

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

Pedro Batalha Gonçalves Filho

**ESTUDO EXPERIMENTAL DAS FORÇAS DE ARRASTO EM BARCOS DE
ESCALA REDUZIDA**

São Luís, Ma

2015

Pedro Batalha Gonçalves Filho

**ESTUDO EXPERIMENTAL DAS FORÇAS DE ARRASTO EM BARCOS DE
ESCALA REDUZIDA**

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia Mecânica e Produção da
Universidade Estadual do Maranhão como requisito de
conclusão do Curso de Engenharia Mecânica.*

São Luís, Ma

2015

Pedro Batalha Gonçalves Filho

**ESTUDO EXPERIMENTAL DAS FORÇAS DE ARRASTO EM BARCOS DE
ESCALA REDUZIDA**

Aprovado em: ___/___/2015

Pedro Batalha Gonçalves Filho
Orientado

Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira
Orientador

Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho
1º Examinador

Prof. Me. Paulino Cutrim Martins
2º Examinador

Gonçalves Filho, Pedro Batalha

Estudo experimental das forças de arrasto em barcos de escala reduzida. / Pedro Batalha Gonçalves Filho– São Luís, 2015.

56p.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof.Dr. Fernando de Lima de Oliveira

1. Arrasto. 2. Corpos flutuantes. 3. Geometria. 4. Arrasto de onda. 5. Comparação.I.
Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Aos meus pais, meus irmãos e minha companheira Ellen Serra.

À UEMA, seu corpo docente, direção e administração.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fernando Lima.

E todos que contribuíram diretamente ou indiretamente, o meu muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho tem a finalidade de apresentar um estudo experimental resultante da comparação das forças de arrasto a partir da variação da geometria em corpos flutuantes. Neste caso, os corpos flutuantes aqui são dois barcos de geometria diferentes. Foi desenvolvido e confeccionado um instrumento de medição para aferir a força de arrasto nos barcos de pequena escala e de custo pequeno comparado com outros métodos experimentais. Os barcos, em teste, possuem mesmas massas, porém, dispõem de dimensões variantes. O barco de modelo A é mais esbelto, enquanto o de modelo B é mais robusto. Partindo da velocidade nula até aproximadamente $0,6m/s$, o barco B, obteve menores valores de força de arrasto quando submetido a mesma velocidade. Para velocidades entre $0,6m/s$ até $0,8m/s$, o barco A obteve menores valores de força de atrito em relação ao barco B. Na análise dos resultados percebeu-se que enquanto o barco A possuía maiores valores da componente de arrasto de onda e o barco B possuía maiores valores para o arrasto de pressão e para o arrasto viscoso.

Palavras-chave: Arrasto. Corpos flutuantes. Geometria. Arrasto de onda. Comparação.

ABSTRACT

This work has the goal to present a resulting experimental study of comparison between drag forces from the geometry variation in floating bodies. In this case, the floating bodies shown are two boats of different geometry. It was developed and made an instrument of measuring to gauge the drag force in low scale boats and of low cost compared to other experimental methods. The boats, in thesis, have the same weight. However, the dispose varying dimensions. The A model boat is thinner, while the B model is blunter. From the zero speed to about 0,6 meters per second (m/s), the B boat had lower values of drag force when submitted to the same speed. To speeds between 0,6 m/s to 0,8 m/s , the A boat had lower values of friction in comparison to the B boat. In the results analysis, it's possible to realize that, while the A boat had higher values of the wave drag component, the B boat had higher values of pressure drag force and to viscous drag force.

Keywords: Drag force. Floating bodies. Geometry. Wave drag. Comparison.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Desvio Padrão dos resultados obtidos.	34
Tabela 2. Erros de cada amostragem.	35
Tabela 3. Planilha dos resultados obtidos no barco A.	39
Tabela 4. Planilha dos resultados obtidos no barco B.	40
Tabela 5. Arrasto em função de Reynolds.	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. Arrasto propulsor no nado.	13
Figura 3. Camada Limite num cilindro.	15
Figura 4. Variação da separação da camada limite em função da velocidade.	19
Figura 5. Coeficientes de arrasto.	20
Figura 6. Escoamento sobre corpos diferentes.	21
Figura 7. Variação temporal da velocidade do fluido.	23
Figura 8. Confeção dos barcos que serão utilizados nos testes.	28
Figura 9. Barcos finalizados.	29
Figura 10. Medidor de Arrasto	30
Figura 11. Sistema de nivelamento.	31
Figura 12. Experimento em funcionamento.	32
Figura 13. Diagrama de corpo livre da polia do dinamômetro.	33
Figura 14. Medição da balança de precisão.	36
Figura 15. Medição através do dinamômetro.	36
Figura 16. Aferição da massa do barco A.	37
Figura 17. Aferição da massa do barco B.	38
Figura 18. Programação da interpolação no MatLab.	41
Figura 19. Plotagem das curvas A e B.	42
Figura 20. Força de arrasto em função do número de Reynolds.	43
Figura 21. Separação da camada limite e região de esteira no barco A.	45
Figura 22. Separação da camada limite e região de esteira no barco B.	46

LISTA DE SIGLAS

μ	Viscosidade dinâmica [$N.s/m^2$]
a_G	Aceleração da gravidade [m/s^2]
A_M	Área imersa no fluido [m^2]
c	Velocidade da onda [m/s]
C_D	Coefficiente de Arrasto [1]
F_D	Força de Arrasto [N]
E	Empuxo [N]
E_{rr}	Erro Estatístico [1]
F_H	Froude baseado na profundidade da água [1]
Fr	Número de Froude [1]
H	Profundidade da água [m]
L	Comprimento característico do escoamento [m]
Ma	Número de Mach [1]
Re	Número de Reynolds [1]
σ	Desvio Padrão [1]
u	Velocidade ao longe [m/s]
U	Velocidade do escoamento [m/s]
v	Velocidade relativa entre fluido e objeto [m/s]
V_D	Volume deslocado pelo objeto [m^3]
v_r	Velocidade do som no fluido [m/s]
y	Altura da onda [m]
ρ	Densidade do fluido [kg/m^3]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos.....	11
1.1.1	Objetivo Geral.....	11
1.1.2	Objetivos Específicos.....	11
2	ESTUDO SOBRE ESCOAMENTOS EXTERNOS.....	13
2.1	Características Gerais de escoamentos Externos	13
2.2	Camadas Limite	14
2.2.2	Efeito do Gradiente de Pressão	15
2.3	Forças de Arrasto	16
2.3.1	Fatores Determinantes da Força de Arrasto	18
2.3.2	Coefficientes de Atrito	20
2.4	Grandezas Adimensionais.....	21
2.4.1	Reynolds.....	22
2.4.1.1	Escoamento Laminar e Turbulento	22
2.4.2	Froude.....	23
2.4.2.1	Escoamento Subcrítico e Supercrítico.....	24
2.5	Forças de Arrasto em Embarcações	25
2.6	Empuxo e Estabilidade de Corpos Flutuantes	25
2.7	Desenvolvimento de Projetos de Embarcações	26
3	PROJETO DO MODELO DO BARCO EXPERIMENTAL.....	28
3.1	Modelo e Características dos Barcos Experimentais	28
3.2	Desenvolvimento do Medidor de Arrasto.....	29
3.3	Procedimentos Experimentais.....	31
3.3.1	Coletas de Dados	32
3.3.2	Análise de Dados.....	33
3.4	Estimativas de Erros Experimentais	34
3.4.1	Desvio Padrão e Margem de Erro.	34
3.4.2	Erro do Dinamômetro.....	35

3.4.3 Erro das Roldanas.....	37
3.4.4 Erro das Massas.....	37
3.4.5 Erro da Inclinação	38
4 RESULTADOS	39
4.1 Forças de Arrasto e Velocidades de Escoamento Obtidos	39
4.2 Fatores que Influenciaram os Resultados	44
4.2.1 Influência da Velocidade.....	44
4.2.2 Influência da Geometria	44
4.2.3 Influência do Acabamento Superficial	44
4.2.4 Influência da Camada Limite	45
4.2.5 Influência de Fatores Externos	46
4.2.6 Influência da Profundidade Mergulhada	47
4.2.7 Influência das Ondas	47
CONCLUSÃO.....	48
APÊNDICE	50
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O estudo de escoamento dos fluidos em suas diversas condições constitui-se de natureza importante para a área industrial e tecnológica. Tal conhecimento, permite que pesquisadores, engenheiros e cientistas possam projetar bombas, turbinas de geração de energia, aviões, carros, navios e outros instrumentos com maior segurança, mais eficiência e menores custos. Contudo, a análise do comportamento fluido é muitas vezes complexo, o que dificulta a solução de forma analítica. Por tal razão, geralmente se utiliza métodos computacionais e métodos experimentais.

Um dos grandes problemas enfrentados em projetos que envolvem o escoamentos de fluidos são as forças de arrasto, pois estas tendem a reduzir a eficiência dos sistemas em análise.

Entende-se por forças de arrasto, na dinâmica dos fluidos, uma força resistente a movimentos imersos em fluidos, líquido ou gás, sempre contrária ao movimento. Os desenvolvedores de veículos automotores como: aeronaves, navios e outros sempre buscaram soluções para diminuir a sua intensidade e assim obter um maior rendimento, já que, será necessário menos energia pra permanecer em movimento. A alteração do coeficiente de arrasto é um dos grandes desafios dos projetistas, já que, outros fatores dependem menos das dimensões e características do objeto.

No entanto, a força de arrasto, também pode ser usada como favorável. Imagine um paraquedista saltando de um avião de uma altura considerável, agora imagine que a resistência do ar (arrasto aerodinâmico), simplesmente não exista, com certeza esse paraquedista não resistiria ao impacto quando este se chocasse na terra. Os paraquedas possuem altos coeficientes de arrasto por motivos óbvios, sendo neste caso, a força de arrasto desejável.

Por essas e outras razões, é necessário entender a natureza do arrasto, a fim de se obter sempre resultados satisfatórios, tais como: economia de combustível, maior segurança, entre outros.

Neste contexto, a proposta desse trabalho acadêmico traz o estudo da análise experimental das forças de arrasto em barcos de pequena escala, um método experimental

que tem por finalidade verificar a atuação das forças de arrasto em barcos de geometrias distintas, sob mesmas velocidades e condições de operação. O estudo é dividido em várias etapas desde a fabricação até a realização dos testes.

O presente trabalho, além deste capítulo da Introdução apresenta outros 3 capítulos. O Capítulo 2 versará de forma a sistemática do estudo sobre escoamentos externos baseado em diversas literaturas, tais como: livros, artigos, teses de mestrado, monografias e outros. O Capítulo 3 é constituído pelo processo de execução dos barcos e medidor de arrasto com a devida caracterização, custo, comportamento durante a realização dos testes, coleta e análise dos dados obtidos. Os resultados alcançados são expostos e examinados no Capítulo 4, com o registro das forças de arrasto, velocidade de escoamento atingidas, fatores que influenciaram nos resultados e possíveis condições que poderiam induzir o experimento ao erro. Por fim, o último capítulo a Conclusão serão feitas as considerações finais com o intuito de avaliar de modo comparativo os resultados obtidos e fomentar trabalhos posteriores.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar experimentalmente o efeito da força de arrasto em barcos de escala reduzida sob diferentes velocidades de escoamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Investigar fenômenos relacionados ao escoamento externo de corpos flutuantes;
- ✓ Construir modelos (barcos de tamanhos experimentais) para medir e analisar as forças de arrasto;
- ✓ Analisar o efeito da força de arrasto em função da velocidade de escoamento da água;

- ✓ Analisar o efeito da força de arrasto em função da geometria de corpos flutuantes;
- ✓ Investigar a influência e a relevância dos grupos adimensionais: Reynolds, Froude e Mach na força de arrasto dos escoamentos externos.

2 ESTUDO SOBRE ESCOAMENTOS EXTERNOS

Escoamento externo é a parte da mecânica dos fluidos que estuda o escoamento do fluido em volta de um corpo qualquer, com movimento relativo entre os dois (fluido e objeto). A distribuição de pressão e de tensão cisalhante desenvolvidas na superfície do objeto geram forças que podem tender a frear o corpo (arrasto), e gerar um movimento normal ao escoamento (sustentação).

“A classe dos escoamentos externos também inclui aqueles em torno de objetos que não estão totalmente envolvidos com fluidos” (Munson, *et al*, 1997). Como por exemplo, os efeitos do vento em uma estrutura metálica, e até mesmo, os efeitos da resistência hidrodinâmica em barcos, que é o foco do presente trabalho. Para exemplificar os conceitos mencionados, a Figura 1, mostra a formação da força de arrasto a partir da execução dos movimentos do indivíduo durante o nado. Esta, propulsiona o nadador, mas ao mesmo tempo, existe uma força de arrasto contrária ao movimento.

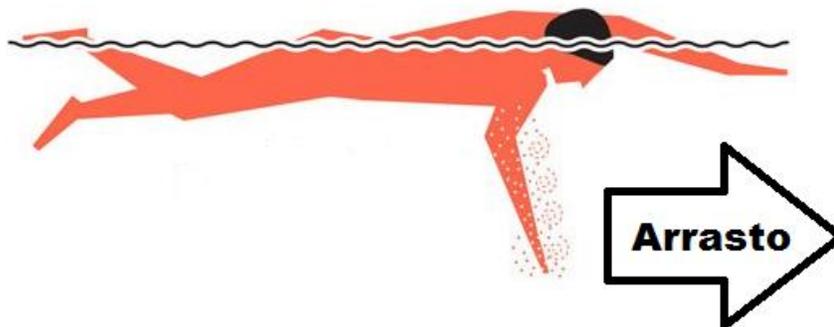


Figura 1. Arrasto propulsor no nado (FTS, 2013)

2.1 Características Gerais de Escoamentos Externos

Para se analisar o comportamento de um objeto submetido a um escoamento externo, deve-se lembrar que, se trata da velocidade relativa entre o corpo e o fluido, por exemplo, um avião voando através do ar parado, se considerarmos o avião como

referencial, nota-se que a aeronave agora se encontra em repouso e o ar que escoar ao redor da mesma. “Em ambos os casos, pode-se fixar o sistema de coordenadas no corpo e tratar como se o fluido estivesse escoando em torno do corpo com velocidade ao longe ” (Munson, *et al*, 1997).

Para melhor compreender o escoamento, é necessário conhecer a distribuição de pressões e tensões cisalhantes na superfície, devido a extrema dificuldade determiná-las analiticamente, muitas vezes, apenas os efeitos globais são necessários para resolver o problema. “A componente da força resultante que atua na direção do escoamento é denominada arrasto, (‘drag’), e a força que atua na direção normal ao escoamento é denominada de sustentação [dinâmica], (‘lift’)” (Munson, *et al*, 1997).

A força de arrasto, é a responsável pelo ‘freio’ causado pela resistência do ar ao lançar um objeto em movimento oblíquo, resistência aerodinâmica em um carro em movimento e também, a força oposta ao movimento de um barco, resultando num gasto maior de combustível.

Já a sustentação dinâmica é responsável por manter um avião no ar, uma vez que, a sua grandeza tem direção para cima, se opondo a força peso, do avião, fazendo o somatório de forças no eixo Y , igual a zero. Também é responsável por fazer uma bola de futebol produzir uma curva, quando esta é chutada com uma rotação, em seu eixo.

2.2 Camadas Limite

Existem pelo menos três tipos de camadas limite: a viscosa, a de temperatura e a de concentração. Neste projeto, apenas a camada limite viscosa será importante para o estudo, uma vez que a de temperatura está relacionada ao gradiente térmico em uma superfície, e a de concentração, um gradiente de densidade oriundo da transferência de calor por convecção (INCROPERA, *et al*, 2008).

Considera-se que a camada limite viscosa é de suma importância, pois, representa o gradiente de velocidade devido ao acabamento superficial e a viscosidade do fluido no qual o barco está imerso.

Para melhor compreender o fenômeno desta camada limite, imaginemos uma partícula fluida em contato direto com a parede de um sólido submetido a um escoamento externo, devido as forças viscosas, esta partícula que se encontra infinitamente próxima da superfície, terá velocidade nula; “ a camada limite é necessária para permitir a condição de não escorregamento” (Munson, *et al*, 1997). Nas regiões próximas à superfície, mas não em contato, terão velocidades menor que a velocidade de escoamento , devido a ação das forças viscosas. Essa região onde há variação de velocidade devido a efeitos viscosos, é conhecido como camada limite e sua espessura é compreendida desde ao contato com a superfície, onde a velocidade é nula, até uma distância perpendicular a superfície que possui velocidade $u = 0,99U$, onde U representa a velocidade de escoamento e u a velocidade ao longe (MUNSON, *et al*, 1997). A figura 2, mostra o escoamento em torno de um cilindro, onde o fluido na camada limite perde energia cinética devido a ação dos efeitos viscosos, e isso ocasiona na separação da camada limite e na região de esteira.

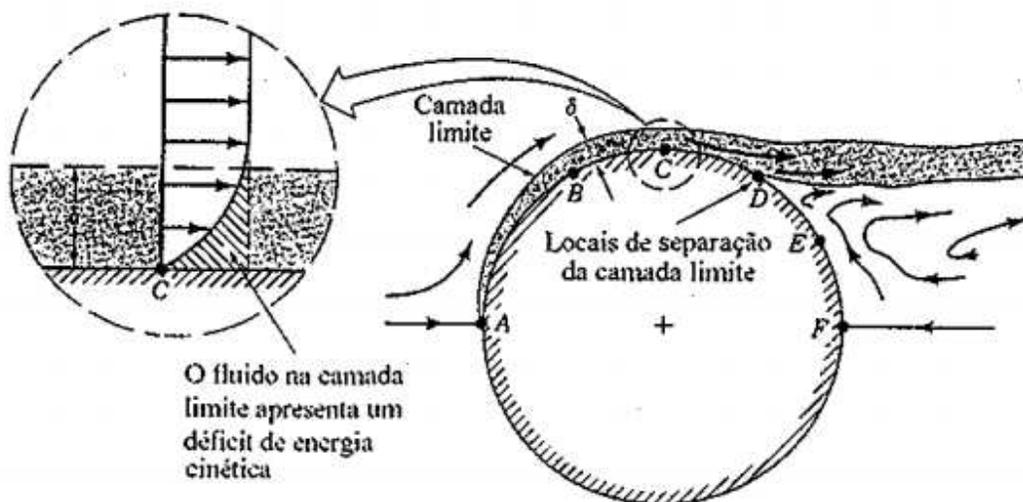


Figura 2. Camada Limite num cilindro (Munson, *et al*, 2004)

2.2.2 Efeito do Gradiente de Pressão

Não importa o valor da viscosidade do fluido, ao menos que seja nula (paradoxo de d'Alembert), ele sempre sofrerá arrasto se estiver submetido a um

escoamento externo, devido ao gradiente de pressão gerado em torno do corpo. “Na ausência de efeitos viscosos, uma partícula fluida pode escoar da parte dianteira para a traseira [de um] cilindro sem nenhuma perda de energia. Há uma transformação de energia cinética para energia de pressão, mas as perdas no processo são nulas”. (Munson, *et al.* 1997) Ou seja, as regiões onde há menor velocidade, haverá maior pressão e vice-versa, de acordo com o princípio de Bernoulli.

“ A diminuição da pressão na direção do escoamento (ao longo da metade dianteira do cilindro) é denominado gradiente de pressão favorável. O aumento de pressão na direção do escoamento (ao longo da metade traseira do cilindro) é denominado gradiente de pressão desfavorável (ou adverso)” (Munson, *et al.* 1997).

Agora, se os efeitos da viscosidade são levados em consideração, haverá perda de energia no escoamento. “Esta perda faz com a partícula [fluida] não tenha energia suficiente para vencer o gradiente de pressão adverso” (Munson, *et al.* 1997). Assim haverá um ponto onde a energia será tão baixa, que a camada limite se separará, onde após esse local (ponto de separação), surgirá um escoamento reverso na camada limite, essa região é chamada de esteira (MUNSON, *et al.* 1997).

2.3 Forças de Arrasto

“O arrasto é a componente da força sobre um corpo que atua paralelamente à direção do movimento relativo” (Fox, *et al.* 2008). A força de arrasto pode ser definida como:

$$F_D = \frac{\rho v^2}{2} C_D A_M \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: F_D é a força de arrasto [N];
 ρ é a densidade do fluido onde o corpo sólido está imerso [kg/m^3];
 v é a velocidade relativa entre fluido e objeto [m/s];
 A_M é a área do objeto que está imersa no fluido [m^2];

C_D é o coeficiente de arrasto [1].

“Os parâmetros mais importantes nos escoamentos externos são o número de Reynolds, o número de Mach, e para escoamentos com superfície livre, o número de Froude” (Munson, *et al*, 1997).

Há pelo menos, três componentes da força de arrasto, o arrasto de pressão, o arrasto de atrito e o arrasto de onda. “ O arrasto devido à pressão é função da magnitude da pressão e da orientação do elemento de superfície onde esta atua” (Munson, *et al*, 1997). “ O atrito de superfície deriva dos contatos deslizantes entre as camadas sucessivas de fluido próximas da superfície de um corpo em movimento”(Hall; Susan, 2005). “ O terceiro tipo de resistência atua na interface de dois líquidos [fluidos] diferentes como, por exemplo, na interface entre a água e o ar” (Hall; Susan, 2005); “essa forma de resistência pode ser o principal responsável pela resistência global que atua sobre um nadador” (Hall; Susan, 2005).

“Conforme o fluido escoar em torno do corpo, ele gerará tensões superficiais sobre cada elemento da superfície, e é isso que fará aparecer a força resultante” (Fox, *et al*, 2008). “Podemos ser tentados a pensar que a força líquida pode ser deduzida analiticamente por meio da integração dessas tensões sobre a superfície do corpo” (Fox, *et al*, 2008), porém esses cálculos são bastante difíceis de se realizar na prática, mesmo em objetos simples, sendo que, tais cálculos não levam em consideração o comportamento da camada limite e separação do escoamento. “Por estas [e outras] razões, devemos recorrer a métodos experimentais para determinar a força resultante sobre a maioria das formas de corpos.” (Fox, *et al*, 2008).

Atualmente, a obtenção dos coeficientes de arrasto é obtida predominantemente através de softwares de modelagem computacional e através de métodos experimentais, como a utilização do túnel de vento e o canal de água, deixando em segundo plano a sua obtenção analítica.

2.3.1 Fatores Determinantes da Força de Arrasto

Como foi visto na seção **2.1**, o arrasto, depende das distribuições de pressões e das tensões cisalhantes na superfície. Estes dois efeitos juntos, produzem um coeficiente de arrasto total C_D . No entanto, essa distribuição de pressão e tensões cisalhantes dependem de vários fatores como: geometria, número de Reynolds, efeitos de compressibilidade, rugosidade superficial, número de Froude, e outros.

“É claro que o coeficiente de arrasto sobre um objeto depende da forma deste. A forma de um objeto pode variar desde uma forma aerodinâmica até uma rombuda” (Munson, *et al*, 1997). Se o objetivo do projeto for a diminuição do arrasto, deve-se utilizar geometrias aerodinâmicas, que são obtidas principalmente através de métodos computacionais.

O coeficiente de arrasto, depende muito de Reynolds. O escoamento laminar, gera uma distribuição de pressão diferente do escoamento turbulento, assim como altera as características da camada limite viscosa de forma diferente (MUNSON, *et al*, 1997).

Normalmente, os efeitos de compressibilidade são desprezados, uma vez que, só ocorre em escoamentos com altíssimas velocidades $U > 0,5 Ma$. Quando são considerados, C_D , vai depender também do número de Mach. Quando o número de Mach é alto, os coeficientes de arrasto são predominantemente provocados por Ma , enquanto os demais fatores, como Fr e Re , se tornam secundários (MUNSON, *et al*, 1997). O número de Mach é definido a partir da seguinte equação:

$$Ma = \frac{v}{v_r} \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde: Ma é o número de Mach [1];
 v é a velocidade do fluxo [m/s];
 v_r é a velocidade do som no fluido [m/s].

A rugosidade superficial está relacionada principalmente com as tensões cisalhantes. “Geralmente, o arrasto aumenta com o aumento da rugosidade superficial nos corpos aerodinâmicos” (Munson, *et al*, 1997). “Para corpos rombudos, como um cilindro circular ou esfera, um aumento na rugosidade superficial pode realmente causar um diminuição do arrasto” (Munson, *et al*, 1997). Isto ocorre quando Reynolds atinge alto valor ($Re = 3 \times 10^5$ para esfera lisa), e então, a região de esteira se torna mais estreita do que quando o escoamento é laminar.

A diminuição da esteira através da rugosidade superficial, reduz consideravelmente o arrasto de pressão, e a rugosidade aumenta apenas um pouco o arrasto de atrito. Por essa razão, uma bola de golfe com cavidades, alcança maiores distâncias que a mesma sendo totalmente lisa. A Figura 3, mostra a variação do ponto de separação com o aumento da velocidade de 50 para 100 *km/h*. O aumento da velocidade do escoamento leva a formação de um regime turbulento, que faz com que a separação da camada limite se torne adiante, gerando uma região de esteira menor, e assim uma força de arrasto menor (AGUIAR e RUBINI, 2004).

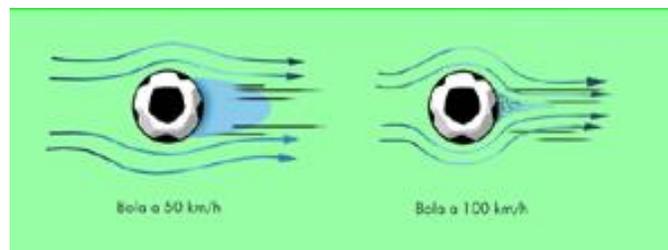


Figura 3. Variação da separação da camada limite em função da velocidade (Aguilar e Rubini, 2004)

Objetos flutuantes que se deslocam em uma superfície livre, geram ondas e estas, se manifestam como um arrasto (MUNSON, *et al*, 1997). “A natureza das ondas produzidas sempre é função do número de Froude do escoamento e da forma do objeto - as ondas geradas por um esqui aquático “cortando” a água com velocidade baixa (baixo *Fr*) são diferentes daquelas geradas pelo esqui “planando” sobre a superfície com alta velocidade (alto *Fr*)” (Munson, *et al*, 1997). Dessa forma, um objeto parcialmente

submerso, é função de Reynolds, na região onde está submerso e função de Froude na região de interface entre os dois fluidos onde é gerado ondas.

2.3.2 Coeficientes de Atrito

“Ao estudar a resistência de um navio é importante calcular não o seu valor absoluto, mas também a sua relação com outro valor, dimensionalmente semelhante, tomado como referência” (Trindade; Jorge, 2012). Isso quer dizer, que esse valor de referência (C_D), mostra características da força de arrasto, que independe de sua dimensão, velocidade e massa específica; depende dos fatores detalhados na seção 2.3.1. A figura 4, exhibe alguns coeficientes de arrasto de corpos totalmente submersos, com Reynolds baixo.

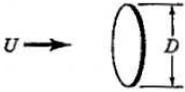
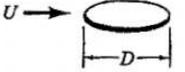
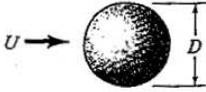
Objeto	$C_D = (\text{Arrasto})/(\rho U^2 A/2)$ (para $Re \leq 1$)
a. Disco circular normal ao escoamento 	$20,4/Re$
b. Disco circular paralelo ao escoamento 	$13,6/Re$
c. Esfera 	$24,0/Re$
d. Hemisfério 	$22,2/Re$

Figura 4. Coeficientes de arrasto (Munson, *et al*, 2004)

Sua obtenção é de extrema importância em projetos estruturais, onde a força de arrasto é um fator importante e sua obtenção experimental quase impossível. Na literatura, existem diversas tabelas de coeficientes, que permitem que projetistas façam uma

aproximação de corpos de difícil obtenção real do arrasto, com objetos mais simples que possuem C_D , tabelados, e assim, levando a diante, projetos que não necessitam de tanta precisão.

Conforme mostra a figura 5, existem dois corpos sujeitos à mesma velocidade de escoamento U . O objeto em (b), possui um coeficiente de arrasto 10 vezes menor que o objeto (a). Dessa forma, mesmo o objeto em (b), sendo de dimensões bem maiores que (a), os dois possuem a mesma força de arrasto. Isso ocorre devido a região de esteira do aerofólio ser bem menor que a região de esteira da esfera.

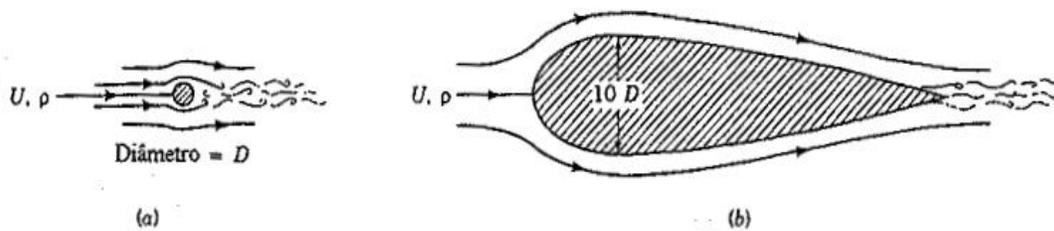


Figura 5. Escoamento sobre corpos diferentes (Munson, *et al*, 2004)

2.4 Grandezas Adimensionais

Os grupos adimensionais são vitais para o entendimento da ciência da mecânica dos fluidos, dentre eles: Reynolds, que é relevante na maioria dos problemas de mecânica dos fluidos, Froude, escoamentos de superfície livre, Euler, onde a diferença de pressão é importante, Mach, para efeitos de compressibilidade, entre outros.

Outra vantagem e não menos importante é, o teorema de *Pi de Buckingham* onde sua análise adimensional permite criar relações de semelhança entre modelos e protótipos. É largamente utilizado no projeto de aeronaves, navios, bombas, basta que o protótipo e modelo possuam semelhança geométrica, cinemática e dinâmica.

2.4.1 Reynolds

“O número de Reynolds, sem dúvida, é o parâmetro adimensional mais famoso da mecânica dos fluidos” (Munson, *et al.* 1997). Essa grandeza, é de extrema importância para a determinação da perda de carga em um escoamento viscoso (real), e também, de grande importância para a determinação do regime de um escoamento, quer seja laminar ou turbulento.

No presente projeto, a maior importância será a relação da camada limite e a influência no arrasto de objetos submersos. O número de Reynolds pode ser obtido através da seguinte fórmula:

$$\text{Re} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: Re é o número de Reynolds [1];

ρ é a densidade do fluido onde o corpo sólido está imerso [kg/m^3];

v é a velocidade do escoamento [m/s];

L é o comprimento característico do escoamento [m];

μ é a viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido [$N.s/m^2$].

Os termos do numerador, representam as forças inerciais e o termo do denominador representa as forças viscosas.

2.4.1.1 Escoamento Laminar e Turbulento

“Osborne Reynolds (1842-1912), cientista e matemático britânico, foi o primeiro a distinguir a diferença entre estes dois tipos de escoamentos” (Munson, *et al.* 1997).

O escoamento laminar, tem como principal característica, as linhas de corrente com direções paralelas entre si ao longo de todo o escoamento. Este ocorre quando o

número de Reynolds é relativamente baixo, ou melhor, quando as forças viscosas são mais relevantes que as forças inerciais.

Já o turbulento, apresenta um fluxo com maior intensidade na direção do escoamento, porém apresenta componentes em todos os eixos de coordenada. Seu escoamento não apresenta uma forma própria, não há direção fixa, por essa razão, analisar as propriedades de um regime turbulento se torna bastante complexo. O mesmo ocorre quando Reynolds é alto, isto é, quando as forças inerciais são relativamente altas. A figura 6, apresenta a variação temporal da velocidade do fluido num ponto nos regimes turbulento, de transição e laminar.

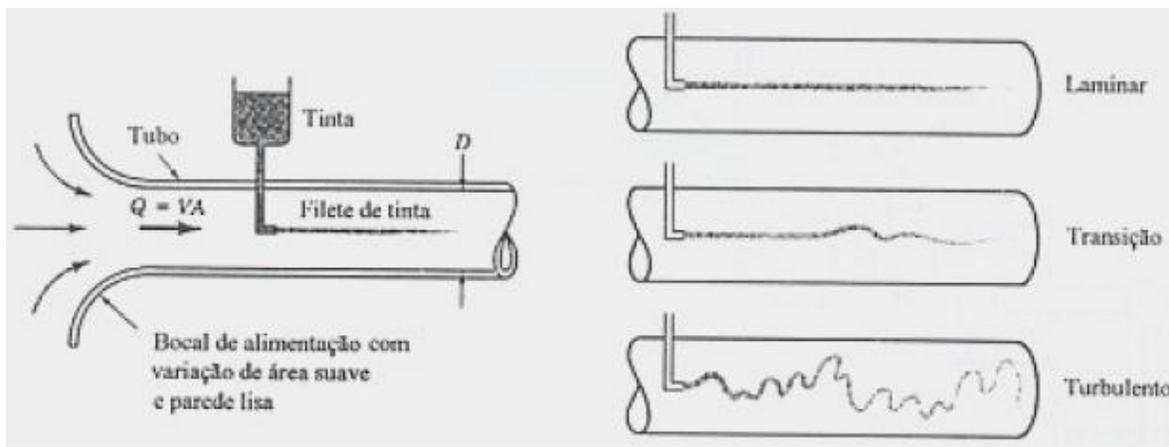


Figura 6. Variação temporal da velocidade do fluido (Munson, *et al*, 2004)

2.4.2 Froude

O número de Froude é bastante importante para a compreensão de um escoamento em canal aberto, já que, em um canal aberto o escoamento não é restringido por uma tubulação, “o fluido “escolhe” a posição da superfície livre e a configuração do escoamento” (Munson, *et al*, 1997).

As perturbações em um escoamento em canal aberto, geram ondas, e suas velocidades dependem do peso do fluido e da profundidade do escoamento. Froude é um número de grande importância na determinação da força de arrasto em corpos flutuantes, principalmente no arrasto de onda, já que, essa grandeza representa a razão entre a

velocidade do escoamento e a velocidade da onda. O número de Froude pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$Fr = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{a_G y}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: Fr é o número de Froude [1];
 v é a velocidade do escoamento [m/s];
 c é a velocidade da onda [m/s];
 a_G é a aceleração da gravidade [m/s²];
 y é a altura da onda [m].

A partir da equação acima, é possível afirmar que quanto maior a altura de uma onda, maior será sua velocidade.

2.4.2.1 Escoamento Subcrítico e Supercrítico

Assim como o número de Reynolds, o valor de Froude também caracteriza o escoamento, no caso em: subcrítico e supercrítico.

Um escoamento subcrítico ocorre quando a velocidade da onda é maior que a velocidade do escoamento, caracteriza-se pela formação de ondas a montante e a jusante do escoamento ($Fr < 1$), por exemplo, ao jogar uma pedra em um poço de água parada, a perturbação, gerará a formação de ondas em todas as direções. “Neste caso, dizemos que os pontos localizados a montante do ponto de geração da onda estão em comunicação hidráulica com os pontos de geração da onda” (Munson, *et al*, 1997).

Por outro lado, se a mesma pedra do exemplo anterior, fosse jogada em um rio, de forma que, a velocidade do escoamento é superior a da onda, seria difícil determinar perceber a perturbação (pedra lançada ao rio). Esse é um caso de escoamento supercrítico, ou seja, escoamento onde $Fr > 1$ (MUNSON, *et al*, 1997).

2.5 Forças de Arrasto em Embarcações

“A resistência de um navio a uma velocidade constante é a força necessária para rebocar o navio a essa velocidade em águas tranquilas” (Trindade; Jorge, 2012).

Além das componentes da força de arrasto de pressão, atrito, e de onda, outras componentes deverão ser consideradas: a resistência do ar na região não submersa; as ondas naturais do oceano que atingem a estrutura da embarcação; resistência em águas pouco profundas.

“Os apêndices do casco contribuem para um aumento da superfície molhada do navio. Por outro lado, com sua presença surgem também alterações no fator de forma do casco” (Trindade; Jorge, 2012).

Quando uma embarcação navega em águas pouco profundas, os componentes do arrasto de atrito e do arrasto de onda aumentam. Isso ocorre quando o número de Froude baseado na profundidade da água, é próximo a um, ou seja, Froude crítico. O número de Froude baseado na profundidade da água é dado por:

$$F_H = \frac{v}{\sqrt{a_G H}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: F_H é número de Froude baseado na profundidade da água [1];
 v é a velocidade do objeto [m/s];
 a_G é a aceleração da gravidade [m/s²];
 H é a profundidade da água [m].

2.6 Empuxo e Estabilidade de Corpos Flutuantes

O princípio de Arquimedes diz que: “ Um corpo total ou parcialmente imerso em um fluido é sustentado por uma força cuja a intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo”. Isto quer dizer que, qualquer objeto mergulhado na água, ou em um

fluido qualquer, aparentará ter um peso menor que o real, já que, a força de empuxo atuará na mesma direção da força peso, porém no sentido oposto, de baixo para cima. Pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$E = \rho V_D a_G \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: E é a força de Empuxo [N];
 ρ é a densidade do fluido onde o corpo sólido está imerso [kg/m^3];
 V_D é o volume deslocado pelo objeto [m^3];
 a_G é a aceleração da gravidade [m/s^2].

“A força de sustentação [empuxo] pode ser considerada atuante no centro de gravidade do fluido deslocado pela parte submersa do objeto flutuante” (Resnick, *et al.* 2003). Assim como um corpo possui centro de massa, se este estiver parcialmente ou completamente submerso, terá um centro de empuxo. Se o peso e o empuxo, estiverem contidos apenas no eixo Y , o somatório de forças se anulará. Agora, se não estiverem, será gerado um binário que poderá garantir a estabilidade do corpo, ou o tombo.

Em projetos de navios, barcos, por exemplo, os projetistas, procuram manter o centro de gravidade da embarcação, sempre abaixo do centro de empuxo, uma vez que, se seu centro estivesse localizado abaixo do centro de massa, qualquer inclinação iria gerar um grande momento, de forma que, o centro de massa e o centro de empuxo tendessem a permutar posição.

2.7 Desenvolvimento de Projetos de Embarcações

“A variação da proporção relativa das dimensões principais de um navio tem um importante efeito nas suas características operacionais. Afeta as suas características hidrodinâmicas, a sua resistência estrutural e, naturalmente a capacidade de carga” (Trindade, 2012).

O projeto de uma embarcação, pode ser decomposta em diversas áreas: cálculo da resistência hidrodinâmica (arrasto), cálculo estrutural, propulsão, flutuabilidade, capacidade de manobra, entre outros.

Atualmente, o desenvolvimento de projetos têm como suportes métodos experimentais, analíticos e computacionais. O método experimental, baseia-se em teste de modelos, para que, a informação através da análise dimensional do teorema de pi de buckingham, mostre quais serão as características do protótipo. “Apesar dos grandes esforços de investigação e normalização, a correlação modelo-navio está sujeita a um grau de empirismo” (Trindade, 2012). Isto é, cada tipo de teste (túneis, bacias), possui ensaios e análise de informações diferentes. “Esta não uniformidade de processos dificulta, se não mesmo em muitos casos impossibilita, o aproveitamento estatístico dos dados de uma forma agregada” (Trindade, 2012).

“As simulações de escoamentos obtidas pela mecânica dos fluidos computacional são ainda consideradas pela indústria como pouco precisas para a previsão da resistência de um casco ou da força propulsiva de uma hélice” (Trindade, 2012). No entanto, a utilização dessas ferramentas se tornam cada vez maiores, ao passo que, a precisão e complexidade desses softwares crescem continuamente, como também, diminuem significativamente o esforço causado para se chegar a determinado resultado, comparado com métodos experimentais.

3 PROJETO DO MODELO DO BARCO EXPERIMENTAL

Este capítulo trata-se da coleta e análise de forças de arrasto e velocidades de escoamento nos barcos experimentais de pequena escala. No presente experimento, considera-se o escoamento em regime permanente, adiabático e sem influência do arrasto aerodinâmico.

3.1 Modelo e Características dos Barcos Experimentais

Foram desenvolvidos dois barcos de escala reduzida. Ambos foram confeccionados de madeira (palitos de sorvete). Possuem geometria de base hexagonal. Entre a madeira possuem silicone para vedar lacunas e garantir um acabamento superficial característico. Outros acessórios que compõem a confecção dos mesmos são: capas de DVD, que funcionam como bolinas (chapa plana e rígida que tem por objetivo evitar deslocamentos laterais), e bolas de gude para aumentar o peso dos barcos e sua estabilidade e também para diminuir a diferença percentual de massa entre os barcos. A figura 7 a seguir mostra os barcos (A e B, da esquerda para direita respectivamente) durante processo de sua confecção.



Figura 7. Confeção dos barcos que serão utilizados nos testes.

A variação que houve nos barcos foi teoricamente, apenas, a geometria, já que, foi utilizado a mesma quantidade de palitos e bolas de gude. Ambos tiveram o mesmo acabamento superficial e foram submetidos as mesmas condições durante a fabricação. A largura do barco A é de 12 *cm*, já o segundo barco, B, de 17,5 *cm*. Pode-se perceber a diferença na geometria dos dois barcos tanto na Figura 7 quanto na Figura 8.



Figura 8. Barcos finalizados.

3.2 Desenvolvimento do Medidor de Arrasto

Durante o projeto e desenvolvimento dos barcos e formas de medidas dos testes foi criado um sistema para medir o arrasto. O dispositivo criado é contituído por um ventilador, 40 W, com 3 potências, dinamômetro digital, roldanas, carretel de linha de pesca, base de madeira e tábuas.

A montagem do dispositivo foi realizado da seguinte maneira: a hélice do ventilador foi removida e então o carretel foi acoplado ao eixo. Após o acoplamento, foi removido a base do ventilador e o mesmo foi fixado numa base de madeira através de parafusos.

Uma tábua esbelta também foi presa à base, ao lado do ventilador, através de cantoneiras e parafusos. A mesma foi furada a uma distância de 7cm do suporte e foi fixada uma roldana através de porca e parafuso. Na mesma tábua, a uma distância de aproximadamente 30cm da base foi fixado um dinamômetro através de braçadeiras de plástico; uma borracha escolar foi colocada entre o instrumento de medição e a madeira, a fim de evitar o atrito entre a roldana do dinamômetro e a tábua de madeira. Uma braçadeira de ferro foi encurvada e adaptada a fim de prendê-la a uma roldana, esta braçadeira presa à roldana foi apoiada no gancho do instrumento finalizando assim o sistema de medição.

A figura 9, apresenta o resultado do sistema de tração e medição. Na mesma é possível ver as polias, o dinamômetro digital, motor de ventilador com algumas velocidades, entre outros.



Figura 9. Medidor de Arrasto

Foi desenvolvido também um sistema de nivelamento, este por sua vez encontra-se independente dos sistemas anteriores (tração e medição). Consiste em duas

tábuas, uma esbelta e leve e outra mais larga e pesada, fixadas através de cantoneiras nas extremidades formando um ângulo reto entre si. Aproximadamente a uma distância perpendicular de 22 *cm* da borda foi fixada uma roldana na tábua esbelta; foi fixado um prendedor de portas, este por sua vez, o responsável por segurar uma outra roldana. É possível ver na figura 10 o sistema de nivelamento no barco tipo A.

Percebe-se que a posição da polia inferior pode ser mudada, de acordo com o nível da água, para que os barcos sejam puxados com inclinação quase nula.



Figura 10. Sistema de nivelamento.

3.3 Procedimentos Experimentais

A montagem experimento consistiu primeiramente no posicionamento das cordas que terão por finalidade delimitar o espaço útil de medição. Quatro cadeiras de madeira foram utilizadas (duas para cada corda) para tracionar e posicionar as cordas a uma distância de 1 metro paralela à borda da piscina e a 1 metro da borda final. Após esse procedimento o sistema de nivelamento é apoiado no centro borda inicial da piscina. A base que contém o sistema de tração e de medição é posicionada pouco menos de um metro da lança (sistema de nivelamento).

A linha do carretel, acoplado ao eixo, é então puxada e passa pelo sistema de medição e nivelamento transpassando pelas 4 roldanas dispostas com o intuito de transmitir o movimento com menor atrito, então atravessa toda a piscina até ser atrelado ao barco, que se encontra flutuando próximo ao centro da borda final da piscina.

Para finalizar, o motor é ligado com o auxílio de uma extensão a uma voltagem de 220 V, corrente alternada. O dinamômetro é ligado, o botão tara (tare) é pressionado a fim de desconsiderar o peso da roldana. Seleciona-se uma potência, e então as coletas de dados iniciam. Na Figura 11 é possível ver a piscina onde os testes foram realizados. Também mostra as cordas que delimitam o espaço útil de medição, o medidor de arrasto, e mais ao fundo o barco sendo puxado.



Figura 11. Experimento em funcionamento.

3.3.1 Coletas de Dados

As informações obtidas a partir do experimento foram obtidas através de uma balança de precisão, paquímetro, cronômetro e o dispositivo desenvolvido.

A balança de precisão têm por finalidade medir o peso de cada barco. O cronômetro é responsável por medir o tempo que cada barco leva para se deslocar perpendicularmente de uma corda até outra na piscina (8 m) . A função do paquímetro é

medir as dimensões do barco e sua área mergulhada, para assim, medir seu empuxo e o volume de carenagem. Já o dispositivo é responsável por puxar o barco com velocidades e forças médias, além de medir a tração na linha.

3.3.2 Análise de Dados

As massas dos barcos foram comparadas e posteriormente conferidas com a diferença percentual de um em relação ao outro. Os intervalos coletados serão convertidos em velocidade, já que, admite-se que o escoamento ocorre em regime permanente num deslocamento de $8m$.

Fazendo-se uma análise estática na polia do dinamômetro percebe-se que a força de tração no dinamômetro é obtida através da força de arrasto em si do barco e mais uma reação do motor como mostra a Figura 12.

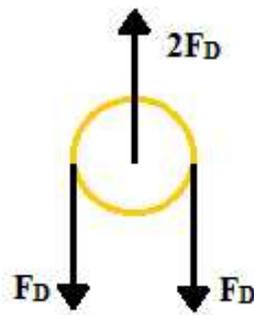


Figura 12. Diagrama de corpo livre da polia do dinamômetro.

Desta forma, as forças coletadas no dinamômetro não correspondem a força de arrasto, e sim o dobro, então é necessário dividir por 2. Como a unidade de força no dinamômetro está em kgf , multiplicamos por 9,81 e assim obtemos o arrasto em newton (N).

Após esses processos, foi plotado um gráfico: Arrasto (N) *versus* Velocidade de escoamento (m/s) para cada barco e então suas curvas foram comparadas.

3.4 Estimativas de Erros Experimentais

Nessa seção, se estimará os fatores que podem determinar os erros obtidos no experimento.

3.4.1 Desvio Padrão e Margem de Erro.

O desvio padrão, que representa o quanto os valores de cada coleta, diferem do valor médio. Quanto mais alto for o desvio padrão, menos confiável o resultado se torna, que pode ser calculado a partir da Equação 7. Ver o desvio padrão das forças de arrasto na Tabela 1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - X)^2}{n - 1}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde: σ é desvio Padrão;
 n é quantidade de amostras;
 X é média da amostra;
 xi é valor de cada coleta.

Tabela 1. Desvio Padrão dos resultados obtidos.

	DesvP A	DesvP B
30,52 W	0,0559	0,0640
34,88 W	0,0219	0,0981
39,24 W	0,0728	0,0981

“Dado o nível de confiança, a margem de erro $[E_{rr}]$ é a maior distância possível entre o ponto de estimativa e o valor do parâmetro que está estimando” (Farber; Larson, 2010). O valor do erro pode ser obtido através da Equação 8.

$$E_{rr} = Z_C \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{[Equação 8]}$$

Onde: E_{rr} é o erro a um certo nível de confiança;

σ é desvio Padrão;

Z_C é z-escor;

n é número de coletas.

No presente trabalho será usado o nível de confiança de 90%, que por sua vez possui, $Z_C=1,645$. Na Tabela 2, ver erros de cada amostragem.

Tabela 2. Erros de cada amostragem

	Erro A	Erro B
30,52 W	0,0411	0,0470
34,88 W	0,0161	0,0722
39,24 W	0,0535	0,0722

Com 90% de confiança, pode-se dizer que os valores de cada força de arrasto estão contidos no intervalo de confiança, onde o raio é o erro estatístico e o centro é a média aritmética.

3.4.2 Erro do Dinamômetro

Este fator provavelmente seja o que mais compromete a coerência dos resultados, pois o instrumento de medição não possui boa precisão. Através da aferição da massa de uma chave inglesa, utilizando a balança de precisão do Laboratório de Química da UEMA, verificou-se uma massa de 413,21g, enquanto no dinamômetro do medidor de arrasto, verificou-se 0,41 kg, observa-se nas Figuras 12 e 13.



Figura 13. Medição da balança de precisão



Figura 14. Medição através do dinamômetro

3.4.3 Erro das Roldanas

As roldanas do sistema de medição e nivelamento, geram erros no instrumento de medição de arrasto, pois parte da energia é dissipada em forma de calor, devido ao atrito dos rolamentos.

3.4.4 Erro das Massas

As massas dos dois foram medidas através de uma balança de precisão do Laboratório de Química da Universidade Estadual do Maranhão. A massa do barco A foi de 702,93 g, conforme Figura 14, enquanto o do barco B foi de 700,84 g, conforme Figura 15. O erro percentual foi de 0,2973%.



Figura 15. Aferição da massa do barco A.



Figura 16. Aferição da massa do barco B

Pode-se perceber que esse resultado não implica em um erro que desvalide a consistência do experimento.

3.4.5 Erro da Inclinação

O sistema de nivelamento foi desenvolvido para diminuir a inclinação da força que é imposta ao barco, fazendo-o ser puxado com ângulo mínimo. Porém, como a roldana que nivela a profundidade não pode ser imersa em água, então a mesma se encontra um pouco acima do nível ângulo zero teórico.

4 RESULTADOS

Todos os testes foram realizados num único dia, e sob as mesmas condições de trabalho. Durante os testes teve-se cuidado com quaisquer fatores que pudesse influenciar nos resultados.

Durante os experimentos notou-se que a formação de ondas auxiliava visualização do escoamento, sem a necessidade de bolhas de hidrogênio, indicadores químicos, entre outros. Em corpos de superfície livre, diferentemente de corpos totalmente submersos, é possível observar as condições da camada limite, o ponto de separação e a região de esteira.

4.1 Forças de Arrasto e Velocidades de Escoamento Obtidos

A seguir, as Tabelas 2 e 3, do software *Microsoft Excell*, mostram as velocidades de escoamento e as forças obtidas nos barcos A e B.

Tabela 3. Planilha dos resultados obtidos no barco A.

Barco A			
Potência 1 - 30,52 W			
Tempo (s)	Força (kgf)	Vel. escoamento (m/s)	Arrasto (N)
16,93	0,08	0,472533963	0,3924
17,7	0,07	0,451977401	0,34335
16,45	0,08	0,486322188	0,3924
18,16	0,09	0,440528634	0,44145
17,95	0,1	0,445682451	0,4905
Média	0,084	0,459408928	0,41202
Potência 2 - 34,88 W			
12,98	0,18	0,61633282	0,8829
13,3	0,18	0,601503759	0,8829
12,88	0,18	0,621118012	0,8829
11,21	0,19	0,713648528	0,93195
11,08	0,18	0,722021661	0,8829
Média	0,182	0,65093572	0,89271
Potência 3 - 39,24 W			
10,58	0,27	0,756143667	1,32435
10,62	0,27	0,753295669	1,32435
10,78	0,28	0,742115028	1,3734
11,1	0,25	0,720720721	1,22625
10,08	0,29	0,793650794	1,42245
Média	0,272	0,753185176	1,33416

O tempo que cada barco levou para se deslocar de uma corda até outra e a força no dinamômetro foram obtidos por um cronômetro e dinamômetro, respectivamente. A velocidade de escoamento (m/s) e a força de arrasto (N) são valores que foram convertidos dos dois anteriores.

Para encontrar a velocidade de escoamento, dividiu-se 8m, distância perpendicular de uma corda a outra, pelo tempo cronometrado. E, para encontrar a força de arrasto, a força no dinamômetro (kgf), foi dividida por dois e depois convertida para Newton (N).

Tabela 4. Planilha dos resultados obtidos no barco B.

Barco B				
Potência 1 - 30,52 W				
Tempo (s)	Força (kgf)	Vel. escoamento (m/s)	Arrasto (N)	
15,16	0,09	0,527704485	0,44145	
14,75	0,09	0,542372881	0,44145	
14,93	0,12	0,535833891	0,5886	
14,84	0,11	0,539083558	0,53955	
15,65	0,1	0,511182109	0,4905	
Média	15,066	0,102	0,531235385	0,50031
Potência 2 - 34,88 W				
12,48	0,18	0,641025641	0,8829	
11,59	0,16	0,690250216	0,7848	
12,58	0,2	0,635930048	0,981	
12,28	0,21	0,651465798	1,03005	
12,25	0,2	0,653061224	0,981	
Média	12,236	0,19	0,654346585	0,93195
Potência 3 - 39,24 W				
10,79	0,27	0,741427247	1,32435	
10,75	0,25	0,744186047	1,22625	
10,92	0,29	0,732600733	1,42245	
10,64	0,3	0,751879699	1,4715	
11,02	0,29	0,725952813	1,42245	
Média	10,824	0,28	0,739209308	1,3734

Para uma melhor compreensão como a força de arrasto com a variação da velocidade de escoamento se comporta em cada barco utilizou-se o software *MatLab* para interpolar os pontos referentes a cada curva, conforme a Figura 16. Posteriormente os resultados foram plotados em um gráfico, conforme a Figura 17. O polinômio interpolador de Lagrange pode ser obtido a partir da Equação 8.

$$P(x) = \prod_{i=0, j \neq i}^k \frac{x - x_i}{x_j - x_i} \quad [\text{Equação 8}]$$

Onde: $P(x)$ é polinômio interpolador;
 x é variável independente;
 k é número de coletas.

```

1 -   clc; clear all ; close all;
2
3 -   %Barco A.
4
5 -   VA=[0.0, 0.4594, 0.65093, 0.753185]; % [m/s]
6 -   FA=[0.0, 0.41202, 0.89271, 1.33416]; % [N]
7
8 -   %Barco B.
9
10 -  VB=[0.0, 0.531235, 0.654346, 0.739209]; % [m/s]
11 -  FB=[0.0, 0.50031, 0.93195, 1.3734]; % [N]
12
13 -  %Interpolação A.
14
15 -  xa=[.0:0.01:.8]
16
17 -  ya=interp1(VA,FA,xa,'spline')
18
19 -  %Interpolação B.
20
21 -  xb=[.0:0.01:.8]
22
23 -  yb=interp1(VB,FB,xb,'spline')
24
25 -  figure(1)
26
27 -  plot(xa,ya,'r-',xb,yb,'b-')
28 -  grid on
29 -  title('Força de arrasto em barcos de pequena escala')
30 -  xlabel('Velocidade (m/s)')
31 -  ylabel('Arrasto (N)')
32
33
34

```

Figura 17. Programação da interpolação no MatLab

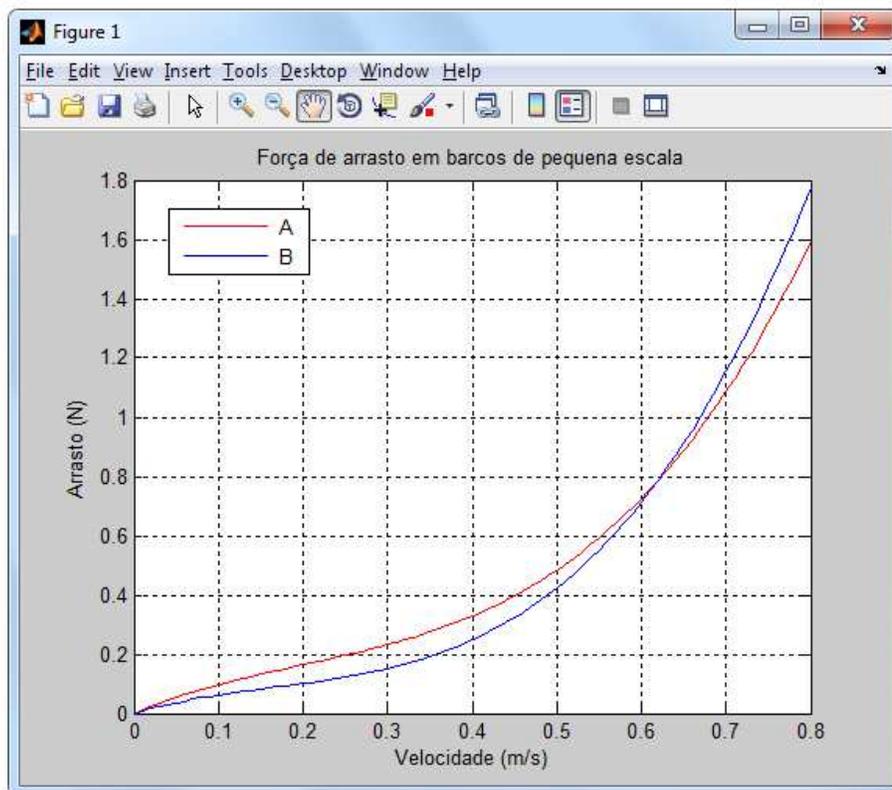


Figura 18. Plotagem das curvas A e B.

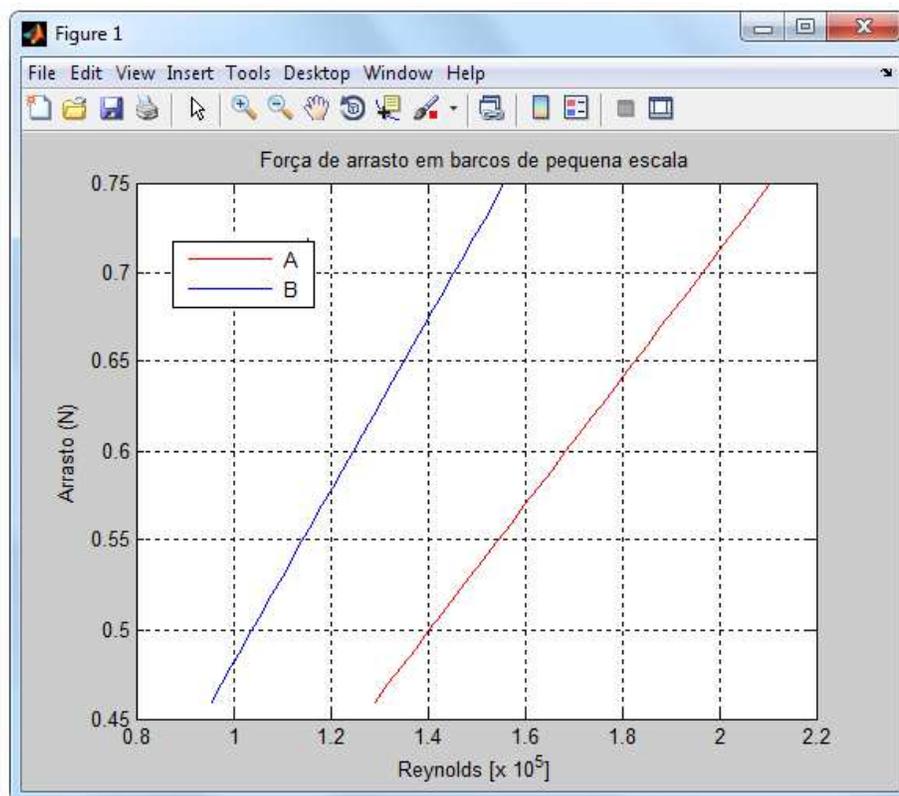
A curva em vermelho, representa o comportamento da força de arrasto no barco A com a variação de velocidade até 0.8 m/s . Já curva em azul representa o comportamento do barco B na mesma situação. Observe que há uma região onde o barco mais robusto possui menor força de arrasto em mesma velocidade que o outro. Tais comportamentos serão analisados nos itens posteriores.

Também foi comparado, a força de arrasto em função do número de Reynolds. Para se obter essa grandeza adimensional, tomou-se o comprimento característico do barco A, que é de $0,25\text{m}$; barco B, $0,185\text{m}$. A viscosidade dinâmica considerada foi a da água a 25°C , $\mu = 0,890 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. Já a densidade da água considerada foi de $\rho = 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Através da Tabela 4 e da Figura 18, é possível perceber a relação da força de arrasto em função do número de Reynolds; nas potências de $30,52\text{W}$, $34,88\text{W}$, $39,24\text{W}$.

Tabela 5. Arrasto em função de Reynolds

Barco A		Barco B	
30,52 W		30,52 W	
Arrasto	Reynolds	Arrasto	Reynolds
0,40221	129044,9	0,50031	110418
34,88 W		34,88 W	
0,89271	182845,5	0,93195	136006,2
39,24 W		39,24 W	
1,33416	211573	1,3734	153653,9

**Figura 19.** Força de arrasto em função do número de Reynolds.

Observa-se que na região analisada, a força de arrasto é proporcional ao número de Reynolds. Percebe-se também que o barco A, possui maior número de Reynolds em todo o intervalo.

4.2 Fatores que Influenciaram os Resultados

Os resultados obtidos foram dependentes de diversos fatores, tais como: a precisão do sistema de medição, a velocidade relativa entre o barco e o fluido, o ângulo de ataque, as condições da camada limite, entre outros.

4.2.1 Influência da Velocidade

De acordo com a Figura 17 percebe-se que, naquela região em que foi analisada, a força de arrasto realmente depende da velocidade do escoamento, ou seja, quanto maior essa velocidade, maior a força de arrasto. Através da mesma Figura, foi possível perceber que a variação da força, com a velocidade, não ocorre de forma linear.

4.2.2 Influência da Geometria

A geometria do mais esbelto (barco A) permite o escoamento do fluido de forma mais sutil, o que o faz percorrer de forma a perder menos energia, tendo assim uma separação da camada limite mais adiante e assim uma região de esteira menor que o barco B.

Outro fator a considerar é que geometria interfere na geração de ondas, e que são relevantes na parcela do arrasto de onda.

4.2.3 Influência do Acabamento Superficial

Como foi comentado na metodologia, os dois barcos sofreram os mesmos processos e submetidos ao mesmo acabamento superficial. Porém, é praticamente impossível, ceder o mesmo acabamento aos dois objetos. Dessa forma, é indiscutível a influência do acabamento superficial nos resultados obtidos.

Porém, têm-se que observar, que essa influência não é de tanta relevância nos resultados, e mesmo sendo, esse interferiria principalmente nas condições da camada limite, que depende de inúmeros outros fatores. Portanto, é mais viável fazer uma análise da camada limite como um todo do que investigar profundamente essa influência da variação do acabamento superficial nos dois barcos.

4.2.4 Influência da Camada Limite

Em corpos totalmente submersos, as condições da camada limite são os principais fatores que contribuem para a força de arrasto total. No presente trabalho, ela terá as mesmas propriedades de contribuição para a força total, porém apenas na região submersa pela água, já que admite-se que o arrasto causado pelo ar (parte superior do barco) seja desprezível.

Na observação do experimento, notou-se que em todas as velocidades a separação da camada limite no barco mais esbelto (barco A) se formou bem adiante do barco mais robusto (barco B). Detalhes nas Figuras 19 e 20. Dessa maneira, pode-se afirmar que o barco B, possui componentes da força de arrasto de pressão maior que o barco A, ao menos no intervalo que foram comparados no presente trabalho.



Figura 20. Separação da camada limite e região de esteira no barco A.



Figura 21. Separação da camada limite e região de esteira no barco B.

4.2.5 Influência de Fatores Externos

Em qualquer projeto desta natureza em que se deseja entender de forma abrangente os resultados obtidos deve-se fazer alguns questionamentos, tais como: quais fatores são realmente relevantes para a análise desta situação? A afinidade elétrica? Magnética? Química? É óbvio que certas hipóteses são descartadas de imediato. Também é óbvio que certas hipóteses simplesmente não podem ser descartadas sem um estudo prévio. No presente experimento, alguns fatores externos indesejáveis foram moldados, de forma que a sua influência no resultado final se tornasse mínima.

A influência do vento no experimento é um fator relevante. Portanto, os testes foram feitos em uma tarde parcialmente nublada, com poucas rajadas de vento. Sendo que todas as velocidades obtidas com os barcos foram obtidas com as mesmas condições climáticas.

Para isto, após cada teste, esperava-se um tempo de aproximadamente 4 min para que as ondas geradas pelo experimento anterior não interferissem na força de arrasto do teste seguinte, já que, um dos maiores componentes do arrasto total em superfície livre é o arrasto de onda.

4.2.6 Influência da Profundidade Mergulhada

O volume de carena dos dois barcos é aproximadamente o mesmo, porém a profundidade imersa, varia, uma vez que o barco B tem uma base maior que o barco A, então requer uma menor profundidade imersa que garantirá o empuxo igual a força peso.

Acredita-se que a profundidade mergulhada foi o principal responsável por fazer o barco B, ter menor força de arrasto que o barco A em algumas regiões do gráfico, mesmo possuindo mesma massa e formato aerodinâmico menos acabado. A razão dessa observação é que quando o barco B era puxado, ele praticamente planava sobre a água pois sua profundidade imersa era bem menor. Vale lembrar, que a velocidade da onda está diretamente relacionada com a sua altura, e que quanto maior o número de Froude, mais o objeto tende a planar sobre a água (MUNSON, *et al.* 1997).

Através da observação do experimento, verificou-se que o barco B obteve maiores números de Froude, não porque tinha uma velocidade maior que o barco A, mas porque gerava ondas menores, que tinham velocidades menores, e assim obtinha o efeito de praticamente planar sobre a água.

4.2.7 Influência das Ondas

Como foi visto na seção 4.2.6, o barco A mesmo tendo uma geometria mais aerodinâmica, acaba gerando ondas maiores, com velocidades maiores e estas ondas contribuem diretamente para o componente do arrasto de onda. Pode-se afirmar que o barco A, possui uma maior força de arrasto de onda que o barco B.

CONCLUSÃO

O presente estudo experimental teve como objetivo fundamental analisar experimentalmente o efeito da força de arrasto em barcos de pequena escala sob diferentes velocidades de escoamento. Inicialmente foi projetado os barcos com suas características particulares. Posteriormente foi montado o sistema experimental com seus detalhes e acessórios. Em seguida foi feito os experimentos e as coletas dos dados.

De maneira geral, pode-se observar que: o barco A, embora de “melhor aerodinâmica” não obteve menor força de arrasto durante todo o intervalo estudado. Caso que, durante boa parte do intervalo analisado, o barco mais robusto (barco B) obteve menor força de arrasto que o barco A. É possível que se o experimento fosse feito com os corpos totalmente submersos, provavelmente o barco A posuiria menor arrasto durante todo o intervalo estudado.

Como foi visto na seção 4.2 o barco A, possui um maior componente de arrasto de onda, enquanto o barco B, possui maior componente de arrasto de pressão. Acredita-se que o fato de ora A possuir maior arrasto, ora B possuir, é devido a relevância dos componentes de arrasto de onda e de pressão. Acredita-se que do intervalo de 0 até aproximadamente $0,6m/s$ os efeitos do arrasto de onda foram mais significativos que os efeitos de pressão, já de aproximadamente $0,6$ até $0,8m/s$ os efeitos de pressão foram mais evidentes.

Os erros do dinamômetro, das roldanas, das inclinações, das massas certamente influenciaram significativamente nos resultados, gerando dados que precisaria serem melhore analisados. Contudo, quando se trata da comparação de resultados, sabendo que os testes foram feitos utilizando os mesmos instrumentos, as mesmas condições, e sob os mesmos tratamentos de dados, é possível afirmar que os resultados foram obtidos com margem de erros aceitáveis.

O presente trabalho mostrou uma alternativa simples e de baixo custo para se determinar as forças de arrasto atuantes em corpos de pequena escala, os quais pode ser utilizado para tomada de decisões quanto a geometria a ser utilizada em determinado projeto de embarcação.

Ainda se pode comentar que embora este experimento seja relativamente simples precisa-se ainda precisa-se maiores entendimento de fenômenos físicos que influenciam o comportamento deste experimento.

Assim, seguem abaixo algumas sugestoes para trabalhos futuros:

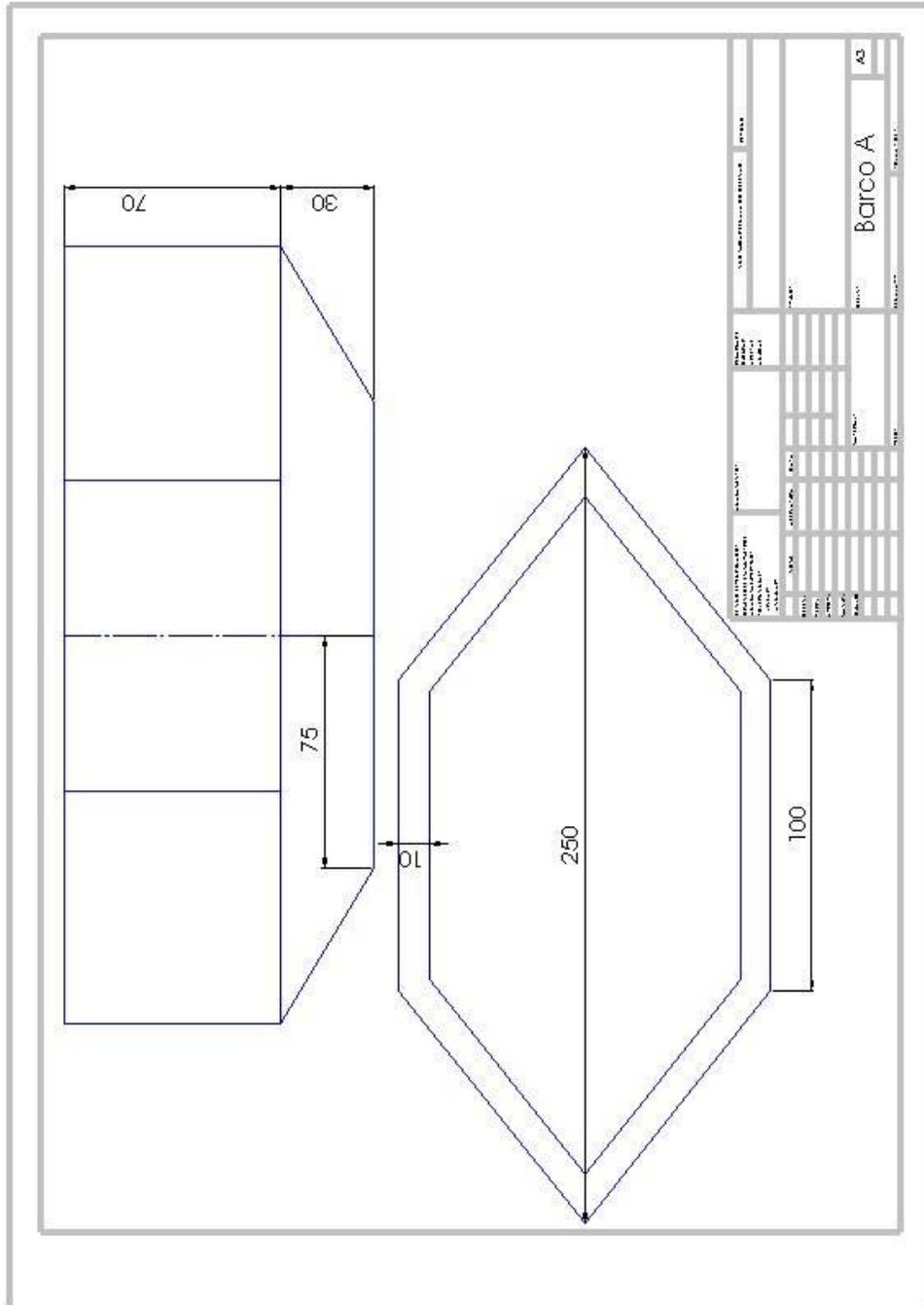
- ✓ Reproduzir um experimento similar a esta configuração com acamento dos barcos de forma mais acurada;

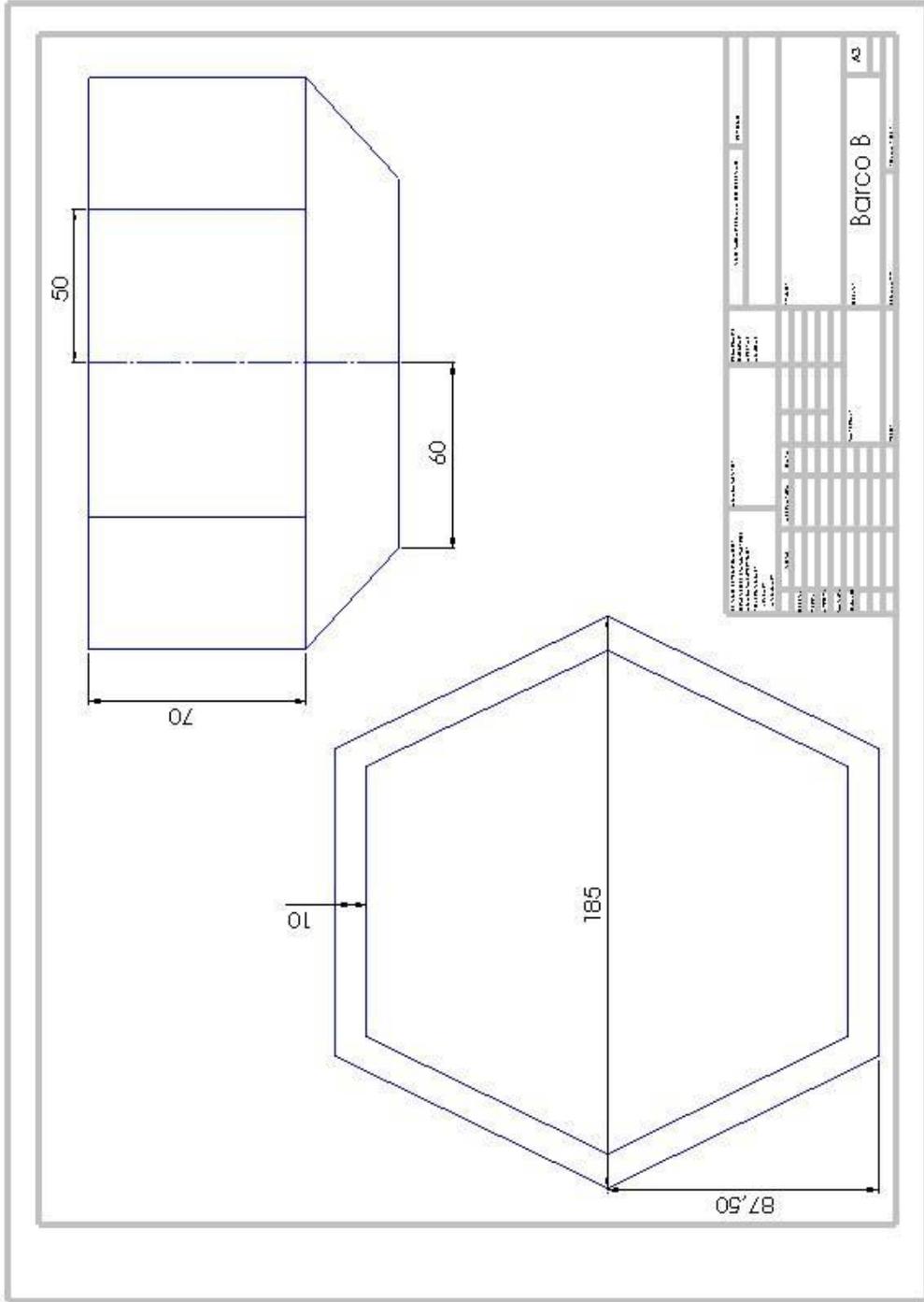
- ✓ Comparar e avaliar os resultados obtidos (forças de arrasto e outros) usando diferentes tamanhos de barcos;

- ✓ Realizar os experimentos e avaliar os resultados obtidos utilizando acessórios calibrados e de boa precisão.

Finalmente, apesar deste trabalho ser de simples complexidade acredita-se que este experimento possa ser fonte de pesquisa para trabalhos e estudos de natureza similar.

APÊNDICE





REFERÊNCIAS

BARROSO, LEÔNIDAS CONCEIÇÃO; BARROSO, MAGALI MARIA DE ARAÚJO; FILHO, FREDERICO FERREIRA CAMPOS; DE CARVALHO, MÁRCIO LUIZ BUNTE; MAIA, MIRIAM LOURENÇO. Cálculo Numérico com Aplicações, 2^a ed. São Paulo, SP, HABRA, 1987.

CASTEJON, DANILO VIEIRA. Metodos de Reducao do Arrasto e Seus Impactos Paulo, São Carlos, SP

C.E. AGUIAR; G. RUBINI. A Aerodinâmica da Bola de Futebol. 2004. Artigo Científico – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

CIÊNCIA NA MÃO – USP. Física do Futebol. Disponível em: <<http://www.cienciamao.usp.br/cienciasfisicas/index.php?painel=36>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

FARBER, LARSON. Estatística Aplicada, 4^a ed. São Paulo, SP, PEARSON, 2010.

FOX, ROBERT W; PRITCHARD PHILIP J, MCDONALD, ALAN T. Introdução à Mecânica dos Fluidos, 7^a ed. Belo Horizonte, MG, Editora LTC, 2008

FREE TRI SPEED (FTS). Swimming: Hard for Triathletes, Even Worse for Scientists. Disponível em: <<http://freetrispeed.com/2013/10/23/swimming-hard-for-triathletes-even-worse-for-scientists/>>. Acesso em 22 jun. 2015.

HALL, SUSAN J. Biomecânica Básica, 4^a ed. Rio de Janeiro, RJ, Editora Guanabara Koogan, 2005

HENRIQUES, VICTOR; PARENTE, JOAQUIM; QUINTANA, MIGUEL. Medidas para Minimização do Consumo de Combustível em Navios de Pesca. 2007. Artigo Científico - Ipirimar, Lisboa, Portugal.

INCROPERA, FRANK P.; DEWITT, DAVID P.; BERGMAN, THEODORE L. LAVINE, ADRIENNE S. Transferência de Calor e de Massa, 6^a ed. Rio de Janeiro, RJ, LTC, 2008.

ISMAIL, KAMAL A R. Aerodinâmica Aplicada. Campinas, SP, Editora da Unicamp, 2007

ISMAIL, KAMAL A R. Técnicas Experimentais em Fenômenos de Transferência. Campinas, SP, Editora da Unicamp, 2000

MUNSON, BRUCE R; YOUNG, DONALD F; OKIISHI, THEODORE H. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos vol. 2 , 2^a ed. São Paulo, SP, Editora Edgard Blucher, 1997

MUNSON, BRUCE R; YOUNG, DONALD F; OKIISHI, THEODORE H. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos, 4^a ed. São Paulo, SP, Editora Edgard Blucher, 2004

ONLINE SCIENCES. The Factors Affecting the Friction Between the Solid Object and the Water. Disponível em:<<http://www.online-sciences.com/friction-2/the-factors-affecting-the-friction-between-the-solid-objects-and-the-water/>>. Acesso em: 21 jun. 2015.

PORTAL DO PROFESSOR – MEC. Com um avião pode voar?. Disponível em:<<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=162>>. Acesso em: 10 abr. 2015

RESNICK, ROBERT; HALLIDAY, DAVID; S.KRANE, KENNETH. Física 2, 5^a ed. Rio de Janeiro, RJ, LTC, 2003

ROSILHO, VINICIUS. Diminuição do Arrasto Aerodinâmico e Economia de Combustível Devido a Substituição dos Espelhos Retrovisores por Câmeras. 2013. Monografia – Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP

R. C. HIBELLER. Estática - Mecânica para Engenharia. 10^a ed. São Paulo, SP, PEARSON, 2005.

TRINDADE, JORGE. Hidrodinâmica e Propulsão. Portugal, ENIDH, 2012

VIANNA, MARCOS ROCHA. Mecânica dos Fluidos para Engenheiros, 4^a ed. Belo Horizonte, MG, Imprimatur, 2001

WHITE, FRANK M. Fluid Mechanics, 4th ed. Rhode Island, McGraw-Hill, 1998