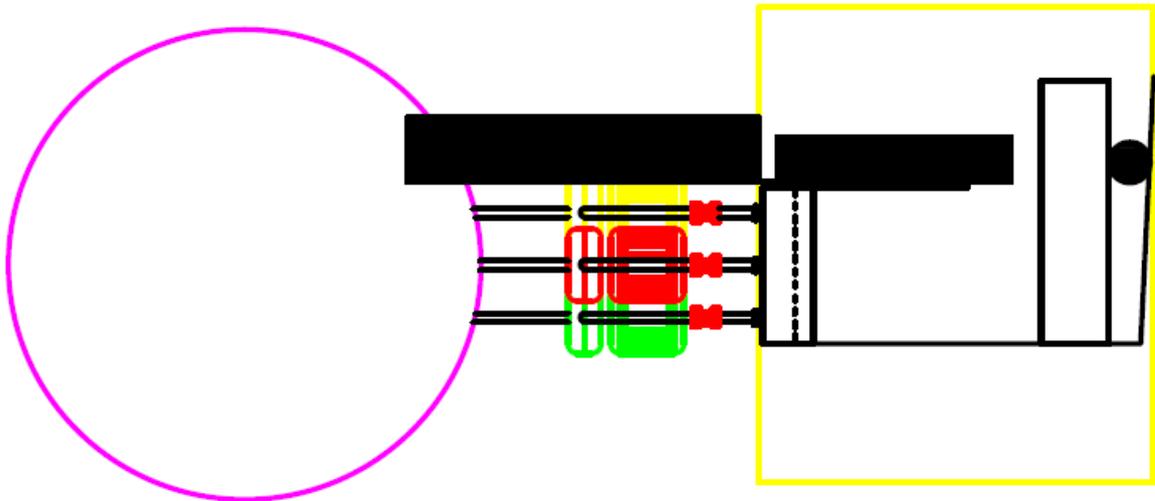
Tabela 4: Vazão e largura do bocal fracionadas

	Total	Divisão por 3
Vazão (L/s)	4,36	1,453
Largura do bocal	0,35	0,117

(fonte: elaborado pelo autor)

Assim, foi feito um esboço da vista superior do projeto, no qual estão dispostas três bombas lado a lado para criar a lâmina de água, conforme mostra a figura 17, e suas peças e quantidades listadas na tabela 5.

Figura 17: Esboço do modelo em vista superior



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 5: Peças e suas quantidades no modelo

Peças	Quantidade
Reservatório	1
Tubulação de adução	3
Tubulação de recalque	3
Adaptador Flangeado para Reservatório de Fibra	3
Bomba de Recalque	3
Curva Longa 90º	3
Registro de Esfera	3
Mesa	1
Parede Anteparo	1
Calha coletora	1
Conjunto difusor e bocal	1

(fonte: elaborado pelo autor)

4.1.2.1 Bombas de Recalque

A escolha das bombas de recalque foi a principal variável do projeto, visto que representa o maior custo entre os seus componentes. Para a determinação das bombas que atendam as necessidades do sistema, foi necessária uma análise da altura manométrica para a configuração proposta, utilizando cálculos nos quais se variou o diâmetro das tubulações. Sabendo que o comprimento da tubulação e o desnível geométrico entre a superfície da água e a mesa é muito pequeno, a altura manométrica foi definida, preponderantemente, pelas perdas de carga singulares, devido à alta velocidade do escoamento. Uma tabela com as singularidades da configuração projetada está disposta abaixo com seus respectivos coeficientes (tabela 6), para o trajeto do escoamento de uma bomba. Como não existem valores tabelados para o difusor e o bocal de saída construídos, se adotou um valor de K igual a 20.

Tabela 6: Singularidades e seus valores para a configuração do modelo escolhida

Singularidade	Quant	K Unit	Total K
Entrada de Borda	1	1	1
Curva 90º	1	0,4	0,4
Registro de Esfera	1	10	10
Difusor	1	20	20
Bocal de saída	1	20	20
		Σ:	51,4

(fonte: elaborado pelo autor)

Para o cálculo das perdas de carga, foi utilizada a Fórmula Universal da Perda de Carga, a temperatura da água em 20° C, o comprimento da tubulação igual a 1,5 m e a rugosidade dos tubos no valor de 60 µm. O desnível geométrico definido para o cálculo da altura manométrica foi de 0,5 m, e uma tabela é apresentada abaixo para os diâmetros comerciais de 25 mm, 32 mm e 40 mm (tabela 7), que são considerados constantes desde o reservatório até o bocal, para efeitos de simplificação.

Tabela 7: Cálculo da altura manométrica para três diâmetros diferentes no modelo

	Unidade:	Diâmetro comercial da tubulação		
		25mm	32mm	40mm
Variáveis fixas:		Valor:	Valor:	Valor:
Vazão	m ³ /s	0,00145	0,00145	0,00145
Diâmetro Interno	m	0,0216	0,0278	0,0352
Velocidade	m/s	3,966	2,394	1,493
Rugosidade:	m	0,00006	0,00006	0,00006
Comprimento Tub:	m	1,5	1,5	1,5
Temperatura água:	°C	20	20	20
f:	adim	0,0272	0,0262	0,0257
Perda Linear	m	1,515	0,414	0,125
$\sum K's$	adim	51,4	51,4	51,4
Perda Singular	m	41,229	15,026	5,846
Perda de Carga Total	m	42,744	15,439	5,970
Desnível Geométrico Considerado	m	0,5	0,5	0,5
Altura Manométrica Total	m	43,244	15,939	6,470

(fonte: elaborado pelo autor)

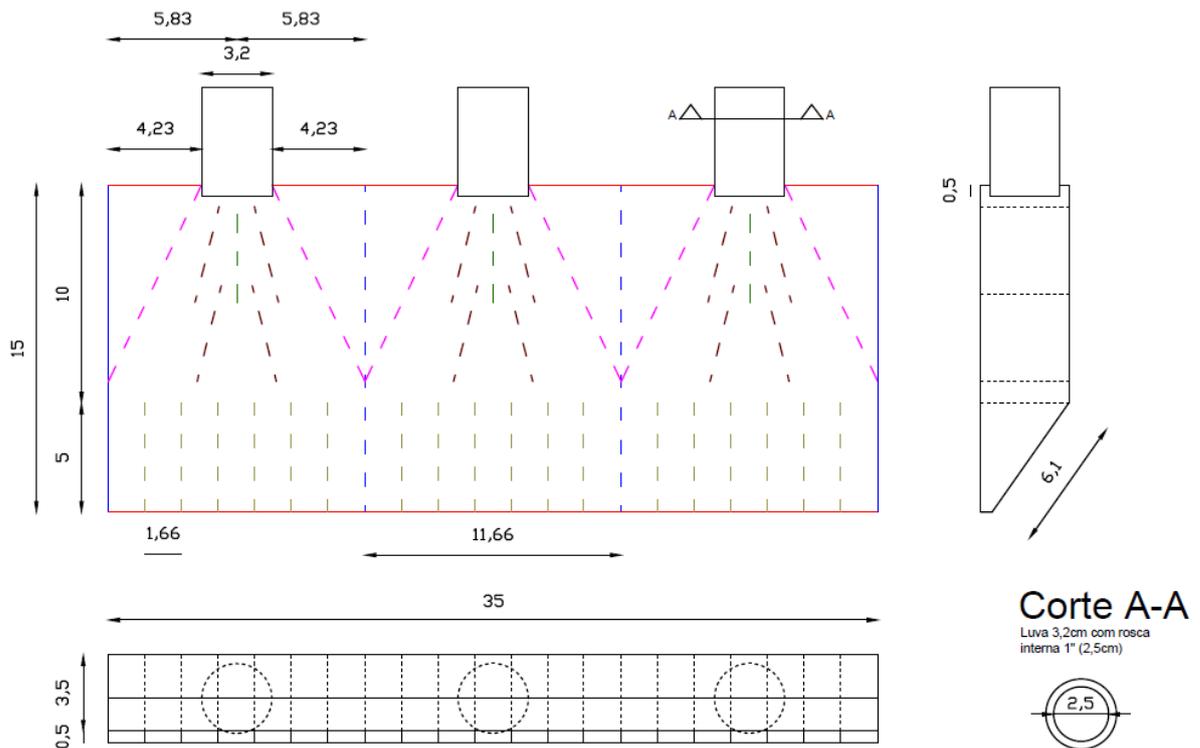
Analisando a tabela 7, verificou-se que a altura manométrica para o tubo de 25 mm resultou demasiadamente alta. A utilização do tubo de 40 mm implicaria na necessidade de um difusor mais alto e dificultaria a transição do escoamento para uma lâmina de água. Assim, foi escolhida a opção de tubos de 32 mm, pois apresentam um maior comprometimento entre as duas situações citadas. A bomba escolhida foi do tipo centrífuga, cujo modelo atinge 16 mca a uma vazão de 1,66 L/s, de potência igual a 0,5 Cv.

4.1.2.2 Difusor e Bocal de Saída de Água

O difusor e o bocal de saída de água são as peças que determinam o formato da lâmina de água que atingirá a parede. A principal função do difusor é de uniformizar a saída de água ao longo de todo o bocal, para que não existam zonas onde a vazão é maior, provocando uma

irregularidade no fluxo de água. O bocal de saída tem a função principal de determinar a altura da lâmina de água. Essas peças foram objetos de um projeto específico, cuja planta está representada na figura 18.

Figura 18: Projeto do difusor e bocal (escala em cm)



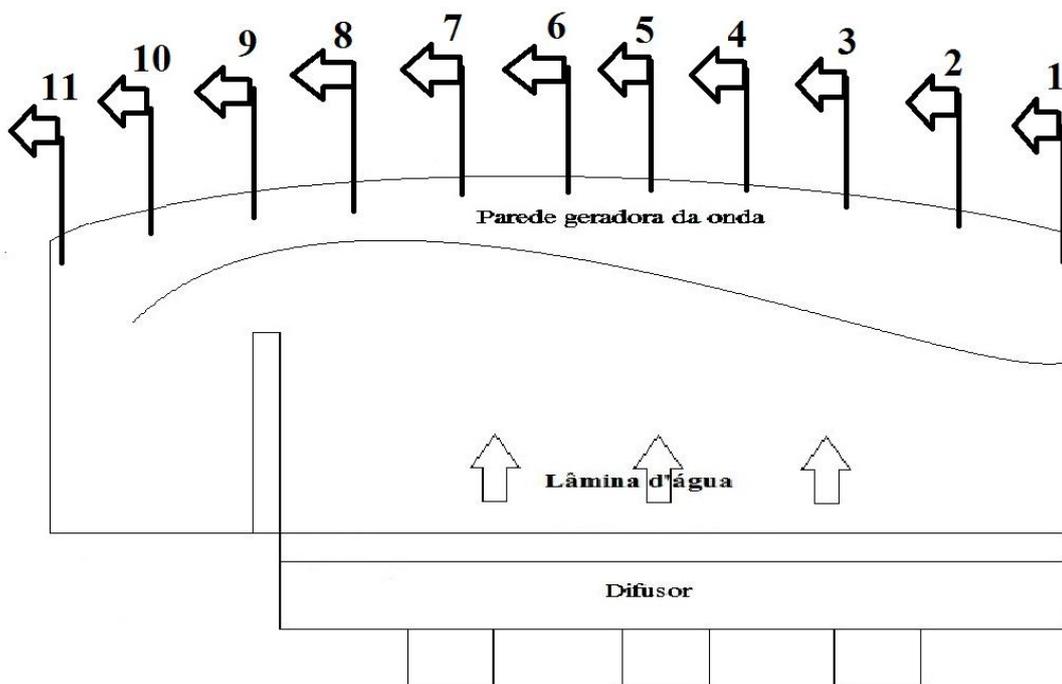
(fonte: elaborado pelo autor)

As aletas em ângulo, posicionadas logo a frente das luvas que fazem a conexão com a tubulação, foram distribuídas de modo a dividir a seção transversal circular em quatro áreas proporcionais. Considerando o fluxo central mais intenso, as duas divisões centrais sofreram outra divisão mais a frente. Por fim, foram posicionadas novas aletas no bocal de saída, igualmente espaçadas, formando vinte e um canais paralelos para gerar a lâmina d'água. Também foram posicionadas divisões internas entre os três fluxos, de modo a permitir o trabalho independente de cada uma das bombas. O material escolhido para a confecção do difusor e do bocal foi o aço galvanizado, com espessura 1 mm, para que modele eficazmente a vazão e resista à alta velocidade do escoamento.

4.1.2.3 Parede Geradora da Onda

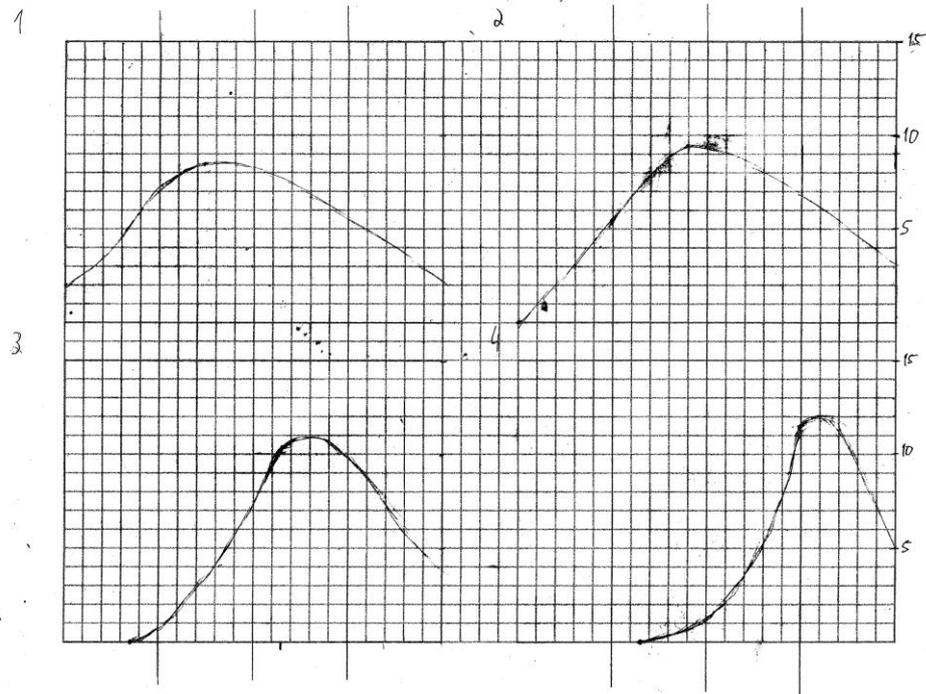
A parede que recebe a lâmina de água tem a função de conduzir o escoamento, simulando o efeito de uma onda útil à prática do surfe. O desenho da parede baseou-se na figura 13, a qual também foi alvo de um projeto específico, feito em um plano de duas dimensões, a partir de onze cortes transversais igualmente espaçados (figura 19) e abrangendo todo o volume da parede. O referido projeto é apresentado nas figuras 20, 21 e 22.

Figura 19: Posição aproximada dos cortes transversais na parede



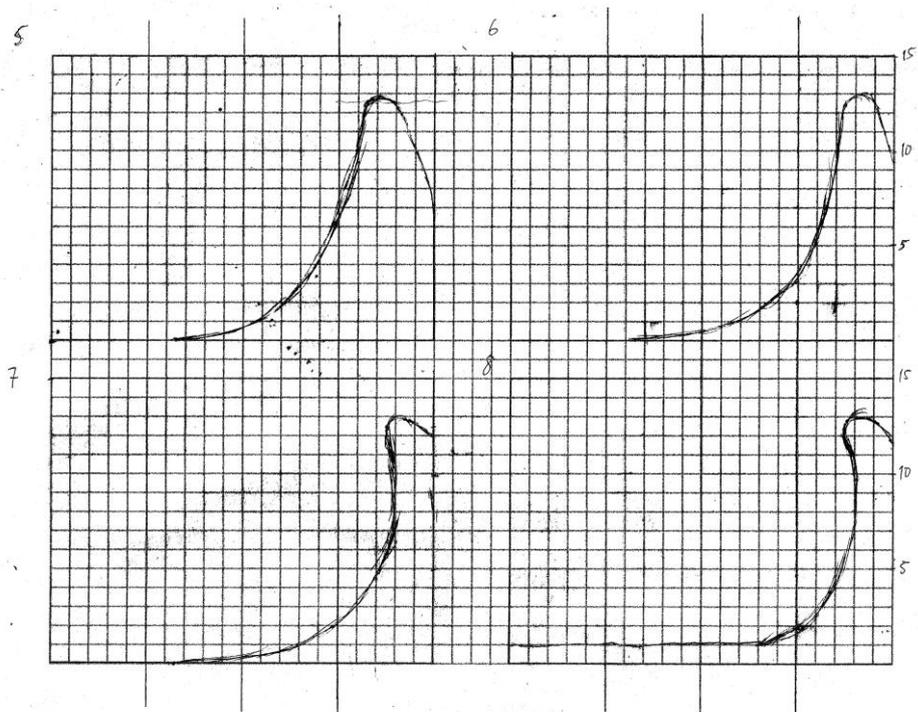
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20: Cortes um ao quatro do desenho da parede (escala em cm)



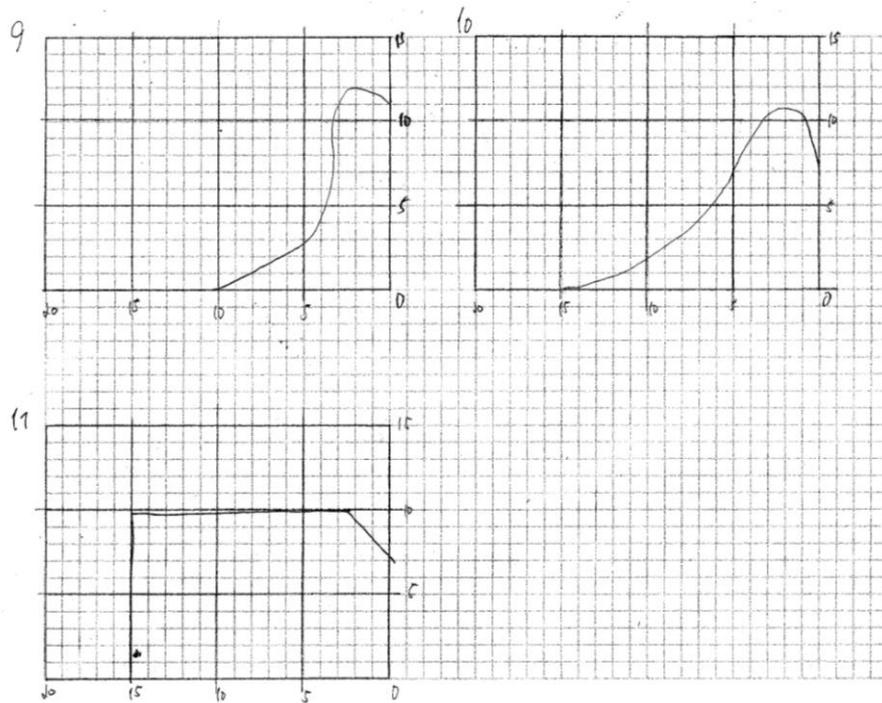
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21: Cortes cinco ao oito do desenho da parede (escala em cm)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22: Cortes nove ao onze do desenho da parede (escala em cm)



(fonte: elaborado pelo autor)

O material escolhido para a construção da parede foi a parafina, que é utilizada para a confecção de velas, por ter a rigidez necessária para suportar o escoamento e ser facilmente remodelável.

4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO REDUZIDO

A construção do modelo reduzido foi iniciada pela fixação das bombas numa tábua de madeira, com dimensões de 2,55 cm x 30 cm x 50 cm, utilizando parafusos de aço galvanizado. A tábua foi apoiada em pés de borracha (figura 23), fixados nos seus quatro cantos (figura 24), para impedir a vibração excessiva dos motores, minimizando o efeito nocivo ao escoamento e o excesso de ruídos.

Figura 23: Pés de Borracha



(fonte: foto do autor)

Figura 24: Tábua de madeira com os pés fixados



(fonte: foto do autor)

O alinhamento das bombas no mesmo plano, conforme esboço inicial, não foi possível de ser executado, pois a largura das carcaças impediu que se tivesse 23,3 cm entre o eixo das tubulações de recalque das bombas das extremidades. Em função disso, optou-se por elevar a bomba central, utilizando outra tábua de madeira, apoiada nas bombas das extremidades (figura 25).

Figura 25: Disposição das três bombas



(fonte: foto do autor)

O passo seguinte foi a conexão das bombas ao reservatório (fabricado em polietileno com capacidade para 250 litros), utilizando tubos de PVC classe 15 e adaptadores. As três colunas de recalque foram produzidas com o mesmo tipo de tubulação, curvas e registros de esfera (colocados para controle da vazão do escoamento). Estas foram conectadas ao difusor, construído a partir da união de peças de aço com uma cola de alta resistência a base de resina epóxi, recebendo um tratamento superficial com esmalte sintético para o controle da corrosão (figura 26). Ele foi apoiado numa mesa construída em madeira, com 85 cm de altura e superfície com 80 cm x 100 cm.

Figura 26: Difusor semi pronto recebendo acabamento em esmalte sintético



(fonte: foto do autor)

Para a ligação elétrica, considerou-se a potência de 1,01 kVA para cada uma das bombas (AES SUL DISTRIBUIDORA GAÚCHA DE ENERGIA SA et al., 2011, p. 37). Como foram ligadas no mesmo circuito, se somou os três valores e calculou-se a corrente resultante através da fórmula 12 apresentada por Halliday et al. (c2003, p. 108):

$$P = Vi \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

P = potência (va);

V = tensão elétrica (volt);

i = corrente elétrica (ampére).

A corrente elétrica total resultou no valor de 23,8 A e o correspondente diâmetro do condutor de 2,5 mm² (AES SUL DISTRIBUIDORA GAUCHA DE ENERGIA SA et al., 2011, p. 43). Foram conectados três disjuntores de 10 A, em paralelo, para o acionamento das bombas de forma individual, que foram fixados numa placa de compensado e apoiados no topo da coluna de recalque.

Quinze quilos de parafina foram moldados numa forma retangular feita de compensado, com dimensões de 20 cm x 50 cm x 15 cm, para a construção da parede geradora da onda. Este bloco foi modelado de acordo com o projeto já apresentado, utilizando espátulas de aço, uma micro retífica elétrica e com o auxílio de uma estrutura de madeira, que foi posicionada acima da parafina, na qual foram marcados os pontos dos cortes desenhados para o uso como referencial. Durante a modelagem, verificou-se que a espessura da parte mais delgada da parede ficaria muito frágil e suscetível à quebra caso sofresse algum tipo de esforço inadequado. Com isso, foi feito um reforço na parte de trás do bloco, o qual recebeu uma nova camada de parafina de 5 cm (figura 27).

Figura 27: Parede geradora da onda moldada em parafina



(fonte: foto do autor)

O sistema para o retorno de toda a água projetada foi feito com um tubo de 300 mm de diâmetro e 1,9 m de comprimento, posicionado logo abaixo do topo da mesa. O escoamento é conduzido através de anteparos construídos na periferia do sistema, descendo até o tubo por dois furos feitos na mesa, um posicionado na parte de trás da onda (10 x 18 cm) e outro posicionado ao lado do difusor (32 x 12 cm), extendendo-se até a parede e recebendo a maior parte da vazão.

O modelo com todos os seus componentes é apresentado nas figuras 28, 29 e 30.

Figura 26: Modelo reduzido com todos os seus componentes



(fonte: foto do autor)

Figura 27: Modelo reduzido em vista lateral



(fonte: foto do autor)

Figura 28: Modelo reduzido no detalhe da mesa

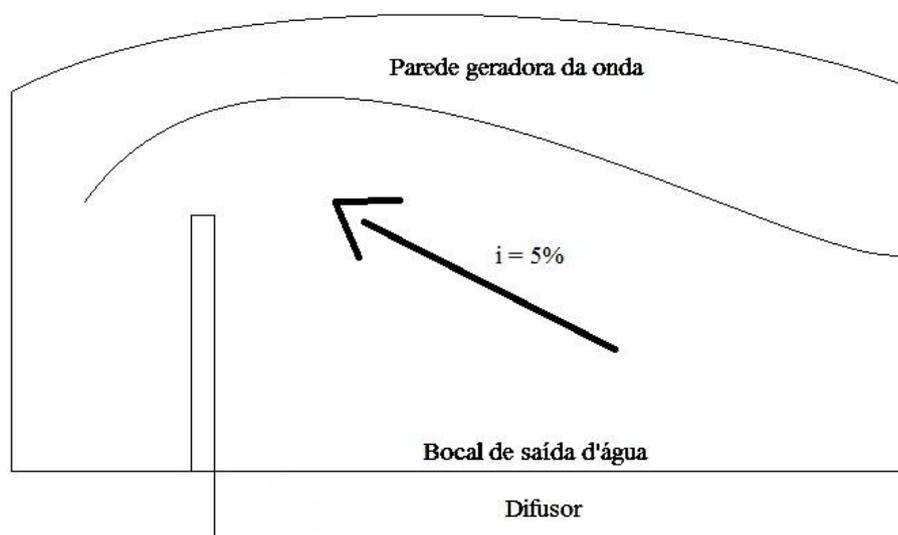


(fonte: foto do autor)

4.3 TESTES E RESULTADOS DO MODELO

Foram realizados diversos testes no modelo, buscando adequá-lo para que pudesse reproduzir uma onda útil à prática do surfe. Para impedir que a água proveniente do difusor ficasse acumulada na mesa, impedindo a formação da onda, foi necessário inclinar a mesa de modo a permitir um fluxo constante da vazão em direção aos pontos de retorno do escoamento (figura 31).

Figura 31: Vista em planta indicando o sentido da declividade da mesa



(fonte: elaborado pelo autor)

O encontro entre a mesa e o início da parede foi suavizado utilizando uma fita adesiva, para que o degrau existente nesse ponto não influenciasse no formato da lâmina d'água. Com isso, após diversos testes realizados utilizando diferentes vazões, conseguiu-se o resultado esperado, cuja avaliação foi feita a partir de uma análise visual, com a formação de uma lâmina d'água plana e um túnel de água (chamado pelos praticantes de "tubo"), reproduzindo o formato de uma onda útil à prática do surfe (figura 32).

Figura 32: Modelo da onda estacionária artificial em funcionamento



(fonte: foto do autor)

O presente resultado foi alcançado para uma única vazão, após a regulagem dos registros, e qualquer alteração na abertura destes resultou numa alteração do formato da onda, invalidando o resultado positivo obtido. Esta vazão foi calculada utilizando um reservatório circular auxiliar, de 56,5 cm de diâmetro, no qual se fez a coleta da água por 20 segundos, alcançando uma altura de 29 cm. Com esses dados, foi possível o cálculo da vazão do sistema pela simples relação entre o volume armazenado e o tempo de armazenamento. A velocidade média com que a lâmina d'água atinge a parede também foi calculada, a partir da vazão e da área do bocal de saída (tabela 8).

Tabela 8: Cálculo da vazão e velocidade do escoamento

	Unidade:	Valor:
Volume armazenado	m ³	0,0727
Tempo do escoamento	s	20
Vazão	m ³ /s	0,0036
Área de saída do bocal	m	0,0018
Velocidade	m/s	2,077

(fonte: elaborado pelo autor)

5 ESTRUTURA HIDRÁULICA PARA A PRÁTICA DO SURFE EM ESCALA REAL

Neste capítulo serão descritos os passos para o desenvolvimento do projeto de uma estrutura hidráulica para a prática do surfe em escala real, utilizando os parâmetros obtidos a partir do modelo em escala reduzida.

5.1 TRANSPOSIÇÃO DA ESCALA

Da mesma forma como se definiram as dimensões geométricas do modelo reduzido, para o dimensionamento da plataforma, onde a água escoava em forma de lâmina, utilizaram-se as medidas previamente arbitradas, visto que esses valores foram testados no modelo e forneceram um resultado satisfatório, na escala modelo:protótipo de 1:20 (figura 13 e tabela 3). O dimensionamento do difusor foi feito utilizando a semelhança de Froude, supondo que o escoamento dentro da peça está sujeito à pressão atmosférica. Com isso, as dimensões lineares adotadas na figura 16 foram multiplicadas por vinte, obedecendo a escala adotada. Ainda pela semelhança Froude, utilizando a equação 2 e o valor da vazão do modelo (tabela 8), a vazão correspondente encontrada para o protótipo foi de 6,5 m³/s. Para os componentes do sistema localizados à montante do difusor, foi feito um dimensionamento hidráulico em função da vazão requerida para o sistema, definindo as bombas e as tubulações necessárias para o pleno funcionamento do projeto.

5.2 PROJETO DA ESTRUTURA HIDRÁULICA EM ESCALA REAL

A partir das definições apresentadas em 5.1, desenvolveu-se o projeto de uma estrutura hidráulica para a prática do surfe. O projeto será apresentado utilizando plantas e esquemas com as dimensões das peças componentes, sem a especificação dos materiais a serem utilizados, por entender que essas informações devam ser alvo de um projeto específico e detalhado.

5.2.1 Bombas e Tubulações

Com a vazão de projeto definida para cada uma das três bombas (2,17 m³/s), restou o dimensionamento do diâmetro das tubulações. Para isso, utilizou-se uma planilha similar à tabela 7, apresentando a altura manométrica total para três diâmetros propostos, utilizando como limite a altura da entrada de água do difusor (0,8 m). Nela, reduziu-se os valores de k anteriormente arbitrados para o bocal e o difusor, de 20 para 10, visto que a aplicação dessas unidades resultou num superdimensionamento das bombas do modelo, fato observado na experimentação prática realizada. Com isso, houve a redução do $\sum K$'s calculado (tabela 6) para o valor de 31,4. A tabela 9 apresenta os novos valores.

Tabela 9: Cálculo da altura manométrica para três diâmetros diferentes no protótipo

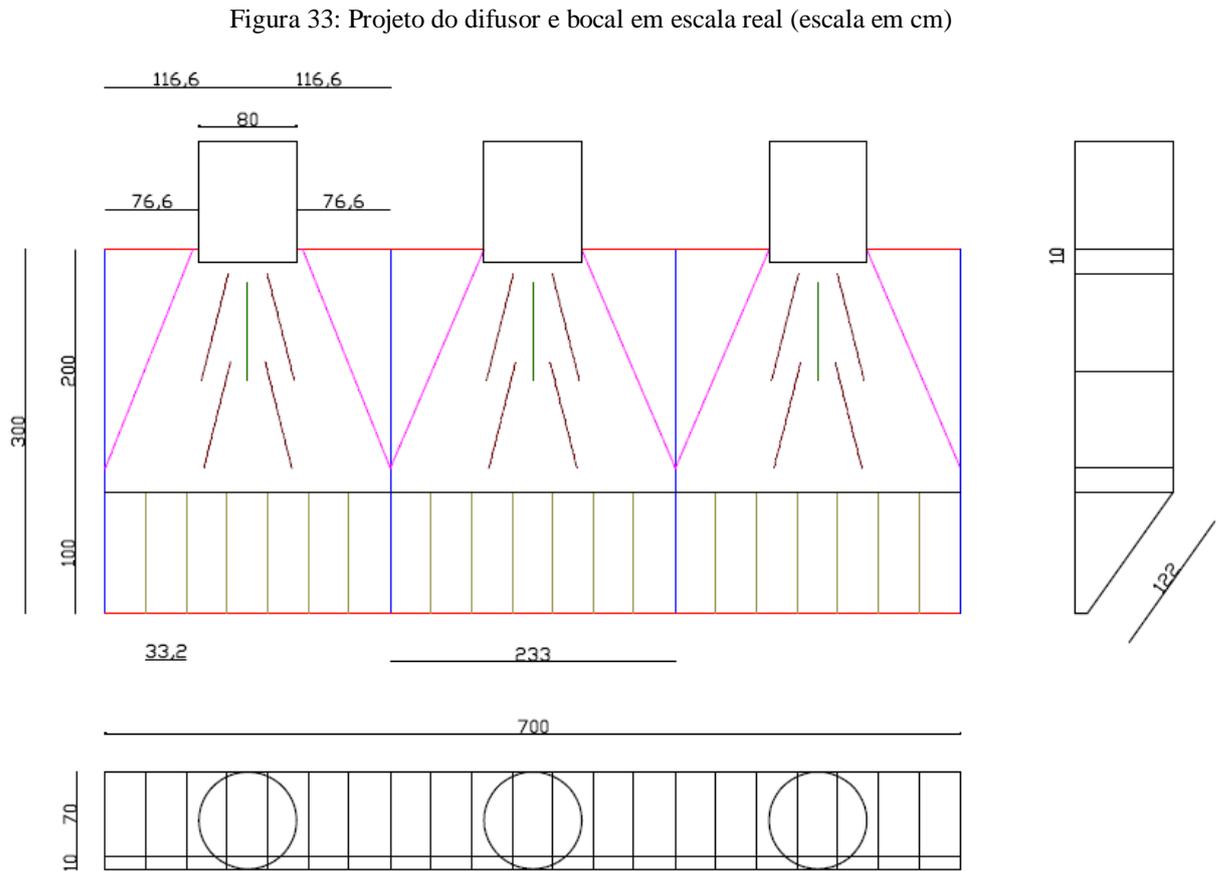
Variáveis fixas:	Unidade:	Valor:	Valor:	Valor:
Vazão	m ³ /s	2,16667	2,16667	2,16667
Diâmetro Interno	m	0,7000	0,7500	0,8000
Velocidade	m/s	5,630	4,904	4,311
Rugosidade:	m	0,00006	0,00006	0,00006
Comprimento Tub:	m	3,0	3,0	3,0
Temperatura água:	°C	20	20	20
f:	adim	0,0121	0,0120	0,0120
Perda Linear	m	0,084	0,059	0,043
$\sum K$'s	adim	31,4	31,4	31,4
Perda Singular	m	50,751	38,512	29,749
Perda de Carga Total	m	50,835	38,571	29,792
Desnível Geométrico Considerado	m	1,5	1,5	1,5
Altura Manométrica Total	m	52,335	40,071	31,292

(fonte: elaborado pelo autor)

Definiu-se a utilização de tubos de 0,8 m de diâmetro interno, pois os outros valores resultantes de perda de carga ficaram demasiadamente altos. Assim, as bombas dimensionadas para o projeto devem atender a vazão de 2,13 m³/s a uma altura manométrica de 32 mca.

5.2.2 Difusor

O projeto do difusor é o mesmo projeto apresentado para o modelo (figura 16), com a escala transposta (figura 33).

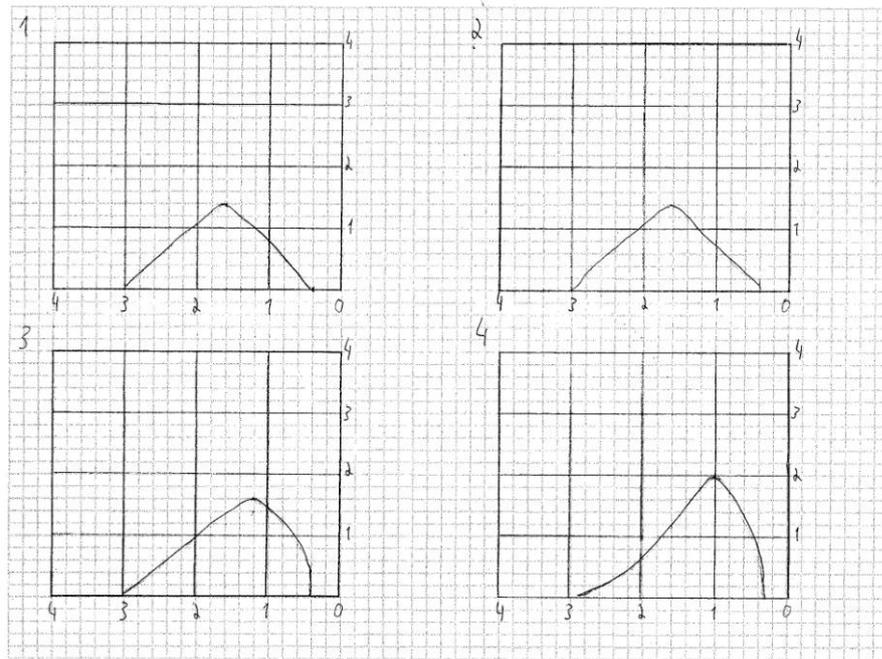


(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.3 Parede Geradora da Onda

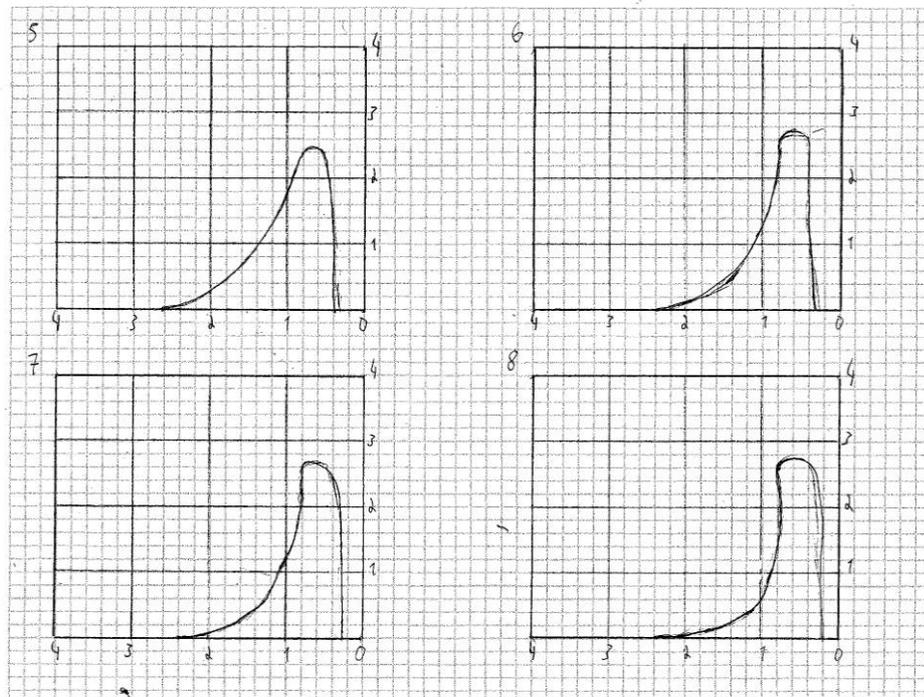
As alterações aplicadas na parede geradora da onda, em relação ao projeto inicial, foram sendo feitas conforme os testes do modelo iam sendo realizados, buscando modelá-la para que o escoamento apresentasse o formato buscado da onda artificial. O resultado dessas modificações está apresentado nas figuras 34, 35 e 36.

Figura 34: Cortes um ao quatro do desenho final da parede (escala em m)



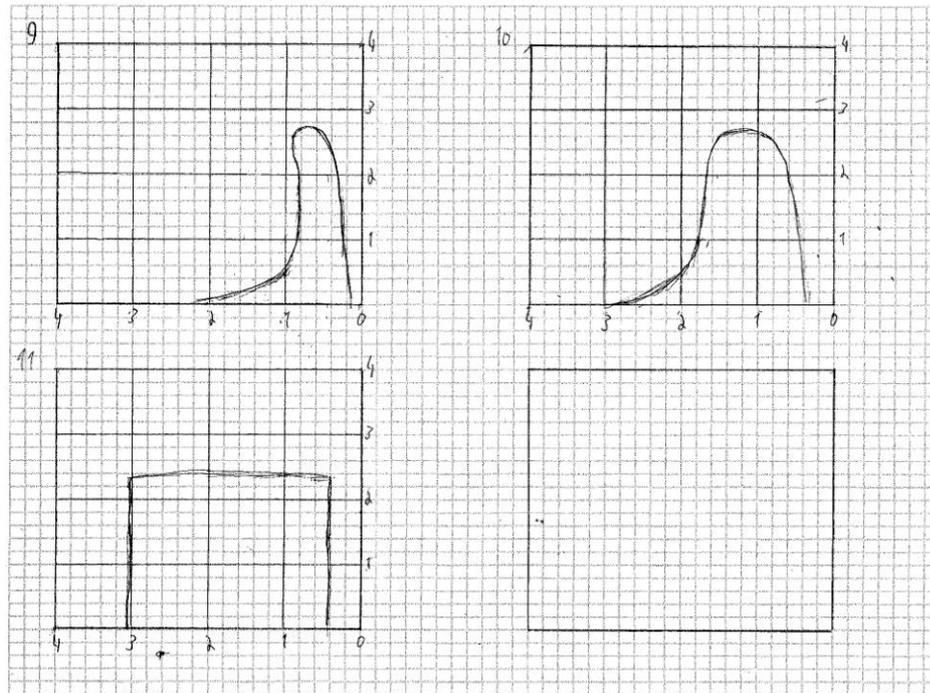
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35: Cortes cinco ao oito do desenho final da parede (escala em m)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36: Cortes nove ao onze do desenho final da parede (escala em m)



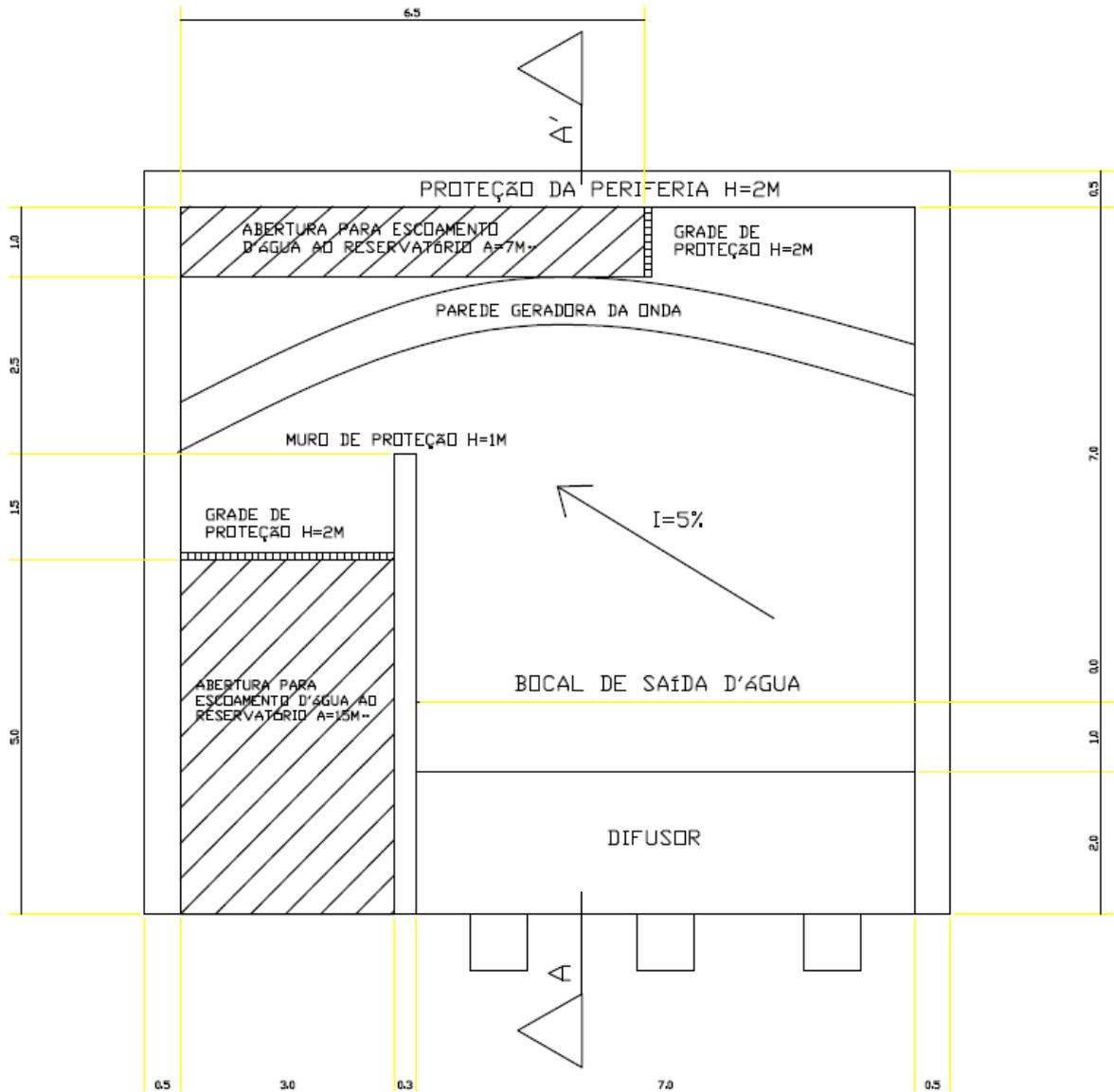
(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.4 Planta Geral e Corte

Definidas as variáveis de maior importância no projeto, foi feito o desenho das plantas gerais, aplicando algumas modificações em relação ao modelo reduzido. O reservatório foi posicionado abaixo da plataforma da onda, para reduzir o comprimento da tubulação e as perdas de carga contínuas, bem como a área necessária para a implantação do projeto. Também foram inseridas duas grades de proteção antes das passagens da água ao reservatório, para impedir que o praticante seja lançado até ele junto com o escoamento.

Figura 37: Projeto da estrutura hidráulica em planta baixa (escala em m)

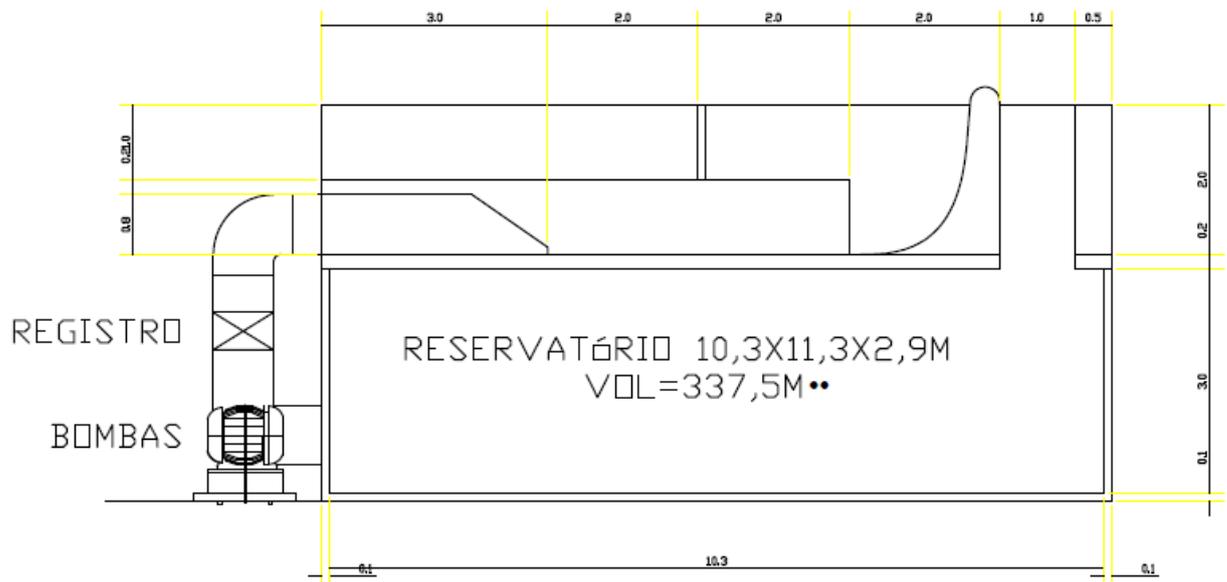
PLANTA BAIXA



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 38: Projeto do protótipo em corte AA' (escala em)

CORTE AA'



(fonte: elaborado pelo autor)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente projeto teve o objetivo de facilitar o acesso à prática do surfe, visto que o esporte depende das ondas oferecidas pelos mares, cujas condições são inconstantes e praticamente não podem ser influenciadas pelo homem, além de haver a necessidade dos praticantes de aproximarem-se da orla marítima.

Para isso, desenvolveu-se o projeto de uma estrutura hidráulica para a prática do surfe, utilizando um modelo reduzido. Buscou-se reproduzir o movimento das ondas de uma forma controlada, utilizando um circuito fechado com o reaproveitamento de água, movimentado por um sistema de bombeamento. Ele baseou-se num projeto já existente, denominado *Flowbarrel Ten*, de onde foram extraídos alguns parâmetros utilizados para o desenvolvimento do projeto do modelo reduzido. Este projeto foi feito utilizando as leis de semelhança, em especial a analogia de Froude, e conceitos de escoamentos em condutos forçados, utilizando a escala de 1:20 entre o modelo e o protótipo. Entretanto, esses cálculos realizados resultaram num superdimensionamento das bombas do modelo, provavelmente causado pela escolha de coeficientes muito altos para as singularidades que não tem seus valores tabelados, o caso do difusor e do bocal de saída. Esse fato foi observado pois as bombas poderiam trabalhar com uma vazão bem mais alta.

A construção do modelo foi realizada diversas etapas, iniciando pela montagem das bombas e das tubulações, passando pela confecção do difusor feita com pequenas chapas de aço e a parede geradora da onda em parafina, finalizando com a união de todas essas peças. Diversos testes foram realizados, de onde se viu a necessidade de adequação de algumas peças para a obtenção do resultado desejado, em especial a alteração do desenho da parede. Depois disso, o escoamento finalmente apresentou o formato de uma onda útil a prática do surfe, resultado obtido para apenas uma vazão do sistema.

Com os dados do modelo em mãos, foi necessária uma análise do sistema para definir os parâmetros que seriam utilizados para a transposição de escala para o protótipo. Concluiu-se que parte do sistema seria transposto pela analogia de Froude, nas partes em que o escoamento está sujeito à pressão atmosférica, e para a outra parte, onde o escoamento é dito em condutos forçados, seria feito um dimensionamento hidráulico em função da vazão

requerida. Assim, foi desenvolvido o projeto da estrutura hidráulica em escala real, apresentando as dimensões resultantes obtidas utilizando os critérios de dimensionamento citados, imprimindo-se algumas alterações em relação ao modelo reduzido, para um melhor aproveitamento da área destinada ao projeto e a redução das perdas de energia do sistema.

REFERÊNCIAS

- AES SUL DISTRIBUIDORA GAÚCHA DE ENERGIA SA; COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA; RIO GRANDE ENERGIA SA. **Regulamento de Instalações Consumidoras**. 5. ed. [Porto Alegre], 2011. Disponível em <<http://www.cee.com.br/pportal/cee/Component/Controller.aspx?CC=12292>>. Acesso em 10 maio 2012.
- ANDRADE, C. M. de. Galeria de fotos. **Revista Fluir**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.fluir.com.br/album>>. Acesso em: 11 nov. 2011.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A.; MASCARENHAS, F. C. B. (Org.) **Hidráulica Aplicada**. 2. ed. rev. e ampl. (1. reimp.) Porto Alegre: ABRH, 2003 (reimp. 2011). Coleção ABRH v. 8.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.
- FEDBYRONBAY.WORDPRESS.COM. **Roadtrip 2011**. [S. l.], 2010. Disponível em <<http://fedbyronbay.wordpress.com/2011/06/10/stay-classy-san-diego>>. Acesso em 10 jul. 2012.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2003. v. 3.
- MOTTA, V. F. **Curso de Teoria da Semelhança**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1972.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. 1. ed. (1. reimp.) São Paulo: Edgard Blücher, 2004 (reimp. 2008).
- NETTO, J. M. A.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. (8. reimp.) São Paulo: Edgard Blücher, 1998 (reimp. 2010).
- POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C.; HONDZO, M.; SHIH, T. I. –P. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Pioneira Thomsom Learning, 2004.
- SANTOS, S. L. dos. **Bombas & Instalações Hidráulicas**. 1. ed. São Paulo: LCTE, 2007.
- SHORESCREW.COM. **International Flowboarding Championships in Singapore**. [S. l.], 2010. Disponível em <<http://shorescrew.com/2010/01/international-flowboarding-championships-in-singapore>>. Acesso em 11 nov. 2011.
- WAVE LOCH INC. **Flowbarrel Ten**. La Jolla, USA, 2011. Disponível em: <<http://www.waveloch.com/attraction/flowbarrel-ten>>. Acesso em: 20 set. 2011.
- WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, c2002.