

**RHAÍRA HELENA CAETANO E SOUZA**

**DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE RESISTÊNCIA  
PASSIVA NA NATAÇÃO: NADO PEITO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2016**

**RHAÍRA HELENA CAETANO E SOUZA**

**DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE RESISTÊNCIA PASSIVA NA  
NATAÇÃO: NADO PEITO**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Cleudmar Amaral de Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Silvio Soares dos Santos

**UBERLÂNDIA - MG**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S729d Souza, Rhaíra Helena Caetano e, 1991-  
2016 Determinação da força de resistência passiva na natação: nado peito  
/ Rhaíra Helena Caetano e Souza. - 2016.  
103 f. : il.

Orientador: Cleudmar Amaral de Araújo.  
Coorientador: Silvio Soares dos Santos.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Natação - Teses. 3. Teste de  
esforço - Teses. 4. Biomecânica - Teses. I. Araújo, Cleudmar Amaral de,  
1963- II. Santos, Silvio Soares dos. III. Universidade Federal de  
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
IV. Título.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar força, clareza e motivação para superar tantos obstáculos e dificuldades ao longo desse período. Hoje me sinto mais forte e capaz, mais realizada.

Agradeço imensamente a minha mãe Iraci, pelo apoio, atenção e motivação em todos os momentos, você é a grande responsável por essa conquista. Ao meu pai Luiz, pelo carinho. Ao meu irmão Ryhã e cunhada Flávia, pelo apoio e ajuda nesse período. Agradeço ao meu namorado Vinícius, pelo amor, apoio, pelos conselhos e motivação incondicionais.

Agradeço ao Cleudmar pela disposição em me orientar neste trabalho, pela confiança, incentivo e esforços ao longo desse período.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram, ajudaram e proporcionaram momentos essenciais nessa caminhada, com palavras, companhia e carinho.

Ao Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM - UFU) e as pessoas que o compõem, por me ajudarem em diversos momentos, em especial meu agradecimento ao Diego Augusto e à Guênia Ladeira, por tornarem realidade nossa motivação e concretizarem nosso aparato experimental. Agradeço a Bárbara Gama da Silva, José Duarte Naves Junior, Mário Eduardo Santos Rodrigues e Silvio Soares dos Santos, por tornarem possível a realização dos experimentos na piscina, obrigada pela prontidão em me ajudar. Foi um grande aprendizado fazer parte deste grupo, sou grata pelo ambiente de trabalho e colegas que pude conviver.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao CNPq pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso e desenvolver esse trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente estiveram ao meu lado e acreditaram em mim.

SOUZA, R. H. C. Determinação da Força de Resistência Passiva na Natação: Nado Peito. 2016. 117f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

A natação é uma atividade esportiva, praticada na água, capaz de melhorar a saúde e auxiliar em processos de reabilitação física de pessoas com e sem deficiência. As modalidades crawl, borboleta, peito e costas são diferenciadas através de gestos motores específicos de pernas e braços. Em todos estes estilos, para diminuir a resistência ao deslocamento, é importante um posicionamento estendido do tronco, um quadril encaixado, um bom alinhamento e membros inferiores unidos. A força propulsiva deve ser aplicada de modo a romper o estado de inércia promovendo o avanço do corpo na água. Para isso, a força propulsiva promovida deve ser, no mínimo, superior à força de arrasto hidrodinâmico imposta pela água, contrária ao sentido de deslocamento do nadador. Portanto, a redução destas forças de resistência é de fundamental importância para o aumento da performance que também depende da melhoria do sistema cardiorrespiratório. Associado a estes aspectos, na natação não existem muitos equipamentos dedicados para avaliação do condicionamento físico que respeitem o gesto motor do nadador na piscina. O objetivo deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias na natação estudando e avaliando o arrasto passivo do nadador. Neste trabalho será desenvolvido um equipamento de potência para o arrasto passivo associado a uma instrumentação para aquisição dos níveis de força e metodologia para a estimativa da área da seção transversal no nado de peito. Foram selecionadas quatro posições do nado peito sendo avaliadas em um trecho de 12 m sob 5 níveis de velocidades. O comportamento biomecânico foi avaliado através da determinação da força de resistência passiva na água e dos coeficientes de arrasto de forma e de contato. Com os resultados encontrados foi possível observar uma diferença nas forças de resistência passiva entre as posições adotadas, especialmente para a posição 1 (Corpo totalmente esticado) que foi a mais hidrodinâmica. Equações polinomiais foram propostas a fim de estimar valores de resistência passiva em diferentes velocidades visando uma avaliação rápida nas diferentes posições no nado peito. A metodologia adotada para a obtenção das áreas das seções transversais do tronco do nadador via software ImageJ se mostrou efetiva e compatível com valores reais. A avaliação de forças na natação foi um primeiro passo para o desenvolvimento futuro do protótipo de um ergômetro para a natação.

---

Palavras - chave: natação; avaliação física; arrasto passivo; ergômetro.

SOUZA, R. H. C. **Determination of Passive Resistance Force in swimming: Breaststroke.**  
2016. 117p. Master Thesis, Universidade Federal de Uberlandia, Uberlandia.

## ABSTRACT

Swimming is a sport practiced in water, able to improve health and assist in physical rehabilitation processes of people with and without disabilities. The modalities crawl, butterfly, breaststroke and backstroke are differentiated through specific motor gestures of legs and arms. In all these styles, to reduce resistance in order to improve human displacement, it is important to adapt an extended position of the trunk, an embedded hip, good alignment of the body and keep lower members tight. The propulsive force must be applied to break the state of inertia promoting body advancement in water. For this purpose, the propulsive force is to be promoted, at a minimum, greater than the hydrodynamic drag force imposed by the water, against the swimmer's moving direction. Therefore, the reduction of these resistance forces is crucial for increasing performance, it also depends on the improvement of the cardiorespiratory system. Associated with these aspects, there are not many swimming equipment dedicated for evaluation of fitness which respects the swimmer's motor gesture in the pool. The objective of this study is to contribute to the development of new technologies in swimming, studying and evaluating the swimmer passive drag. This study aims to develop a swimming power equipment for passive drag associated with an instrumentation for acquisition of force levels and methodology for the estimation of the cross-sectional area in the breaststroke. Four positions were selected from the breaststroke, being evaluated in a stretch of 12 m in 5-different speed levels. The biomechanical behavior was evaluated by measuring the passive resistance force in water and drag coefficients according to shape and contact. With the results, we observed a difference in passive resistance forces among the positions adopted, especially for 1<sup>st</sup> position (fully extended body) which was the most hydrodynamics. Polynomial equations have been proposed in order to estimate passive resistance values at different speeds in order to rapidly assess different positions on the breaststroke. The methodology used to obtain the cross sections areas of the swimmer's trunk via ImageJ software was effective and compatible with real values. Evaluation of forces in swimming was a first step for the future development of the prototype of an ergometer for swimming.

---

Keywords: swimming; physical assessment; passive drag; ergometer.

## LISTA DE FIGURAS

<p>Figura 2.1 - Posição hidrodinâmica do corpo na natação. (<a href="http://www.efdeportes.com/efd54/deslize.htm">www.efdeportes.com/efd54/deslize.htm</a>). Acesso em: 06 mai 2015</p> <p>Figura 2.2 - Direção e sentido das forças propulsiva e de resistência (arrasto hidrodinâmico)</p> <p>Figura 2.3 – Posição dos centros de gravidade e de aplicação do empuxo (MIRON, 2009 – adaptado)</p> <p>Figura 2.4 - Posição do corpo quando o peso e empuxo atuam na mesma linha de ação</p> <p>Figura 2.5 – Fluxo Laminar e Turbulento no nado</p> <p>Figura 2.6 – Posições do nadador na execução do nado peito, vista lateral. (<a href="http://diariodahidroginastica.blogspot.com.br/2010/09/sobre-o-nado-peito.html">http://diariodahidroginastica.blogspot.com.br/2010/09/sobre-o-nado-peito.html</a>). Acesso 28 jun. 2016</p> <p>Figura 2.7 - Desenho do sistema <i>mad systems</i>.</p> <p>Figura 2.8 - Dispositivo portátil Exerswim. (<a href="http://www.bornrich.com/compound-you-pools-value-with-exerswim-current-generator.html">www.bornrich.com/compound-you-pools-value-with-exerswim-current-generator.html</a>.)</p> <p>Acesso em 23 abr de 2013</p> <p>Figura 2.9 – Forças medidas em diferentes modalidades de nado</p> <p>Figura 2.10 - Esquemático do aparato experimental descrito por YEATER et al. (1981).</p> <p>Figura 2.11 - Variação da força de tração dada no trabalho de DOPSAJ et al. (2000)</p> <p>Figura 2.12 - Força x Tempo típica após filtragem</p>	<p>8</p> <p>9</p> <p>10</p> <p>10</p> <p>11</p> <p>19</p> <p>22</p> <p>23</p> <p>24</p> <p>25</p> <p>25</p> <p>26</p>
--	---

Figura 3.1 – Método de nado atado. ( <a href="http://www.woohome.com/outdoor/make-the-endless-pool-with-home-swimmer">www.woohome.com/outdoor/make-the-endless-pool-with-home-swimmer</a> .) Acesso em: 22 abr 2015	28
Figura 3.2 - Sistema de avaliação com sistema atado. ( <a href="http://www.woohome.com/outdoor/make-the-endless-pool-with-home-swimmer">www.woohome.com/outdoor/make-the-endless-pool-with-home-swimmer</a> .) Acesso em: 22 abr 2015	28
Figura 3.3 – Esquemático da metodologia por nado atado, adotada por VILAS-BOAS (2001)	29
Figura 3.4 – Posicionamento do nadador no teste de dinamometria	30
Figura 3.5 - Fixação do dinamômetro na borda da piscina	30
Figura 3.6 - Ergômetro para nado crawl fora da água	32
Figura 4.1 - Desenho esquemático do equipamento. Na figura, 1: Estrutura sustentadora de ferro (medidas em cm), 2: Motor, 3: Redutor, 4: Tambor para cabo de aço, 5: Polias, 6: Célula de Carga, 7: Sistema de aquisição de dados, 8: Filmadora do plano transversal, 9: Filmadora do plano sagital. Destaque para o cabo de aço em cor azul e o fio de aquisição de dados em cor laranja	38
Figura 4.2 - Vista superior do sistema: 1 - motor; 2 - polia; 3 - redutor; 4 - mancais; 5 - tambor com cabo de aço.	39
Figura 4.3 - Visão geral do sistema: 1 - célula de carga	39
Figura 4.4 - Esquemático do sistema de forças, cabos e polias. Na figura, 1: Nadador, 2: polia presa ao cinto peitoral do nadador, 3: cabo de aço, 4: célula de carga, 5: polias fixas do lado de fora da piscina e 6: tambor	41
Figura 4.5 - Sistema integrado de aquisição de dados. ( <a href="http://www.lynxtec.com.br/">www.lynxtec.com.br/</a> )	42
Figura 4.6 - Inversor de frequência utilizado nos experimentos	43

Figura 4.7 - Cinto peitoral de massa 225 g (501 g quando molhado na água), idêntico ao utilizado nos testes.	43
( <a href="http://www.conquistamontanhismo.com.br/cinto-peitoral">www.conquistamontanhismo.com.br/cinto-peitoral</a> )	
Figura 4.8 - Nadadora vestida com cinto peitoral e acessórios	44
Figura 4.9 - Célula de carga da HBM, modelo S40A, capacidade de 100 N	44
Figura 4.10 - Máquina Universal de Ensaios - BME 10 kN	45
Figura 4.11 - Célula de carga padrão utilizada na calibração	46
Figura 5.1 - Área frontal no nado peito	49
Figura 5.2 - Posições adotadas no nado peito, destaque para as posições 1, 2, 3 e 4 deste trabalho, respectivamente	49
Figura 5.3 - Câmera para aquisição das imagens no plano transversal	50
Figura 5.4 - Deslocamento da nadadora em três momentos do percurso	51
Figura 5.5 - Calibração da escala nas imagens, valores em cm, com o software ImageJ	52
Figura 5.6 - Área frontal efetiva, primeiramente determinada em pixel <sup>2</sup> a partir da vista transversal do corpo do nadador	53
Figura 5.7 - Medidas superior e lateral da cabeça da nadadora	54
Figura 6.1 – Nadadora posicionada na piscina durante captação das imagens	55
Figura 6.2 - Área frontal efetiva, determinada em pixel <sup>2</sup> pelo software ImageJ, correspondente à área da seção transversal S na posição 1	56
Figura 6.3 - Área frontal efetiva, determinada em pixel <sup>2</sup> pelo software ImageJ, correspondente à área da seção transversal S na posição 2	57

Figura 6.4 - Área frontal efetiva, determinada em pixel <sup>2</sup> pelo software ImageJ, correspondente à área da seção transversal S na posição 3	57
Figura 6.5 - Área frontal efetiva, determinada em pixel <sup>2</sup> pelo software ImageJ, correspondente à área da seção transversal S na posição 4	57
Figura 6.6 - Área frontal no nado peito. A linha central representa o valor encontrado para as áreas (em m <sup>2</sup> ), as linhas superior e inferior representam o erro intrínseco das medidas, observado com o uso do software ImageJ	59
Figura 6.7 - Contato feito por parafuso entre as células de carga utilizadas na calibração	60
Figura 6.8 - Correlação e ganho do sinal dados na calibração da célula de carga pelo software de aquisição de dados da LYNX®	61
Figura 6.9 - Sinal de força no reboque da nadadora	62
Figura 6.10 - Trecho retirado para processamento do sinal destacado entre as linhas vermelhas	62
Figura 6.11 - Trecho do sinal de interesse em relação ao sinal de base dos resíduos	63
Figura 6.12 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de 0,536 m·s <sup>-1</sup>	64
Figura 6.13 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de 0,711 m·s <sup>-1</sup>	64
Figura 6.14 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de 0,886 m·s <sup>-1</sup>	65
Figura 6.15 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de 1,036 m·s <sup>-1</sup>	65
Figura 6.16 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de 1,175 m·s <sup>-1</sup>	66

Figura 6.17 – Posicionamento real da nadadora na realização dos testes nas posições 2 (a), 3 (b) e 4 (c)	67
Figura 6.18 – Exemplos de frames extraídos do aplicativo kinovea, para a detecção das velocidades lineares. (a) frame do início do deslocamento da nadadora e medida de calibração dada entre cones; (b) momento intermediário do percurso da nadadora e (c) momento final do percurso da nadadora	69
Figura 6.19 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dméd}$ ) em função da velocidade linear (v) para as 04 posições analisadas	72
Figura 6.20 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dméd}$ ) em função da velocidade linear (v) e curva de interpolação para a posição 1	72
Figura 6.21 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dméd}$ ), em função da velocidade linear (v), e curva de interpolação para a posição 2	73
Figura 6.22 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dméd}$ ), em função da velocidade linear (v), e curva de interpolação para a posição 3	73
Figura 6.23 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dméd}$ ), em função da velocidade linear (v), e curva de interpolação para a posição 4	74
Figura 6.24 - Determinação do arrasto passivo analítico de contato ( $F_{DC}$ ) por posições, de acordo com a velocidade de deslize / reboque da nadadora.	77
Figura 6.25 – Relação entre o coeficiente de arrasto passivo total e a velocidade para as quatro diferentes posições de deslize	78
Figura 6.26 – Relação entre o coeficiente de arrasto de contato calculado e a velocidade para as quatro diferentes posições de deslize	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Valores de área da secção transversal do tronco da nadadora (S) para as quatro posições.	58
Tabela 6.2 – Valores em Volts (V) e força de compressão (N) correspondentes para calibração da célula de carga da HBM®	60
Tabela 6.3 - Velocidades na saída do tambor e no cabo de aço	68
Tabela 6.4 - Velocidades medidas e teóricas para cada rotação do motor	68
Tabela 6.5 - Forças médias de arrasto passivo total na nadadora	70
Tabela 6.6 –Forças de resistência passiva para cada posição à velocidade de $2,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	74
Tabela 6.7 - Valores do coeficiente de arrasto e da contribuição de forma e contato para cada velocidade em quatro posições de deslize	75
Tabela 6.8 - Valores do arrasto passivo de contato para cada velocidade em quatro posições de deslize ( $H = \text{Pos1: } 1,980 \text{ m, Pos2: } 1,685 \text{ m, Pos3: } 1,250 \text{ m, Pos4: } 1,400 \text{ m}$ $BM = 58,500 \text{ kg}$ , $A_{\text{superfície}} = 1,641 \text{ m}^2$ ).	76

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$A_{superfície}$	Área da superfície corporal em contato com a água
$A_f$	Área frontal
$A_{eff}$	Área frontal efetiva
$a$	Aceleração
$BM$	Massa corporal [kg]
$BSA$	Superfície da área do corpo do nadador
$C_D$	Coeficiente de arrasto hidrodinâmico total
$C_{Df}$	Coeficiente de arrasto de contato
cm	Centímetros
$F_{Dtotal}$	Força de arrasto hidrodinâmico total
$F_D$	Força de arrasto hidrodinâmico de forma
$F_{DC}$	Força de arrasto hidrodinâmico de contato
$F_{DW}$	Força de arrasto hidrodinâmico de onda
FINA	Federação Internacional de Natação
fps	frames por segundo
$g$	Aceleração da gravidade
$H$	Altura do indivíduo
$kg$	Quilogramas, Unidade de massa
$L$	Comprimento do corpo pelo qual o fluido se escoa
$m$	Metros, Unidade de comprimento / massa, no SI
$min$	Minutos
$N$	Newtons, Unidade de Força
$^{\circ}C$	Graus centígrados
$p$	Força propulsiva
$Re$	Reynolds
$S$	Área da seção transversal do tronco do nadador

s	Segundos
<i>t</i>	Tempo
v	Velocidade linear [m·s <sup>-1</sup> ]
$\mu$	Viscosidade dinâmica da água [Pa·s]
$\rho$	Massa específica / densidade
$\sigma$	Desvio padrão

## SUMÁRIO

Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de figuras	v
Lista de tabelas	x
Lista de Símbolos e Siglas	xi
<b>1 CAPÍTULO I</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 CAPÍTULO II</b>	<b>5</b>
<b>BIOMECÂNICA DO NADO</b>	<b>5</b>
2.1 Modelagem dinâmica	5
2.2 Modelo Cinemático	7
2.3 Velocidades na natação	17
2.4 Arrasto Passivo	17
2.5 Relação entre Força e Velocidade	21
<b>3 CAPÍTULO III</b>	<b>27</b>
<b>ERGOMETRIA NA NATAÇÃO</b>	<b>27</b>
3.1 Dispositivos atados e semiatados	27
3.2 Equipamentos para avaliação do nado	32
3.3 Técnicas experimentais do estudo do arrasto passivo na água	33
<b>4 CAPÍTULO IV</b>	<b>37</b>
<b>PROJETO E FABRICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ARRASTO</b>	<b>37</b>
4.1 Desenvolvimento do Equipamento de Arrasto	37
4.2 Materiais Utilizados	43
4.3 Calibração da célula de carga	45
4.4 Caracterização do experimento	46
4.5 Análise dos Dados	47

<b>5</b>	<b>CAPÍTULO V</b>	48
	<b>COEFICIENTE DE ARRASTO HIDRODINÂMICO</b>	48
	5.1 Amostra	48
	5.2 Avaliação do Perfil Hidrodinâmico	48
	5.3 Método para cálculo da área da seção transversal do tronco do nadador (S)	51
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO VI</b>	55
	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	55
	6.1 Área da seção transversal	55
	6.2 Calibração da Célula de Carga	59
	6.3 Força de Resistência Passiva	61
	6.4 Determinação das Velocidades Lineares	67
	6.5 Coeficiente de Arrasto Passivo no Nado Peito	74
<b>7</b>	<b>CAPÍTULO VII</b>	80
	<b>CONCLUSÕES</b>	80
	7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	81
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	83
<b>9</b>	<b>APÊNDICE</b>	93
	Apêndice I – Passo a passo do procedimento de cálculo da área plana da seção transversal do tronco do nadador	93
	Apêndice II – Dimensões Equipamento para arrasto do nadador	98
<b>10</b>	<b>ANEXO</b>	99
	Anexo I – Certificado de Calibração da Célula de carga padrão usada na Máquina Universal de Ensaios	94
	Anexo II – Configuração de pinos no hardware do sistema de aquisição da LYNX®	101
	Anexo III – TCLE (Termo de Consentimento Livre e Esclarecido) assinado pela equipe executora do projeto e voluntária	102

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUÇÃO**

A prática de exercícios físicos é importante e benéfica para a saúde. O exercício contribui para manter níveis baixos de açúcar e colesterol no sangue. A natação tem se mostrado como uma fórmula que retarda o envelhecimento ao ser apontada por especialistas como prática que ajuda a capacidade cardiorrespiratória e circulatória, melhora o raciocínio, auxilia na reabilitação de movimentos, melhora o equilíbrio e coordenação motora. (SILVA e VASCONCELOS, 2008) Na natação, para que um nadador se desloque, o mesmo deve dispor de uma força propulsiva no mínimo superior à força de arrasto hidrodinâmico imposta pela água, contrária ao sentido de deslocamento do nadador. Portanto, para o estudo da natação, trabalho mecânico será dado pela força aplicada pelo nadador ao longo da execução do exercício na piscina. (BELLOCH, 2006) Porém, forças de resistência, detalhadas no estudo da hidrodinâmica estão intimamente envolvidas nesse processo e devem ser cuidadosamente analisadas, visto que podem conferir erro quanto ao estudo do movimento e aplicação de forças.

Muitas estratégias de treinamento e condicionamento de nadadores são descritas na literatura na intenção de se melhorar as habilidades físicas dos nadadores. Estratégias proeminentes referem-se a métodos resistivos fora e dentro da água na prática do nado. Alguns estudos têm sugerido que treinamento resistivo na água é mais eficiente do que treinos que simulam o nado fora da água. (TOUSSAINT, 2004)

Esfôrços têm sido dispendidos em alguns estudos no intuito de se analisar o deslize na natação e sua influência no resultado da performance do nadador, outros estudos procuram

comparar os métodos de treinamento fora e dentro da água. Tais considerações serão discutidas e apresentadas ao longo deste trabalho. O deslize na natação diz respeito a certas fases na execução do nado em que o nadador não executa ações de propulsão do corpo e procura manter sua velocidade para gerar grande deslocamento. Nessas fases, a área da seção transversal de seu tronco influencia diretamente na força de arrasto hidrodinâmico que se opõe ao movimento do nadador e deve ser minimizada. Essa relação é dada por uma formulação, que será discutida adiante.

Ao executar propulsão no nado, o nadador está sujeito a uma força de arrasto ativo, a qual se opõe ao sentido de movimento, já nas fases de deslize do nado, essa força de arrasto será passiva, determinando o arrasto passivo. Relaciona-se diretamente com esses arrastos, a seção transversal do tronco do nadador, a qual será uma área que permitirá determinar se há diferenças entre o arrasto ativo e passivo na execução do movimento pelo nadador. (ZAMPARO *et al.*, 2009)

Sabe-se que com a correta execução do exercício da natação, assim como acionamento direcionado das fibras necessárias para a execução de cada parte da atividade, impulsiona a produção de fibras específicas para cada tipo de ataque, assim como aciona maior quantidade de unidades motoras de um músculo, na contração muscular, fazendo com que o atleta coordene melhor seus movimentos. (WEINECK, 1986) A reação do processo de contração das fibras musculares ocorre pela combinação de impulsos neurais inibitórios e excitatórios, que transmitem estímulos continuamente aos neurônios e determinam seu potencial de ação para a excitação (MAIOR e ALVES, 2003; WILMORE e COSTILL, 2001).

Com a prática do exercício físico, a capacidade motora do indivíduo é alterada, apresentando-se uma maior sincronização das unidades motoras quando solicitada e ainda, maior recrutamento dessas unidades motoras. Tais fatos impulsionam a velocidade de contração do indivíduo, em exercícios que exijam grande recrutamento de fibras em um pequeno intervalo de tempo, como na saída da natação. Porém, o recrutamento das unidades motoras depende do exercício que está sendo executado, pois nem todas as unidades motoras são solicitadas ao mesmo tempo (STEWART *et al.*, 2011). Com isso, é possível notar que a reprodução do movimento do nado é necessária no treinamento do nadador, recrutando unidades motoras específicas, de modo a melhor superar a força de arrasto hidrodinâmico que se opõe ao nado na água. Nesse aspecto, a avaliação física de um atleta prevê diversos passos que são importantes na análise de sua performance e melhoria de desempenho. Um conceito representativo nessa análise é o da ergometria. A ergometria, por definição, é um método que

mede a quantidade de trabalho realizado pelo corpo durante um exercício físico. Essa medição pode ser realizada com o auxílio de um equipamento denominado ergômetro, que é um aparelho desenvolvido com a finalidade de se medir trabalho realizado por uma pessoa ou animal. Na natação, o ergômetro procura avaliar o trabalho realizado, na execução do movimento de nado.

Dentre as quatro modalidades de nado, o nado peito é o mais lento, pois exige difícil coordenação. Neste estilo, o corpo do nadador deve estar posicionado com os ombros paralelos à superfície da água. Nos estilos de nado crawl e costas, braços e pernas devem ser alternados, já no nado peito, esses movimentos são simultâneos. O início da movimentação do nado peito deve ser com as pernas totalmente estendidas, mas passa por diversas configurações que abrangem grande amplitude de movimento.

A natação é uma das modalidades que reúne o maior número de participantes em jogos olímpicos e paralímpicos. Nos jogos paralímpicos está presente desde a primeira edição, em Roma – 1960. Como destaca o Portal dos jogos paralímpicos, Rio 2016 (<http://www.brasil2016.gov.br/pt-br/paraolimpiadas/modalidades/natacao>), o Brasil tem se destacado na natação desde 1984. Alguns atletas se destacaram nos Jogos de 2004, 2008 e 2012, garantindo ao Brasil 83 medalhas nesta modalidade, a qual se tornou a segunda modalidade com mais medalhas pelo Brasil, atrás apenas do atletismo.

Em nadadores de elite, a técnica do nado pouco se difere, assim, medidas antropométricas, como a área da superfície em contato com água e a área da seção transversal do tronco do nadador, a qual irá se chocar contra o fluxo de água, são elementos decisivos para o desempenho do nadador em seu percurso. Estimar a força de arrasto que ocorre contra o sentido de movimento e sua alteração de acordo com o posicionamento do nadador é o primeiro passo para se projetar um ergômetro para a natação. Para desenvolver ergômetros específicos para a natação, adaptados ao ambiente da piscina, de modo a avaliar o condicionamento físico de nadadores é necessário, em um primeiro momento avaliar os níveis de força resistiva na água (força de arrasto). Neste caso, o conhecimento dos efetivos níveis de resistência definirão as faixas operacionais do equipamento permitindo realizar a otimização dos movimentos do nadador.

A proposta deste trabalho é desenvolver um equipamento para arrastar um nadador (a) na piscina associado a uma metodologia adaptada capaz de medir os níveis de resistência passiva gerados por posicionamentos específicos associados a uma modalidade específica de nado. Por meio desta avaliação, determinar parâmetros relacionados com forças efetivas na

natação. Para isto, as análises serão realizadas em uma modalidade de natação, o nado peito. Através do equipamento e da instrumentação integrada serão estimados os níveis de força mínimos necessários para romper o arrasto hidrodinâmico durante as fases de deslize do nadador (arrasto passivo). Nessa avaliação, a área da seção transversal do tronco do nadador foi determinada através de imagens do nadador em posições estabelecidas do nado peito.

O arrasto do nadador foi realizado através de um equipamento desenvolvido neste trabalho. O arrasto na piscina era realizado em uma condição passiva representativa de um gesto motor específico da modalidade nado peito. Através da instrumentação e da metodologia utilizada, adaptada para as condições experimentais, foi possível avaliar a força de resistência do arrasto passivo em quatro diferentes posições do nado peito.

As posições adotadas atuaram como fonte de modificação da eficiência do deslize da nadadora, devido suas características resistivas e iniciais, distinguindo-se em relação à área frontal do corpo do nadador e abrangendo uma maior expansão de movimentos.

Os valores experimentais de força de resistência passiva encontrados para a nadadora nas quatro posições variaram de 26 a 134 N. Observou-se que na posição mais hidrodinâmica, posição 1, os valores de força foram inferiores aos observados nas outras posições.

Para que os objetivos deste trabalho fossem atingidos, no Capítulo II é apresentada a fundamentação teórica na qual se respalda a justificativa deste trabalho, apresentada na mesma seção. No Capítulo III é apresentada uma revisão da literatura sobre ergômetros para a natação e trabalhos desenvolvidos recentemente. No Capítulo IV são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do equipamento usado nos testes. O Capítulo V mostra os materiais e métodos adotados na estimativa do coeficiente de arrasto passivo, a partir do cálculo experimental da área da seção transversal da nadadora. O Capítulo VI apresenta os resultados encontrados com a metodologia proposta e discute sua relevância, comparando com trabalhos recentes encontrados na literatura. O Capítulo VII apresenta as conclusões deste trabalho e as sugestões para a sua continuação.

## CAPÍTULO II

### BIOMECÂNICA DO NADO

#### 2.1 Modelagem dinâmica

No estudo da biomecânica do nado existem diversas limitações inerentes ao processo de aquisição de dados do nadador na água, o que exige do observador habilidade de avaliação de diferentes fluidos junto ao corpo do nadador e a interface água/ar, além de abordar modelos aquáticos de predição de forças de resistência, existentes na locomoção do nadador em seu percurso. É notável, portanto, que o estudo de variáveis isoladas da biomecânica do nado não trata do sistema nadador mais meio aquoso de maneira global, o que deve ser evitado como apontam estudos. A avaliação de variáveis biomecânicas em ambiente não controlado, na execução da atividade por parte do nadador revela maior potencial na representação real da prática da natação.

Segundo Silvatti e coautores (2010) a biomecânica da natação está relacionada com aspectos considerados na seleção de modelos biomecânicos em meio. O modelo biomecânico para este estudo pode ser dinâmico ou cinemático.

A determinação de forças que agem com resistência ao sentido de movimento é de interesse no nado e técnicas dinâmicas inversas são utilizadas a fim de se estimar os parâmetros de interesse que provocam resistência ao nado. Neste caso, a força de arrasto gerado pelo nadador é de interesse no estudo da natação

Em uma análise dinâmica, o arrasto e o empuxo são relevantes além da força peso. De acordo com Barros (2010), o efeito do empuxo do ar nessa análise não pode ser desconsiderado. O arrasto hidrodinâmico ( $F_D$ ) é dependente de características da água, como viscosidade, fluxo laminar ou turbulento, densidade do fluido ( $\rho$ ), coeficiente de arrasto do corpo ( $C_D$ ) e área da seção transversal do corpo normal ao movimento ( $S$ ).

Desta forma, a força propulsiva executada pelo nadador deve superar à força resistiva imprimindo maior diferença entre as duas a fim de gerar uma maior velocidade do nadador ( $v$ ). A Eq. (2.12.1) apresenta a relação entre essas variáveis, sendo o arrasto a resistência da água associada a um movimento de nado (KOLMOGOROV *et al.*, 1997) com cálculo do coeficiente de arrasto de forma ( $C_D$ ):

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot v^2 \cdot S} \quad (2.1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da água ( $997 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $26^\circ\text{C}$ ),  $F_D$  é o arrasto passivo (força),  $v$  é a velocidade e  $S$  é a área da seção transversal do tronco do nadador.

Há diversas maneiras, discutidas atualmente, que procuram reduzir o coeficiente de arrasto entre o nadador e fluido. Por exemplo, desde os anos 1970, a retirada dos pelos do corpo do nadador e a confecção de roupagem especial na prática de competições são realizados.

Fédiaevski *et al.* (1979), destacam que o coeficiente de arrasto do corpo ( $C_D$ ) é uma grandeza adimensional, dependente dos números de *Strouhal*, *Froude*, *Euler* e *Reynolds*, da densidade da água, velocidade e seção transversal, aceleração da gravidade ( $g$ ), da viscosidade do fluido ( $\mu$ ), da forma e orientação do corpo, relativamente às direções de deslocamento.

A utilização das roupas especiais foi proibida, após diversos recordes mundiais superados na Olimpíada de Pequim, em 2008, devido ao abuso de vantagens tecnológicas em favor de cada nadador, diminuindo a resistência de contato com a água e influenciando diretamente no arrasto de contato, uma das componentes de resistência no nado.

Atualmente, os separadores de raias são em formato de anéis plásticos, os quais absorvem energia mecânica das ondas formadas na água com o movimento do nadador. Tais anéis plásticos se movimentam e não permitem a propagação das ondas para as raias subsequentes. A redução da densidade da água por elevação da temperatura da mesma, beneficia a performance do nadador em determinada piscina, além de outras medidas, como profundidade da piscina e paredes que evitam a reflexão das ondas nas bordas da piscina podem auxiliar na melhora da performance do nadador.

Silvatti e coautores (2010) em seu estudo destaca ainda que parte do corpo do nadador é submetida a fluxo laminar do fluido, enquanto outras sofrem ação de fluxo turbulento. Tal aspecto influí diretamente na velocidade do nadador, em que, no fluxo laminar a força de arrasto é proporcional à velocidade do nadador, já para o fluxo turbulento, quando há aumento da

velocidade do nadador, a força de arrasto aumenta proporcionalmente com o quadrado dessa velocidade.

Autores como Belloch (2006) têm se dedicado a observar quais partes do corpo, em cada braçada, estão submetidas a quais fluxos. A relação de igualdade do empuxo com o peso existe apenas quando o corpo do nadador está completamente submerso, sendo que essa igualdade não é observada no momento que o nadador sofre empuxo por diferentes fluidos, como no ar. Muitas vezes, apenas o nadador submerso é considerado para fins de cálculo.

Barbosa (2015) destaca que a força de arrasto é estimada a partir de propriedades cinemáticas e inerciais. Assim, como no modelo dinâmico, a diferenciação do conjunto velocidade-tempo ou a dupla diferenciação do conjunto deslocamento-tempo é feita então, inserida nas equações básicas do movimento (VILAS-BOAS *et al.*, 2010; BARBOSA *et al.*, 2013; BARBOSA *et al.*, 2014).

## **2.2 Modelo Cinemático**

Como discute Barros (2010), a dificuldade de se obter as posições do nadador em cada ponto ao longo do movimento, é um desafio que se estende à obtenção de variáveis que sistematizem o nado. A representação do nadador como segmentos rígidos e articulados tem se mostrado propícia na análise do movimento, visto que o nadador não deve ser considerado como um ponto material. Conclusão esta tomada a partir do que foi discutido anteriormente, como diferença de forças e fluxo em cada parte do corpo do nadador, como consequência, diferentes variáveis são passíveis de cálculo. Quando em um estudo simplificado, o nadador pode ser tratado como ponto material, e assim é possível analisar sua posição ao longo do tempo e variáveis derivadas, como velocidade e aceleração, por exemplo. No modelo para seguimentos rígidos e articulados, deve-se definir, a cada dois segmentos subsequentes, se determinada articulação é de apenas flexão-extensão, ou se possui também abdução-adução e rotação médio-lateral. Deve-se evidenciar ainda se o modelo será tridimensional ou bidimensional, adequando-se às simplificações de cada uma das abordagens, as variáveis de interesse devidamente colocadas.

A geometria e cada parte do corpo do nadador deve seguir padrões já pré-estabelecidos de proporcionalidade definidos em outros estudos, ou ser aceita como representativa a partir de variáveis com proporcionalidade. As características biomecânicas de cada segmento devem ser mantidas, como massa e posicionamento do centro de massa do indivíduo. Silvatti e coautores

(2010) destacam que há análise em duplo-meio, com presença de dois fluidos, o ar e a água; de modo que a análise cinemática fique condicionada a tratar o problema dos diferentes índices de refração envolvidos e deve ser considerada quando se tratar de uma análise por meio de sensores-transdutores.

Como parte de interesse no modelo cinemático que estima a conformação do corpo do nadador em suas posições no nado, a morfologia do corpo do nadador requer atenção especial na execução do exercício.

Para o nadador, o principal objetivo na natação competitiva é terminar a distância exigida em menor tempo possível. A maior parte do percurso é realizada em natação livre (HAZRATI *et al.*, 2016), exigindo que o nadador tenha uma propulsão adequada e deslize o corpo com a técnica adequada, posicionando-se mais corretamente possível de forma a manter seu corpo em posições hidrodinâmicas, de modo a vencer a força negativa exercida pelo arrasto.

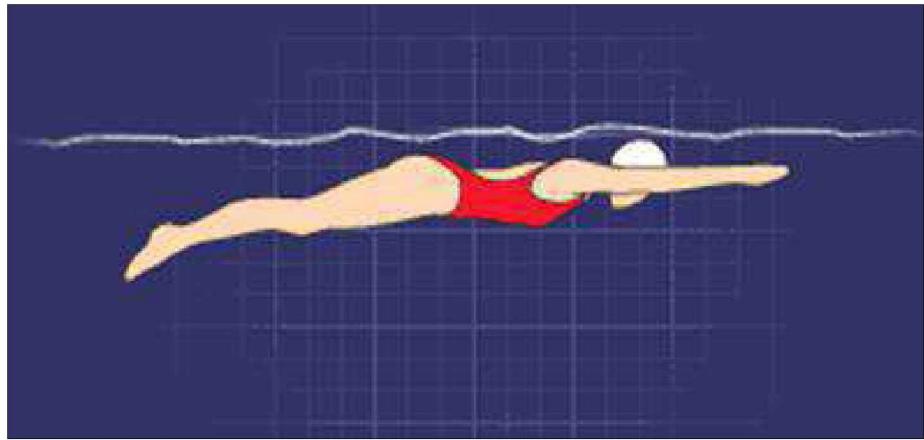


Figura 2.1 - Posição hidrodinâmica do corpo na natação.  
[www.efdeportes.com/efd54/deslize.htm](http://www.efdeportes.com/efd54/deslize.htm)). Acesso em: 06 mai 2015.

Para o correto posicionamento do nadador, o tronco deve estar estendido e o quadril encaixado, como mostra a Fig. 2.1, diminuindo ao máximo a curvatura lombar, apresentando um alinhamento horizontal e lateral, para diminuir a força de atrito.

Os membros inferiores devem estar unidos e estendidos para diminuir a resistência ao deslocamento. Os pés devem se esforçar para ficar com máxima flexão plantar.

Para uma efetiva execução de técnicas por parte dos nadadores, diversas características biomecânicas devem ser observadas. Fatores como forças aplicadas, rendimento do nado, propulsão e posicionamento corporal definem a performance do nadador, de forma que as resistências envolvidas agem sobre as resultantes das forças e, consequentemente, sobre o

desempenho energético do nadador. Na Figura 2.2 insere-se a representação da direção e do sentido dessas forças, na execução do nado crawl.

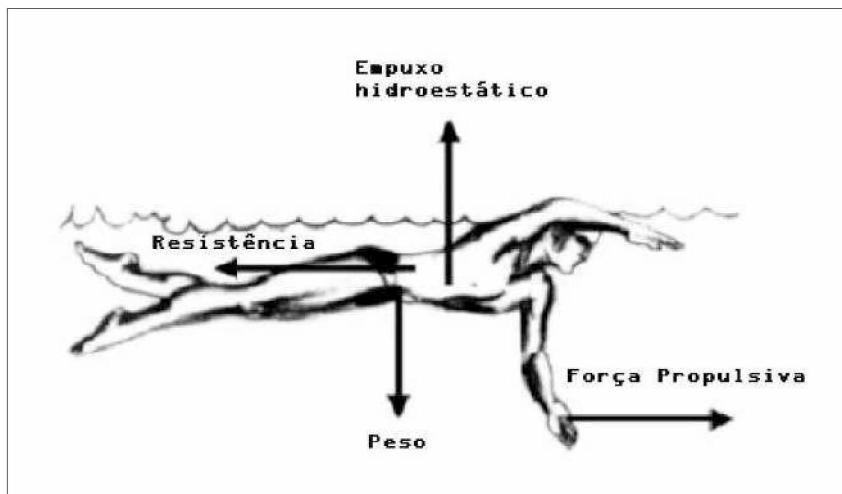


Figura 2.2 - Direção e sentido das forças propulsiva e de resistência (arrasto hidrodinâmico) (BELLOCH, 2006)

As forças propulsivas no nado são regidas pelo Princípio de Bernoulli, o qual afirma que a pressão do fluido é reduzida quando a velocidade de fluxo é aumentada. Há conservação de energia no sistema quando o fluxo é laminar. Esta condição é inexistente durante as braçadas. A diferença de pressão entre dois fluxos é descrita como sustentação dinâmica. Tal princípio, no entanto, desconsidera forças de resistência, as quais devem ser consideradas na modelagem real de forças de propulsão na natação (RUSHALL *et al.*, 1994).

Como destaca Minetti (2004), uma locomoção eficiente acontece quando a maior parte da energia metabólica é convertida em gasto mecânico. Com isso, é possível gerar a propulsão na natação, porém, diferentemente de atividades na terra/ar, a propulsão não é gerada a partir do empurrão contra um ponto fixo (como o é contra o solo na marcha) e sim a partir de um impulso dado na água, o qual possibilita o movimento de avanço do nadador. (TOUSSAINT *et al.*, 2004)

A performance do nadador é devida ao meio que está inserido e a capacidade do corpo humano de flutuar. A flutuabilidade é a capacidade de uma pessoa flutuar, que depende tanto do peso do atleta como da força hidrostática (empuxo), que age no centro de volume. Se o peso for maior que o empuxo a pessoa afundará, do contrário flutuará na água, ou seja, o fator que determina se uma pessoa vai flutuar ou não é a relação entre as densidades do corpo e da água, pois os volumes do corpo e de água deslocada por ele são iguais. (BELLOCH, 2006)

A capacidade de flutuar também depende dos centros de gravidade e de aplicação do empuxo. Esses centros não se coincidem, o centro de empuxo está mais próximo da cabeça que o centro de massa, como mostrado na Fig. 2.3, isso ocorre pois a porção superior do corpo do indivíduo apresenta maior densidade, volume maior com maior massa. (MIRON, 2009)

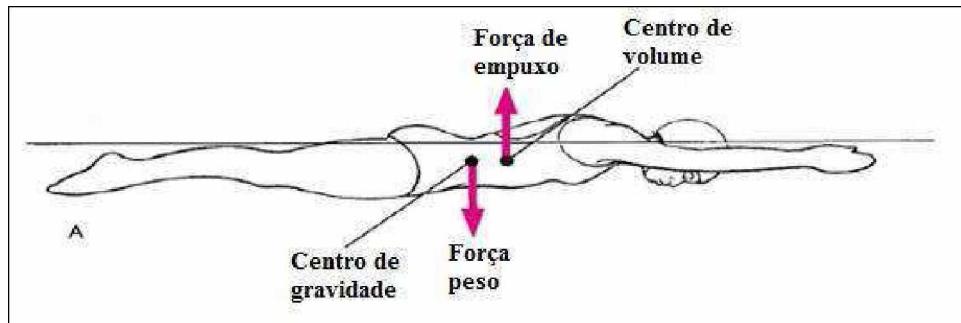


Figura 2.3 - Posição dos centros de gravidade e de aplicação do empuxo (MIRON, 2009 – adaptado)

Na Figura 2.4 é possível observar como o empuxo e a força peso atuam na mesma linha de ação quando o corpo do nadador se encontra em uma posição específica. É possível perceber que na posição apresentada, o centro de gravidade e de volume encontram-se próximos e em um mesmo eixo vertical, o que indica a distribuição proporcional da massa do nadador entre sua parte superior e inferior, para a posição mostrada.

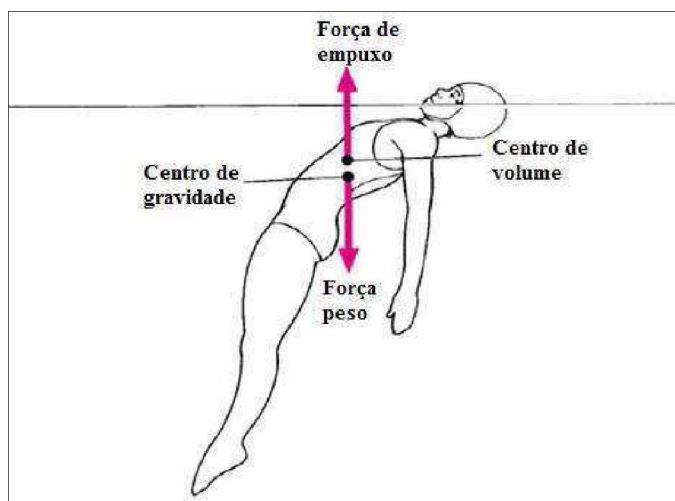


Figura 2.4 - Posição do corpo quando o peso e empuxo atuam na mesma linha de ação. (MIRON, 2009 – adaptado)

O fluido pode apresentar escoamento laminar, turbulento e de transição. Para Costill (1992), a definição de fluxo laminar refere-se àquele que apresenta fluxo das moléculas de

fluido sem interrupções. Em geral, a superfície sobre a qual escoa é lisa e a velocidade média do mesmo não atinge valores elevados (FÉDIAEVSKI *et al.*, 1979). No regime laminar, o fluido escoa e se desloca sem mistura de suas camadas (NOVAIS-BARBOSA, 1985).

O deslocamento do fluido com velocidade elevada, pode promover um escoamento irregular, formando-se esteiras e misturas de camadas de fluido adjacentes com diferentes velocidades. Esse escoamento é considerado turbulento. No escoamento turbulento, as partículas do fluido apresentam movimento não uniforme, com trocas transversais de quantidade de movimento (STREETER e WYLIE, 1982 *apud* RIBEIRO, 2006).

Tanto no fluxo laminar ou turbulento, existe uma força de resistência contrária ao movimento e intrínseca ao deslocamento de um corpo por um fluido, denominada de arrasto. A resistência (ou arrasto) é uma força com mesma direção, mas com sentido contrário ao avanço, por isso ela dificulta ou impede o movimento do nadador. Na água existem três tipos de resistência: a resistência de forma (ou de pressão), de atrito (ou de contato) e de onda (BELLOCH, 2006).

O arrasto de forma ou pressão: é a resistência mais importante na natação, pois é aquela que se manifesta como o grau de dificuldade do corpo em deslizar-se na água. É devida ao diferencial de pressões que se cria em torno do nadador. Durante o nado, é gerada uma zona de alta pressão à frente do corpo e de baixa pressão por trás dele. (BELLOCH, 2006). Os gradientes de pressão freiam o avanço do nadador, com o aparecimento de fluxos turbulentos, como se observa na Fig. 2.5.

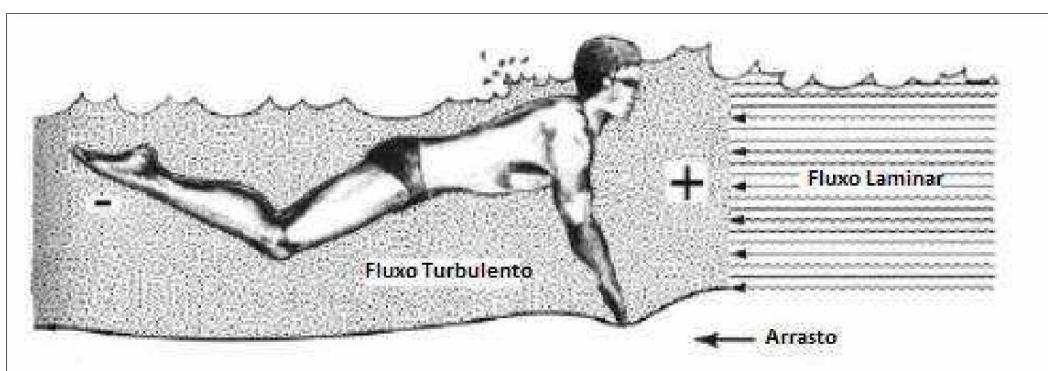


Figura 2.5 - Fluxo Laminar e Turbulento no nado. (BELLOCH, 2006 – adaptado)

O estudo da resistência de forma, como descreve (BELLOCH, 2006), é quantificado a partir do modelo dinâmico. Este modelo é adequado para medir a resistência passiva, quando o nadador assume uma posição fixa sendo arrastado por algum mecanismo.

Como a densidade do fluido pode ser considerada constante, assumindo uma pequena variação da temperatura, mantendo-se a velocidade, quanto menor a resistência de forma, menor a resistência frontal. Com um bom alinhamento do corpo, o nadador reduz a resistência frontal. Um ponto interessante é observar que o grande volume muscular, apesar de fomentar a capacidade de movimento do nadador, gera uma área frontal considerável, o que pode não compensar na relação aumento de volume e aumento de resistência associado. O arrasto de forma é considerado como o maior determinante do arrasto em velocidades moderadas na natação (abaixo de  $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (e.g., PENDERGAST *et al.*, 2005; WILSON e THORP, 2003)

O arrasto de atrito ou de contato: na natação está intimamente relacionado com a estética dos nadadores, que fazem a tricotomia (retirada dos pelos corporais). Outro aspecto está relacionado com os trajes dos atletas, que deve “ser confeccionado” com material têxtil, sendo uma peça para homens e duas para mulheres. O tamanho dos trajes é relevante nesse tipo de resistência, sendo normatizado para homens e não deve estar acima do umbigo e nem abaixo dos joelhos. Para mulheres, o traje não deve cobrir o pescoço, passar dos ombros e nem passar do joelho. Para quantificar essa resistência, deve-se considerar a quantidade de superfície em contato com a água, a viscosidade da água, o coeficiente de atrito da pele, cabelo e traje, além da velocidade de nado (BELLOCH, 2006).

O arrasto de onda é a resistência associada à interface de fluidos, a qual aparece quando o nadador se desloca para respirar, por exemplo, e permanece por alguns instantes com uma pequena parte do corpo em contato com outro fluido, o ar. Essa resistência não aparece no nado subaquático.

Toussaint (2002) destaca que o arrasto de onda se torna negligenciável à medida que a profundidade aumenta. Quando na superfície, o arrasto total tem aumento considerável devido ao arrasto de onda.

O arrasto total ( $F_D$  total) observado no nado de um atleta possui as três componentes: força de arrasto de forma ( $F_D$ ), de contato ( $F_{DC}$ ) e de onda ( $F_{DW}$ ), Eq. (2.2):

$$F_D \text{total} = F_D + F_{DC} + F_{DW} \quad (2.2)$$

Ramos e coautores (2012) estudaram, por meio de simulações numéricas, o efeito da profundidade no arrasto hidrodinâmico durante o deslize na natação. Como resultado, foi revelado que o coeficiente de arrasto diminui à medida que a profundidade aumenta, existindo

uma tendência para a estabilização do valor após 0,75 m de profundidade. Verificou-se que o aumento da velocidade levou a uma diminuição do coeficiente de arrasto, de modo que o deslize subaquático tem papel decisivo na performance dos nadadores.

Baseando na terceira lei de Newton (ação e reação), como descreve (BELLOCH, 2006), o corpo do nadador entra em contato com as ondas formadas ao longo do percurso do nadador, a água se desloca para a frente, em contrapartida o nadador é deslocado para trás.

Modelos teóricos incluem procedimentos analíticos baseados na arquitetura naval e adaptados à natação humana (WEBB *et al.*, 2011). Com os indivíduos completamente imersos, é assumido que o arrasto total é a soma das componentes do arrasto de contato e forma. O coeficiente de arrasto de contato é para fluxo turbulento (MOLLAND *et al.*, 2011), como mostra a Eq. (2.3).

$$C_{Df} = \frac{0,075}{(\log(Re) - 2)^2} \quad (2.3)$$

Onde  $Re$  é o número de Reynolds do corpo, ou seja:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot L}{\mu} \quad (2.4)$$

Onde  $v$  é a velocidade pela qual o fluido escoa,  $\rho$  é a densidade da água ( $997 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $26^\circ\text{C}$ ),  $L$  é o comprimento do corpo sobre o qual o fluido se escoa e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica da água:  $0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  a  $26^\circ\text{C}$ . (BARBOSA *et al.*, 2015). A Eq. (2.4) corresponde ao modelo proposto por R. N. Newton em 1957.

O arrasto de contato ( $F_{DC}$ ) é calculado por:

$$F_{DC} = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{superfície} \cdot C_{Df} \quad (2.5)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da água ( $997 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $26^\circ\text{C}$ ),  $v$  é a velocidade de deslize do nadador,  $A_{superfície}$  é a área da superfície do nadador em contato com a água e  $C_{Df}$  é o coeficiente de arrasto de contato.

A área da superfície do corpo do nadador em contato com a água pode ser determinada pela fórmula de Du Bois (CARPERSEN *et al.*, 2010), ou seja:

$$A_{superfície} = 0,20247 \cdot H^{0,725} \cdot BM^{0,425} \quad (2.6)$$

Onde  $H$  é a altura do indivíduo (em metros) e  $BM$  é a sua massa corporal (em kg). A área da superfície em contato com a água ( $A_{superfície}$ ). Esta área não se altera quando o corpo do nadador se encontra completamente imerso na água.

Vilas-Boas (1997) destaca que considerando a viscosidade, o fluido pode ser perfeito ou ideal quando o valor de sua viscosidade é desconsiderado e real ou viscoso quando seu valor for considerado para fins de cálculo. A viscosidade é o principal elemento do fluido que causa uma força de resistência oferecida ao nadador na execução do movimento de avanço do corpo.

Para eliminar as forças de resistência e proporcionar uma maior velocidade no nado é necessário reduzir a resistência da água com o corpo, dar continuidade as ações propulsivas e ao ritmo de nado. Os nadadores procuram seu alinhamento a fim de evitar perturbações no nível de forma. Essa preocupação leva ao aperfeiçoamento técnico dos nadadores.

O efeito da forma é importante para a resistência de forma, que para a mesma área, os objetos sejam arredondados no bordo de ataque e afilados na parte posterior. Com isso, produzirão menor força de arrasto hidrodinâmico. Isso ocorre pois será gerado uma menor turbulência ao longo do corpo de escoamento do fluido e as linhas de corrente acompanharão os contornos do corpo sem separação da camada limite. Esta forma do corpo possibilita a mudança gradual na direção das moléculas de água à medida que o corpo atravessa esse fluido gerando um escoamento estacionário. (BELLOCH, 2006)

A flutuação é um elemento que está presente na relação do corpo com a água e é regida pelo Princípio de Arquimedes: “[...] quando um corpo está completa ou parcialmente imerso em um líquido em repouso, ele sofre um empuxo para cima igual ao peso do líquido deslocado”. (SKINNER e THOMSON, 1985)

Na natação, à medida que o nadador executa as braçadas, é gerada uma força de sustentação com gestos propulsivos (BROWN e COUNSILMAN, 1971). Esse movimento provê uma força de arrasto na direção oposta ao sentido de movimento. No estudo da hidrodinâmica do nado, são quatro forças predominantes, a força peso, o empuxo hidrostático, as forças propulsivas e a força de resistência ou de arrasto.

Em 1977 Cavagna e coautores mostraram que o trabalho mecânico total na locomoção humana é dado por duas componentes: a energia necessária para acelerar e desacelerar os membros em relação ao centro de massa; e as forças externas, que são as energias necessárias para superar o arrasto.

Rushall e coautores (1994) mostraram que na orientação distal ocorre o fluxo que se move da ponta dos dedos até o braço, uma ação que não é associada com propulsão na natação. Com a análise realizada no trabalho foi possível verificar o princípio de Bernoulli na análise da criação de forças de sustentação do nadador na água. Colwin (2000) ressalta que a velocidade em que o fluido se movimenta e a pressão que é gerada por ele, enunciada pelo “Efeito de Bernoulli”, é uma relação inversa.

Como destaca Maglischo (1999), diferentes movimentações dos braços dos atletas marcaram momentos na evolução da performance dos nadadores. (COSTILL *et. al.*, 2001) descrevem que nadadores dobravam seus braços durante as fases submersas. Para tal observação, teorias sobre arrasto e propulsão foram introduzidas, como a teoria do “Empurrar Direto para trás para ir para Frente”, a qual é elucidada por Palmer (1990). O autor reitera que além da densidade da água ser 1000 vezes superior à do ar, esse fluido exerce resistência no sentido contrário ao movimento do nadador. Assim, ao se movimentar, o nadador traciona ou empurra a água, com seus braços e pernas, tendendo-se a mover ou se movendo na direção oposta à ação de tracionar ou empurrar. Identifica-se, com isso, que a propulsão está relacionada com o correto movimento dos membros. De fato, os mecanismos de qualquer manobra ou ação na água se relacionam segundo a terceira lei do movimento (de Newton) (PALMER, 1990).

A força propulsiva produzida pelo nadador deve ser superior à força do arrasto hidrodinâmico que a água exerce em oposição ao seu deslocamento. Quando essa força propulsiva é menor, o nadador fica sujeito a um impulso negativo, o que freará o movimento do nadador (VILAS-BOAS *et al.*, 2001).

Com auxílio de imagens, como a fotografia submersa, pode-se observar que o trajeto da mão do nadador é sinuoso, assim, uma nova abordagem do arrasto propulsivo foi explicada, enunciada como “Movimento sinuoso para trás”. Em um terceiro momento, demonstra-se que grande parte dos movimentos propulsivos das mãos e braços do nadador eram realizados nas direções lateral e vertical do corpo, assim, teve-se início a teoria da “Força de Sustentação da Propulsão”.

Na natação, por estar em meio fluido, estabelece que à medida que o fluido se movimenta, há uma alteração na pressão criada por ele. Quando a velocidade do fluido aumenta,

sua pressão exercida tende a diminuir. Com essa lei natural, é perceptível notar que com o aumento da velocidade do nadador, a resistência exercida pelo fluido contrária a seu sentido de movimento tende a diminuir.

A resultante das forças, como apresenta Vilas-Boas e coautores (2001) é dada por:

$$\vec{p} + \vec{F_D} = m \cdot \vec{a} \quad (2.7)$$

Onde:  $a$  é a aceleração,  $p$  corresponde à força propulsiva,  $F_D$  à força de arrasto hidrodinâmico e  $m$  à massa do nadador com a massa da água acrescentada. Assim, o sentido de  $a$  dependerá da força propulsiva aplicada e, quando superior ao arrasto hidrodinâmico, ela será positiva, quando inferior,  $a$  será negativa.

Vilas-Boas e coautores (2001) discutem a dificuldade em se determinar  $F_D$ , no qual pode exigir métodos morosos, de custo elevado e ainda assim, ineficientes. O trabalho se restringe ao cálculo do arrasto ativo máximo atrelado à potência mecânica máxima no nado. Os autores perceberam que os valores de potência propulsiva máxima evoluem com o nível do nadador e sua idade, já os valores de  $C_D$  não variam expressivamente com essas condições.

Há então, duas grandes categorias de métodos para determinação do arrasto, como exemplifica Vilas-Boas e coautores (2001):

- 1) Arrasto passivo: determinação da força  $F_D$  requerida para fazer deslocar o nadador numa determinada posição que é mantida constante;
- 2) Arrasto ativo: avalia a intensidade de  $F_D$  a que efetivamente se sujeita o nadador ao nadar livremente, ou tão livremente quanto possível.

Vilas-Boas (1997), esclarece que a intensidade de  $F_D$  depende de um conjunto de fatores, os quais ele dividiu em quatro categorias, compreendendo as características morfológicas do indivíduo, os seus equipamentos utilizados (como traje, touca e óculos), as características físicas do meio e a técnica do nado utilizada.

Clarys (1979) e Kolmogorov e Duplishcheva (1992) foram precursores na avaliação do arrasto através da expressão newtoniana apresentada na Eq. (2.1). Clarys (1979) estimou a área da seção transversal do tronco do nadador ( $S$ ) por meio de características antropométricas como massa corporal e altura do indivíduo. O autor deu foco no estudo de variáveis antropométricas na medição do arrasto hidrodinâmico, constatando que  $S$  desempenha um papel importante na determinação do valor do arrasto passivo. Apresentou como resultado significativo a correlação da largura do tórax com velocidades superiores a  $1,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

## 2.3 Velocidades na natação

Os recordes mundiais são classificados pela FINA (Federação Internacional de Natação), para tanto, são distintos entre piscina longa e curta, com 50 e 25 metros, respectivamente. O reconhecimento dos recordes divide-se entre as modalidades: nado livre, costas, peito, borboleta, medley e revezamento.

No nado peito, os recordes para 50 metros para homens em piscina longa e curta são de 26,42 e 25,25 segundos, respectivamente. Para mulheres, os recordes para 50 metros em piscina longa e curta são de 29,48 e 28,80 segundos, respectivamente.

A partir dos valores encontrados para os mais recentes recordes mundiais, todos ratificados pela FINA, as maiores velocidades atribuídas aos recordes masculinos são de 1,89 e 1,98 m/s para as piscinas longa e curta, respectivamente. Enquanto que as máximas velocidades atribuídas para os recordes femininos em piscinas longa e curta são, respectivamente, de 1,69 e 1,74 m s<sup>-1</sup>. Os valores calculados admitem as velocidades médias dos atletas, as quais são maiores para distâncias curtas; quando em maiores percursos, como de 100 ou 200 metros, a capacidade humana para sustentar tais velocidades é limitada.

No entanto, recordes mundiais de velocidade na natação são admitidos, neste caso o estilo de nado livre marca a maior velocidade já registrada em competições, 2,35m/s, sendo este em piscina longa, para um percurso de 50 metros, em 2008 pelo brasileiro César Cielo, nas Olimpíadas de Pequim. Portanto, a máxima velocidade para humanos na natação é de aproximadamente 2 m·s<sup>-1</sup>, Toussaint e Truijens (2005), ressaltam que esta velocidade é apenas 16% da máxima atingida em terra por velocistas.

## 2.4 Arrasto Passivo

Sabe-se que o arrasto ativo é muito superior ao arrasto passivo (GATTA *et al.*, 2015) porém o deslize na natação é executado por períodos superiores aos de propulsão e constitui em um diferencial de tempo o correto posicionamento do nadador.

A força de arrasto é denominada “arrasto passivo” quando age sobre um nadador que está sendo rebocado ou está deslizando, sem nenhuma ação de seus membros (KJENDLIE e STALLMAN, 2008).

No desenvolvimento de métodos experimentais para estudo do arrasto passivo aplicado à natação, autores se destacaram apresentando diversas técnicas de reboque do nadador:

Chatard e Wilson (2003), Clarys (1979), Faulkner (1968), Karpovich e Pestrecov (1939) e Karpovich (1933).

Gatta *et al.* (2015) concluíram em seu estudo que a área da seção transversal ( $S$ ) do nadador submersa durante o nado tem os mínimos valores semelhantes em todos os estilos. No entanto, os valores máximos são superiores nos nados peito e borboleta. O autor apresenta quantitativamente que as maiores variações de  $S$  durante a execução do nado, ocorre no nado peito devido ao fato de se adotar diferentes estilos por parte dos nadadores, para se manter com o corpo alinhado, o que se relaciona diretamente com a área frontal do nadador.

Naemi *et al.* (2010) destacam que a maioria, senão todos, os estudos da natação com o corpo humano em posição alinhada têm focado apenas nas características resistivas. Muitas vezes, fatores como forças inerciais e a massa corporal têm recebido pouca atenção. Conclui ainda que características inerciais e resistivas do corpo alinhado afetam a eficiência do deslize na natação.

Na performance do nadador, o nado peito é considerado o mais lento entre os estilos, de difícil coordenação, porém, o mais cômodo para o nadador. O corpo do nadador deve ser mantido com os ombros paralelos à superfície da água. Os movimentos de pernas e braços, ao contrário dos nado crawl e nado costa, devem ser simultâneos e no mesmo plano horizontal. As mãos devem ser empurradas para frente e trazidas para trás na superfície ou abaixo. Os pés devem estar voltados para fora durante o movimento para trás. O rosto deve estar dentro d'água. O início do movimento é com as pernas totalmente estendidas. As pernas são trazidas simultaneamente para junto do corpo, com os joelhos dobrados e abertos, enquanto os braços se recolhem na altura do peito. Pernas são novamente jogadas para trás e os braços estendidos. O movimento de perna no nado peito é semelhante ao da rã, também conhecido como "chicotada". A respiração é feita no final da puxada do braço, com a cabeça erguida fora d'água. (FERNANDES, 2011) A Figura 2.6 mostra as posições exercidas pelo nadador na execução do nado peito.

O arrasto hidrodinâmico depende das propriedades de um fluido, como a fluidez, fluxo, viscosidade e densidade. Neste sentido, existe uma camada limite em relação ao corpo e ao fluido (adaptado de COLWIN, 1992). Tal camada é então subdividida em diversas subcamadas, as quais aumentam sua velocidade de escoamento do fluido a partir da superfície do sólido até que seja igual à velocidade de escoamento livre do fluido. Isso pode ser dado em função da viscosidade do fluido e da distância do escoamento livre em relação ao sólido.

Um fluido possui propriedades de viscosidade e densidade (massa específica). A massa específica compreende a razão entre uma determinada porção da substância e volume que ela ocupa. Essa medida, multiplicada pela aceleração da gravidade designa o peso volumétrico. O fluido é considerado homogêneo quando sua massa específica permanece constante para diferentes pontos no interior do fluido e heterogêneo quando se diferem em relação à massa específica.

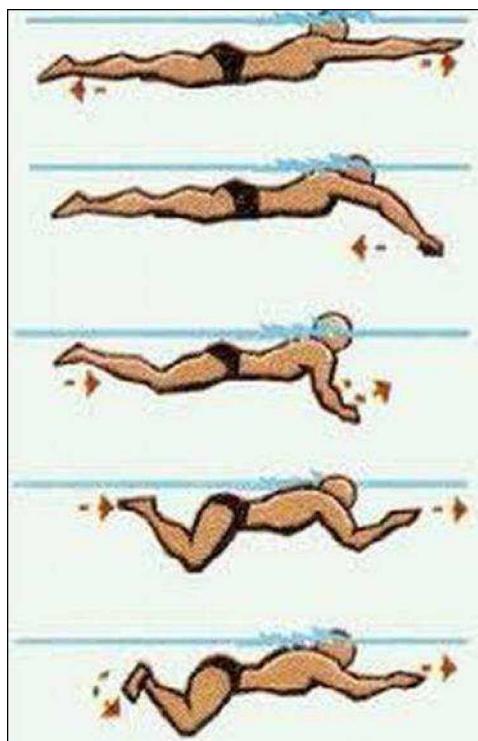


Figura 2.6 - Posições do nadador na execução do nado peito, vista lateral.

(<http://diariodahidroginastica.blogspot.com.br/2010/09/sobre-o-nado-peito.html>). Acesso 28 jun. 2016.

Toussaint *et al.* (2000) destacam, com base em trabalhos como o de HOLLANDER *et al.* (1986), que somente as forças de arrasto não são determinantes da velocidade máxima do nado. O arrasto, por sua vez, é determinado pelas dimensões antropométricas e é decisivo em grupos de nadadores de elite, visto que os mesmos não se diferem quanto à técnica de nado.

Cortesi e Gatta (2015) estudaram o efeito do posicionamento da cabeça do nadador na natação com base na observação do arrasto passivo. Os autores encontraram diferenças significativas entre a relação de velocidade e posição do nadador (braços ao longo do tronco ou estendidos à frente) e relação de velocidade com o posicionamento da cabeça (a qual podia estar elevada em relação ao tronco, na mesma linha do tronco ou projetada para baixo). Para as

velocidades adotadas, o arrasto passivo foi bem maior quando o nadador tinha os braços junto a seu tronco, já para a posição da cabeça, o arrasto passivo foi significativamente menor quando os braços estavam estendidos à frente do nadador e quando a cabeça do nadador estava na linha do tronco ou projetada para baixo.

Barbosa *et al.* (2015) em seu estudo recrutou 60 nadadores, com homens e mulheres na mesma proporção para execução do método dinâmico inverso que considera o decaimento de velocidade no deslize do nadador a partir de um impulso inicial. Com isso, buscou observar experimentalmente o arrasto passivo e de modo analítico essa mesma componente de resistência. O estudo não foi efetivo em identificar diferenças significativas entre gêneros, no entanto, valores relevantes para o coeficiente de arrasto passivo foram identificados tanto para a componente de arrasto de contato (variando de 0,04 a 0,18) e para o método experimental, o coeficiente de arrasto passivo total variou de 0,34 a 0,56. Com isso, identificou que a variabilidade é maior quando observado o perfil hidrodinâmico do que unicamente as componentes antropométricas.

Ramos *et al.* (2012) simularam numericamente um nadador em sua posição mais hidrodinâmica, com os braços estendidos à frente do corpo, de modo a obter coeficientes de arrasto passivo a três velocidades distintas, variando-se a profundidade do nadador. Os autores observaram que o coeficiente de arrasto passivo total varia de acordo com a profundidade e revelou valores entre 0,75 e 0,62 para a velocidade de  $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a diferentes profundidades.

Ribeiro (2006) buscou abordar o estudo correlacional entre o arrasto passivo e ativo em diferentes práticas de nado. O autor abordou técnicas para cálculo da velocidade do nadador e área da seção transversal do tronco do nadador. A metodologia para estudo do arrasto passivo se deu pelo decaimento de velocidade, com impulso inicial do nadador até sua parada. Os valores para o coeficiente de arrasto passivo variaram entre 0,56 e 0,35, para  $S$  entre 0,06 e 0,08  $\text{m}^2$ , respectivamente.

MARINHO *et al.* (2009) apresentaram valores encontrados para o arrasto passivo, simulando um corpo imerso em um fluido por meio de um modelo computacional de dinâmica dos fluidos. Os valores encontrados para o arrasto de forma foram bem superiores quando comparados ao arrasto de contato, correspondendo a valores de 0,758 a 0,677, em torno de 92% do arrasto total observado, a velocidades de  $1,6 \text{ m s}^{-1}$  e  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente. O arrasto total observado nas simulações variou de 0,824 a 0,736, com velocidades de  $1,6$  a  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ .

Em 2011, Marinho *et al.* apresentaram como metodologia a simulação numérica de linhas corporais, em 2D, simulando a geometria do corpo de um nadador em quatro diferentes

posições. Com os braços ao longo do tronco os coeficientes de arrasto passivo foram superiores, variando de 1,06 a 0,85, para velocidades de 1,6 a 2,0 m s<sup>-1</sup>, respectivamente. A posição mais hidrodinâmica, com os braços estendidos à frente do tronco, os coeficientes de arrasto passivo foram os menores possíveis, variando de 0,57 a 0,53, para as mesmas velocidades observadas anteriormente.

## 2.5 Relação entre Força e Velocidade

Existem vários métodos para analisar cineticamente o nadador, estes são subdivididos em meios específicos e inespecíficos de mensuração da força do nadador. Sendo os meios inespecíficos exemplificados por: meios convencionais (pesos livres e máquinas de musculação), aparelho isocinético convencional, banco biocinético de natação. Já os meios específicos são: nado completamente amarrado, nado parcialmente amarrado e “*mad systems*”. Como destacam Marinho e Junior (2004), quanto maior for o nível dos atletas, mais específicos deverão ser os métodos para se mensurar a força. Ainda, Badillo e Ayestarán (2001) afirmam que quanto melhor o nível do atleta, menor se torna a capacidade dos métodos inespecíficos de mensuração da força de se relacionarem com a performance desportiva de determinada modalidade.

A relação força x velocidade do nadador é integralmente dependente da capacidade metabólica e suas fontes energéticas. A fim de adotar um cálculo consistente apontado na literatura, estudos recentes indicam que a energia metabólica total possível é inferior a 10% (de 3% a 9%), a qual pode ser transformada em trabalho útil para superar forças de arrasto. Tal discussão é abordada em trabalhos como de Holmér (1972), Kolmogorov e Duplisheva (1992), Pendergast *et al.* (1977) e Zamparo *et al.* (2005).

Há divergências quanto à faixa de 3 – 9% da energia metabólica total que é convertida em trabalho útil, haja vista ao modelo de aproximação adotado ou os métodos para estimar a energia necessária para superar a resistência da água, como apontam os estudos de Figueiredo *et al.* (2011) e Martin *et. al.* (1981), por exemplo.

Minetti (2004), em seu trabalho, aponta que o trabalho total gasto em relação ao trabalho metabólico efetivo depende essencialmente da eficiência com que o ATP é convertido em trabalho mecânico a nível muscular e na transmissão eficiente do mesmo.

Wooledge (1985) destaca que a velocidade ótima de contração gera de 25 – 35% de conversão do ATP em energia efetiva. Essencialmente, pode-se concluir, que a capacidade do sujeito de exercer forças úteis, seja no ar ou na água, é devida a sua capacidade de desempenhar

de forma biomecânica movimentos satisfatórios, quando em um ergômetro próprio para a atividade ou na execução durante uma competição.

Um tipo de avaliação cinética do nadador é apresentado no trabalho de Hollander *et al.* (1986). Os autores desenvolveram pela primeira vez o *mad systems*, técnica que permite que o nadador se desloque na água tendo como pontos de propulsão uma sucessão de apoios fixos, estes apoiados a plataformas que se comunicavam a um transdutor de força. Estes apoios encontram-se a uma distância constante e ajustável entre si e a uma profundidade pré-definida, ao longo de 23 metros (Fig. 2.7). A força propulsora horizontal exercida sobre o sistema de apoios sólidos necessária para garantir o deslocamento a uma dada velocidade constante é considerada igual em intensidade à força de resistência ativa média a que o nadador se submete ao nadar a essa mesma velocidade, a medição é feita de forma direta da força propulsiva das braçadas. Segundo Clarys *et al.* (1988) o padrão eletromiográfico dos músculos dos nadadores durante a utilização do *mad systems* é idêntico ao padrão apresentado pelos mesmos quando em nado normal, constituindo desta forma um método verossímil para a avaliação da força propulsora do nadador.

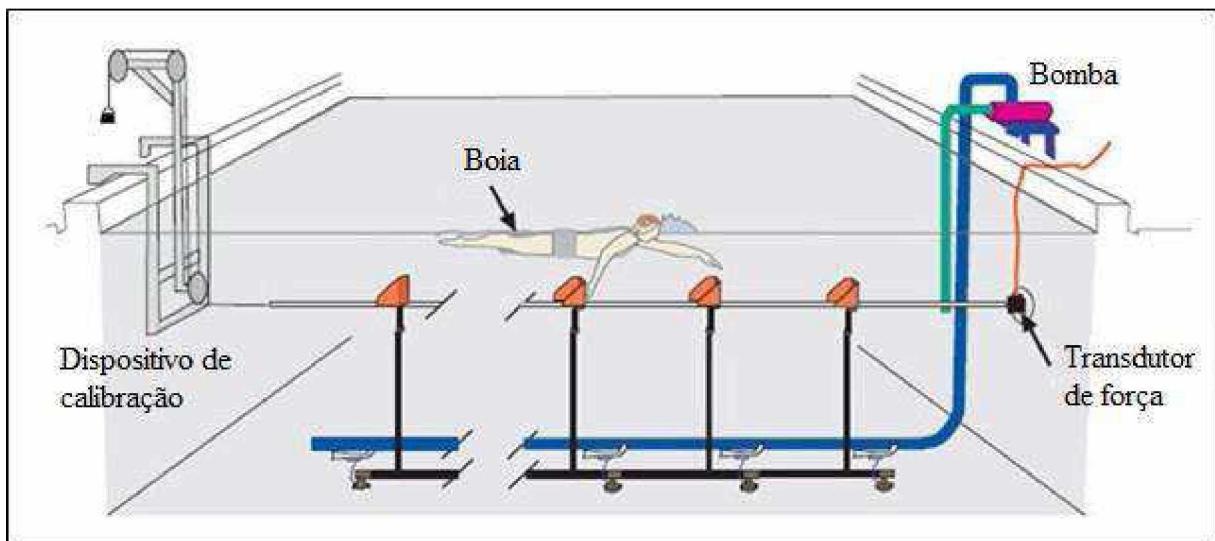


Figura 2.7 - Desenho do sistema *mad systems*. (TOUSSAINT, 2002)

Porém, o método *mad systems*, segundo Botelho (2004), apresenta limitações: não é nado real, embora se aproxime suficientemente para que os seus cálculos sejam considerados válidos mas, acima de tudo, só permite a avaliação do nado na técnica de crawl e unicamente com a utilização dos membros superiores, visto que as pernas se encontram sustentadas por um flutuador.

O Método de Perturbação Volumétrico (MPV) proposto por Kolmogorov e Duplischeva (1992) baseia-se na suposição de que a potência mecânica total se mantém constante quando um nadador executa dois percursos curtos nadados à intensidade máxima, rebocando num deles um objeto de perfil hidrodinâmico conhecido. Os autores utilizaram a variação de velocidade observada para calcularem a força de arrasto média para a distância de nado associado a uma velocidade de nado e a do percurso máximo em nado livre. Como se conhece o perfil hidrodinâmico do objeto rebocado, a avaliação da magnitude da resistência ativa é obtida pela medição da velocidade durante percursos com e sem carga. Kolmogorov e Duplischeva (1992) concluíram em uma comparação do  $C_D$  entre nadadores e nadadoras que não houve diferenças significativas.

Outra técnica, chamada de “*Swim Flume*”, é usada para medir o consumo energético, parâmetros fisiológicos e biomecânicos. É mais próxima da realidade do atleta de natação. Ela consiste em um tanque onde a água circula a diferentes velocidades através de motores, semelhante ao “*ExerSwim*”, permitindo o indivíduo realizar um nado estacionário que pode ser analisado com mais facilidade comparado a natação comum onde o atleta se desloca ao longo da piscina. A desvantagem desse método é o alto custo de sua construção (CASTRO, 2007).

O *ExerSwim* usa um sistema de propulsão através de uma hélice para criar uma grande e profunda corrente que flui em apenas uma direção para um mais suave. A velocidade é totalmente ajustável de simples à extenuante, apenas alterando um mostrador para um "número de nadar", variando de 0 a 60; o *ExerSwim* promove uma variedade de regimes, desde a natação tradicional ou terapias exercidas na água. A Figura 2.8 ilustra o aparelho e sua utilização.



Figura 2.8 - Dispositivo portátil *ExerSwim*.

([www.bornrich.com/compound-you-pools-value-with-exerswim-current-generator.html.](http://www.bornrich.com/compound-you-pools-value-with-exerswim-current-generator.html.))

Acesso em 23 abr de 2013.

Existem diversos estudos que procuram determinar forças na natação, alguns autores buscam saber quais as forças nos membros superiores e inferiores dos atletas, a força de arrasto no corpo, a força propulsora e também qual a força nos cabos, no caso do nado atado.

Para o nado atado, segundo Yeater *et al.* (1981), as forças no cabo, no nado estilo crawl e costas, variam de aproximadamente, 0 a 200 N, já no nado peito as forças variam de aproximadamente 0 a 300 N. Esses valores são para as forças provocadas somente pelos braços, além disso a análise é da força pelo tempo de nado. A Figura 2.9 apresenta estas relações de força medidas pelos autores.

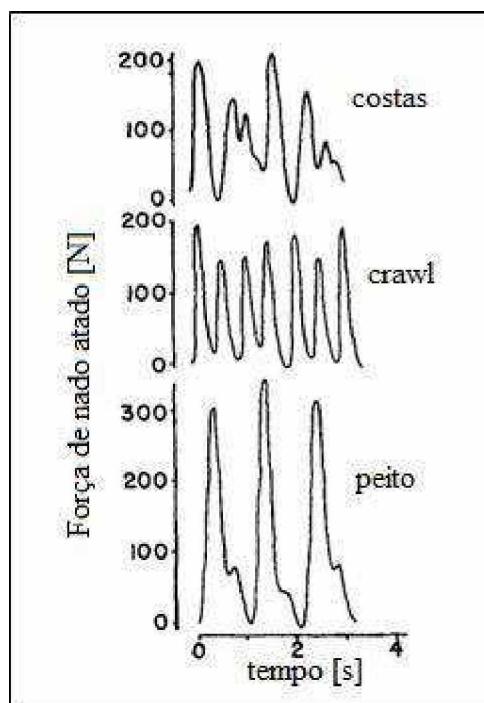


Figura 2.9 – Forças medidas em diferentes modalidades de nado (YEATER *et al.*, 1981).

O aparelho proposto no estudo, para medir essas forças e potências é apresentado na Fig. 2.10. O atleta é amarrado a um cabo que percorre toda extensão da piscina. Por meio de uma célula de carga atada ao cabo que se desloca junto ao nadador as forças foram captadas, o nadador é rebocado, de modo passivo. Valores para o nado peito variaram de 0 a 300 N.

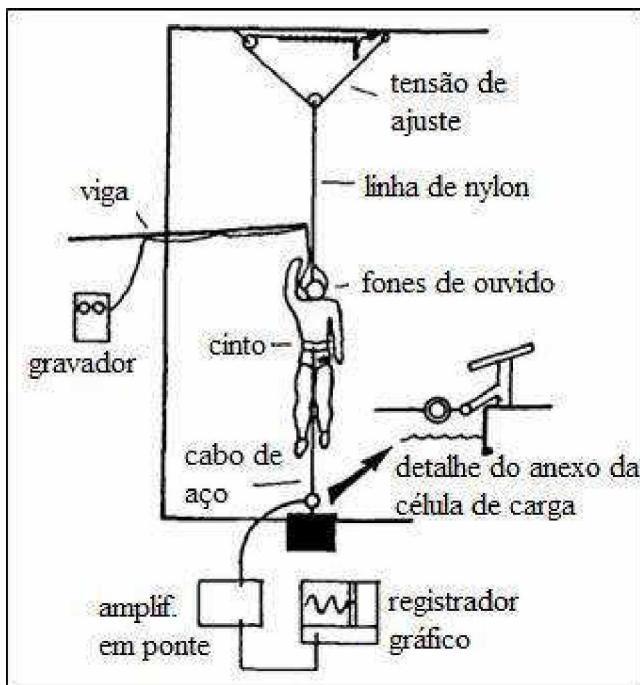


Figura 2.10 - Esquemático do aparato experimental descrito por YEATER *et al.* (1981).

No trabalho de Dopsaj e coautores (2000), a força no cabo no nado atado de 50 metros livre, varia de 10 a 400 N. Essa força foi medida usando-se um dinamômetro. A Figura 2.11 mostra a variação da força de tração.

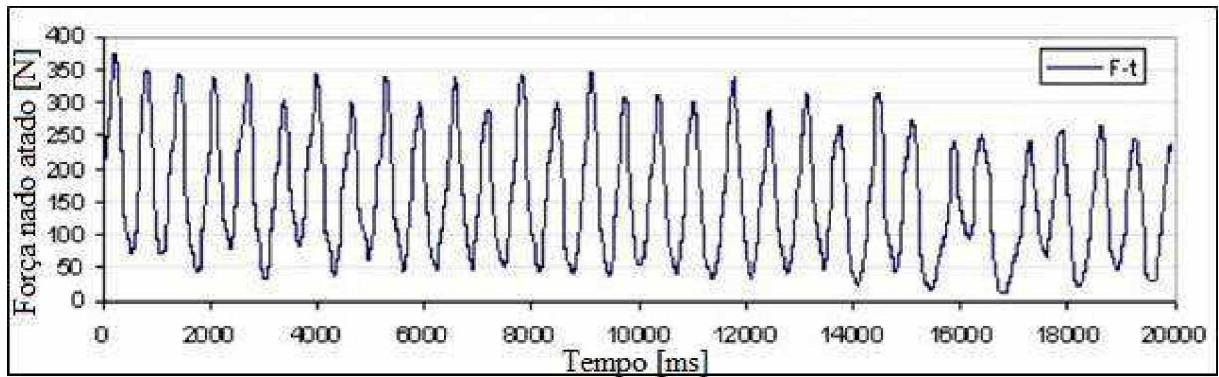


Figura 2.11 - Variação da força de tração dada no trabalho de DOPSAJ *et al.* (2000)

Akis e Orcan (2004) analisam a força primeiramente de forma computacional, depois realizaram a parte experimental, semelhante ao trabalho de Yeater *et al.* (1981), para compará-las. De acordo com os autores, os experimentos analisam somente a força produzida pelos braços do nadador. Os autores identificaram valores de força semelhantes àqueles encontrados por Yeater *et al.* (1981).

Para Barbosa *et al.* (2012) a força pode variar de aproximadamente 50 a 273,9 N, já a força média encontrada foi 146,4 N. Na metodologia para o nado atado (Fig. 2.12). Eles usaram uma célula de carga para medir a força.

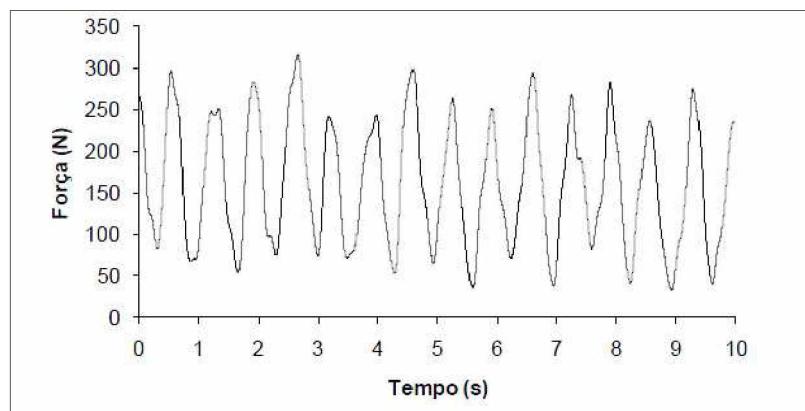


Figura 2.12 - Força x Tempo típica após filtragem. (BARBOSA, 2012)

Papotí e coautores (2003) também usaram um dinamômetro com célula de carga com capacidade de 300N para mensurar a força no cabo durante o nado crawl. A força neste caso variou entre 0 e 225N, com uma força média de 86,6 N.

Marinho (2002) faz a medição da força propulsora no nado completamente atado através de uma célula de carga e uma interface. A força máxima encontrada durante os testes foi 227,75 N, a força mínima foi 132,59 N e a força média encontrada foi 169,34 N.

Papotí e coautores (2005) usaram o aparelho de medição padronizado por Papotí e coautores (2003) para determinar a força nos membros inferiores, durante os esforços, os nadadores estiveram com os braços estendidos sobre uma prancha comercial sendo solicitado aos atletas que mantivessem a cabeça fora da água. As forças encontradas variam entre 20 e 65 N para as forças de pico e as forças médias variam entre 20 e 55 N.

Barbosa e coautores (2015) compararam valores no nado hidrodinâmico assistido (passivo) com valores analíticos estimados, com procedimentos experimentais e analíticos. Os valores médios encontrados estavam entre 40 e 90N, apesar de encontrarem valores subestimados e superestimados.

## CAPÍTULO III

### ERGOMETRIA NA NATAÇÃO

Ergômetro, por definição, é um aparelho desenvolvido para medir o trabalho realizado por uma pessoa ou por um animal. Pode ser, portanto, utilizado em avaliações físicas, se mostra valido na medida que avalia, em condições controladas, a resposta do paciente e seu potencial cardíaco a um determinado esforço.

Os ergômetros voltados para a avaliação física do indivíduo na natação, geralmente possuem resistência variável a fim de buscar uma resistência semelhante àquela encontrada na água. Podem medir, além da potência mecânica, o tempo, distância e força da braçada. Os ergômetros utilizados para este fim, fora da água, com isso, não tornam possível avaliar alguns fatores de grande importância no desempenho do atleta em competições. A posição corporal correta do nadador (alinhamentos horizontal e lateral, rotação do corpo), ritmo respiratório, rotação da cabeça para execução da inspiração durante o final da ação submersa do braço, entre outros; são objetos de pesquisa e fatores decisivos para um bom desempenho do atleta.

Como destaca Zamparo (2012), diversos métodos foram desenvolvidos até hoje a fim de determinar precisamente o arrasto passivo e/ ou ativo gerado na natação. Tais métodos são apontados por trabalhos como de Toussaint (2004), Havriluk (2007), Wilson e Thorp (2003), Zamparo e coautores 2009 e 2011, por exemplo.

#### 3.1 Dispositivos atados e semiataados

No nado atado (*tethered swimming*), estima-se a força resultante do nado e a força de arrasto. O atleta é amarrado a um cabo, geralmente de borracha ou aço, o qual é ligado a uma célula de carga fixada na borda da piscina ou em cargas livres. A Figura 3.1 mostra este tipo de nado, amplamente utilizado em avaliações na água.



Figura 3.1 – Método de nado atado. ([www.woohome.com/outdoor/make-the-endless-pool-with-home-swimmer](http://www.woohome.com/outdoor/make-the-endless-pool-with-home-swimmer).) Acesso em: 22 abr 2015.

Medir a força produzida pelo nadador usando o método do nado atado é difícil, pois o atleta tem de manter uma velocidade constante e abaixo da velocidade mínima entre os ciclos para manter a tensão no cabo, amarrado em seu corpo, constante (RIBEIRO, 2012). Por isso, existem vários estudos e formas diferentes de medir e avaliar as forças neste método.

As células de carga são captadores, unidirecionais, baseados em transdutores extensométricos, que podem registrar a tração e a compressão de um material. Assim, o cabo é tracionado de forma que não existam forças de impacto e a célula de carga mede a força de tração do nadador.

O uso de cabos de borracha permite o cálculo de outras variáveis biomecânicas de interesse. Porém, deve estar calibrado para calcular o avanço do nadador e a velocidade de nado. Com a velocidade e a força registrada é possível calcular a potência desenvolvida pelo nadador. (BELLOCH, 2006) A Figura 3.2 ilustra este tipo de nado em diferente ponto de vista.

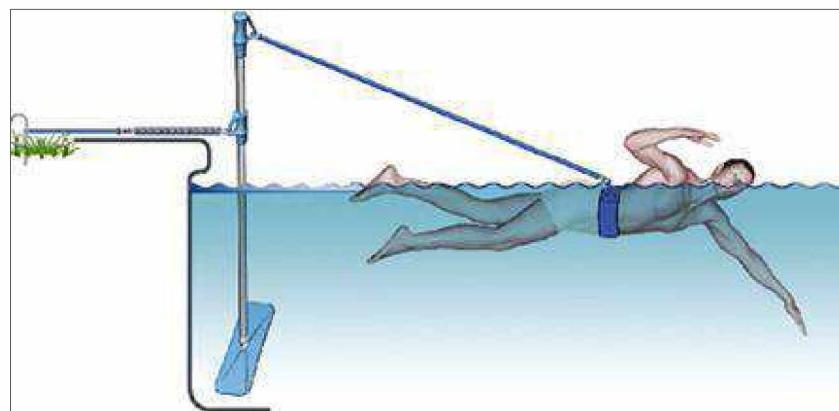


Figura 3.2 - Sistema de avaliação com sistema atado. ([www.woohome.com/outdoor/make-the-endless-pool-with-home-swimmer](http://www.woohome.com/outdoor/make-the-endless-pool-with-home-swimmer).) Acesso em: 22 abr 2015.

Vilas-Boas (2001) desenvolveu uma metodologia de nado atado, mostrado na Fig. 3.3. Neste sistema, o nadador é atado a um tambor e com um protocolo próprio são medidas as resistências a que o mesmo estava submetido, de forma que o impulso inicial, ou que a chegada no outro lado não influenciasse nas medições. A medição de interesse é o arrasto ativo. Os tempos são registrados por cronômetros, de acordo com as marcações.

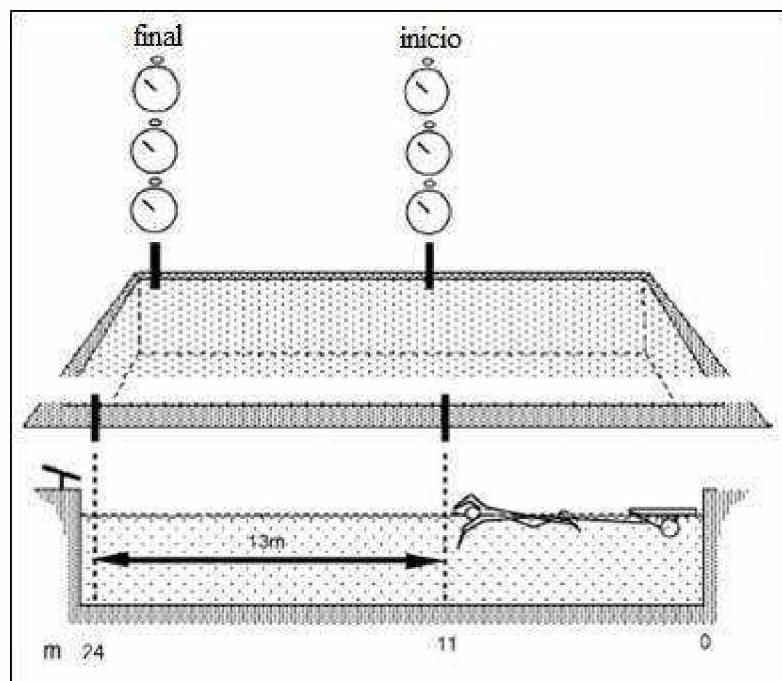


Figura 3.3 – Esquemático da metodologia por nado atado, adotada por VILAS-BOAS (2001)

O método de medição do arrasto ativo desenvolvido por Kolmogorov e Duplishcheva (1992) baseia-se na conservação da potência mecânica propulsiva máxima do nadador em duas situações de nado distintas, em velocidade máxima, como descreve Vilas-Boas (2001): nado livre e nado rebocando um dispositivo de arrasto adicional conhecido. No trabalho desse autor há a dedução das equações de  $C_D$  e  $F_D$ , a partir dos arrastos ativos totais  $F_{D1}$  e  $F_{D2}$ , referentes ao nado livre e rebocado, respectivamente.  $S$  foi estimado de acordo com Kolmogorov e Duplishcheva (1992), através da potência  $2/3$  do volume corporal, o qual foi inferido do peso e da altura do nadador.

Uma forma de medir as forças no nado atado é usando um dinamômetro na borda da piscina, chamado teste de dinamometria. Nesse teste, o nadador usa um cinto ligado a um cabo de aço, Fig. 3.4, fixado a uma célula de carga com frequência de amostragem de 1000 Hz, conectada a um amplificador em interface com software específico. A célula de carga é ligada em um segundo cabo que fica acima da piscina, ligado a um motovariador. A câmera de

superfície e a célula de carga foram calibradas previamente a cada sessão de testes. (RIBEIRO, 2006)



Figura 3.4 – Posicionamento do nadador no teste de dinamometria. (RIBEIRO, 2006)

A fixação do dinamômetro foi feita de uma estrutura em aço carbono, com o objetivo de fixar o dinamômetro na borda da piscina, com estrutura presa no bloco de partida, Fig. 3.5.



Figura 3.5 - Fixação do dinamômetro na borda da piscina. (RIBEIRO, 2006)

O dispositivo proposto consiste em dois suportes, um para sustentação do nadador composto por quatro boias de polipropileno presas nas extremidades de uma haste de alumínio

que serve como espaçador entre as pernas do nadador, além de cabos para a transmissão de tração para o dinamômetro, como mostrado na Fig. 3.5.

Outro método possível é desenvolvido com o nado semiatado. Este método pode ser usado de outra forma, mas com o mesmo princípio. O nadador é preso a um cinto, e o mesmo a um cabo, que é preso em um sistema de roldanas que permitem colocar cargas conhecidas, com isso, o atleta deve nadar contra as cargas até não conseguir completar dois minutos com uma nova carga colocada. (CASTRO, 2007)

Alguns autores, como Robergs e Roberts (2002) também indicam esse método para medir e aumentar a intensidade de exercício durante a natação. O método é baseado em uma polia simples e um sistema de suspensão de peso em uma mesma posição estacionária (McARDLE e MAGEL, 1970). Dessa forma, os pesos são suportados pelo nadador, mantendo-o em apenas um local, sem se deslocar.

Outro método, semelhante ao nado atado, é o teste de potência desenvolvido por Costill (2001), onde um cinto é colocado na cintura do nadador e fixado a um cabo que é conectado em um aparelho isocinético modificado. Esse aparelho mantém a velocidade constante e a tensão exercida no cabo é medida como uma força. Esse teste oferece dados da geração máxima de potência durante a natação e tem sido usado para correlacionar potência natatória e desempenho de nadadores competitivos. Ele também pode monitorar os efeitos dos programas de treinamento e treino de capacidades para desenvolvimento de potência intraquática. Sistemas similares estão sendo usados para avaliar as mudanças de velocidade durante as várias fases propulsivas dos diferentes estilos de nado.

Como citado por Papoti e coautores (2005), no nado semiatado são geralmente utilizados cabos de aço, porém, também há sua substituição por tubo cirúrgico, os quais geralmente são de látex. No nado semiatado, percebe-se ainda melhor movimentação das braçadas do nadador, o que viabiliza melhor compreensão (MAGLISHO, 1984).

Um tanque ergométrico também pode ser usado para avaliações na natação. Esse tanque, similar a uma pequena piscina equipada com aparelhos de controle eletrônicos de circulação de água que produzem velocidades de água conhecidos. O nadador deve nadar na velocidade da água para manter sua posição no tanque. Pesquisas realizadas com essa técnica têm determinado a variação do gasto energético dos diferentes estilos e diferenças entre indivíduos com diferentes técnicas para um mesmo estilo. (ROBERGS e ROBERTS, 2002)

No trabalho de Ribeiro (2006) propõe-se o cálculo dos arrastos ativo e passivo. Nele, o autor compara e relaciona as forças de arrasto hidrodinâmico passivo e ativo, com os

respectivos coeficientes de arrasto passivo e ativo. Como o autor destaca, a história investigativa da natação tem despendido esforços na tentativa de se determinar o arrasto hidrodinâmico ( $D$ ), como apresentam Toussaint e coautores (2004). Sabendo-se que aquela se refere a uma força externa que atua sobre o corpo do nadador, com mesma direção e sentido oposto ao deslocamento, de modo que, quanto menor for sua intensidade, maior será a velocidade de deslocamento, para todas as outras condições mantidas constantes, *ceteris paribus*. (VILAS-BOAS *et al.*, 1997)

### **3.2 Equipamentos para avaliação do nado**

Zamparo e Swaine (2012) propõem o desenvolvimento de um ergômetro específico que simula os movimentos do nado crawl em condições controladas, a fim de calcular a eficiência mecânica total do exercício, a qual estabelece a relação entre toda a potência mecânica de saída do nadador e a entrada metabólica global. O ergômetro apresentado para treino à seco, Fig. 3.6, propõe um método de aplicação de um exercício incremental, executado até a exaustão por dez nadadores.

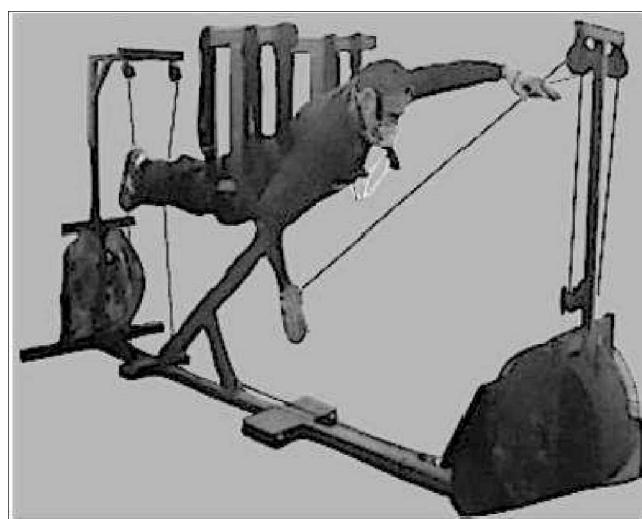


Figura 3.6 - Ergômetro para nado crawl fora da água. (ZAMPARO e SWAINE, 2012)

Resistências para movimentação de cada membro foram criadas por quatro pedais aéreos, os quais estão montados em eixos que rodam com uso de polias e cordas atreladas a pedais nas mãos e pés do indivíduo. O sistema permite o ‘chute de pernas’ e que força seja exercida para cima e para baixo, somente quando os braços puxam e não ocorra na fase de recuperação. Em cada pedal há um sensor fotoelétrico que detecta a revolução do mesmo. A

taxa de revolução de cada pedal é então passada para um computador onde a potência foi derivada a partir de um software e algoritmo de calibração. Os indivíduos, posicionados decúbito ventralmente foram instruídos a simular nado crawl, a fim de atingir máxima reprodução dos movimentos, pernas e braços. Na calibração estática dos pedais aéreos, a relação entre a taxa que cada força foi aplicada e a taxa de revolução dos mesmos é determinada pela suspensão de pesos conhecidos.

Tal calibração é similar às descritas nos trabalhos de Sharp *et. al.* (1982) e Swaine e Reilly (1983). Os quatro pedais foram relacionados por meio de uma equação, sendo esta a relação de saída de potência e a cadência (revoluções/s). A calibração foi feita de forma dinâmica, semelhante àquela realizada para um cicloergômetro (Jones e Passfiled, 1998).

A calibração é feita em duas diferentes condições, o pedal e um pêndulo de Monark foram montados em um mesmo eixo, regulados por um motor; possibilitando que na primeira condição, o pêndulo iria desacelerar em relação ao pedal quando a resistência de fricção aplicada a ele excedesse a do pedal. Para dez diferentes taxas de revolução, a resistência foi aumentada gradativamente e um sensor fotoelétrico possibilitou medir as taxas de revolução do pêndulo e do pedal. Já na segunda condição, uma embreagem foi incorporada entre o eixo e o pêndulo. Nesta condição há atraso na revolução do pedal comparativamente ao pêndulo e adição de pesos conhecidos. Revoluções incrementais foram aplicadas até que a discrepância fosse detectada. O exercício incremental foi simulado com uma potência mecânica inicial e aumentado de 25 a cada minuto. O rendimento/ eficiência do nado foi calculado pela diferença da potência metabólica total de entrada e a potência mecânica total de saída, baseada nos valores de VO<sub>2</sub> medidos correspondentes a até 30 s de cada carregamento, o que é melhor explicado na apresentação dos resultados do trabalho. Se encontrou nesse trabalho que a eficiência do nado é entre 0,21 a 0,30, em ambiente controlado, ou seja, de 21% a 30% do consumo metabólico é revertido em fonte de energia. São resultados similares a outros estudos de ergômetros em condições controladas, porém distanciam-se das reais condições descritas na literatura para natação (0,1 – 0,2), fora de ambiente controlado (laboratório).

### **3.3 Técnicas experimentais do estudo do arrasto passivo na água**

Em 2015, Gatta e coautores fizeram um resumo do estado da arte no que tange à medição da área frontal de nadadores (*S*) durante a natação. Vogel (1994) mostra que *S* pode ser definida de diversas formas:

- 1)  $S$  é a área em contato com a água: o total da superfície exposta ao fluxo, corpos hidrodinâmicos a um baixo número de Reynolds.
- 2)  $S$  é a área frontal / área da seção transversal: a área do corpo projetada em um plano normal a direção do fluxo, corpos que não necessariamente estão em posição hidrodinâmica, com alto ou médio número de Reynolds.
- 3)  $S$  é a área de forma planar, área do perfil, como a área submersa, o qual é um parâmetro independente da orientação com respeito ao fluxo (este método é geralmente utilizado com produção de aerofólios). Neste caso,  $S$  pode ser calculada como 2/3 do volume corporal (este método é usado para dirigíveis onde o volume é proporcional à sua subida).

Entretanto, diferentes autores têm aplicado essas diferentes definições para calcular  $S$  e então estimar o arrasto, o nadador não é um corpo hidrodinâmico, ele se move em médio a elevado número de Reynolds (MOLLENDORF, *et al.*, 2004) e é predominantemente impulsionado por forças de arrasto, assim, a área frontal / área da seção transversal parece ser a mais razoável “escolha de área”. (GATTA *et al.*, 2015)

Vilas-Boas (2001), destaca que  $S$  é determinante de  $F_D$  e assume importância especial na biomecânica da natação. Principalmente na correção da técnica de nado. Para  $F_D$ ,  $S$  corresponde à área de projeção do corpo no seu plano transverso, em relação à direção da aplicação de  $D$ , oposto à direção de aplicação da força.  $S$  deve ser cuidadosamente considerada, na tentativa de se eliminar falhas técnicas decisivas na performance do nadador. Essas falhas, como destaca Ribeiro (2006), são: a acentuada obliquação do corpo em imersão com os membros inferiores em posição mais profunda que o tronco, uma entrada com o cruzamento dos membros superiores na agua após a realização da recuperação, gerando um desalinhamento lateral.

Clarys (1979) apontou que o diâmetro da seção transversal do corpo pode ser medido simplesmente por técnicas fotográficas e é linearmente relacionada com a massa e altura do corpo. Neste método, Clarys encontrou valores aproximados de 0,077 m<sup>2</sup> para a seção transversal do nadador. Em estudos recentes, como apontam Gatta e coautores (2015), obtiveram valores similares usando fotografias com escalas apropriadas dos nadadores, como no trabalho de Vilas-Boas e colaboradores (2010): 0,076 – 0,081 m<sup>2</sup> em homens e 0,072 – 0,076 m<sup>2</sup> em mulheres. Barbosa e coautores (2012) encontraram valores de 0,071 – 0,077 m<sup>2</sup> em homens e 0,062 – 0,064 m<sup>2</sup>. Em mulheres, em amostra com nadadores de diferentes níveis de competição. Caspersen e coautores (2010), como contam Gatta e coautores (2015), encontraram

valores de  $0,089 \pm 0,006 \text{ m}^2$  em homens adultos,  $0,065 \pm 0,008 \text{ m}^2$  em jovens do sexo masculino e  $0,080 \pm 0,015 \text{ m}^2$  em mulheres adultas.

Os valores encontrados, apontados nos trabalhos citados, admitem uma área frontal mínima, de modo que o nadador não apresenta inclinações horizontais, o que implicaria em um aumento da área da seção transversal. Essa questão foi exposta por Zamparo e coautores em 2009.

Levando em consideração a inclinação do tronco do nadador na água e que somente parte do seu corpo fica submersa, Mollendorf e coautores (2004) propuseram uma fórmula para cálculo do parâmetro  $S$ , o que chamaram de área frontal efetiva ( $A_{eff}$ ).

$$A_{eff} = Af \cos\alpha + \frac{BSA}{2} \operatorname{sen}\alpha \quad (3.1)$$

Onde  $Af$  (área frontal) foi calculada de acordo com Clarys (1979),  $BSA$  é a superfície da área do corpo do nadador, sendo que  $\frac{BSA}{2}$  leva em conta apenas metade do corpo do nadador submerso,  $\alpha$  é o ângulo de inclinação do tronco do nadador em relação a uma linha horizontal. Com o auxílio dessa fórmula, Zamparo e coautores (2009) encontraram áreas de  $0,13 - 0,21 \text{ m}^2$  durante o arrasto passivo, valores cerca de 2 a 3 vezes maiores do que os valores de  $Af$ .

No reboque do nadador, com o nadador submerso ou na linha da água, com a medição do arrasto passivo,  $Af$  e  $A_{eff}$  dão uma ideia dos valores de área frontal esperados. Entretanto, no nado, com seus movimentos efetivos, as partes do corpo do nadador têm influência na área frontal, dependendo da fase do ciclo do nado e do estilo de nado adotado, o que afeta o arrasto ativo. Gatta e coautores (2015), afirmam que investigações das mudanças na área frontal durante o nado foram realizadas em apenas três estudos na literatura, quando na condição do arrasto ativo.

Cohen, Cleary e Mason (2012) apontaram valores intracíclicos da área frontal com valores de  $0,10$  a  $0,15 \text{ m}^2$ . Esses autores encontraram os resultados, baseando-se em meios de estudo computacional de dinâmica dos fluidos em um modelo de nadador em posição decúbito dorsal.

Taiar e coautores (2005) encontraram valores médios de área de  $0,31 \text{ m}^2$  e valores máximos de  $0,7 - 0,8 \text{ m}^2$  para o nado borboleta, imagens de vídeos feitos durante condições reais de nado foram obtidas e seus dados processados por computador.

Nicolas e coautores (2007) calcularam a área frontal em nado com uso do *monofin* através de uma filmadora frontal; os valores encontrados no estudo,  $0,053 \pm 0,005 \text{ m}^2$  são extremamente baixos se comparados com aqueles encontrados durante medições do arrasto passivo. (GATTA *et al.*, 2015)

O Núcleo de Habilitação / Reabilitação em Esportes Paralímpicos (NH/RESP) sediado na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia tem, como uma de suas propostas, desenvolver equipamentos, métodos e processos dedicados para o desenvolvimento de tecnologias assistivas voltadas para a saúde e o esporte em geral. Neste aspecto, o NH / RESP vem desenvolvendo ergômetros para cadeirantes e foram iniciados os estudos para o desenvolvimento de um ergômetro para a natação. Nesta fase inicial é importante a quantificação do arrasto passivo no processo de reboque do nadador. Uma metodologia via software *open source* foi desenvolvida para medir a área da seção transversal do tronco do nadador em diferentes condições, sabendo que essa variável é determinante no arrasto hidrodinâmico. Busca-se investigar sua influência relacionando com a magnitude da força de arrasto medida e o coeficiente de arrasto hidrodinâmico. Dessa forma, variáveis que influenciam diretamente na performance do nadador serão medidas e utilizadas para o futuro desenvolvimento de um novo ergômetro para natação que respeite o efetivo gesto motor do nadador realizado na piscina.

## CAPÍTULO IV

### FABRICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ARRASTO

Este capítulo apresenta como foi desenvolvida a metodologia de coleta de dados experimentais com o nadador. O desenvolvimento de um equipamento de arrasto foi necessário para em efetivo movimento de arrasto do nadador sem que haja interferência em seus movimentos, mesmo que essa condição seja passiva ou estática. O protótipo associado com a instrumentação são utilizados para a coleta de dados de força no arrasto passivo, no reboque de um nadador, executando a modalidade de nado peito.

#### 4.1 Desenvolvimento do Equipamento de Arrasto

Para avaliar a força de resistência, optou-se por uma condição passiva e estática do nadador imitando gestos motores específicos realizados durante um ciclo específico da natação. Neste caso, a proposta foi desenvolver um equipamento que pudesse arrastar o nadador em seu ambiente de treino, ou seja, na água. A opção foi um cabo de aço ligado ao corpo do nadador. Uma vez que, para uma análise efetiva, ou seja, a aquisição de uma base de dados maior, seria necessário um arrasto por uma distância mínima de 10 m e, com isso, o cabo deveria ter uma altura mínima e não ser utilizado efetivamente no nível da água. A Figura 4.1 mostra o projeto da estrutura proposta para fazer a movimentação do nadador.

A estrutura do equipamento de arrasto é formada por perfis quadrados (Apêndice II) que será posicionada externamente à piscina. Nesta estrutura foram projetados um tambor, motor, redutor, os quais permitem a movimentação do cabo de aço através de duas polias para o reboque do nadador. A Figura 4.1 mostra um desenho esquemático de todo o aparato experimental.

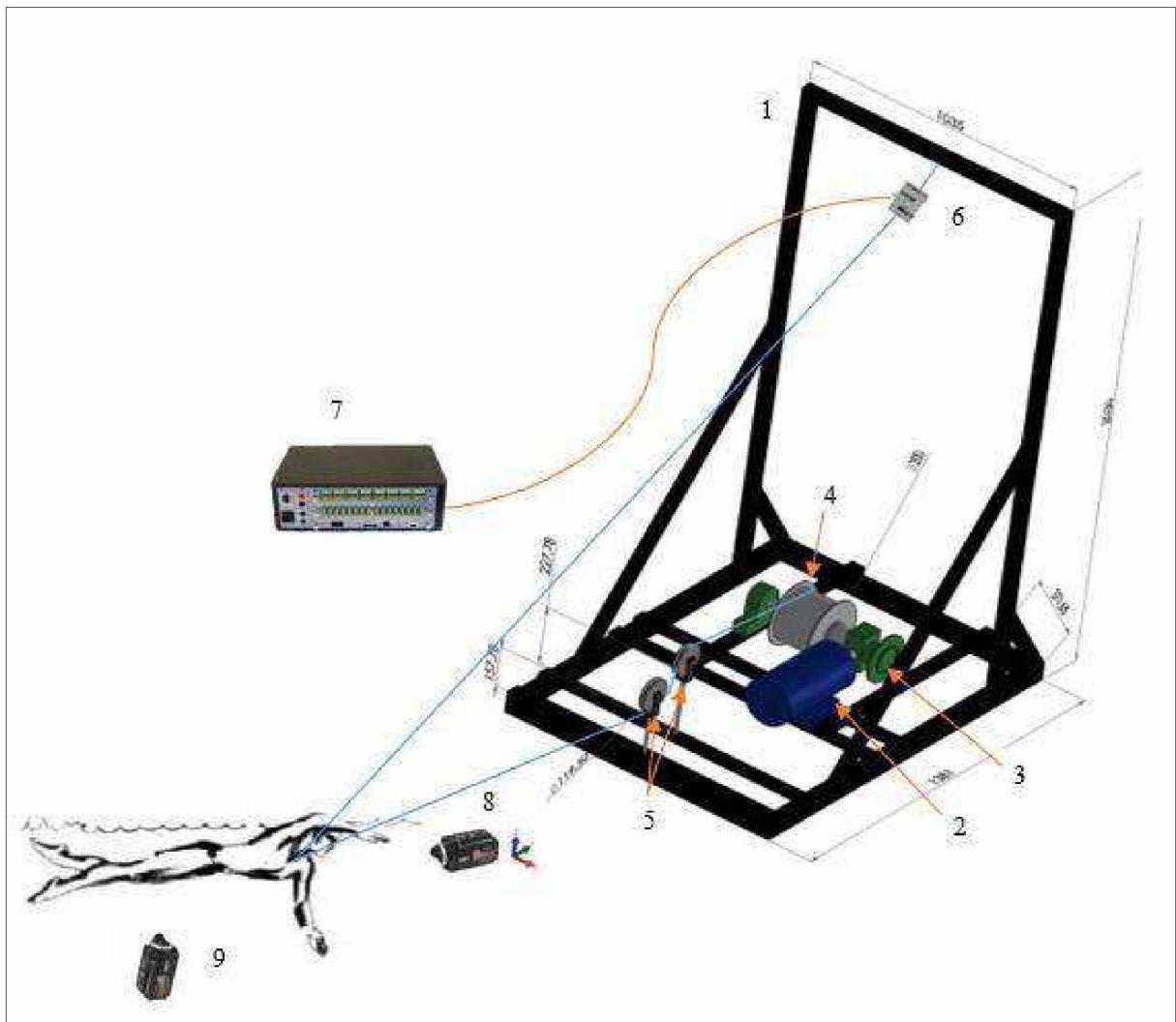


Figura 4.1 - Desenho esquemático do equipamento de arrasto. Na figura, 1: Estrutura perfilada, 2: Motor, 3: Redutor, 4: Tambor para cabo de aço, 5: Polias, 6: Célula de Carga, 7: Sistema de aquisição de dados, 8: Filmadora do plano transversal, 9: Filmadora do plano sagital. Destaque para o cabo de aço em cor azul e o fio de aquisição de dados em cor laranja. (As dimensões do equipamento podem ser melhor visualizadas no Apêndice II deste trabalho)

O motor utilizado nos testes é da marca WEG®, tem 7,5 c.v. de potência, 2 polos e foi alimentado em tomada trifásica (380 V). É um motor de alta rotação (3495 rpm), de massa igual a 42 kg. O redutor tem relação de redução de 1:15 e 90% de eficiência. O inversor utilizado é da Allen-Bradley, marca PowerFlex®753, alimentado em fonte trifásica (junto ao quadro de energia próximo a piscina), o qual foi programado para controlar o motor, tracionando o cabo de aço e, consequentemente, o nadador. A corrente elétrica máxima de atuação do motor na sua capacidade máxima foi de 8,7 ampères. A Figura 4.2 mostra a vista superior do sistema, composto pelo motor, redutor, polia, tambor com cabo de aço e mancais.

A Figura 4.2 mostra o desenho esquemático do sistema de transmissão de potência utilizado para aplicar uma força efetiva no cabo de aço, capaz de arrastar o nadador em diferentes posições com diferentes velocidades.



Figura 4.2 - Vista superior do sistema de transmissão de potência: 1 - motor; 2 - polia; 3 - redutor; 4 - mancais; 5 - tambor com cabo de aço.



Figura 4.3 - Visão geral do sistema: 1 - célula de carga.

A Figura 4.3 mostra a vista geral do sistema acoplado à estrutura de ferro, destaque para o posicionamento da célula de carga.

Para o projeto do sistema de transmissão de potência foi considerado como velocidade máxima do redutor o valor  $2,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Para o nado peito, esta velocidade indicaria um tempo de aproximadamente 20 s no percurso de 50 m – o recorde mundial desta modalidade em prova de 50 m é de 26 s 42ms do nadador britânico Adam Peaty, em 2015, ratificado pela FINA –, ao todo, 30 m de cabo de aço foram necessários para garantir os 12 m de percurso da nadadora, sendo que 15 m estavam entre a nadadora e a célula de carga e os outros 15 m, entre a nadadora e o tambor de recolhimento do cabo; 12 m tratam-se do percurso da nadadora e 3 m adotados como segurança para evitar choque da nadadora contra a borda da piscina. A massa total dos 30 m de cabo de aço corresponde a  $0,39 \text{ kg}$  ( $0,013 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1} \times 30 \text{ m}$ ), a qual foi desprezada.

Utilizando um tambor com diâmetro de 200 mm tem-se que,

$$v_T = \omega_T \cdot r_T \rightarrow 2,4 = \omega \cdot 0,1 \rightarrow \omega = 24 \text{ rad s}^{-1} \quad (4.1)$$

$$\text{Em rpm: } \omega_T = 24 \cdot \frac{30}{\pi} \cong 229 \text{ rpm} \quad (4.2)$$

Onde:  $v_T$  : velocidade no tambor;  $r_T$  : raio do tambor e  $\omega_T$  a rotação do tambor.

Para que o sistema de transmissão de potência pudesse ser utilizado em uma ampla faixa operacional foi considerada uma força resistiva da ordem de 2000 N. Com isso, a potência estimada deveria ser da ordem de 5000 W (7 c.v.). Foi selecionado um motor de 7,5 c.v. a 3495 rpm (2 polos).

Para adequar os parâmetros de potência foi relacionado um redutor sem fim / coroa com redução de 15:1. Portanto, tem-se que,

$$\omega_T = 229 \cdot 15 \rightarrow \omega_M = 3435 \text{ rpm} \quad (4.3)$$

Onde:  $\omega_M$  é a rotação máxima necessária no motor.

A potência máxima (*Pot*) fornecida pelo motor é 7,5c.v. corresponde a 5,59 kW com rotação nominal de 3495 rpm ( $\cong 366 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ). O torque de saída ( $T_S$ ) é de,

$$T_S = \frac{Pot}{rot_N} \rightarrow T_S = \frac{5,59 \cdot 10^3}{366} = 15,28 \text{ N m} \quad (4.4)$$

Com a relação de transmissão do redutor de 15:1, o torque total ( $T_T$ ) pode ser estimado, considerando uma eficiência total ( $\eta$ ) de 90%, ou seja,

$$T_T = \text{rel} \cdot T_S \cdot \eta \rightarrow T_T = 15 \cdot 15,28 \cdot 0,9 = 206,28 \text{ N m} \quad (4.5)$$

Com isso, a força máxima ( $F_{cabo}$ ) suportada no cabo de aço para arraste do nadador(a), será de,

$$T_T = F_{cabo} \cdot r_T, F_{cabo} = \frac{T_T}{r_T} \rightarrow F_{cabo} = \frac{206,28}{0,1} = 2063 \text{ N (210 kgf)} \quad (4.6)$$

A  $F_c$  estimada no cabo atende aos níveis de força encontrados na literatura, a partir de então foi possível direcionar a execução dos testes. Deve-se destacar que nos cálculos foi desprezada a influência do cabo de aço. A Figura 4.4 mostra um desenho esquemático do sistema de cabeamento utilizado para movimentar o nadador.

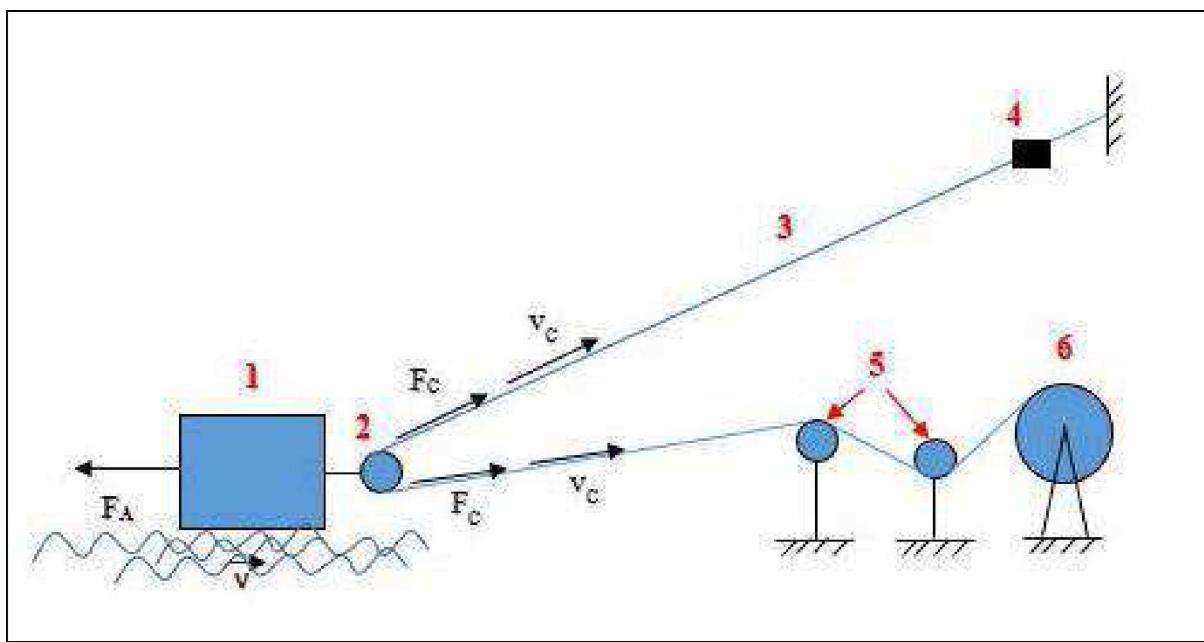


Figura 4.4 - Esquema do sistema de forças, cabos e polias. Na figura, 1: Nadador, 2: polia presa ao cinto peitoral do nadador, 3: cabo de aço, 4: célula de carga, 5: polias fixas do lado de fora da piscina e 6: tambor.

Na configuração mostrada na Fig. 4.4 observa-se que a força no cabo ( $F_c$ ) será a metade da força resistiva na nadadora, enquanto a velocidade linear no cabo ( $v_c$ ) deve ser o dobro da velocidade da nadadora. Portanto, devido ao sistema de cabeamento, a estrutura da força de resistência e da velocidade do nadador devem levar em consideração esta montagem. A força observada no nadador será duas vezes a  $F_c$ , devido a existência da polia no cinto

peitoral pelo qual a nadadora é puxada. A velocidade observada na nadadora será a metade da velocidade no tambor devido a existência da polia acoplada ao cinto peitoral.

O sistema de aquisição de dados de força da célula de carga corresponde ao módulo condicionador de sinais AI2161 da LYNX®, Fig. 4.5, que permite que o sinal seja condicionado. O software integrado ao hardware possibilita o processamento do sinal de interesse e extração em tempo real.



Figura 4.5- Sistema integrado de aquisição de dados. ([/www.lynxtec.com.br/](http://www.lynxtec.com.br/))

O sistema da LYNX® possui conversor A/D de 16 bits, comunica com o computador via rede Ethernet/IP a uma taxa de aquisição de 1000 Hz. O sinal bruto foi adquirido a uma taxa de 100 Hz e filtrado a 20 Hz. Os ensaios foram configurados para adquirir por 1 min de aquisição a partir do início da aplicação de força de arrasto sobre a nadadora.

Para obter diferentes velocidades constantes de arrasto, foi utilizado um inversor de frequência da Allen-Bradley, marca PowerFlex®753 (Fig. 4.6). Este foi programado para variar sua rotação de -3400 a +3400 rpm, desta forma, foi possível enrolar e desenrolar o cabo de aço do tambor, operando nos dois sentidos. Na programação do inversor foi selecionado o freio com parada imediata ao comando do operador. Para que o motor atingisse a rotação desejada, o inversor foi configurado para aumento e diminuição da velocidade de rotação em sinal rampa, o qual teria até 5 s para sua estabilização. A alimentação do sistema inversor-motor foi trifásica.



Figura 4.6 - Inversor de frequência utilizado nos experimentos.

Com o equipamento montado e integrado, o arrasto do nadador foi realizado para quatro posições distintas, pré-estabelecidas, a cinco velocidades distintas, com repetição de três vezes para cada velocidade, totalizando 60 ensaios. Estas configurações são mostradas em detalhes no Capítulo V.

## 4.2 Materiais Utilizados

O equipamento exige que o nadador esteja vestindo um cinto peitoral, com mosquetão de alumínio “D” frontal com trava associado a uma polia fixa com roldana em aço de capacidade de 30 kN, esse sistema é acoplado na extremidade de um cabo de aço encapado de 1/16” de diâmetro (1,5875 mm), sua carga máxima de ruptura é de 1630 N e pesa 0,013 kg por metro de comprimento. A Figura 4.7 mostra o tipo do cinto utilizado pela nadadora nos testes. A Figura 4.8 mostra a nadadora com o sistema do cinto peitoral, mosquetão e polia que é acoplado ao cabo de aço.



Figura 4.7 - Cinto peitoral de massa 225 g (501 g quando molhado na água), idêntico ao utilizado nos testes. ([www.conquistamontanhismo.com.br/cinto-peitoral](http://www.conquistamontanhismo.com.br/cinto-peitoral)).



Figura 4.8 - Nadadora vestida com cinto peitoral e acessórios.

Entre o nadador e a célula de carga foram utilizados 18 m de cabo de aço. A célula de carga utilizada nos testes é da marca HBM®, com capacidade de 1000 N e grau de proteção IP68, o qual permite seu uso por algumas horas em até 1 m de profundidade na água, sensibilidade de  $2,0 \pm 0,01 \text{ mV V}^{-1}$ , erro total apontado pelo certificado de  $\pm 0,02\%$  da sua capacidade. Suas dimensões e massa são  $5,08 \times 7,62 \times 2,54 \text{ cm}$  e  $0,7 \text{ kg}$ , respectivamente. A Figura 4.9 mostra o aspecto desse dispositivo.



Figura 4.9 - Célula de carga da HBM, modelo S40A, capacidade de 1000 N.

Na natação, a célula de carga é utilizada principalmente para se medir a força de arrasto. A união da nadadora à célula de carga foi feita mediante um cabo de aço e nestas condições desprezou-se sua flexibilidade durante a ação de arrasto do nadador.

#### 4.3 Calibração da célula de carga

A calibração da célula de carga foi feita utilizando-se uma máquina de ensaios – BME 10kN da Oswaldo Filizola® (Fig. 4.10), na qual é possível realizar ensaios de tração / compressão / flexão, entre outros. O controle operacional da máquina é feito pelo software DynaView Pro M. A velocidade de execução do ensaio foi de  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , a resolução do incremento é de 0,001 mm. O sistema de medição incorporado à máquina, possibilitou a visualização, em leitor digital com resolução de 0,1 N e fundo de escala nominal de 1000 N, dos valores de força resultantes na compressão. A temperatura ambiente no momento da calibração foi de  $28 \pm 1^\circ\text{C}$ , a mesma foi realizada no Laboratório de Projetos Mecânicos – LPM/FEMEC-UFU.



Figura 4.10 - Máquina Universal de Ensaios - BME 10 kN

A calibração da célula de carga utilizada nos experimentos foi feita por comparação, em relação a célula de carga padrão da Berman Load Cells®, modelo BTSI (Fig. 4.11), com capacidade de 10000 N e resolução de 0,1 N, sensibilidade de  $2,0 \pm 0,01 \text{ mV} \cdot \text{V}^{-1}$ , erro total apontado pelo certificado de  $\pm 0,02\%$  da sua capacidade. A célula de carga a ser calibrada foi

apoiada sobre bancada niveladora e força local foi exercida com a presença de um parafuso rosqueado à célula de carga.



Figura 4.11 - Célula de carga padrão utilizada na calibração.

#### **4.4 Caracterização do experimento**

Estima-se medir os níveis de resistência hidrodinâmica passiva (força de resistência -  $F_D$ ), coeficiente de arrasto passivo com o procedimento experimental ( $C_D$ ), coeficiente de arrasto passivo calculado por procedimento analítico ( $C_{Df}$ ), área da seção transversal do tronco da nadadora ( $S$ ) e velocidade efetiva realizada durante arrasto da nadadora. Tais valores são calculados para 5 velocidades constantes impostas considerando uma repetição de três percursos de 12 metros, para cada uma das cinco velocidades impostas, em quatro posições distintas adotadas no nado peito.

Foi feita a medição temporal do percurso, por meio da filmagem lateral dos ciclos, as posições inicial e final foram feitas por marcadores na piscina. O início do movimento do nadador é dado com o acionamento do inversor, com um atraso de 5 s, para estabilização do motor na velocidade configurada.

A célula de carga fixada no cabo de aço permite a coleta de dados de força ao longo dos ciclos, conferindo os dados de interesse dessa configuração. As imagens laterais permitem observar o tempo gasto e o deslocamento efetuado pela nadadora, gerando informação de velocidade da nadadora, ao passo que as imagens do plano transversal conferem informação da área da seção transversal da nadadora submersa em acordo com a posição definida para representação do deslize da nadadora no nado peito.

#### 4.5 Análise dos Dados

Dados de força foram obtidos através de uma célula de carga acoplada ao sistema. Os gráficos de força ( $F_D$ ) *versus* velocidade e coeficiente de arrasto passivo ( $C_D$ ) *versus* velocidade serão comparados entre os diferentes posicionamentos. Por meio de gráficos foi possível observar de modo visual o comportamento dos valores coletados experimentalmente e os valores obtidos por meio de modelos analíticos. A estatística descritiva dos dados é apresentada para os valores encontrados de modo experimental.

A definição dos elementos do projeto e componentes que executem o experimento como planejado configuraram uma importante parte do projeto. A realização de teste piloto foi necessária na medida que evidenciou partes faltantes que deveriam ser incorporadas ao sistema e mostrou falhas de projeto, exigindo o refinamento do sistema. A definição da metodologia de coleta de dados e das características fundamentais do sistema, revelou as necessidades para se atingir os objetivos do trabalho. A definição dos métodos de processamento dos dados também foi feita nesta etapa, refletindo o andamento do projeto.

A partir dos elementos do projeto apresentados, a metodologia de coleta das imagens e cálculo da área da seção transversal do tronco do nadador são apresentados no Capítulo V.

## **CAPÍTULO V**

### **COEFICIENTE DE ARRASTO HIDRODINÂMICO**

#### **5.1 Amostra**

Os ensaios foram conduzidos na Universidade Federal de Uberlândia, no campus da Faculdade de Educação Física (FAEFI-UFU). Os procedimentos, foram realizados em uma piscina de 25 m, aquecida ( $26\pm2$  °C). A amostra foi composta por um indivíduo, nadadora de 26 anos de idade, nado estilo peito. Consentimento formal escrito para participar da pesquisa foi assinado por parte dos membros da equipe de pesquisa e por parte da voluntária, como mostra o Anexo III deste trabalho. Os procedimentos adotados neste trabalho foram aprovados pelo Comitê de ética em Pesquisas com Seres Humanos (CEP - UFU) sob processo de número 533196/16.

#### **5.2 Avaliação do Perfil Hidrodinâmico**

Neste estudo, apenas um indivíduo foi recrutado, tendo em vista o interesse de avaliar uma nova metodologia de coleta de dados de força resistiva e maneira de estimar o coeficiente de arrasto passivo, durante a realização do deslize na natação utilizando um equipamento projetado que inclui sistema de transmissão e cabo de aço.

Foi solicitado que a nadadora estivesse em quatro posições distintas, representativas do nado peito, semelhantes àquelas adotadas na metodologia de Gatta e coautores (2015), como mostra a Fig. 5.1.

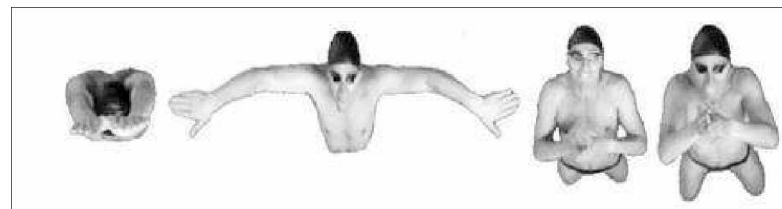


Figura 5.1 - Área frontal no nado peito. (GATTA *et al.*, 2015)

Schramm (1987) apresenta nove fases do nado peito, como pode ser observado na Fig. 5.2. Quatro configurações de posicionamento do nadador, representativas das maiores áreas e naquelas em que o nadador está com a cabeça submersa, consequentemente com o corpo todo submerso, foram definidas para avaliação nos testes realizados, as mesmas são destacadas sequencialmente na Fig. 5.2 como posições de 1 a 4.

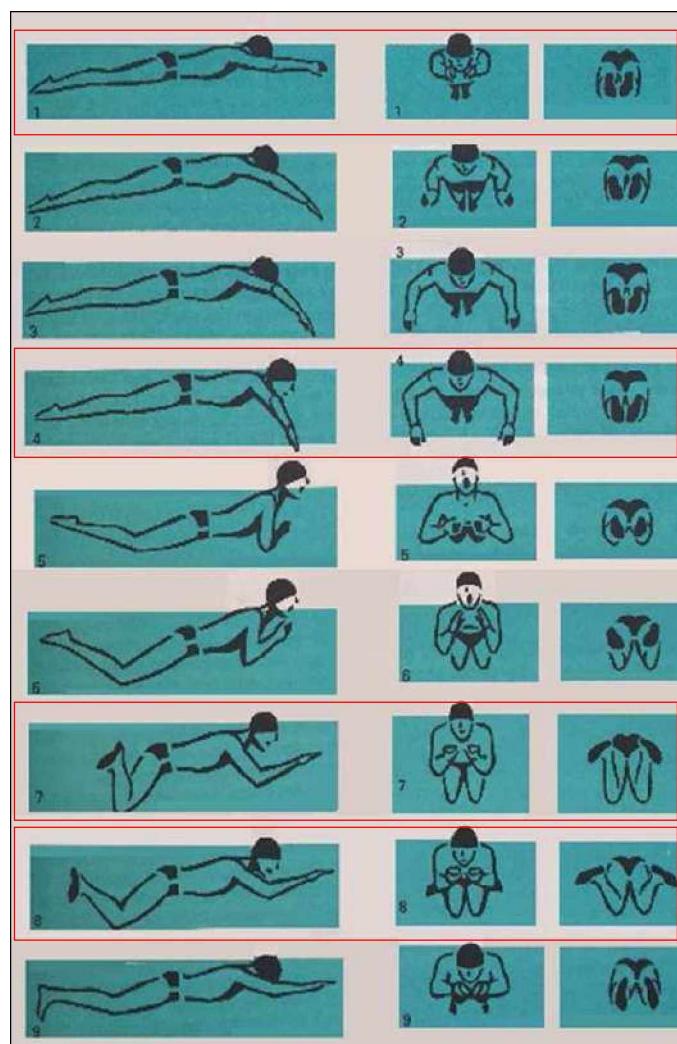


Figura 5.2 - Posições adotadas no nado peito, destaque para as posições 1, 2, 3 e 4 deste trabalho, respectivamente. (SCHRAMM, 1987)

Para a avaliação da área da seção transversal resistiva em cada posição ( $S$ ) nos instantes de interesse do nado, o nadador foi filmado no plano transversal ao seu sentido de movimento, com vista superior por uma câmera digital colocada na água (Sony HDR-XR 160, Tóquio, Japão) Full HD. O objeto usado para calibração das imagens, retiradas de frames do vídeo, foi a touca utilizada pelo nadador. As imagens de interesse foram obtidas de modo que o nadador estivesse na posição mais ortogonal possível em relação à câmera e à piscina, isso foi observado com o auxílio da linha de centro da raia de natação, como mostra a Fig. 5.3, e a altura do nadador em relação ao nível da água.



Figura 5.3 - Câmera para aquisição das imagens no plano transversal.

Simultaneamente à filmagem do plano transversal do nadador, a filmagem de seu plano sagital também foi realizada. Essa com intenção de sincronizar o início e o fim da ação de reboque do nadador, com a aquisição do sinal de força pela célula de carga acoplada ao sistema.

As cinco velocidades a que o nadador foi submetido foram calculadas por meio das filmagens, o ângulo de posicionamento da câmera, em relação aos cones de marcação mostrados na Fig. 5.4 foi estimado para efeito de ajuste dos cálculos no software *kinovea*.

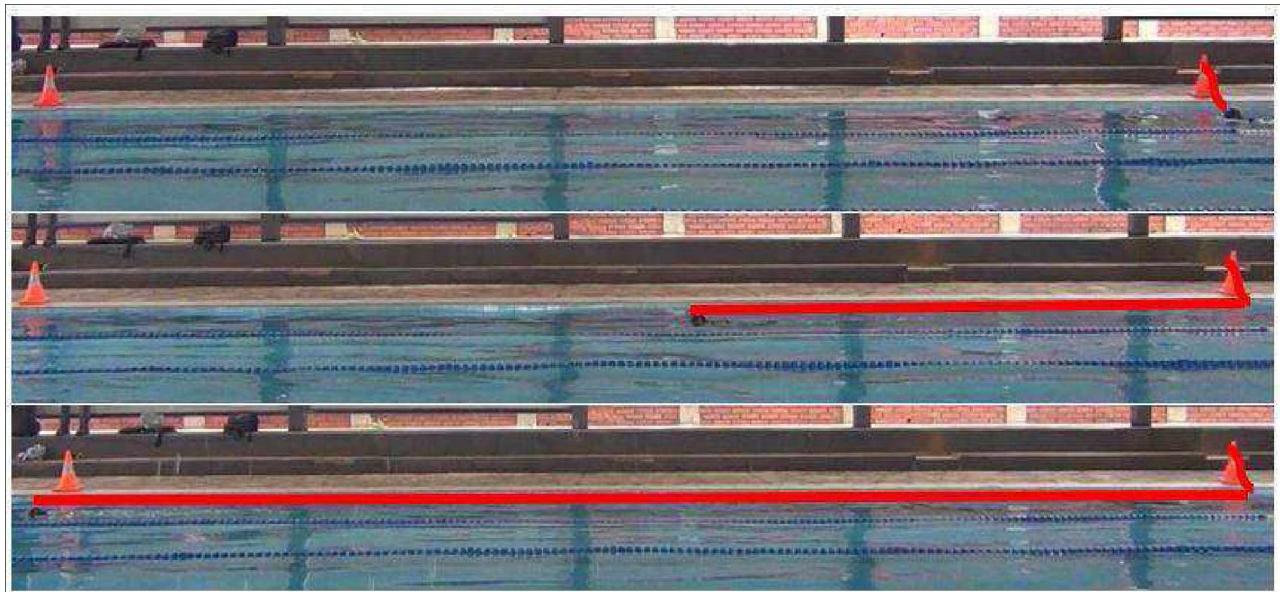


Figura 5.4 - Deslocamento da nadadora em três momentos do percurso.

Os cones observados na Fig. 5.4 delimitam o início e o fim do reboque da nadadora. A nadadora foi observada no início e no final do percurso como é mostrado na Fig. 5.4, o ângulo de visualização pela câmera em relação aos marcadores inicial e final foi estimado permite a avaliação formando um triângulo com medidas do deslocamento da nadadora, largura da piscina e distância da nadadora do cone até o centro da raia, linha em que ela se desloca.

A nadadora percorreu o trajeto no centro da raia, posicionando-se então a 1,5 m dos marcadores. A piscina de largura 12 m, permitiu concluir que a nadadora se deslocou 10,6 m, ou seja, menos do que marcam os cones. Dessa forma, foi possível estabelecer as referências necessárias para obtenção das velocidades da nadadora nos testes, realizada com auxílio do software *open source* kinovea.

### 5.3 Método para cálculo da área da seção transversal do tronco do nadador ( $S$ )

As imagens obtidas pela câmera no plano transversal foram analisadas, processadas e editadas pelo software de domínio público, ImageJ, o qual foi desenvolvido pelo National Institute of Health, NIH, Estados Unidos. No ImageJ, o cálculo das áreas é realizado pela contagem interna de pixels das regiões selecionadas pelo usuário (RASBAND, 2011). O ImageJ processa a imagem captando a intensidade luminosa ou nível de cinza dos pixels.

Para edições complementares das imagens, que compreendem uma alteração de cores da área de interesse, assim como na exclusão de detalhes da imagem que não fossem de interesse, o software Adobe® Photoshop® CS2 foi utilizado.

O software ImageJ estima a área plana em pixel<sup>2</sup> ( $S_{pixel}$ ) com área adquirida a partir da câmera frontal. A cada ciclo de deslize do nadador na água, o qual consistiu em seu arrasto por 12 metros, monitorados pela câmera lateral por meio de marcadores inicial e final. Foram realizadas filmagens de 40 s com 60 fps. Com as imagens obtidas nas filmagens, selecionou-se os melhores frames de cada ciclo para que as posições de interesse definidas fossem capturadas.

O processo de cálculo da área plana da seção transversal do tronco do nadador em m<sup>2</sup> foi comparado com os valores reais de uma área conhecida, uma placa retangular, que foi destacada em uma foto, como mostra a Fig.5.5.



Figura 5.5 - Calibração da escala nas imagens, valores em cm, com o software ImageJ.

A calibração da escala na imagem, mostrada na Fig. 5.5, foi feita a partir da touca do nadador, visto que esse é o método adotado para as outras calibrações realizadas neste trabalho, sempre pelo mesmo operador. Como resultado, a placa de área conhecida (2,10 x 2,95 cm) teve suas medidas dadas pelo ImageJ de 2,05 x 2,93 cm, sendo, portanto, subestimada. Admite-se, dessa forma, um erro na fonte de 3% para as medidas encontradas neste trabalho.

Na avaliação da área efetiva de cada imagem, o seguinte processamento da imagem foi adotado: (i) calibração da escala de medição a partir da touca do nadador; (ii) delimitação do plano de fundo, por meio do *threshold* de cores (adota-se uma cor limite na escala de cores para diferenciar a imagem em duas partes), automatizado pelo software ImageJ; (iii) eliminação de partes próximas à área de interesse, que atrapalhavam a diferenciação dessa área, por meio do software Adobe® Photoshop® CS2; (iv) Threshold binário da imagem e identificação do seu contorno (comando ‘Find edges’ do ImageJ). A Figura 5.6 exemplifica a etapa de identificação da área efetiva transversal do nadador que se choca com a água na execução do nado, além de identificar seu contorno, o qual é utilizado na seleção da área de interesse que terá seu interior medido de modo automatizado pelo ImageJ.

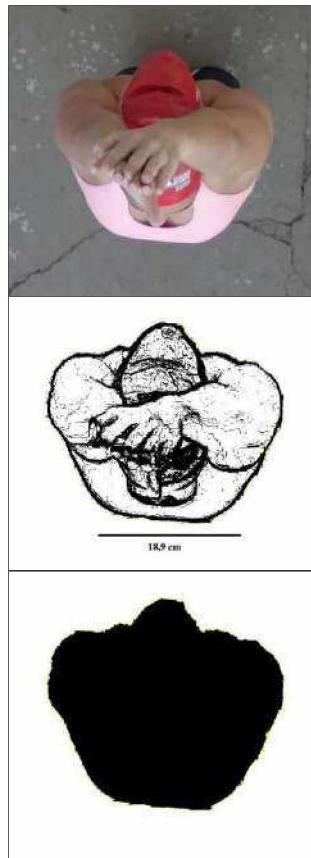


Figura 5.6 - Área frontal efetiva, primeiramente determinada em *pixel*<sup>2</sup> a partir da vista transversal do corpo do nadador.

O passo a passo da metodologia apresentada no parágrafo anterior é descrito no Apêndice I ao final deste trabalho.

O procedimento de escolha das imagens de interesse foi dado pelo mesmo observador, com repetitividade, em busca dos posicionamentos característicos e melhor distinguíveis dentre as imagens. A área que é destacada na Fig. 5.6 tem seus *pixels* contados e o software ImageJ realiza a contagem de *pixels* automaticamente, fornecendo o tamanho real da área em  $\text{cm}^2$  a partir da calibração feita a partir da touca da nadadora. Com o reboque da nadadora, o coeficiente de arrasto passivo no nado peito foi estimado, assumindo:

- 1) A área  $S$  corresponde ao valor da área encontrada para cada posição ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ , para as posições 1, 2, 3 e 4, respectivamente), e que não muda com a velocidade do nado;
- 2) O valor da densidade da água se manteve constante, ( $\rho = 997 \pm 0,00059 \text{ kg m}^{-3}$ ) e a temperatura da água a  $26 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- 3) O arrasto de forma ( $D$ ) é o principal determinante do arrasto total, nessas condições, por se tratar da resistência relativa à forma da área da seção transversal da nadadora.

- 4) O arrasto de contato ( $D_C$ ) foi estimado via cálculo matemático, sendo o arrasto total composto pelo arrasto de forma ( $D$ ) e pela componente de arrasto de contato ( $D_C$ ).

A amostra é composta por uma nadadora, 26 anos de idade, massa corporal = 56,5 kg, altura = 168,5 cm, comprimento do corpo com braços estendidos à frente (Posição 1) = 198 cm, comprimento do corpo na Posição 2 = 168,5 cm, comprimento do corpo na Posição 3 = 125 cm, comprimento do corpo na Posição 4 = 140 cm, comprimento envergadura = 170,1 cm, cintura = 69 cm e quadril = 96 cm. A Figura 5.7 apresenta as medidas de sua cabeça com a touca de natação, essas medidas foram utilizadas para calibração das imagens coletadas.

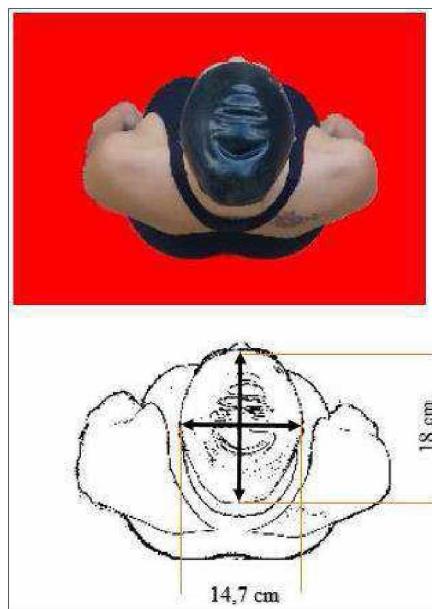


Figura 5.7 - Medidas superior e lateral da cabeça da nadadora.

Os resultados encontrados para a metodologia apresentada de estimativa do coeficiente de arrasto passivo, a partir de dados experimentais da área da seção transversal da nadadora e da utilização do equipamento são apresentados no Capítulo VI.

## CAPÍTULO VI

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes à avaliação das forças de resistência medidas para o nado peito em uma condição passiva. Considerando o cálculo da área da seção transversal do tronco da nadadora também são apresentados os valores do arrasto passivo e os coeficientes de arrasto passivo de forma e de contato considerando os dados experimentais e o modelo analítico.

#### 6.1 Área da seção transversal

Como descrito no Capítulo V, a área da seção transversal da nadadora foi estimada em 04 posições passivas do nado peito. Neste caso, imagens da nadadora, posicionada perpendicularmente a uma câmera frontal, foram adquiridas na direção de deslocamento durante o percurso de 12 metros. Este percurso seguia a linha central de uma das raias da piscina, conforme mostrado na Fig. 6.1.



Figura 6.1 – Nadadora posicionada na piscina durante captação das imagens

Para a determinação da área da seção transversal, dentre os 60 ensaios realizados, foi selecionado o melhor ensaio para cada uma das quatro posições avaliadas. O melhor ensaio foi selecionado considerando o vídeo de maior contraste entre o nadador e a água, o melhor alinhamento do nadador em relação à câmera frontal e à linha central da raia, a melhor qualidade de luminosidade do filme e o vídeo com frames detectáveis para fins de observação sem que a imagem pudesse ser tratada.

Para a seleção foram analisados 78 frames, foi feita uma observação da movimentação da nadadora, porém as áreas não foram extraídas durante a parte dinâmica do nado. Utilizando o programa Image J, as áreas das seções transversais foram calculadas e comparadas com aquelas observadas na literatura. A nadadora foi observada de fora da água, de modo estático, para a captura das imagens nas quatro posições distintas. Então, uma estimativa da área da seção transversal da nadadora foi feita fora da piscina com imagens em posições similares ao do nado peito.

Na realização dos testes, uma das principais dificuldades, é a manutenção de um posicionamento fixo da nadadora durante todo o percurso, principalmente em velocidades mais altas. As posições foram escolhidas com base na literatura levando em consideração uma imersão completa do corpo da nadadora na água. O procedimento e tratamentos realizados para calcular a área da seção transversal da nadadora na posição 1 são mostrados no Capítulo V. A calibração foi efetuada a partir da largura da touca/cabeça da nadadora. A Figura 6.2 mostra uma das imagens adquiridas e tratadas para a posição 1 do nado peito realizado pela nadadora em uma condição passiva.

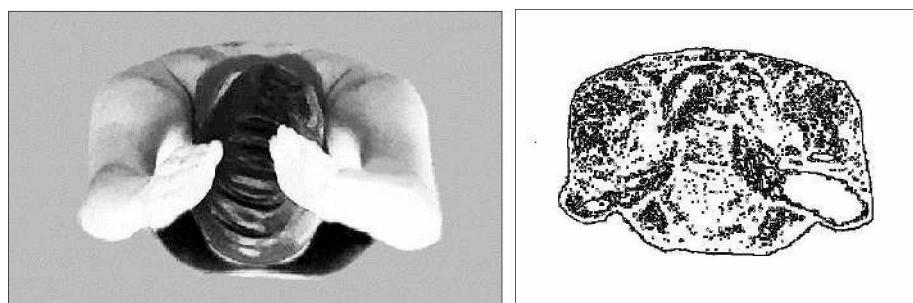


Figura 6.2 - Área frontal efetiva, determinada em pixel<sup>2</sup> pelo software ImageJ, correspondente à área da seção transversal  $S$  na posição 1.

A área da seção transversal da nadadora foi calculada para a posição 2, a calibração também foi feita a partir da largura da touca/cabeça da nadadora. A Figura 6.3 mostra uma das imagens adquiridas para a posição 2.

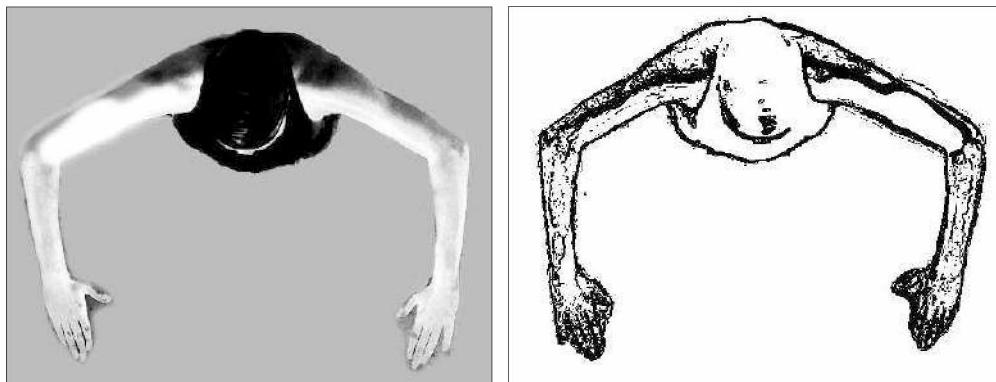


Figura 6.3 - Área frontal efetiva, determinada em pixel<sup>2</sup> pelo software ImageJ, correspondente à área da seção transversal S na posição 2.

A área da seção transversal da nadadora foi calculada para a posição 3, a calibração foi efetuada a partir da touca da nadadora. Uma das áreas obtidas é mostrada na Fig. 6.4. A Figura 6.5 mostra a área estimada para a posição 4.

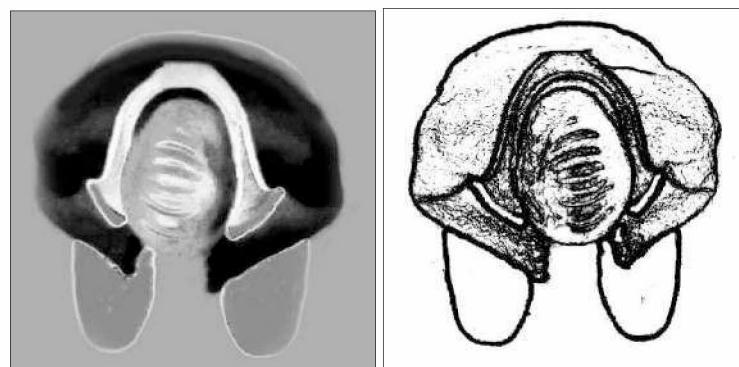


Figura 6.4 - Área frontal efetiva, determinada em pixel<sup>2</sup> pelo software ImageJ, correspondente à área da seção transversal S na posição 3.

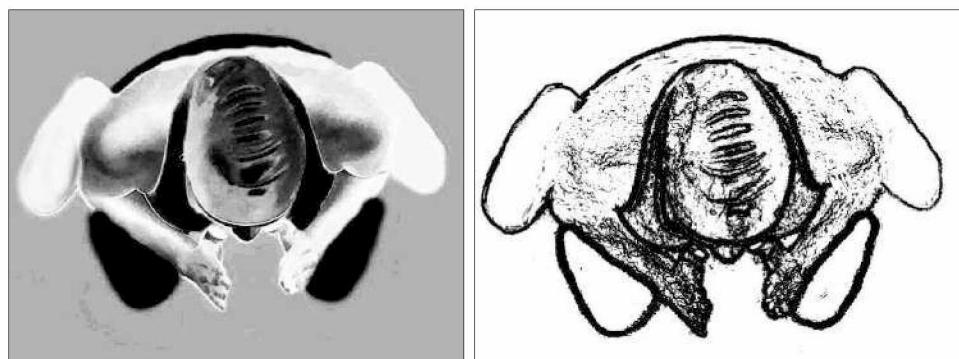


Figura 6.5 - Área frontal efetiva, determinada em pixel<sup>2</sup> pelo software ImageJ, correspondente à área da seção transversal S na posição 4.

A Tabela 6.1 mostra os valores das áreas das seções transversais do tronco da nadadora para cada posição adotada conforme metodologia mostrada anteriormente. O erro calculado via software (ImageJ), da ordem de  $\pm 3\%$ , foi estimado a partir do cálculo automatizado do software de uma área real conhecida, o software ImageJ subestima os valores de área em aprox. 3%.

Tabela 6.1 - Valores de área da secção transversal do tronco da nadadora ( $S$ ) para as quatro posições.

	$S_1$ (m <sup>2</sup> )	$S_2$ (m <sup>2</sup> )	$S_3$ (m <sup>2</sup> )	$S_4$ (m <sup>2</sup> )
<i>Valor</i>	0,055	0,110	0,093	0,088
<i>Erro</i>	0,010	0,018	0,019	0,020

A Figura 6.6 apresenta uma comparação para as áreas da seção transversal da nadadora estimadas via software ImageJ para as quatro posições adotadas neste estudo. A forma de apresentação dos resultados, adotada na Fig. 6.6 foi inspirada no trabalho de GATTA *et al.* (2015).

O comportamento da curva que relaciona a área da seção transversal do tronco do nadador com o ciclo do nado tem correspondência com o estudo de Gatta e coautores (2015) em termos de evolução da curva. Os valores de área naquele trabalho, no entanto, foram bastante superiores, apresentando valores próximos a 0,40 m<sup>2</sup> quando o nadador se encontrava na posição 2. Tal fato pode ser justificado por questão de gênero (área do tronco de homem ser superior à de mulher) e pelo fato de que o tronco do nadador pode estar mais ou menos elevado no momento de identificação da área frontal do indivíduo. Gatta e coautores (2015) estimaram a área da seção transversal dos nadadores a partir de um software que estimava a área de interesse por pixel na imagem e fazia a conversão para a escala real, a partir de um tamanho de frame conhecido. Método semelhante ao utilizado neste trabalho.

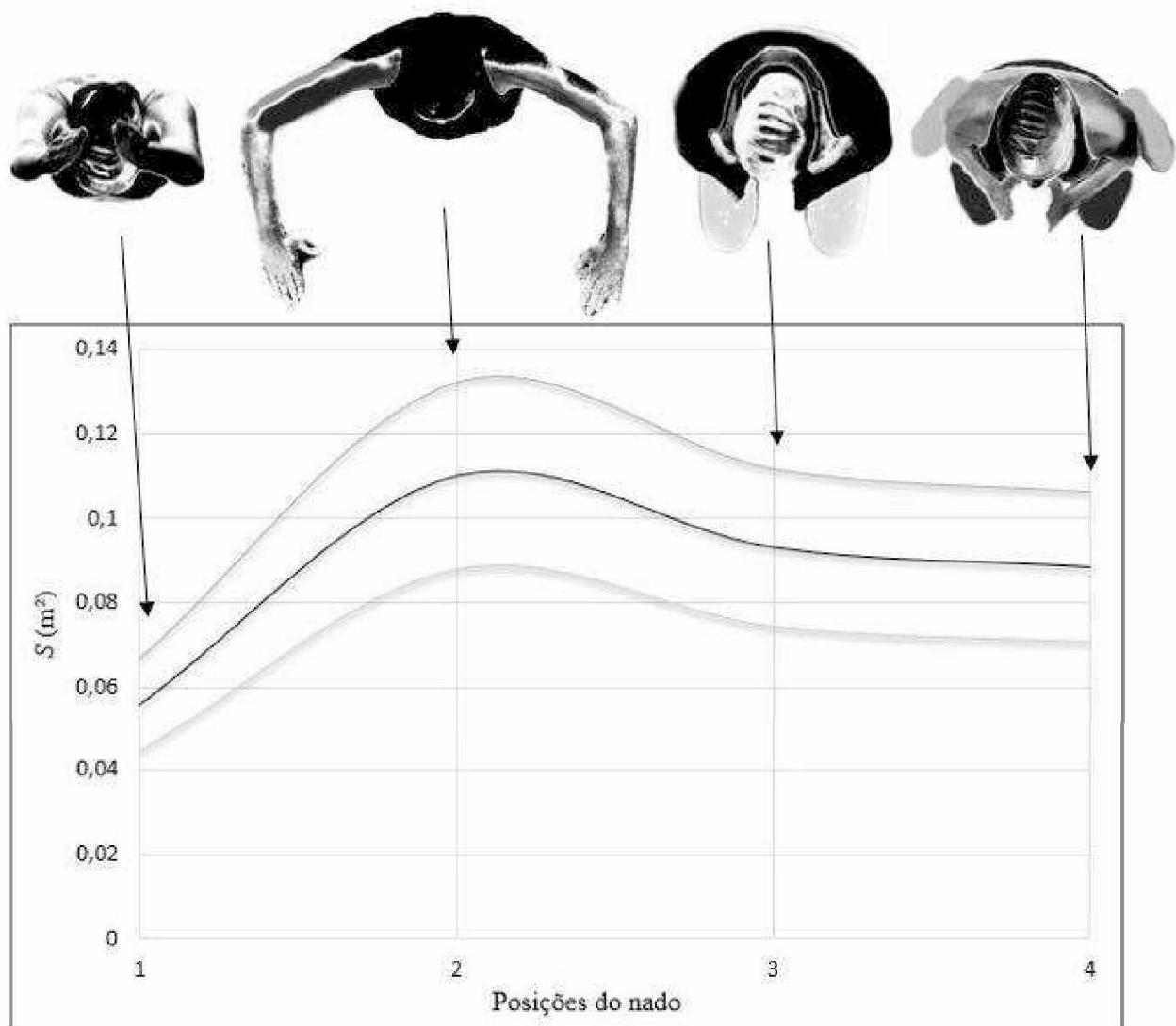


Figura 6.6 - Área frontal no nado peito. A linha central representa o valor encontrado para as áreas (em  $m^2$ ), as linhas superior e inferior representam o erro intrínseco das medidas, observado com o uso do software ImageJ.

## 6.2 Calibração da Célula de Carga

A calibração da célula de carga utilizada nos testes, célula da HBM®, com capacidade de 1000 N, sensibilidade de  $2,0 \pm 0,01 \text{ mV V}^{-1}$ , como foi apresentada no Capítulo IV, foi feita por comparação, a partir de uma célula de carga padrão.

O esquema de contato entre as células de carga é apresentado na Fig. 6.7.



Figura 6.7 - Contato feito por parafuso entre as células de carga utilizadas na calibração.

Foi feita a calibração com a coleta de 8 pontos, sempre com aumento de compressão, a cada ponto de interesse, 10 s são marcados desde a compressão efetuada, até a estabilização do valor de força no leitor digital. A correlação apontada no incremento de compressão ao longo dos pontos coletados foi de 99,98%. A célula de carga usada nos experimentos estava conectada à LYNX® e módulo condicionador de sinais AI2161. No ensaio por regressão, possível de ser realizado na LYNX®, os dados de calibração foram salvos no sistema de aquisição de dados, de modo que foram usados como referência nos testes com a nadadora. A Tabela 6.2 apresenta os pontos registrados na calibração da célula de carga, enquanto que a Fig. 6.8 comprova a correlação por regressão linear e destaca o ganho sobre o sinal de origem.

Tabela 6.2 – Valores em Volts (V) e força de compressão (N) correspondentes para calibração da célula de carga da HBM®

V	F (N)
-0,2303	-41
-0,6064	-110
-1,0069	-184
-1,4348	-262
-1,8214	-335
-2,2729	-418
-2,6044	-480
-3,0124	-556

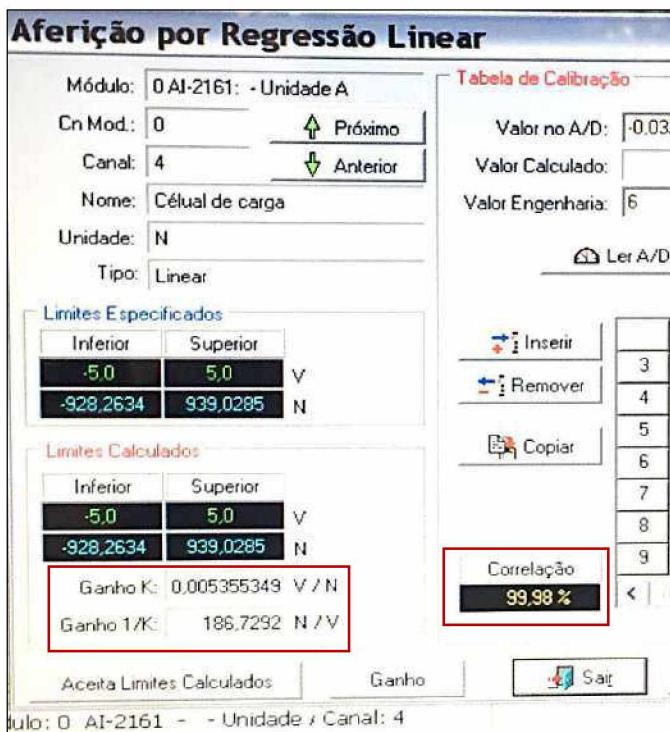


Figura 6.8 - Correlação e ganho do sinal dados na calibração da célula de carga pelo software de aquisição de dados da LYNX®.

### 6.3 Forças de Resistência Passiva

Como destacado no Capítulo IV, um sistema de cabo e polia ligado ao cinto da nadadora, arrastava-a durante um percurso de 12 m. O sistema de aquisição de dados adquiria o sinal da força de arrasto medida pela célula de carga. Durante alguns segundos, antes da partida, ou seja, do fornecimento de potência ao motor, o sinal era adquirido através do sistema de aquisição da Lynx. A condição operacional do inversor de frequência fornecia uma rotação indicada em uma condição de sinal do tipo rampa, chegando a condição máxima em 5 s. Por isso, o sinal da célula de carga era bem característico. A Figura 6.9 mostra uma curva típica dos níveis de força de resistência passiva considerando a fase inicial do movimento durante o percurso de 12 m que era atingido em poucos segundos.

O gráfico de força x tempo observado na Fig.6.9 exemplifica o sinal de força obtido pela célula de carga no reboque da nadadora a uma velocidade de  $0,536 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Este sinal observado na célula de carga corresponde ao nível de força observado nela, necessário para o reboque da nadadora, denominado  $D$ , a qual se refere à força observada no cabo no reboque da nadadora, correspondente ao arrasto passivo de forma.

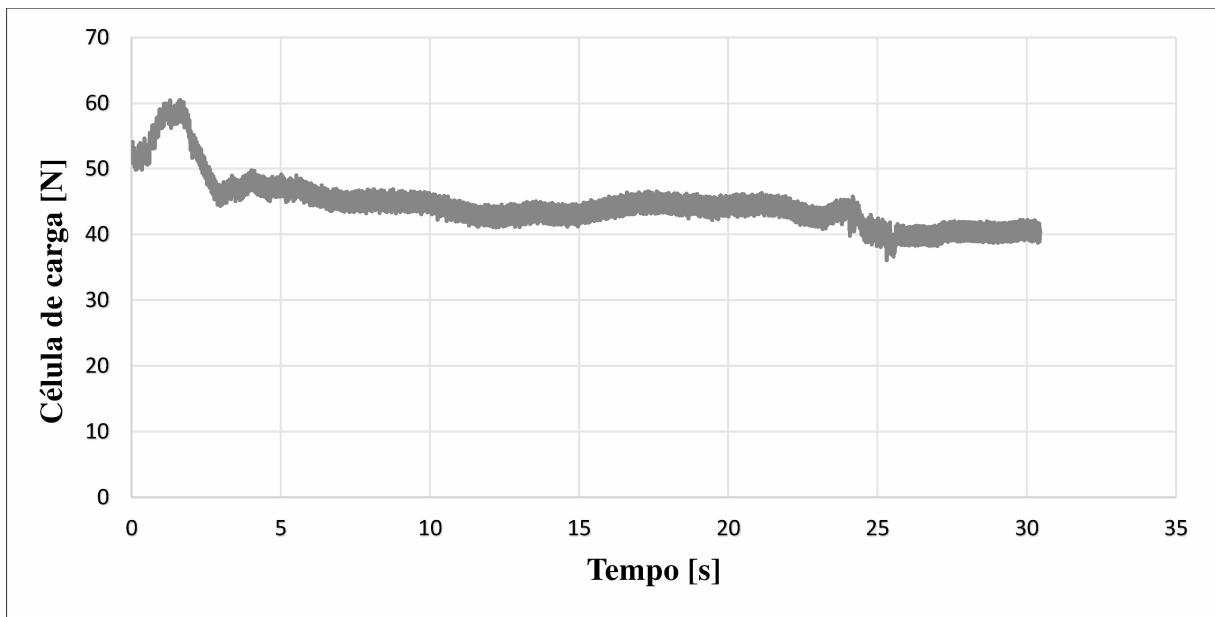


Figura 6.9 - Sinal de força no reboque da nadadora.

O trecho em destaque na Fig. 6.10 corresponde ao sinal efetivo medido pela célula de carga no momento em que o motor está funcionando em sua condição máxima, ou seja, após o inversor aplicar a rotação selecionada em uma condição do tipo rampa. Esse trecho era cortado do sinal original e processado para avaliar os níveis médios de resistência passiva.

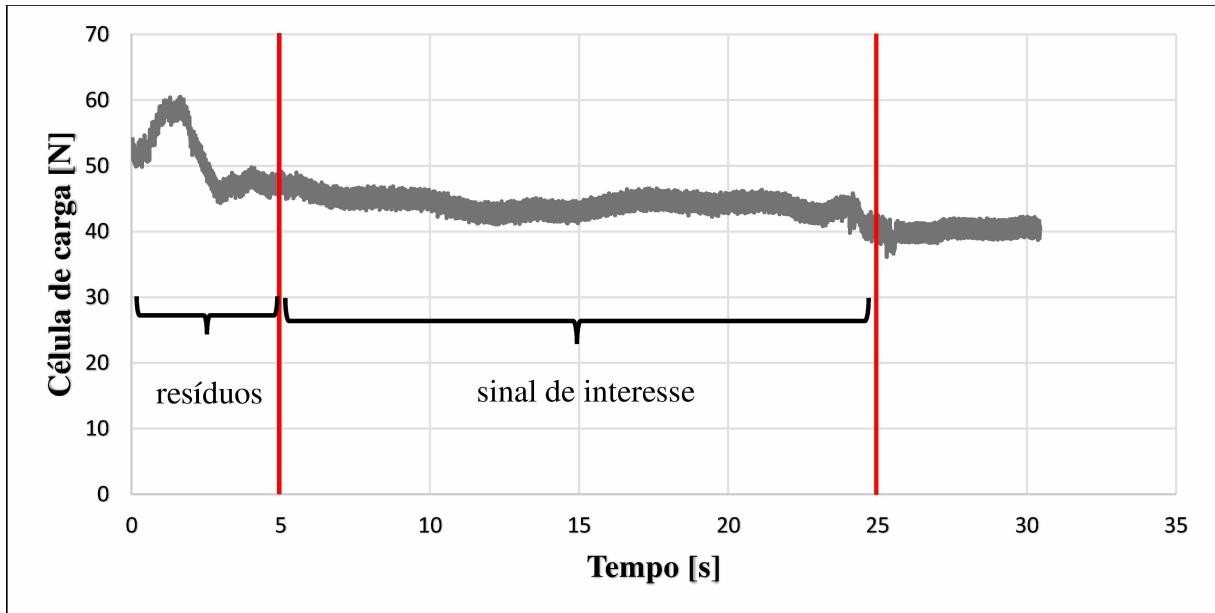


Figura 6.10 - Trecho retirado para processamento do sinal destacado entre as linhas vermelhas.

O sinal de força observado na célula de carga não foi sincronizado com imagens laterais do nadador para identificação da sua velocidade. Porém, é nítido que o sinal apresenta uma

rápida elevação quando o motor está em funcionamento. Este detalhe pode ser melhor observado na Fig. 6.11 como sinal de interesse. A Figura 6.11 mostra o sinal a partir do software da Lynx®.

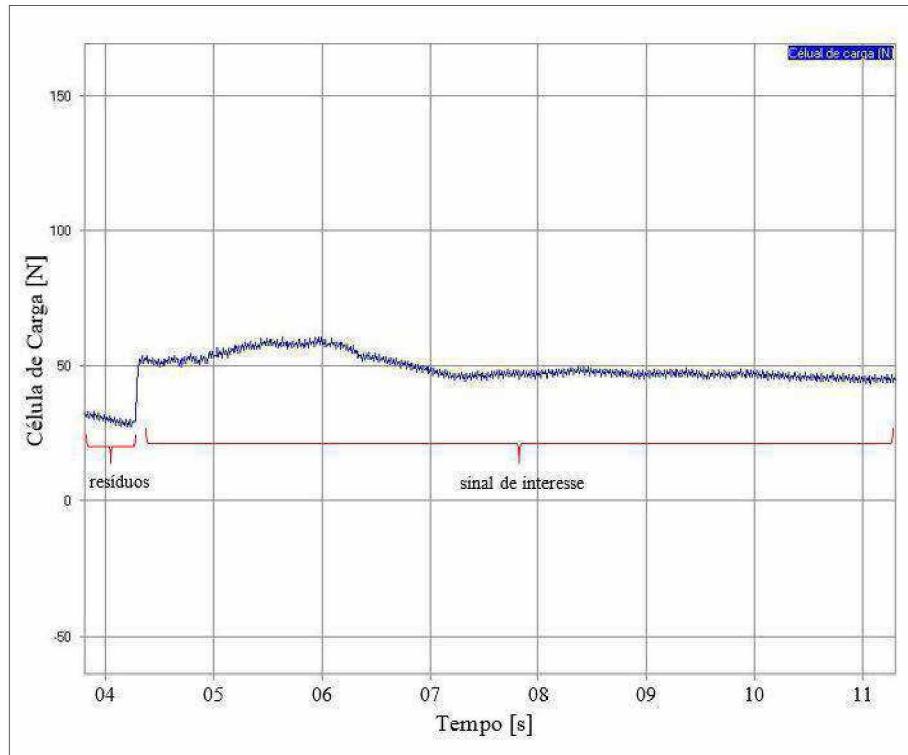


Figura 6.11 - Trecho do sinal de interesse em relação ao sinal de base dos resíduos.

A Figura 6.9 apresenta um corte do sinal original, mostrando o tempo de aquisição (30 s) de aquisição pela célula de carga em que há o funcionamento do motor. Na Figura 6.10 são identificados os resíduos e o sinal de interesse.

Os resíduos correspondem ao sinal de base da célula de carga, visto que mesmo após calibração, o sistema apresentou uma tensão residual devido seus componentes intrínsecos, como a força peso do cabo de aço, o atrito com as polias e o tambor, os quais geram força de resistência. Para reduzir este efeito ou erro no sinal efetivo da força de resistência, o valor médio das forças devido aos resíduos foi calculado e correspondia aproximadamente ao sinal coletado em torno de 5 segundos para cada coleta de 1 minuto. Essa média (Resistência dos resíduos) era subtraída do sinal de interesse da célula de carga, observando o período de funcionamento do motor.

O trecho destacado na Fig. 6.10 foi processado retirando o sinal do resíduo com o sinal processado após os 5 segundos iniciais e finais, a fim de eliminar o sinal de rampa do motor de

subida e descida em cada rotação. A rampa de subida do motor foi configurada em 5 segundos com o auxílio do inversor de frequência.

As Figuras 6.12 a 6.16 mostram os resultados obtidos para as forças de resistência passivas efetivas adquiridas pelo sistema de aquisição para as diferentes velocidades, após retirada dos resíduos, nas quatros posições analisadas, respectivamente.

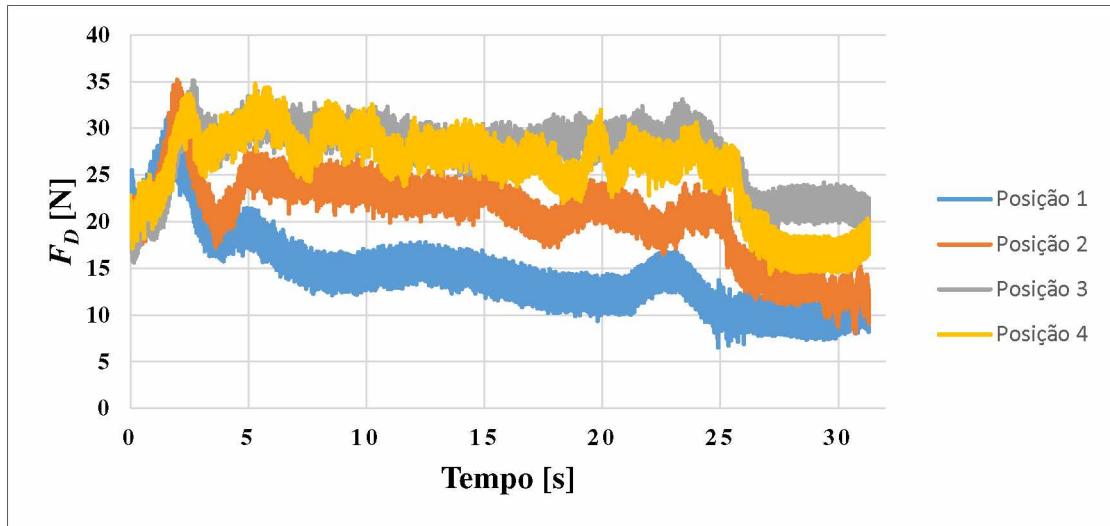


Figura 6.12 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de  $0,536 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

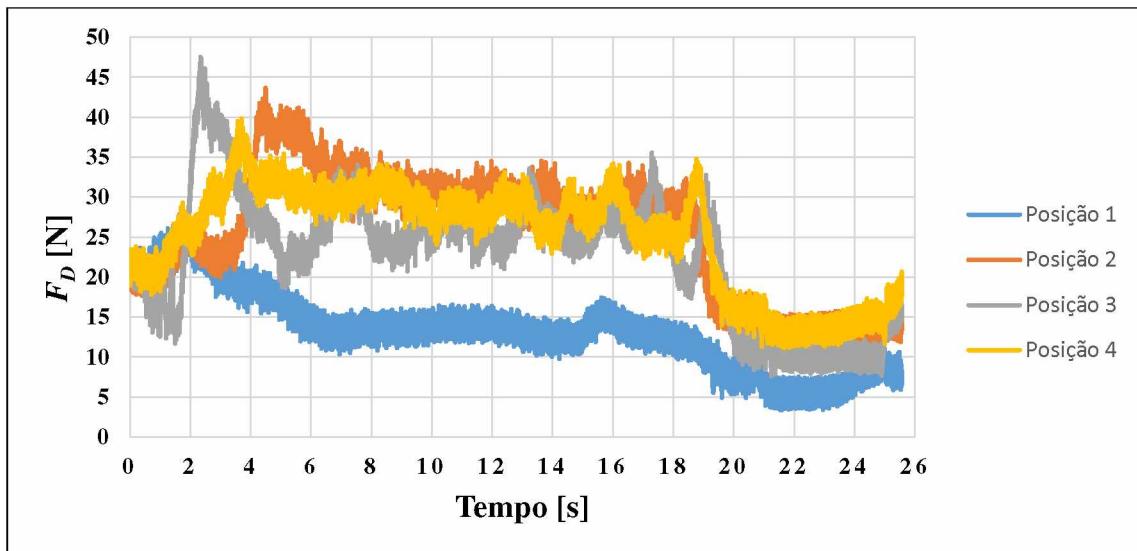


Figura 6.13 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de  $0,711 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

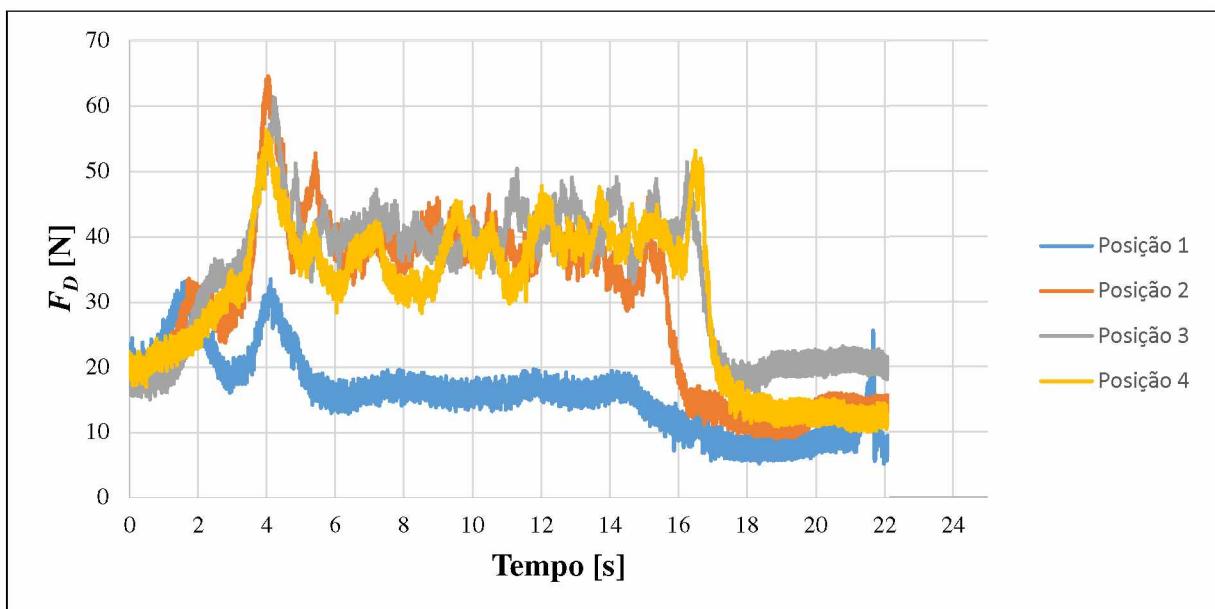


Figura 6.14 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de  $0,886 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

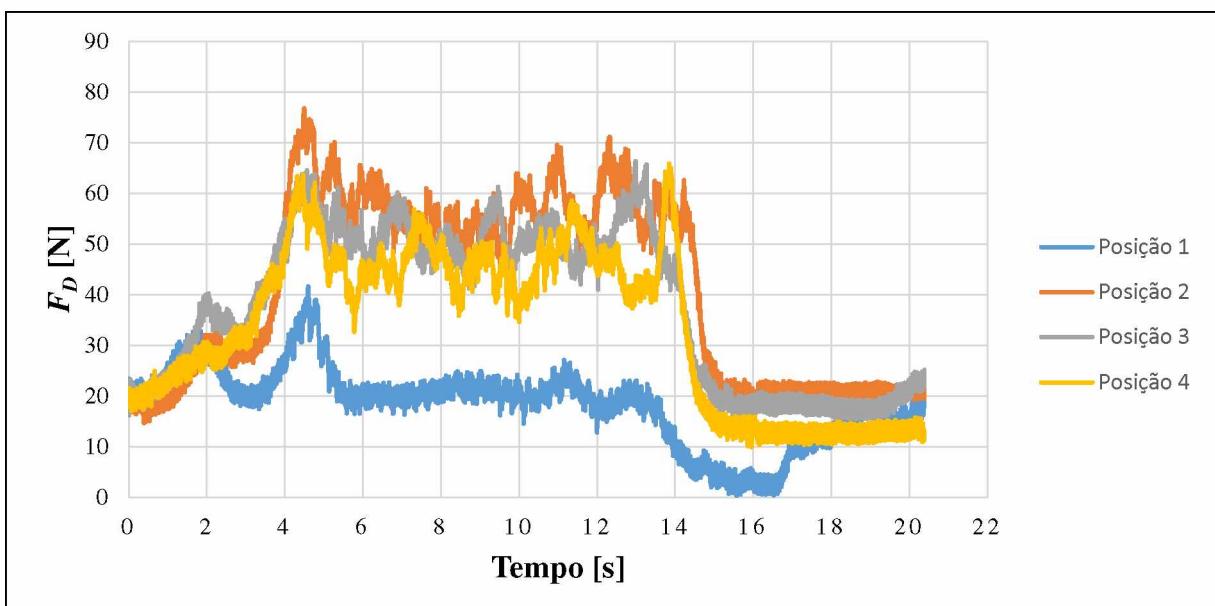


Figura 6.15 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de  $1,036 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

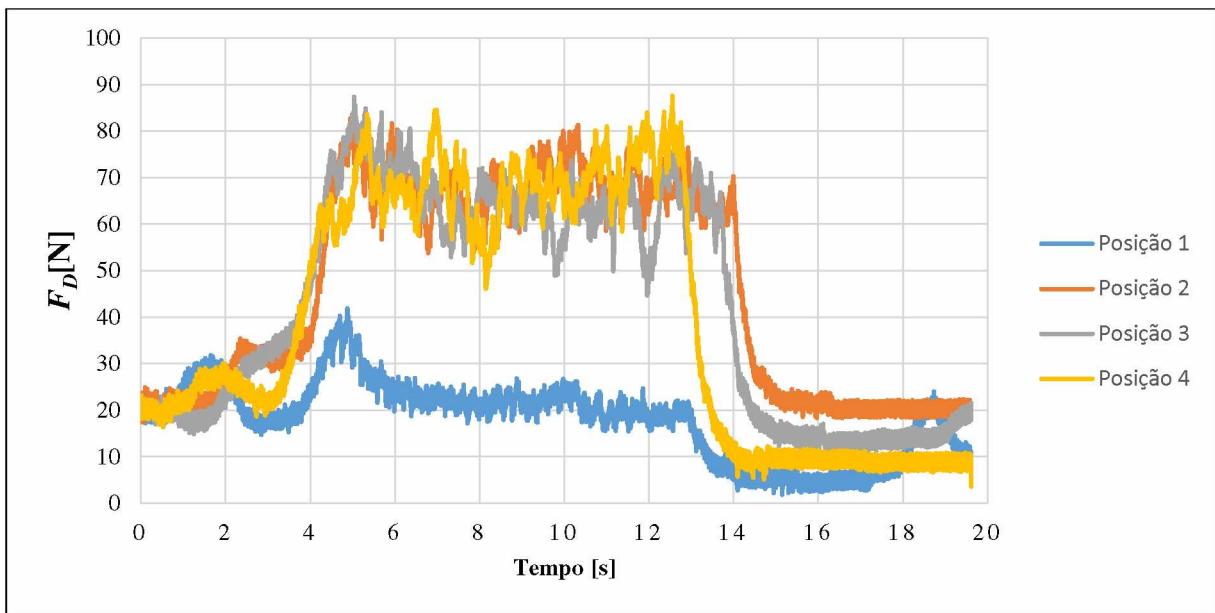


Figura 6.16 – Forças de resistência passiva para as quatro posições do nado peito, à velocidade de  $1,175 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Para as Figuras. 6.14 a 6.16, os valores de força para a posição 1 foram sempre inferiores aos das outras posições, como era de se esperar, visto que a posição 1 é a mais hidrodinâmica dentre as posições adotadas neste trabalho. As faixas de valores observadas nos gráficos correspondem a trabalhos relevantes na literatura, como Yeater e coautores (1981) e Barbosa e coautores (2012), os quais observaram o nadador no arrasto passivo. Sabendo que a força de arrasto na nadadora é duas vezes a força observada no cabo em que há o registro com a célula de carga, os valores observados estão na faixa de 0 a 130 N, dentro de faixas de valores médios observados nos trabalhos citados. À medida que a velocidade de reboque da nadadora aumenta, a força média observada no cabo também aumenta para as posições 2, 3 e 4, visto que são posições de maior complexidade de execução e manutenção da condição inicial por parte da nadadora, um grande esforço é requerido nesse intuito. Para a posição mais hidrodinâmica, posição 1, nota-se que não há uma grande variação dentre as curvas observadas para as diferentes velocidades e a variabilidade do sinal também é menor em cada gráfico.

Observa-se uma inclinação das curvas nas várias posições ao final da distância de arrasto. Este efeito, provavelmente, é devido à redução de parte do cabo de aço que era recolhido com o enrolamento no tambor.

A Figura 6.17 mostra o posicionamento real da nadadora na piscina, em cada posição selecionada para os testes considerando a modalidade do nado peito.

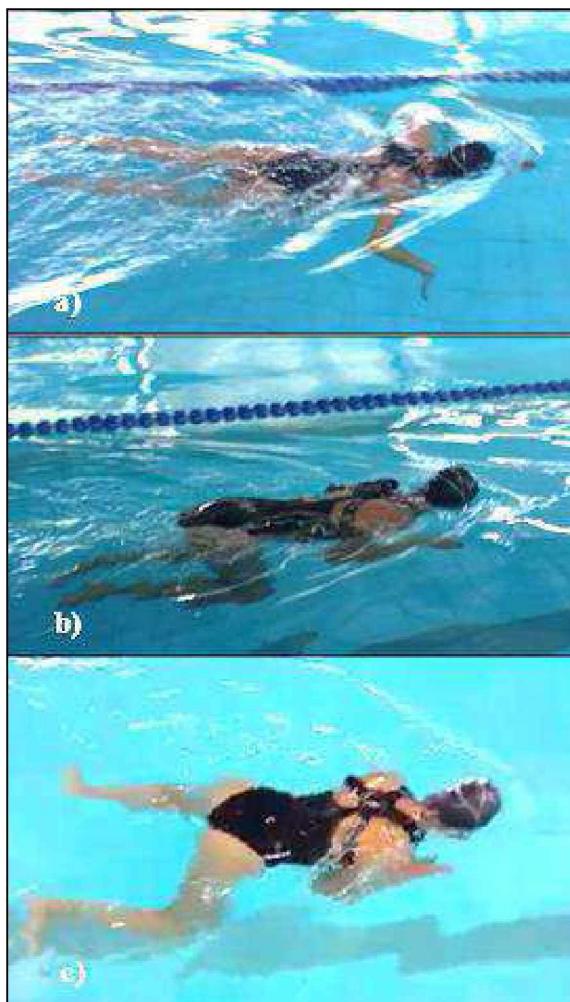


Figura 6.17 – Posicionamento real da nadadora na realização dos testes nas posições 2 (a), 3 (b) e 4 (c)

#### 6.4 Determinação das Velocidades Lineares

Considerando a modalidade de natação estilo peito, observa-se na literatura para as provas de curta distância (50 m) que as velocidades máximas são da ordem de 1,5 a 2,0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (FINA). Portanto, foram utilizados 05 níveis de rotação do motor (1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm, 3000 rpm e 3400 rpm). Estas rotações foram selecionadas em função das dimensões do tambor e sistema de redução e em função das velocidades máximas requeridas nesta modalidade de natação. Neste caso, para cada uma destas rotações, a Tab. 6.3 mostra as rotações e velocidades lineares na saída do tambor, conforme descrito no Capítulo IV.

Tabela 6.3 - Velocidades na saída do tambor e no cabo de aço

<b><math>\omega</math> (rpm) no motor</b>	<b><math>\omega</math> (rpm) no redutor</b>	<b>v tambor (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>v nadadora (m s<sup>-1</sup>)</b>
1500	100,000	1,046	0,523
2000	133,333	1,394	0,697
2500	166,667	1,744	0,872
3000	200,000	2,092	1,046
3400	226,667	2,372	1,186

Para a determinação e validação das velocidades de arrasto da nadadora, também foi efetuada uma filmagem lateral da nadadora em todas as condições de ensaio. Para isto foi utilizado o software (*kinovea*) para estimar as velocidades (v) em todos os testes. A Figura 6.18 mostra um esquema da metodologia utilizada para avaliar a velocidade de arrasto, calculada por meio do aplicativo *kinovea 8.24*, utilizado para avaliar as velocidades lineares. Os vídeos para cada velocidade foram feitos com a câmera montada lateralmente à piscina, instalada e fixada sobre um tripé.

As velocidades medidas nas filmagens são apresentadas na Tab. 6.4, as velocidades calculadas para o cabo de aço medidas a partir da rotação nominal do motor são novamente incluídas para avaliar o erro das medições. O erro (%) é relativo entre as velocidades medida e a calculada.

Tabela 6.4 - Velocidades medidas e teóricas para cada rotação do motor

<b><math>\omega</math> (rpm) no motor</b>	<b>v medida (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>v teórica (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Erro (%)</b>
1500	0,536	0,523	-2,486
2000	0,711	0,697	-2,009
2500	0,886	0,872	-1,605
3000	1,036	1,046	-0,956
3400	1,175	1,186	-0,936

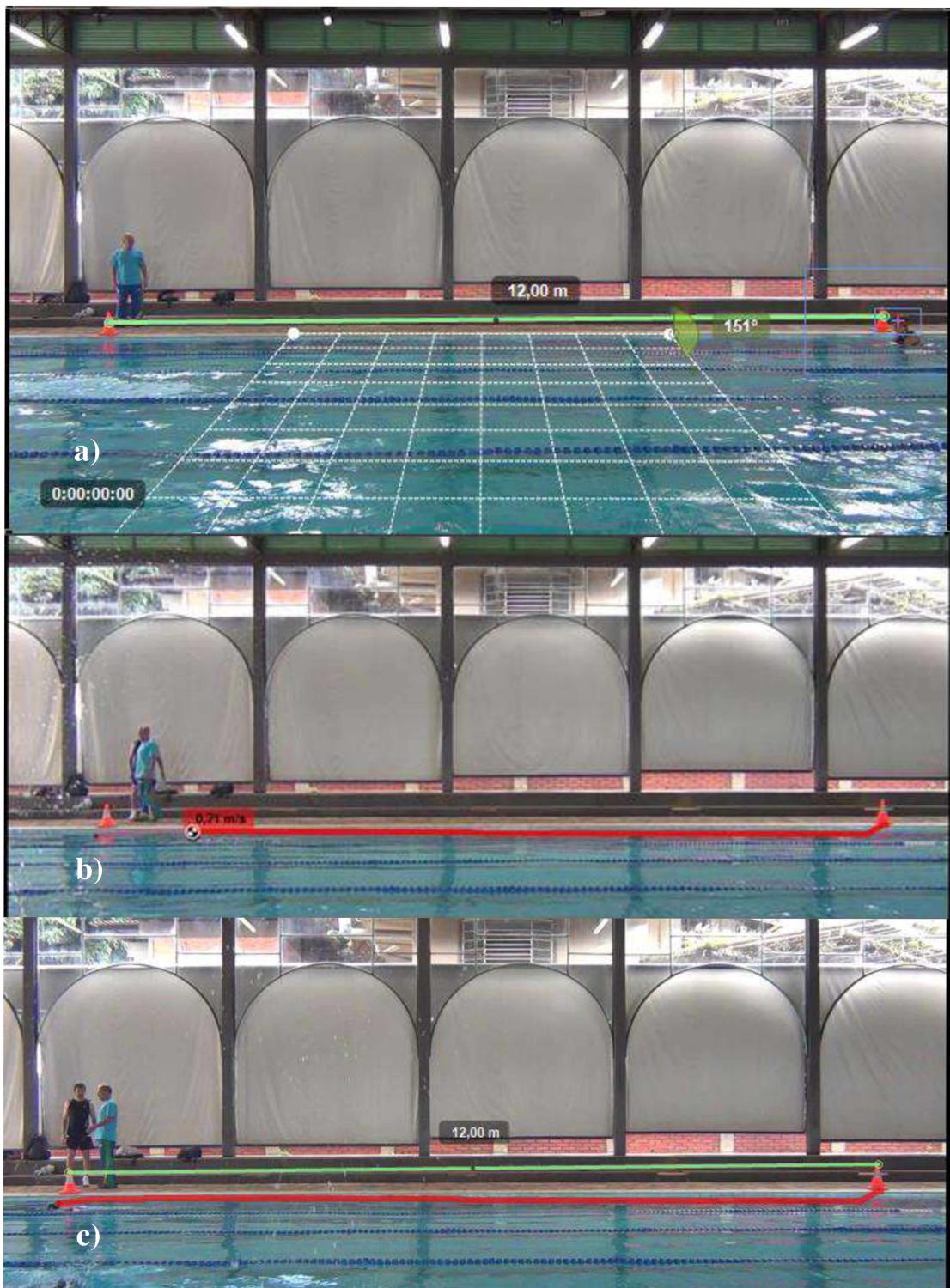


Figura 6.18 – Exemplos de frames extraídos do aplicativo *kinovea*, para a detecção das velocidades lineares. (a) frame do início do deslocamento da nadadora e medida de calibração dada entre cones; (b) momento intermediário do percurso da nadadora e (c) momento final do percurso da nadadora

A Tabela 6.5 mostra os valores médios para a força do arrasto hidrodinâmico passivo ( $D$ ) medido experimentalmente para cada uma das posições adotadas. As forças  $F_{D\text{méd}}$  ( $\bar{x} \pm \sigma$ ) correspondem às forças  $F_D$  medidas para cada uma das coletas, fazendo-se a média das três coletas para determinada velocidade de interesse.

Tabela 6.5 - Forças médias de arrasto passivo total na nadadora

<b>v (m·s<sup>-1</sup>)</b>		<b>Posição 1</b>	<b>Posição 2</b>	<b>Posição 3</b>	<b>Posição 4</b>
<b>0,536</b>	$F_{D\text{méd}}$ (N)	29,068 ± 1,594	44,247 ± 1,298	48,006 ± 0,607	50,868 ± 1,870
	$t_{\text{méd}}$ (s)	31,13 ± 0,223	31,843 ± 0,268	31,790 ± 1,021	32,470 ± 0,358
	$n_{\text{méd}}$	3116 ± 22	3187 ± 27	2108 ± 1799	3250 ± 35,791
<b>0,711</b>	$F_{D\text{méd}}$ (N)	26,542 ± 2,873	55,241 ± 1,643	51,189 ± 1,222	58,122 ± 1,962
	$t_{\text{méd}}$ (s)	26,073 ± 0,101	26,27 ± 0,603	26,380 ± 0,334	26,383 ± 0,441
	$n_{\text{méd}}$	2610 ± 10	2630 ± 60	2644 ± 38,070	2641 ± 44
<b>0,886</b>	$F_{D\text{méd}}$ (N)	31,970 ± 1,457	78,456 ± 1,580	76,940 ± 2,152	75,654 ± 1,807
	$t_{\text{méd}}$ (s)	22,43 ± 0,294	23,06 ± 0,693	23,6 ± 0,485	23,633 ± 0,607
	$n_{\text{méd}}$	2246 ± 29	2309 ± 69	2363 ± 48,538	1579 ± 34
<b>1,036</b>	$F_{D\text{méd}}$ (N)	36,684 ± 1,299	115,58 ± 1,507	103,71 ± 1,091	94,164 ± 2,262
	$t_{\text{méd}}$ (s)	21,243 ± 0,897	21,146 ± 0,175	20,783 ± 0,254	21,405 ± 0,361
	$n_{\text{méd}}$	2056 ± 57	2117 ± 17	2081 ± 25,423	2143 ± 36
<b>1,175</b>	$F_{D\text{méd}}$ (N)	35,332 ± 2,441	134,55 ± 2,227	130,01 ± 2,275	127,22 ± 1,089
	$t_{\text{méd}}$ (s)	20,923 ± 0,640	20,356 ± 0,692	20,666 ± 0,543	19,903 ± 0,415
	$n_{\text{méd}}$	2095 ± 64	1376 ± 1176	2069 ± 54,271	1993 ± 41

Onde:  $F_{D\text{méd}}$  – força média de arrasto hidrodinâmico,  $t_{\text{méd}}$  – tempo médio dos três testes para a mesma velocidade,  $n_{\text{méd}}$  – número de amostras médio dos testes para a mesma velocidade.

As rotações do motor, configuradas para cada teste a partir de um inversor de frequências, foram de 1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm, 3000 rpm e 3400 rpm. As posições, numeradas de 1 a 4 na Tab. 6.5, são correspondentes àquelas apresentadas na Fig. 6.2.

Os valores de  $F_{D\text{méd}}$  observados na Tab. 6.5 variam de 26 a 134N, aproximadamente. esses valores são correspondentes às forças necessárias para reboque da nadadora nas 4 posições. Observa-se que na posição mais hidrodinâmica, posição 1, os valores de força são notavelmente inferiores aos observados nas outras posições. À medida que a velocidade aumenta, a força necessária para puxar a nadadora aumenta, devido aos choques com a água e ao atrito. A posição 2 apresentou, de modo geral, os valores um pouco superiores para as forças, se comparado às demais posições, à medida que a velocidade aumenta, dado que esse fato se relaciona com a área da seção transversal da nadadora. Na maior velocidade observada, as

diferentes forças exigidas para se puxar a nadadora apresentaram uma maior diferença entre as posições. É interessante destacar que a posição mais hidrodinâmica se destaca como aquela em que é necessária a menor força para deslocamento da nadadora, isso indica que é uma posição que deve ser mantida por mais tempo nos períodos de deslize da nadadora.

A Figura 6.19 mostra a relação dos valores de arrasto passivo encontrado nos experimentos, a partir dos dados da Tab. 6.5 e relaciona com as velocidades lineares de arrasto aplicadas à nadadora para as diferentes posições do nado peito. As Figuras. 6.20 a 6.23 mostram as curvas de interpolação das quatro posições em função da variação da velocidade para a força de arrasto passivo ( $F_D$ ), com velocidade (v) no intervalo de 0,536 a 1,175  $m \cdot s^{-1}$ . Por meio destas equações é possível filtrar erros da análise e estimar os níveis de resistência para cada posição analisada na modalidade de natação nado peito. Observando estas resistências nota-se que as posições 2, 3 e 4 possuem resistências equivalentes e crescentes em função do aumento da velocidade linear; enquanto na posição 1, estas resistências chegam a ser cerca de 20% menores. Os valores de  $F_D$  apresentam comportamento normal das variáveis para cada posição, foi feito o teste de normalidade SW via software STATISTICA® 8.0, todas as análises foram feitas ao nível de significância de 5%. Houve diferença significativa para os valores de  $F_D$  entre as posições 1 e 2 ( $p = 0,02$ ), posições 1 e 3 ( $p = 0,01$ ) e entre as posições 1 e 4 ( $p = 0,01$ ), o teste t de student foi realizado, visto que a amostra é normal. Não houve diferença significativa dentre as posições 2, 3 e 4. Avaliando-se os valores de  $F_D$  em relação ao aumento da velocidade, para cada uma das posições, observou-se que se agrupando as forças ( $F_D$ ) por velocidade, a amostra não apresentou comportamento normal. Dessa forma, o teste não-paramétrico de Wilcoxon foi aplicado para verificar se houve diferença estatística significativa entre os valores de  $F_D$  com o aumento da velocidade, ao nível de significância de 5%. Não foi encontrada diferença significativa no aumento de  $F_D$  em relação ao aumento de velocidade. Essa hipótese poderá ser verificada, evidentemente, com o aumento da amostra, com maior quantidade de posições e indivíduos, além de aumentar também a quantidade de velocidades a serem observadas, de modo que o aumento de  $F_D$  em relação ao aumento de velocidade de deslize da nadadora possam apresentar diferença significativa.

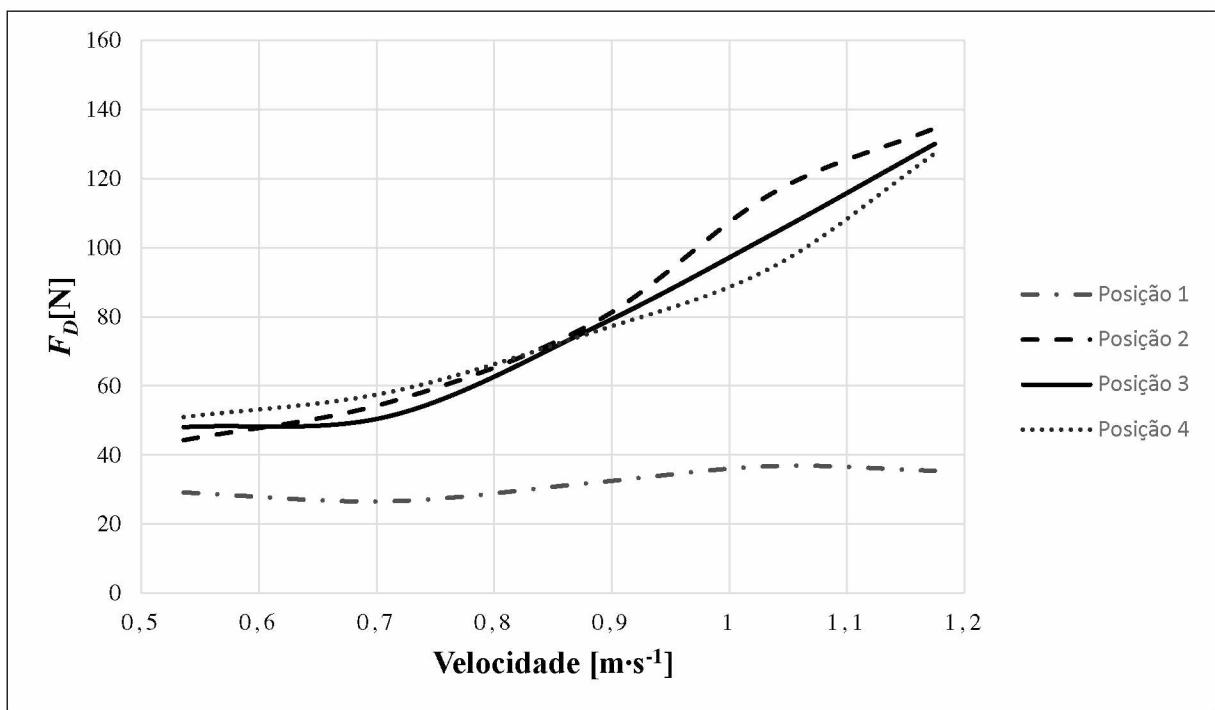


Figura 6.19 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dmed}$ ) em função da velocidade linear (v) para as 04 posições analisadas.

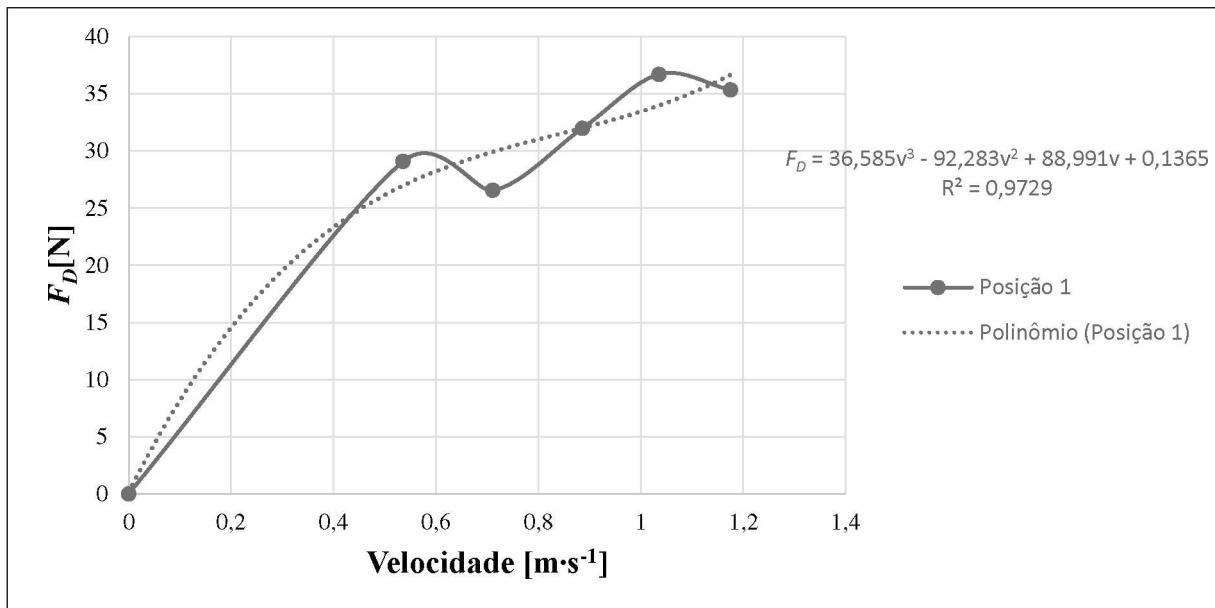


Figura 6.20 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dmed}$ ), em função da velocidade linear (v), e curva de interpolação para a posição 1

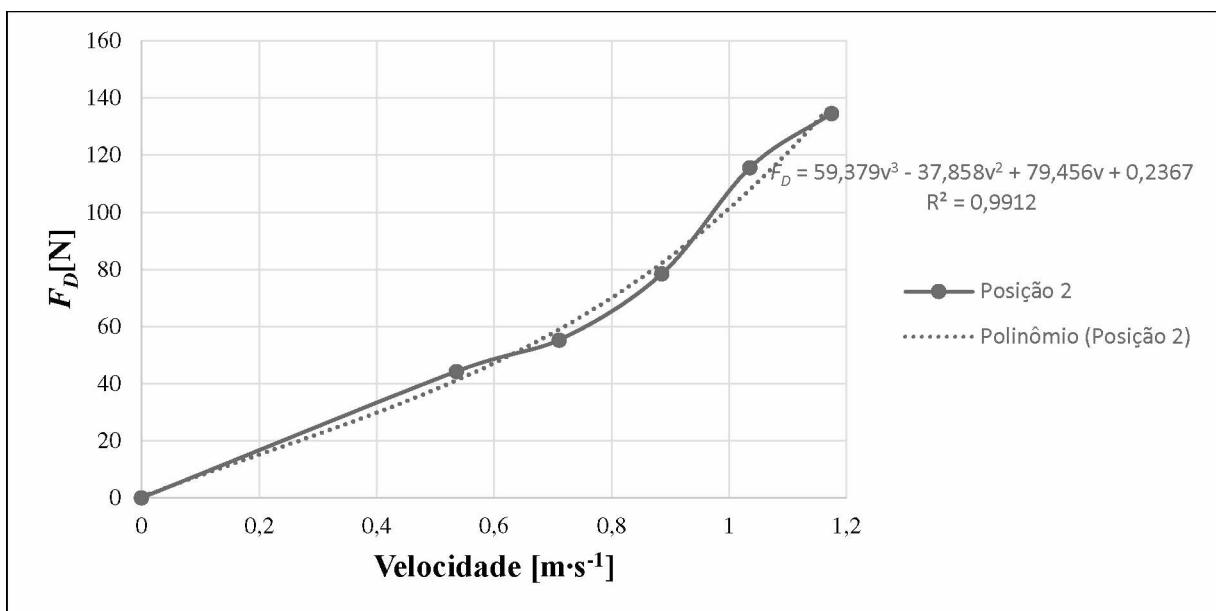


Figura 6.21 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dméd}$ ), em função da velocidade linear (v), e curva de interpolação para a posição 2

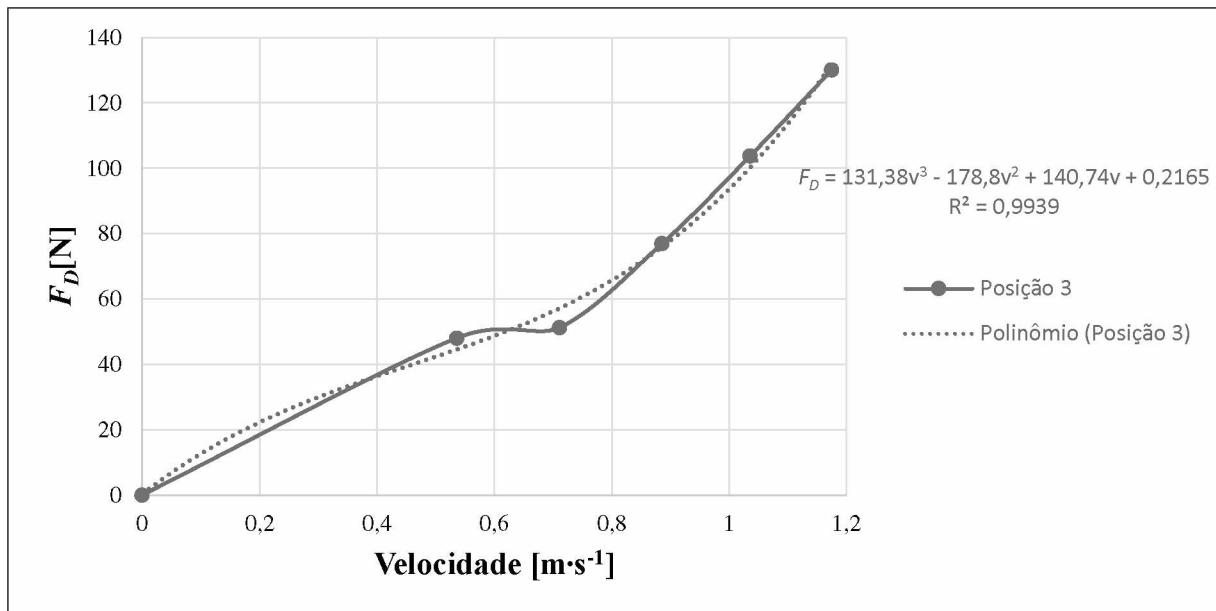


Figura 6.22 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dméd}$ ), em função da velocidade linear (v), e curva de interpolação para a posição 3

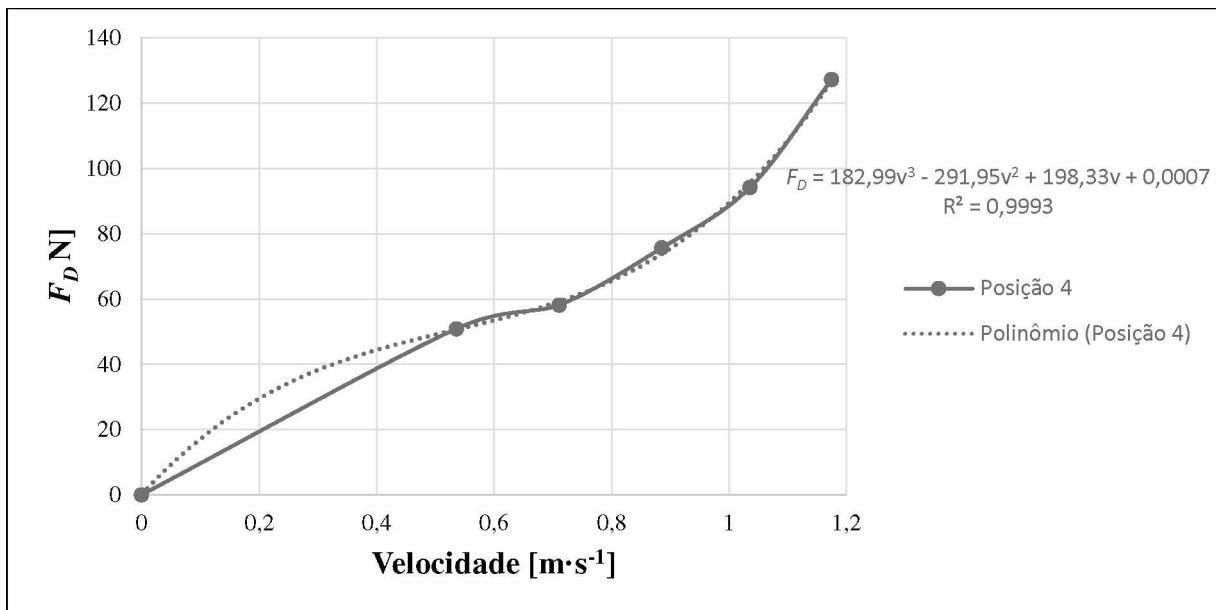


Figura 6.23 – Força de arrasto passivo ( $F_{Dm\acute{e}d}$ ), em função da velocidade linear (v), e curva de interpolação para a posição 4

A partir das equações apresentadas nas figuras anteriores, pode-se estimar a força de resistência passiva para cada posição no valor da velocidade de previsão inicial deste trabalho, de  $2,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Tab. 6.6), porém, o valor encontrado é especulativo, as condições reais podem gerar um valor diferente. A posição 1 é a mais hidrodinâmica e apresenta um valor até 85% menor de resistência do arrasto passivo se comparada às outras posições.

Tabela 6.6 –Forças de resistência passiva para cada posição à velocidade de  $2,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

v ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4
2,4	424,352	793,724	1124,302	1324,0145

## 6.5 Coeficiente de Arrasto Passivo no nado peito

A força de arrasto passivo ( $F_D$ ) foi medida utilizando um aparato experimental com célula de carga, associado ao equipamento de potência com cabo de aço. Como descrito no Capítulo IV, o coeficiente de arrasto passivo ( $C_D$ ) referente ao arrasto de forma, pode ser estimado considerando a área da seção transversal da nadadora ( $S$ ), como foi mostrado na Eq. (2.1).

O coeficiente de arrasto por contato pode ser determinado como apresenta MOLLAND (2011), através da Eq. (2.3). O coeficiente de Reynolds, por sua vez, é calculado pela Eq. (2.4).

A Tabela 6.7 mostra os coeficientes de arrasto passivo nos testes realizados com a nadadora, os quais consideram o arrasto de forma e arrasto por contato. O arrasto por contato foi calculado com os valores de  $L$  para as posições de 1 a 4 sendo 1,98, 1,68, 1,25 e 1,4 m, respectivamente. Na posição 1, o comprimento é dado da ponta dos dedos da nadadora até o calcanhar. Nas posições 2, 3 e 4 há flexão do corpo da nadadora, a flexão de quadril com ângulo de 90° é feita na posição 3, portanto, é a posição com menor  $L$ .

Tabela 6.7 - Valores do coeficiente de arrasto e da contribuição de forma e contato para cada velocidade em quatro posições de deslize

<b><math>\omega</math> no motor</b>	<b>v água</b>	<b>Posição 1</b>		<b>Posição 2</b>		<b>Posição 3</b>		<b>Posição 4</b>	
<b>(rpm)</b>	<b>(m·s<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>C_D</math></b>	<b><math>C_{Df}</math></b>	<b><math>C_D</math></b>	<b><math>C_{Df}</math></b>	<b><math>C_D</math></b>	<b><math>C_{Df}</math></b>	<b><math>C_D</math></b>	<b><math>C_{Df}</math></b>
<b>1500</b>	0,536	3,624	0,071	2,809	0,082	3,604	0,110	4,036	0,098
<b>2000</b>	0,711	1,881	0,057	1,993	0,064	2,184	0,083	2,621	0,075
<b>2500</b>	0,886	1,459	0,048	1,823	0,054	2,114	0,069	2,197	0,063
<b>3000</b>	1,036	1,224	0,044	1,964	0,049	2,084	0,061	2,000	0,056
<b>3400</b>	1,175	0,917	0,040	1,777	0,045	2,031	0,055	2,101	0,051

$C_D$ : coeficiente de arrasto total e  $C_{Df}$ : coeficiente de arrasto de contato.

Na natação humana, o arrasto total é composto pelo arrasto de contato, de forma e de onda. Como foi discutido anteriormente, o arrasto de contato é atribuído a forças que tendem a reduzir o fluxo de água que passa pela superfície do corpo do nadador, o que depende da velocidade do fluxo, da área da superfície do corpo e das características da superfície. O arrasto de forma é causado pelo diferencial de pressão entre as partes do corpo do nadador durante o trajeto e é inversamente proporcional ao quadrado da velocidade de nado, da massa específica da água e da área da seção transversal do nadador. O arrasto de onda não foi considerado, visto que este se refere à formação de ondas na superfície da água com o avanço do nadador, por adotarmos posições em que o corpo da nadadora está todo submerso, sem que haja interface de fluidos água-ar.

No método analítico, seguindo o estudo de Barbosa (2015), para cálculo do arrasto passivo devido ao contato, a área da superfície corporal em contato com a água deve ser medida e utilizada nos cálculos. Esta pode ser determinada pela fórmula de Du Bois, Eq. (2.6), como mostra (CARPERSEN *et al.*, 2010).

A área da superfície em contato com a água ( $A_{superfície}$ ) não se altera em relação às posições adotadas pela nadadora, visto que seu corpo está completamente imerso na execução de todas as quatro posições adotadas neste estudo. A massa corporal da nadadora foi medida com uma balança digital de alta resolução (InBody® 230) do Laboratório de Biomecânica da FAEFI – UFU, a estatura foi medida no mesmo laboratório, em posição ortostática, por meio de um estadiômetro de parede. As medidas de envergadura, cintura, quadril, cabeça e tamanho nas posições de nado foram feitas com o auxílio de uma trena com resolução de 1 mm.

Para cálculo do arrasto de contato ( $F_{DC}$ ), utiliza-se o seguinte,

$$F_{DC} = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{superfície} \cdot C_{Df} \quad (6.5)$$

A Tabela 6.8 mostra os valores de  $F_{DC}$  calculados para a nadadora nos testes realizados para a modalidade de natação peito. A Figura 6.24 mostra uma comparação gráfica para os valores de  $F_{DC}$  para as quatro posições analisadas no estudo.

Nota-se que os valores do arrasto passivo estão intimamente relacionados com a posição adotada no nado, pois isso afetará expressivamente o coeficiente de arrasto de contato -  $C_{Df}$ . Na posição 3, a nadadora se encontra com os joelhos flexionados, aproximando-se com ângulo de 90° com o quadril, portanto, nesta posição, o comprimento de seu corpo é diminuído e faz com que os valores de  $C_{Df}$  sejam os maiores dentre as posições analisadas, por conseguinte, gerando os maiores valores de  $F_{DC}$ . A posição 1, em contrapartida, apresentou os menores valores de  $C_{Df}$ , considerando que a nadadora tem os braços estendidos à sua frente, adotando a posição mais hidrodinâmica dentre as analisadas, refletindo em menor arrasto passivo de contato ( $F_{DC}$ ).

Tabela 6.8 - Valores do arrasto passivo de contato para cada velocidade em quatro posições de deslize (H = Pos1: 1,980 m, Pos2: 1,685 m, Pos3: 1,250 m, Pos4: 1,400 m BM = 58,500 kg, A\_superfície = 1,641 m)

	$F_{DC}$ [N]			
$v$ água (m·s <sup>-1</sup> )	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4
<b>0,536</b>	16,756	19,303	25,839	23,015
<b>0,711</b>	23,520	26,676	34,467	31,151
<b>0,886</b>	31,128	34,954	44,175	40,288
<b>1,036</b>	38,267	42,707	53,247	48,830
<b>1,175</b>	45,365	50,400	62,225	57,291

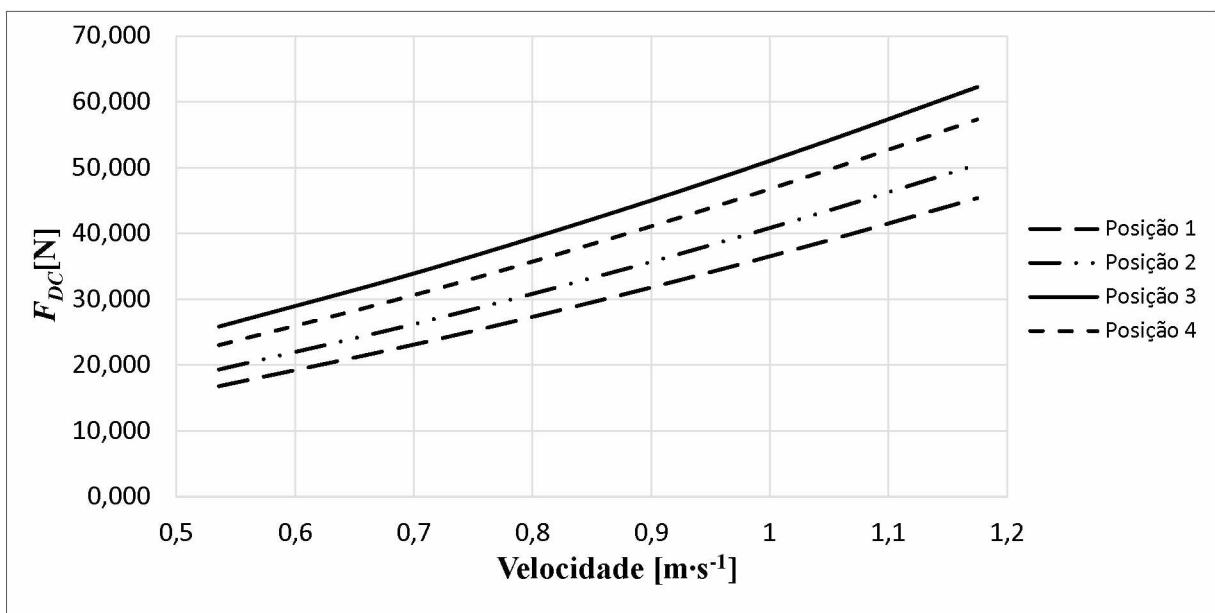


Figura 6.24 - Determinação do arrasto passivo analítico de contato ( $F_{DC}$ ) por posições, de acordo com a velocidade de deslize / reboque da nadadora.

O teste SW de normalidade revelou que os valores de  $F_{DC}$  correspondem a distribuições normais para cada posição, ao nível de significância de 5%. O p-valor para cada posição deveria ser superior a 0,05 e a estatística SW superior a 0,762, visto que esse é o valor crítico para uma amostra com 5 dados (tabelado), para cada posição. Os resultados foram obtidos com o uso do software STATISTICA® 8.0. Os resultados foram: posição 1 – SW = 0,981 (p = 0,942); posição 2 – SW = 0,981 (p = 0,941); posição 3 – SW = 0,980 (p = 0,938) e posição 4 – SW = 0,981 (p = 0,940). Verificando-se o comportamento das posições para o mesmo indivíduo, o teste t-student para dados amostrais mostrou que não há diferença significativa ( $p >> 0,05$ ) entre os valores de  $F_{DC}$  para as posições 1 e 2, posições 1 e 3 e posições 1 e 4. Entre as posições 2 e 3, 2 e 4 também não houve diferença significativa ( $p >> 0,05$ ) para os níveis de  $F_{DC}$ . Ao nível de significância de 5%, houve diferença significativa entre as posições 3 e 4 ( $p = 0,04$ ).

A partir dos valores observados na Tab. 6.7 é perceptível que para baixas velocidades, como  $0,536 m \cdot s^{-1}$ ,  $0,711 m \cdot s^{-1}$  e  $0,886 m \cdot s^{-1}$ , os valores de  $C_D$  são maiores ( $C_D >> 1,0$ ). Para velocidades superiores, como  $1,036 m \cdot s^{-1}$  e  $1,175 m \cdot s^{-1}$  os valores de  $C_D$  decaem

Os valores de  $C_D$  decrescem à medida que a velocidade da nadadora aumenta, o que era de se esperar, visto que o aumento da velocidade de nado permite que o nadador rompa a força de resistência / arrasto passivo mais facilmente. Os valores de  $C_D$  não apresentaram comportamento normal, segundo o teste SW, por meio do software STATISTICA® 8.0. Dentre

as posições 2, 3 e 2 e 4, houve diferença significativa entre os valores de  $C_D$  ( $p = 0,04$  para ambos), o que não ocorreu entre as posições 3 e 4. Para a relação entre posições 1 e 3, e posições 1 e 4, o valor de  $C_D$  apresentou-se significativamente inferior ( $p = 0,04$  para ambos) ao nível de significância de 5%, com uso teste não-paramétrico Wilcoxon Matched-pairs.

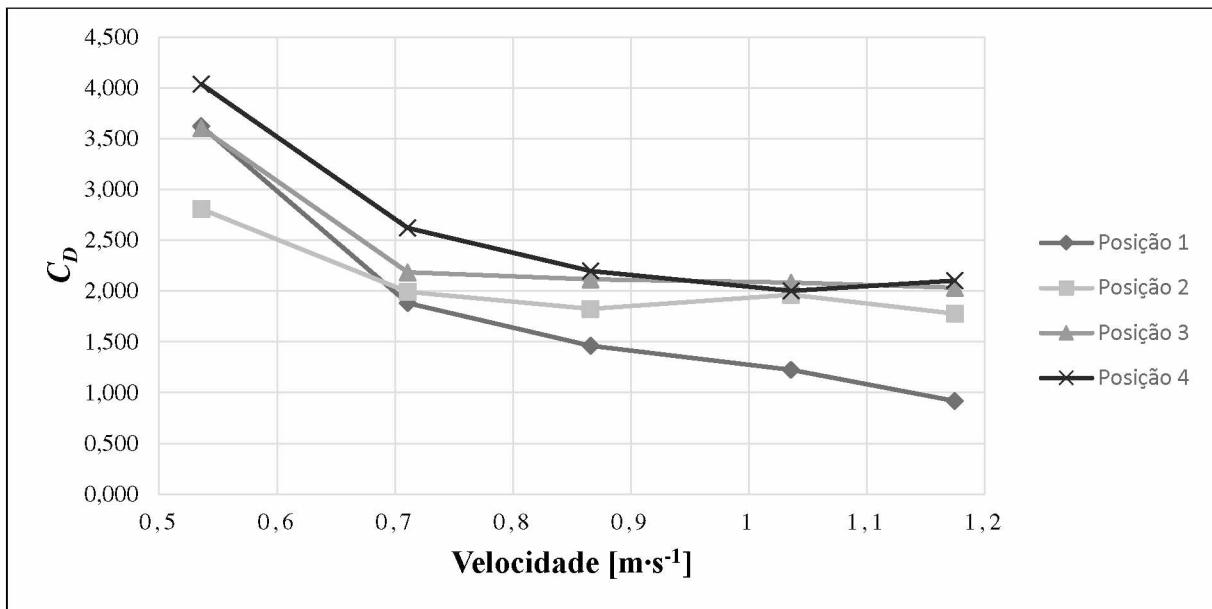


Figura 6.25 – Relação entre o coeficiente de arrasto passivo total e a velocidade para as quatro diferentes posições de deslize.

A Figura 6.25 evidencia graficamente essas características observadas nos valores de  $C_D$ .

A Figura 6.26 apresenta graficamente os valores de  $C_{Df}$  descritos na Tab. 6.7 e estimados por método analítico. Neste caso, observa-se uma relação decrescente do coeficiente de arrasto passivo de contato com o aumento da velocidade. Como foi destacado anteriormente, devido a adoção da posição mais longilínea (hidrodinâmica, portanto) na posição de número 1, foram observados os menores valores do coeficiente de arrasto passivo de contato. Para a posição com maior flexão dos membros, posição 3, o  $C_{Df}$  se apresentou relativamente superior. Pode-se observar ainda que à medida que a velocidade da nadadora aumenta, o  $C_{Df}$  estimado diminui, o que era de se esperar, visto que o aumento da velocidade no nado reflete em maior facilidade no rompimento da ação da força de resistência contra o sentido de movimento do corpo (força de arrasto).

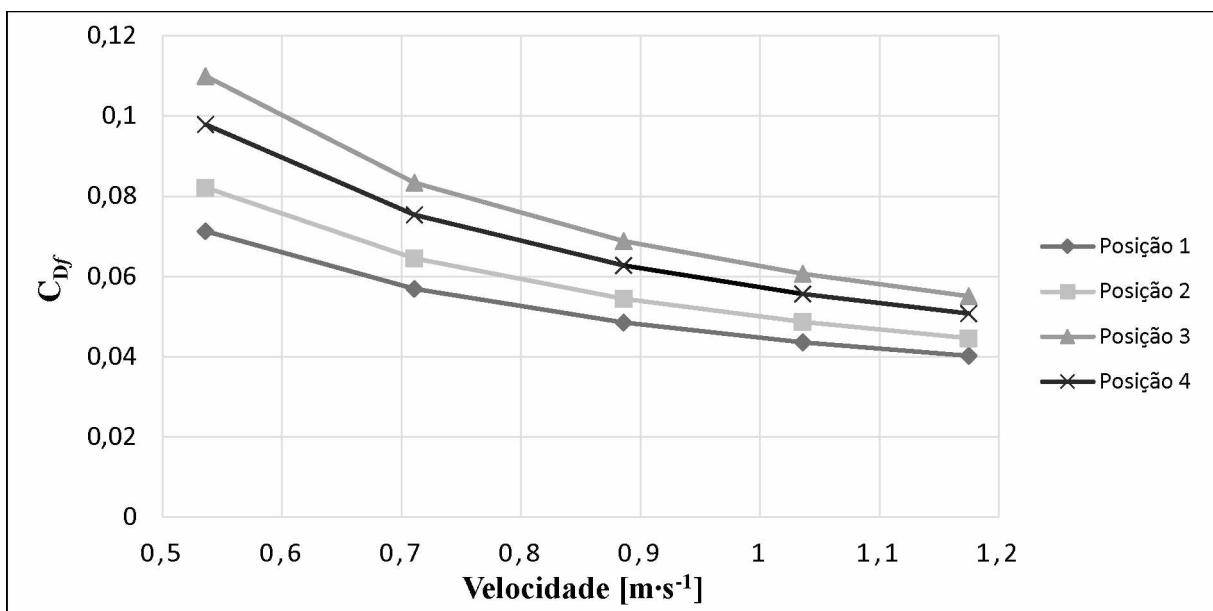


Figura 6.26 – Relação entre o coeficiente de arrasto de contato calculado e a velocidade para as quatro diferentes posições de deslize.

Através dos resultados obtidos nas análises deste trabalho é possível avaliar os níveis de resistência máximos para a modalidade nado de peito considerando as quatro posições estudadas. Estas resistências foram avaliadas em função da velocidade de arrasto simulando uma condição contrária, ou seja, no efetivo gesto motor de natação estilo peito. Observou-se que a posição 2 é uma posição crítica em termos de resistência com forças da ordem de 140 N para uma velocidade de  $1,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e que podem ser o dobro para velocidades de  $2,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , como previsto inicialmente como condição de velocidade máxima. Porém, deve-se destacar que estas análises foram obtidas em uma condição passiva, ou seja, o arrasto feito de forma direta para uma posição estática. Em uma condição dinâmica estes valores devem ser inferiores às medidas passivas, por causa da inversão de movimentos nos vários ciclos modificando as áreas resistivas e consequente redução do atrito.

No entanto, esta informação é relevante para o projeto de um ergômetro para natação, ou seja, indicam faixas de valores mínimo e máximo de resistência em uma condição passiva e, que servem, para estabelecer os níveis experimentais no projeto de um equipamento que respeite o gesto motor efetivo da natação em seu ambiente. Utilizando-se um ergômetro é possível comparar os resultados da natação em sua condição dinâmica com os resultados apresentados neste trabalho.

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um equipamento para arrastar um nadador na piscina em uma condição passiva representativa de um gesto motor específico de uma determinada modalidade de natação. Através da instrumentação e da metodologia desenvolvida foi possível avaliar a força de resistência do arrasto passivo em diferentes posições do nado peito.

As posições adotadas atuaram como fonte de modificação da eficiência do deslize da nadadora, devido suas características resistivas e iniciais. Dentre as diversas posições exercidas no nado peito, quatro foram selecionadas por se distinguirem em relação à área frontal do corpo do nadador e por abrangerem uma maior expansão de movimentos. Das análises realizadas observou-se que:

- Com o desenvolvimento do equipamento para arrasto da nadadora, foi possível, através da implementação da metodologia descrita, gerar resultados relevantes para a observação das forças de arrasto passivo na natação, assim como observar a importância da área da seção transversal do tronco da nadadora quando no movimento aquático. Esse foi um primeiro passo para compreender os níveis de força e as variáveis relevantes na performance de um nadador profissional. Com os dados encontrados, foi possível se ter uma noção das relações entre as variáveis e dar um passo inicial no projeto de um novo ergômetro para a natação.

- A posição 1 foi a condição de melhor hidrodinâmica. Essa posição apresentou-se significativamente inferior comparada às posições 3 e 4 ( $p = 0,04$  para ambos), quando analisadas pelo valor de  $C_D$ .

- Uma maior área da seção transversal do tronco da nadadora foi observada na posição 2, quando o nadador deve estender seus braços lateralmente, seguida da posição 3 e posição 4,

respectivamente. Na posição 3, o quadril está mais flexionado do que na posição 4 e abrange uma área maior. A posição 1 é a mais hidrodinâmica, com o corpo do nadador todo estendido, dessa forma apresenta a menor área da seção transversal no nado peito.

- A força média de resistência passiva aumenta com o aumento da velocidade para as posições 2, 3 e 4, visto que são posições de maior complexidade de execução e manutenção da condição inicial por parte da nadadora, porém, esse aumento não é significativo nessa amostra. Para a posição mais hidrodinâmica, posição 1, nota-se que não há uma grande variação dentre as curvas observadas para as diferentes velocidades e a variabilidade do sinal também é menor para cada percurso separadamente. Houve diferença significativa para os valores de  $F_D$  entre as posições 1 e 2 ( $p = 0,02$ ), posições 1 e 3 ( $p = 0,01$ ) e entre as posições 1 e 4 ( $p = 0,01$ ), o teste t de student foi realizado, visto que a amostra é normal.

- Os valores experimentais de força de resistência passiva encontrados para a nadadora nas 04 posições variaram de 26 a 134 N. Observou-se que na posição mais hidrodinâmica, posição 1, os valores de força são bastante inferiores aos observados nas outras posições.

- Na maior velocidade observada, as diferentes forças exigidas para se puxar a nadadora apresentaram clara diferença entre as posições. É interessante destacar que a posição mais hidrodinâmica se destaca como aquela em que é necessária a menor força para deslocamento da nadadora, isso indica que é uma posição que deve ser mantida por mais tempo nos períodos de deslize da nadadora.

O presente trabalho buscou apresentar soluções para o estudo de forças de resistência passiva na natação, mostrando metodologias que avaliassem variáveis de interesse, como a força de arrasto passivo, o coeficiente de arrasto passivo e a área da seção transversal do tronco do nadador, as quais são decisivas no treinamento e desempenho de um atleta. No entanto, este trabalho compreende parte de um projeto que busca o desenvolvimento de um ergômetro para a natação e, dessa forma, este trabalho deve ser continuado.

## **7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Para continuidade deste trabalho sugerem-se para trabalhos futuros:

- Estender este estudo para todas as modalidades de natação. O estudo completo deve contemplar voluntários masculinos e femininos, com amostra mínima que represente o total de atletas na natação. O estudo do arrasto ativo é complementar ao estudo do arrasto passivo, para tanto, a metodologia deste trabalho deverá ser adaptada e o estudo do arrasto ativo

deverá ser realizado, pois é necessário para o desenvolvimento de um ergômetro para a natação.

- Implementar este estudo para nadadores paralímpicos.
- Otimizar o equipamento de arrasto para faixas mais amplas de velocidade e reduzir a influência do peso do cabo de aço;
- Desenvolver modelos matemático-computacionais para validar os níveis de força de resistência nas diversas modalidades de natação;
- Projetar, fabricar e testar um novo ergômetro para natação que respeite os gestos motores efetivos das diversas modalidades de natação.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AKIS, T.; ORCAN, Y. Experimental and analytical investigation of the mechanics of crawl stroke swimming. **Mechanics Research Communications**, v. 31, p. 243-261, 2004.
- BADILLO, J. G.; AYESTARÁN, E. G. **Fundamentos do Treinamento de Força: aplicação ao alto rendimento desportivo**. 2<sup>a</sup> ed., Artmed, 2001. 284 p.
- BARBOSA, A. C.; ANDRADE, R. M.; MOREIRA, A.; SERRÃO, J. C.; JÚNIOR, O. A. Reprodutibilidade da curva força-tempo do estilo “Crawl” em protocolo de curta duração. **Revista Brasileira de Educação Física**, v.26, p.37-45, 2012.
- BARBOSA, T. M.; COSTA, M. J.; MORAIS, J. E.; MOROUÇO, P.; MOREIRA, M.; GARRIDO, N. D.; MARINHO, D. A. e SILVA, A. J. Characterization of speed fluctuation and drag force in young swimmers: a gender comparison. **Human Movement Science**, v. 32, p. 1214–1225 doi: 10.1016/j.humov.2012.07. 2013.
- BARBOSA, T. M.; MORAIS, J. E.; MARQUES, M. C.; SILVA, A. J.; MARINHO, D. A.; KEE, Y. H. Hydrodynamic profile of young swimmers: changes over a competitive season. **The Scandinavian Physiological Society**. doi: 10.1111/sms. 12281. 2014.
- BARBOSA, T. M.; MORAIS, J. E.; FORTE, P.; NEIVA, H.; GARRIDO, N. D.; MARINHO, D. A Comparison of Experimental and Analytical Procedures to Measure Passive Drag in Human Swimming. **PLOS ONE**, doi:10.1371/journal.pone.0130868. July 24, 2015.
- BARROS, R. M. L. Biomecânica da natação: considerações sobre a seleção de modelos. **Revista Mackenzie de Educação Física e Esporte 9 (1 suplemento 1)**, p. 60-63, 2010.
- BELLOCH, S. P. A análise biomecânica em natação. Faculdade de Ciências da Atividade Física e o Esporte. Universitat de Valencia, 2006. Disponível em <

[http://www.notinat.com.es/docs/analisis\\_biomecanico\\_en\\_natacion.pdf](http://www.notinat.com.es/docs/analisis_biomecanico_en_natacion.pdf) >, traduzido por Leonardo Delgado.

BOTELHO, A. **Resistência hidrodinâmica activa ao longo de uma época de treino em nadadores de Alto Rendimento e carga de treino.** Universidade Técnica de Lisboa – Lisboa, 2004. Dissertação 90 p.

BROWN, R. M., COUNSILMAN, J. E. The role of lift in propelling swimmers. In J.M. Cooper, (Ed.), **Biomechanics**, p.179-188. Chicago, Illinois: Athletic Institute. 1971.

CAPUTO, F.; OLIVEIRA, M. F. M.; DENADAI, B. S.; GRECO, C. C. Fatores intrínsecos do custo energético da locomoção durante a natação. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v. 12, n. 6, p. 399-404. 2006.

CASPERSEN, C.; BERTHELSEN, P. A.; EIK, M.; PAKOZDI, C.; e KJENDLIE, P. L. Added mass in human swimmers: Age and gender differences. **Journal of Biomechanics**, v. 43, p. 2369–2373, 2010.

CARROLL, T. J.; RIEK, S.; CARLSON, R. G. Neural adaptations to resistance training: implications for movement control. **Sports Medicine**. Califórnia, v. 31, n. 12, p. 829-840, 2001.

CASTRO, F. A. S. **Determinantes do desempenho para a prova de 200 m nado livre.** 153f. Porto Alegre, 2007. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CAVAGNA, G. A.; KANEKO, M. Mechanical work and efficiency in level walking and running. **The Journal of Physiology**, v. 268, p. 467–481, 1977.

CHATARD, J. C. e WILSON, B. D. Drafting Distance in Swimming. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 35, p. 1176-81, 2003.

COHEN, R. C. Z.; CLEARY, P. W. e MASON, B. R. Simulation of dolphin kick swimming using smoothed particle hydrodynamics. **Human Movement Science**, v. 31, p. 604–619, 2012.

COLWIN, C. Swimming into the 21<sup>st</sup> century. **Human Kinetics Publishers**, Champaign, Illinois, USA. 1992.

CORTESI, M. e GATTA, G. Effect of The Swimmer's Head Position on Passive Drag. **Journal of Human Kinetics**, v. 49, p. 37-45, 2015.

- COSTILL, D.; MAGLISCHO, E.; RICHARDSON, A. **Swimming**. Blackwell Scientific Publications. Oxford, England, 1992. 200 p.
- CLARYS J. P. Human morphology and hydrodynamics. In, Terauds J, Bedingfield EW (editors). **Swimming III**. Baltimore: University Park Press, p. 3-41; 1979.
- DOPSAJ, M.; MATKOVIC, I.; ZDRAVKOVIC, I. The relationship between 50m – freestyle results and characteristics of tethered forces in male sprint swimmers: A new approach to tethered swimming test. **Physical Education and Sport**, v. 1, n. 7, p. 15 – 22, 2000.
- FAULKNER, J. A. Physiology of swimming and diving. In: Falls H. **Exercise physiology**. Baltimore. Academic Press, p.415-446, 1968.
- FÉDIAEVSKI, C.; VOITKOUNSKI, I. e FADDÉEV, Y. **Mecânica dos fluidos**. Lopes da Silva, Porto, 1979.
- FERNANDES, H. **Os quatro estilos de nado**. 2011. Disponível em <<http://www.cdoe.com.br/>>.
- FIGUEIREDO, P.; ZAMPARO, P.; SOUSA, A.; VILAS-BOAS, J. P.; FERNANDES, R. J. An energy balance of the 200 m front crawl race. **European Journal of Applied Physiology**, v. 111, p. 767–777, 2011.
- FISIOLOGIA DO EXERCÍCIO. – Brasília: Fundação Vale, UNESCO, 2013.74 p. – (**Cadernos de referência de esporte; 2**). ISBN: 978-85-7652-156-3
- GATTA, G., ZAMPARO, P. e CORTESI, M. Effect of swim-cap model on passive drag. **The Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 27, p. 2904–2908, 2013.
- GATTA, G.; CORTESI, M.; FANTOZZI, S.; ZAMPARO, P. Planimetric frontal area in the four swimming strokes: Implications for drag, energetics and speed. **Human Movement Science**, v. 39, p. 41–54, 2015.
- HARRISON, A. J.; KEANE, S. P.; COGLAN, J. Force-velocity relationship and stretch--shortening cycle function in sprint and endurance athletes. **The Journal of Strength & Conditioning Research**, v. 18, n. 3, p. 473-479, Aug. 2004.

- HAVRILUK, R. Variability in measurements of swimming forces: a metanalysis of passive and active drag. **Research Quarterly for Exercise and Sport**, v. 78, p. 32–39, 2007.
- HAZRATI, P.; MASON, B.; SINCLAIR, P. J. Reliability of estimating active drag using the assisted towing method (atm) with fluctuating velocity. **Sports Biomechanics**, v. 15, p. 283-94, 2016.
- HOLLANDER, P.; DE GROOT, G.; VAN INGEN SCHENAU, G.; TOUSSAINT, H. B.; DE BEST, W.; PEETERS, W.; MEULEMANS, A.; SCHREURS, W. Measurement of active drag during crawl stroke swimming. **Journal of Sports Science**, v. 4, p. 21-30, 1986.
- HOLMÉR, I. Oxygen uptake during swimming in man. **Journal of Applied Physiology**, v. 33, p. 502–509, 1972.
- JONES, S.M.; PASSFIELD, L. The dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. In: The Engineering of Sport, edited by Haake SJ. **Oxford: Blackwell Science**, p. 265–274, 1998.
- JUNIOR, J. M. S.; DIAS, J.; NOGUEIRA, M. D. G. R.; MANSOLDO, A. C. Revendo os fatores que afetam à propulsão durante o nado. **EFD deportes.com, Revista Digital**. Buenos Aires, ano 15, n. 152, 2011.
- KARPOVICH, P. V. Water resistance in swimming. **Reading Research Quarterly**, v. 4, p. 21-28, 1933.
- KARPOVICH, P.V. e PESTRECOV, K. Mechanical work and efficiency in swimming crawl and back strokes. **Arbeitsphysiologie**, v. 10, p. 504-514, 1939.
- KJENDLIE P. L., STALLMAN R. K. Drag characteristics of competitive swimming children and adults. **Journal of Applied Biomechanics**, v. 24, p. 35–42, 2008.
- KOLMOGOROV, S. V.; DUPLISHEVA, O. A. Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. **Journal of Biomechanics**, v. 25, p. 311–318, 1992.
- KOLMOGOROV, S.; RUMYANTSEVA, O.; GORDON, B.; CAPPAERT, J. M. Hydrodynamic characteristics of competitive swimmers of different genders and performance levels. **Journal of Applied Biomechanics**, v.13, p. 88-97, 1997.

LILJESTRAND, G.; STENSTRÖM, N. Studien über die physiologie des schwimmens. **The Scandinavian Physiological Society**, v. 39, p. 1-63, 1919.

MAGLISCHO, E. W. **Nadando ainda mais rápido**. São Paulo: Manole, 1999. 716 p.

MAIOR, A. S.; ALVES, A. A contribuição dos fatores neurais em fases iniciais do treinamento de força muscular: uma revisão bibliográfica. **Motriz**, v.9, p.161-168, 2003.

MARINHO, P. C.; JÚNIOR, O. A. Mensuração da força isométrica e sua relação com a velocidade máxima de jovens nadadores com diferentes níveis de performance. **Revista Brasileira de Ciência e Movimento**, v. 12, n. 1, p. 71-76, jan./mar, 2004

MARINHO, D. A.; REIS, V. M.; ALVES, F. B.; VILAS-BOAS, J. P.; MACHADO, L.; SILVA, A. J. e ROUBOA, A. I. Hydrodynamic Drag During Gliding in Swimming. **Journal of Applied Biomechanics**, v. 25, p. 253-257, 2009.

MARINHO, D. A.; BARBOSA, T. M.; ROUBOA, A. I. e SILVA, A. J. The Hydrodynamic Study of the Swimming Gliding: a Two-Dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis. **Journal of Human Kinetics**, v. 29, p. 49-57, 2011.

MARTIN, R. B.; YEATER, R.A.; WHITE, M.K. A simple analytical model for the crawl stroke. **Journal of Biomechanics**, v. 14, p. 539–548, 1981.

MINETTI, A. E. Passive tools for enhancing muscle-driven motion and locomotion. **Journal of Experimental Biology**, v. 207, p. 1265–1272, 2004.

MIRON, A. J. M. **A física da natação**. 2009. 37 f. Monografia de Licenciatura em Física – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power**. Cambridge: Cambridge University Press. 2011. 568 p.

McARDLE, W. D.; KATCH, F. I.; KATCH, V. L. **Fisiologia do exercício: energia, nutrição e desempenho humano**. 7.ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2011. 1172 p.

- McARDLE, W. D., MAGEL, J. R. Physical work capacity and maximum oxygen uptake in treadmill and bicycle exercise. **Medicine and Science in Sports and Exercise** 2, p. 118-123, 1970.
- NAEMI, R.; EASSON, W. J.; SANDERS, R. H. Hydrodynamic glide efficiency in swimming. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 13, p. 444–451, 2010.
- NICOLAS, G.; BIDEAU, B.; COLOBERT, B. e BERTON, E. How are Strouhal number, drag, and efficiency adjusted in high level underwater monofin-swimming? **Human Movement Science**, v. 26, p. 426–442, 2007.
- NOVAIS-BARBOSA, J. **Mecânica dos fluidos e hidráulica geral**, v. 1. Porto Editora, Porto. 1985. 480 p.
- PALMER, M. L. **A ciência do ensino da natação**. São Paulo: Manole, 1990. 360 p.
- PAPOTI, M.; MARTINS, L.; CUNHA, S.; ZAGATTO, A.; GOBATTO, C. Padronização de um protocolo específico para determinação da aptidão anaeróbia de nadadores utilizando células de carga. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**, v. 3, p. 36 – 42, 2003.
- PAPOTI, M., ZAGATTO, M., FREITAS, P. B. J., CUNHA, S. A., MARTINS, L. E. B., GOBATTO, C. A. Utilização do intercepto-y na avaliação da aptidão anaeróbia e predição da performance de nadadores treinados. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v. 11, p. 126-130, 2005.
- PENDERGAST, D.R.; DI PRAMPERO, P. E.; CRAIG, A. B.; WILSON, D.R.; RENNIE, D.W. Quantitative analysis of the front crawl in men and women. **Journal of Applied Physiology**, v. 43, p. 475–479, 1977.
- PENDERGAST, D. R., MOLLENDORF, J. C., ZAMPARO, P., TERMIN, A., BUSHNELL, D., & PASCHKE, D. The influence of drag on human locomotion in water. **Undersea & Hyperbaric Medicine**, v. 32, p. 45–58. 2005
- POWERS, S. K.; HOWLEY, E. T. **Fisiologia do exercício: teoria e aplicação ao condicionamento e ao desempenho**. 6.ed. São Paulo: Manole Editora, 2009. 668 p.

RAMOS, R. J.; MANTHA, V. R.; NOVAIS, M. L.; ROUBOA, A. I.; SILVA, A. J.; MARINHO, D. A. O efeito da profundidade no arrasto hidrodinâmico durante o deslize em natação. **Motricidade**, v. 8, p. 57-65, 2012.

RASBAND, W., ImageJ documentation. Disponível em: <[www.rsb.info.nih.gov](http://www.rsb.info.nih.gov)>, acesso em 01/04/2011.

RIBEIRO, J. A. M. **Análise hidrodinâmica do arrasto passivo e activo nas diferentes técnicas de nado**. Universidade do Porto – Porto, 2006. Monografia, 81 p.

ROBERGS, R. A; ROBERTS, S. O. **Princípios Fundamentais de Fisiologia do Exercício para Aptidão, Desempenho e Saúde**. São Paulo: Phorte, 2002.

RUSHALL, B. S.; SPRIGINGS, E. J.; HOLT, L. E. e FRANCIS, P. R. Forces in swimming--current status. **NSWIMMING Coaching Science Bulletin**, v. 2, p. 1-25, 1994.

SCHRAMM, E. **Sportschwimmen**. Berlin: Sportverlag, 1987.

SHARP, R. L.; TROUP, J. P.; COSTILL, D.L. Relationship between power and sprint freestyle swimming. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 14, p. 53–56, 1982.

SILVA, M.I. e VASCONCELOS, C.B. Qualidade de vida e saúde: uma abordagem da fisioterapia do trabalho e equipe interdisciplinar na gestão de ergonomia e promoção da saúde para colaboradores da indústria têxtil. In: 8º Fórum Internacional de Qualidade de Vida e Saúde, Curitiba, Paraná, Brasil. **Revista JOPEF - Online**, Fórum Internacional de Qualidade de Vida e Saúde, v. 1, p. 1-4, 2008.

SILVATTI, A.; TELLES, T.; ROSSI, M.; DIAS, F.; LEITE, N; BARROS, R. Underwater non-linear camera calibration: an accuracy analysis. In: 28 International Conference on Biomechanics in Sports, Marquette, Michigan, USA, 2010.

SKINNER, A. T.; THOMSON, A. M. **Duffield: exercícios na água**. 3a ed. São Paulo: Manole, 1985. 210 p.

STEWART, D.; FARINA, D.; SHEN, C.; MACALUSO, A. Muscle fiber conduction velocity during a 30-s Wingate anaerobic test. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, v. 21, n. 3, p 418-422, Jun. 2011.

SWAINE, I. L. Arm and leg power output in swimmers during simulated swimming. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 32, p. 1288–1292, 2000.

SWAINE, I. L. Cardiopulmonary responses to exercise in swimmers using a Swim bench and a leg-kicking ergometer. **International Journal of Sports Medicine**, v. 18, p. 359–363, 1997.

SWAINE, I. L. e REILLY, T. The freely chosen swimming stroke rate in a maximal swim and on a biokinetic swim bench. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 15, p. 370–375, 1983.

SWAINE, I.; ZAMPARO, P. The gross mechanical efficiency of simulated swimming. **16th Annual Congress of the European College of Sport Science**, Liverpool, UK, p. 279–280, July 6–9, 2011.

TAIAR, R.; LODINI, A.; ROUARD, A. e TOSHIEV, Y. Estimation of swimmers anthropometric parameters and surface areas in real swimming conditions. **Acta of Bioengineering and Biomechanics**, v. 7, p. 85–95, 2005.

TOUSSAINT, H.M.; The “Fast-Skin” body suit: hip, hype but does it reduce drag during front crawl swimming? In: K.E. Gianikellis; B.R. Mason; H.M. Toussaint; R. Arellano and R.H. Sanders (eds.) Scientific Proceedings – Applied Program – **XXth International Symposium on Biomechanics in Sports – Swimming**, p. 15-24. Caceres, Spain, University of Extremadura, 2002.

TOUSSAINT, H. M.; ROOS, P. E., KOLMOGOROV, S. The determination of drag in front crawl swimming. **Journal of Biomechanics**, v. 37, p. 1655–1663, 2004.

TOUSSAINT, H.; TRUIJENS, M. Biomechanical aspects of peak performance in human swimming. **Animal Biology**, v. 55, n. 1, p. 17-40, 2005.

UNGERECHTS, B.; NIKLAS, A. Factors of active drag estimated by flume swimming. In: Miyashita M, Mutoh M, Richardson R (eds.), Medicine and science in aquatic sports, Basel: Karger. **Medicine and Sport Science**, v. 39, p. 137-142, 1994.

URL1: <http://www.poolandspa.com/page5179.htm>. Acesso 20 Mar, 2015.

VILAS-BOAS, J. P. Bases mecânicas da natação. In: R. Fernandes, J.V. Santos Silva e J. P. Vilas-Boas (eds.), Natação: vivências específicas e conhecimentos teóricos básicos. **Coletânea de textos**, p. 281-352, 1997.

VILAS-BOAS, J. P.; COSTA, L.; FERNANDES, R. J.; RIBEIRO, J.; FIGUEIREDO, P.; MARINHO, D. A.; *et al.* Determination of the drag coefficient during the first and second gliding positions of the breaststroke underwater stroke. **Journal of Applied Biomechanics**, v. 26, p. 324–331. 2010.

VILAS-BOAS, R.; FERNANDES; J. P.; KOLMOGOROV, S. Arrasto hidrodinâmico activo e potência mecânica máxima em nadadores pré-juniors de Portugal. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**, v. 1, p. 14–21, 2001.

VOGEL, S. **Life in moving fluids**. New Jersey: Princeton University Press. 1994.

WEBB, A.; BANKS, J; PHILLIPS, C.; HUDSON, D.; TAUTON, D.; TURNOCK, S. Prediction of passive and active drag in swimming. **Procedia Engineering**, v. 13, p. 133-140, 2011.

WEINECK, J. **Manual de treinamento esportivo**. 2.ed. São Paulo: Editora Manole, 1986. 480 p.

WILMORE, J. H.; COSTILL, D. L. **Fisiologia do esporte e do exercício**. 2.ed. São Paulo: Editora Manole, 2001. 312 p.

WILSON, B. e THORP, R. Active drag in swimming. In: Biomechanics and Medicine in Swimming IX, edited by Chatard JC. Saint Etienne, France: **Publications de l'Université de Saint Etienne**, p. 15–20, 2003.

WOOLEGE, R. C.; CURTIN, N.A.; HOMSHER, E. **Energetic aspects of muscle contraction. Monographs of the Physiological Society**. London: Academic, 1985. 357 p.

YEATER, R. A.; MARTIN, R. B.; WHITE, M. K.; GILSON, H. K. Tethered swimming forces in the crawl, breast and back strokes and their relationship to competitive performance. **Journal of Biomechanics**. v.8, p.527-537, 1981.

ZAMPARO, P.; CAPELLI, C.; PENDERGAST, D. R. Energetics of swimming: a historical perspective. **European Journal of Applied Physiology**, v. 111, p. 367–378, 2011.

ZAMPARO, P.; GATTA, G.; CAPELLI, C.; PENDERGAST, D. R. Active and passive drag, the role of trunk incline. **European Journal of Applied Physiology**, v. 106, p. 195–205, 2009.

ZAMPARO, P.; PENDERGAST, D. R.; MOLLENDORF, J.; TERMIN, A.; MINETTI, A. E. An energy balance of front crawl. **European Journal of Applied Physiology**, v. 94, p. 134 – 144, 2005.

ZAMPARO, P. E SWAINE, I. Mechanical and propelling efficiency in swimming derived from a whole-body swimming ergometer. **Journal of Applied Physiology**, v. 113, p. 584– 594, 2012.

## APÊNDICE

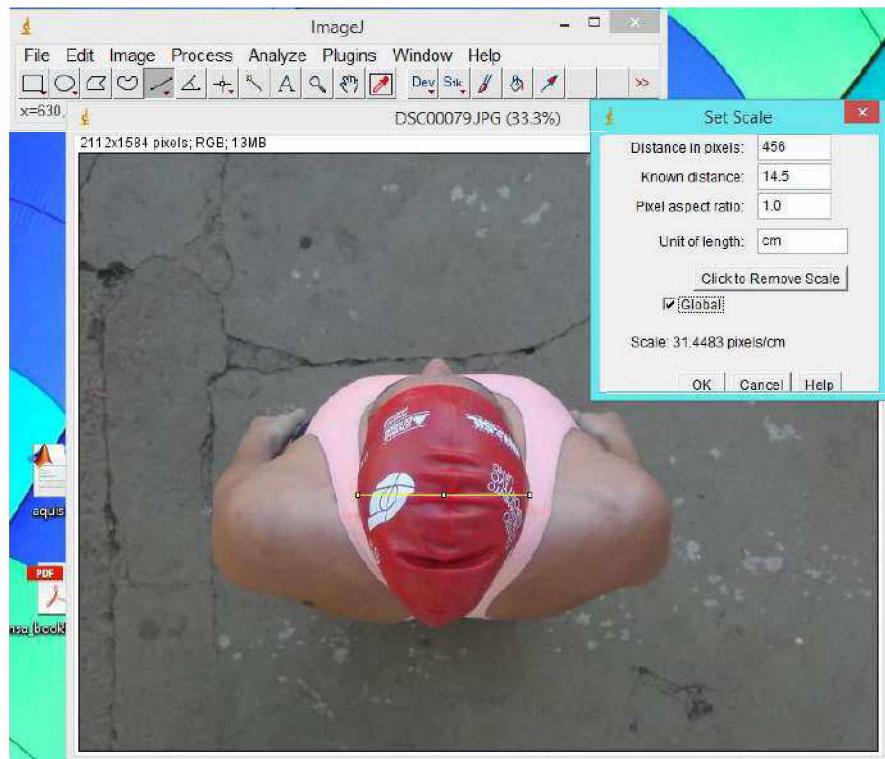
### **Apêndice I – Passo a passo do procedimento de cálculo da área plana da seção transversal do tronco do nadador**

- 1) Calibração da escala de medição a partir da touca do nadador:

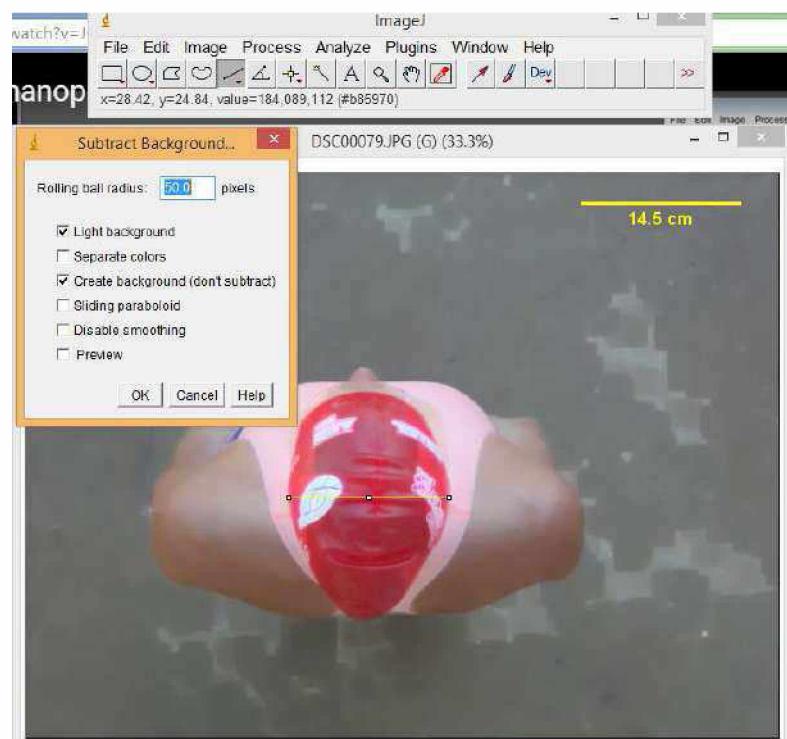
Para esta imagem:



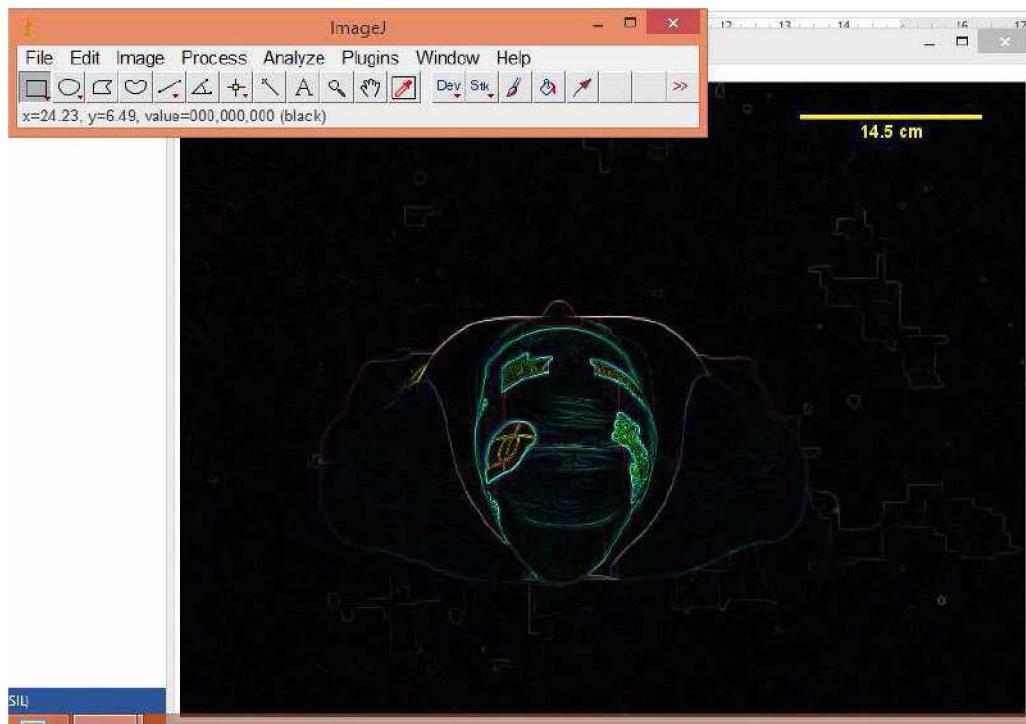
No software ImageJ, a partir do comando selecionado mostrado é traçado um comprimento conhecido para calibração global da imagem. Na guia: Analyze>Set Scale. O comprimento conhecido deve ser inserido e a unidade de comprimento utilizada, dessa forma será mostrada a opção de escala global com respectivo valor em pixels.



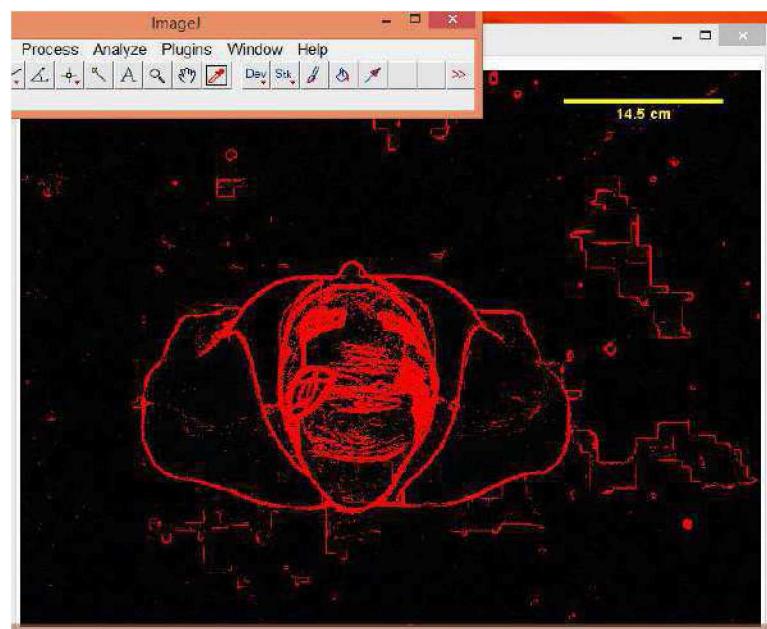
- 2) O ‘background’, ou fundo da imagem, pode ser subtraído através da guia: Process>Subtract Background. As modificações feitas para esta imagem são apresentadas.



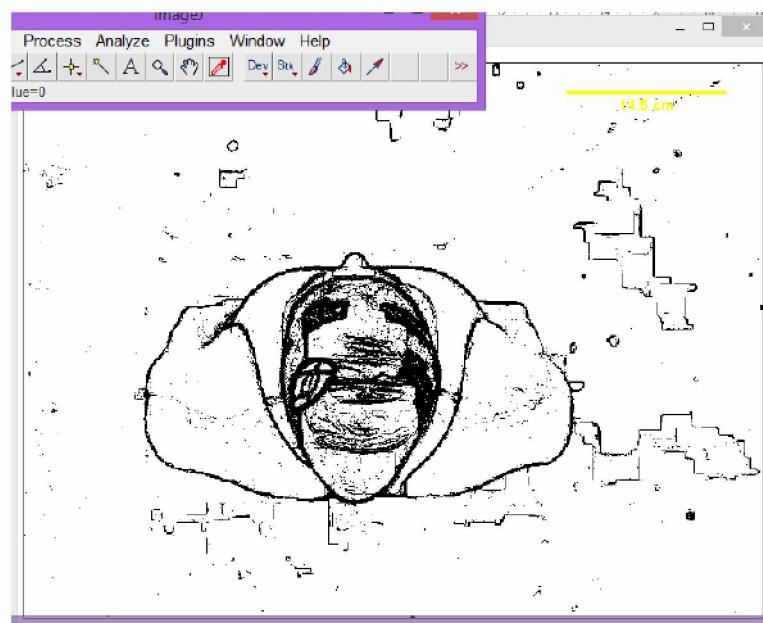
- 3) A partir de então, seleciona-se o comando ‘Find edges’ para mostrar os contornos da imagem. Comandos: Process>Find Edges.



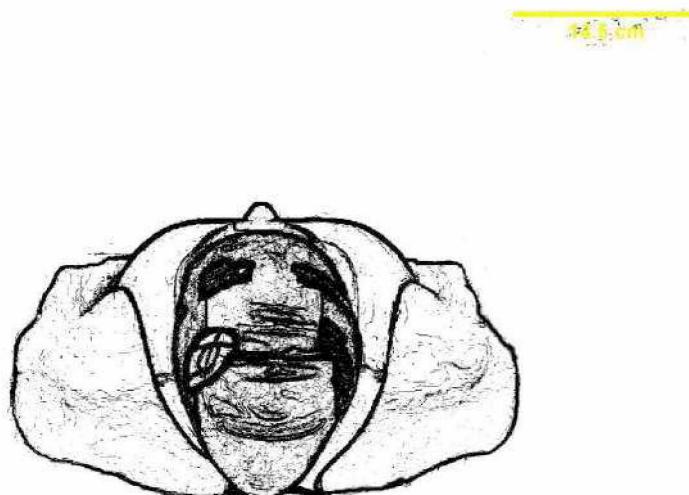
- 4) O ‘Threshold’ da imagem é necessário para se realçar os contornos. Na guia: Image>Adjust>Threshold. Para a imagem abaixo foi selecionado a opção Red.



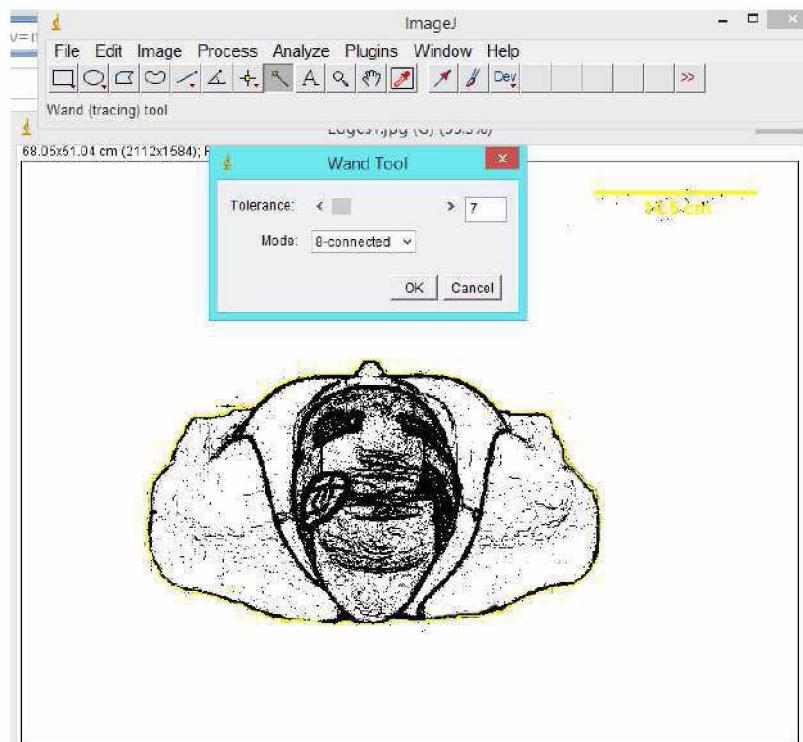
- 5) A partir de então é feito o binário da imagem. Comandos: Process>Binary>Make binary.



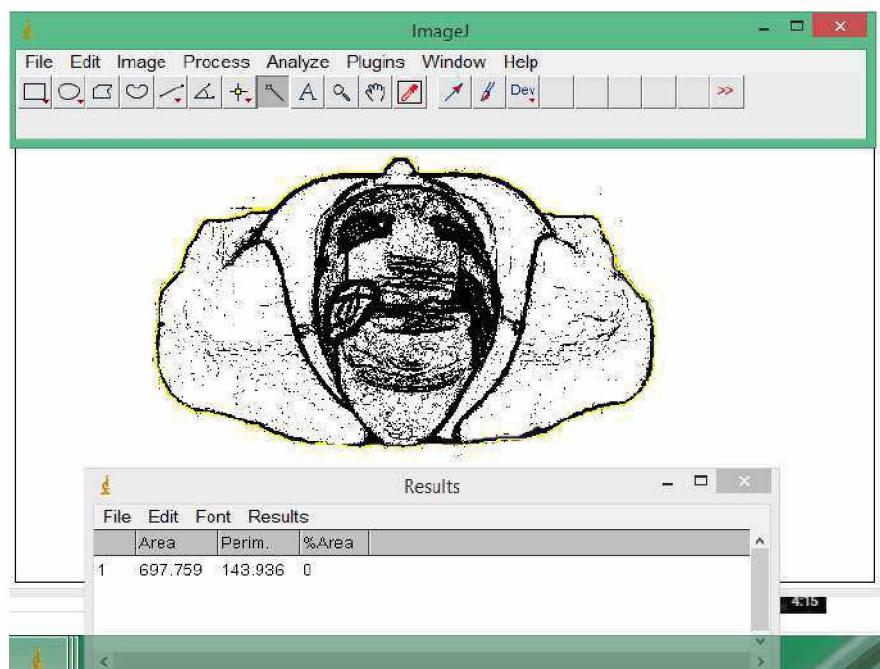
- 6) Com o auxílio do Adobe Photoshop®, as partes de interesse da imagem são retiradas e a imagem fica mais clara, como segue:

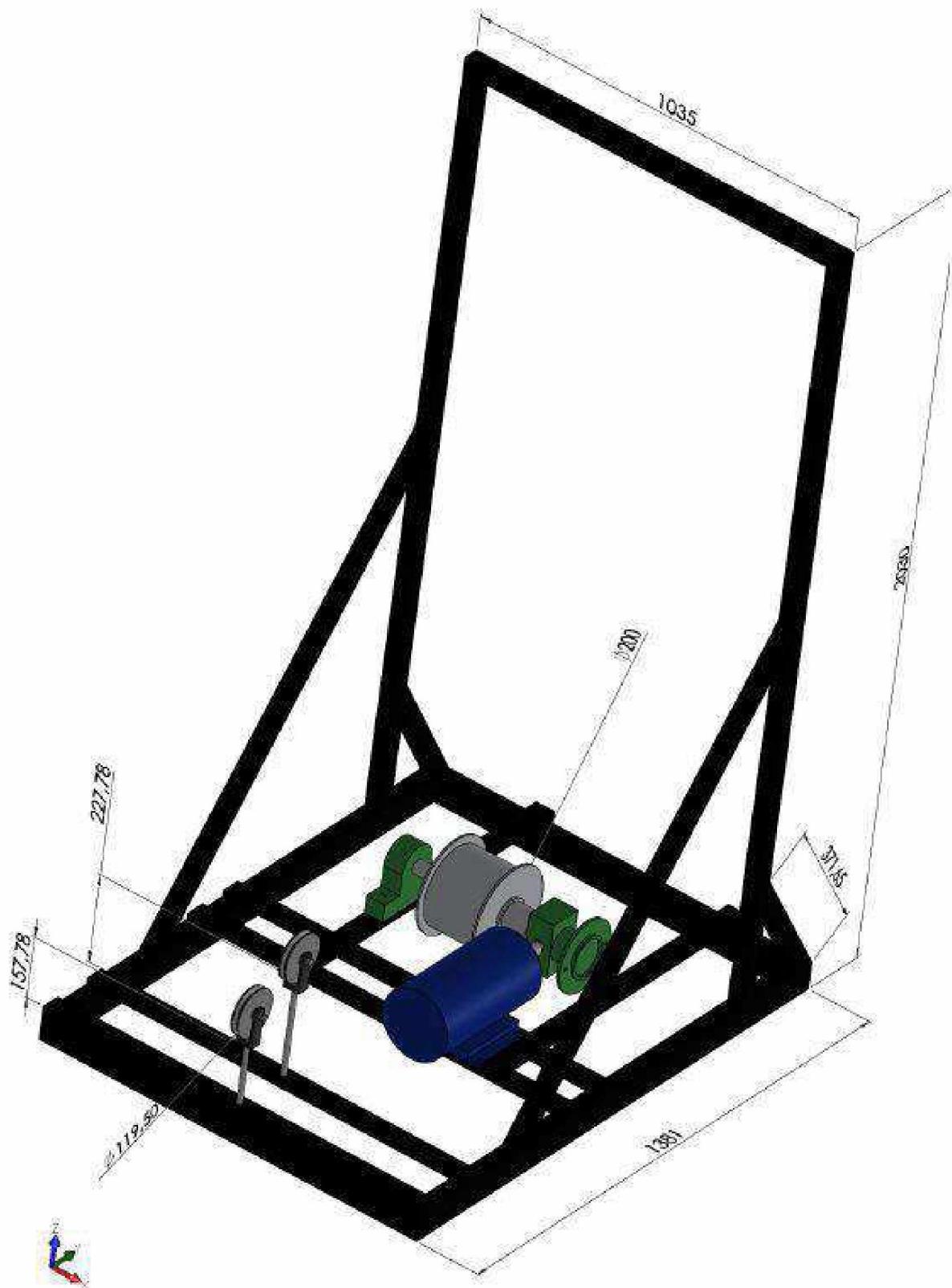


- 7) Com isso, o contorno que compreende a área de interesse é selecionado com a ferramenta mostrada:



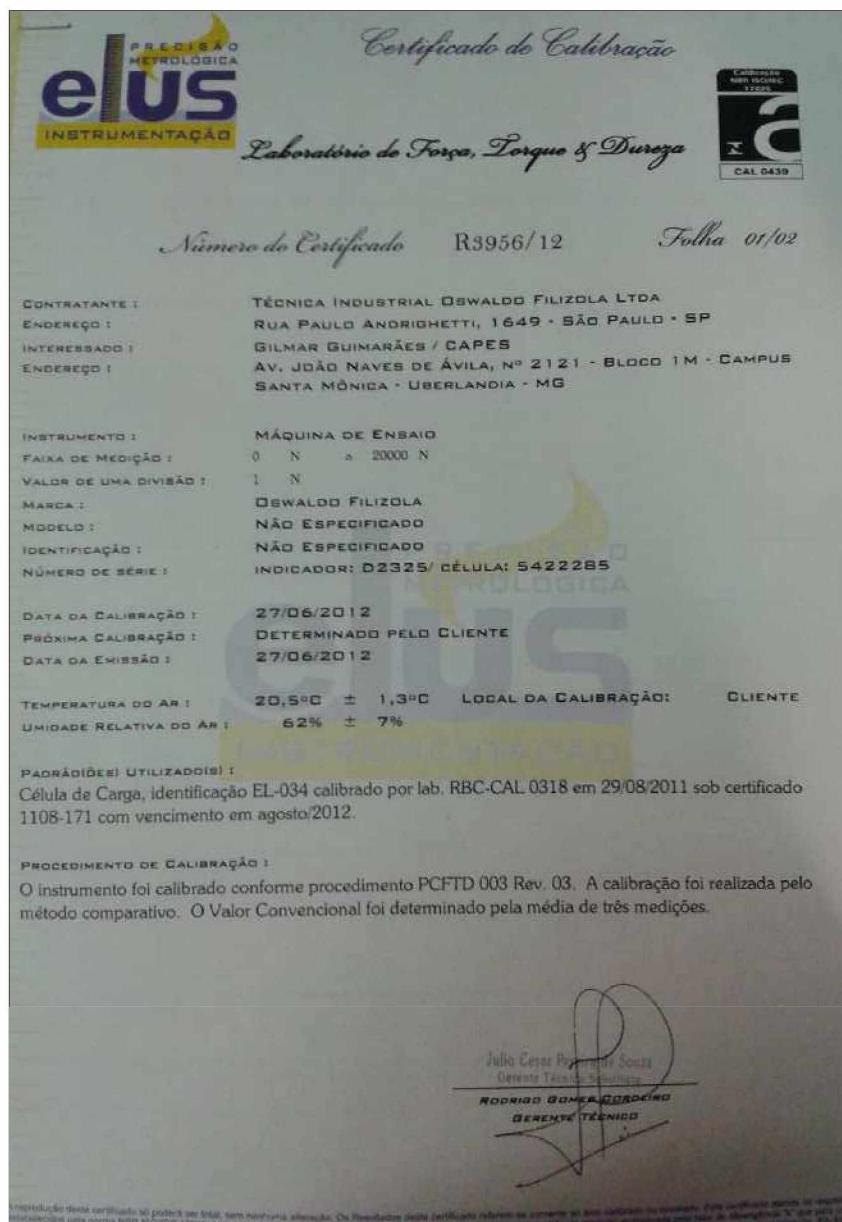
Comandos: Analyze>Measure, para se obter a área final.



**Apêndice II – Dimensões Equipamento para arrasto do nadador**

## ANEXO

### Anexo I – Certificado de Calibração da Célula de carga padrão usada na Máquina Universal de Ensaios



Certificado de Calibração

**elus** PRECISÃO METROLOGICA INSTRUMENTAÇÃO

*Laboratório de Força, Torque & Dureza*

"Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRIE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439"

Número do Certificado R3956/12 Folha 02/02

**RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :**

Sentido da Calibração			Tração			
Indicado no Instrumento (N)	Valor Convencional (N)	Ero (N)	Erro Percentual (% do Ponto)	Incerteza de Medição (N)	k	Veff
4039,0	4023	16	0,40	16	2,00	∞
6121,0	6098	23	0,38	25	2,00	∞
10058,0	10026	32	0,32	39	2,00	∞
14016,0	13984	32	0,23	55	2,00	∞
19500,0	19481	39	0,20	76	2,00	∞

Sentido da Calibração			Compressão			
Indicado no Instrumento (N)	Valor Convencional (N)	Ero (N)	Erro Percentual (% do Ponto)	Incerteza de Medição (N)	k	Veff
4022,0	4009	13	0,32	13	2,00	∞
6022,0	6002	20	0,33	19	2,00	∞
10011,0	9971	40	0,40	32	2,00	∞
14009,0	13970	39	0,28	45	2,00	∞
19500,0	19482	58	0,30	63	2,00	∞

**CURVA DA CALIBRAÇÃO :**

Indicado no Instrumento (N)

Indicado no Instrumento (N)	Ero Percentual (% do Ponto) - Tensão	Ero Percentual (% do Ponto) - Compressão
4039,0	0,35	-
6121,0	0,38	0,40
10058,0	0,32	0,42
14016,0	0,30	0,35
19500,0	0,28	0,38

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRIE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua堪能性 para padronizar e medir.

TÉCNICO EXECUTANTE : JULIO CESAR PEREIRA DE SOUZA

*[Signature]*

## Anexo II – Configuração de pinos no hardware do sistema de aquisição da LYNX®

Como mostra a foto seguinte, para aquisição de dados em um circuito de ponte completa, como no caso da célula de carga, a configuração das chaves internas ao canal de aquisição correspondem à revisão 4 e devem ser configuradas como indicado.

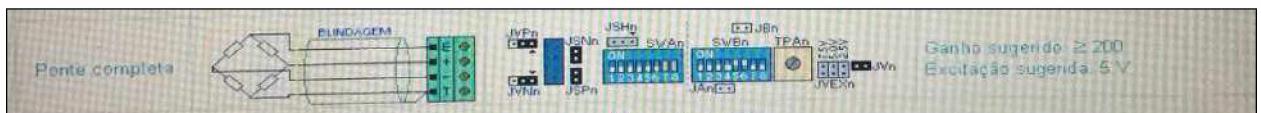


Figura 1 - Revisão 4 do módulo AI2161 da LYNX® e configuração de ponte completa.

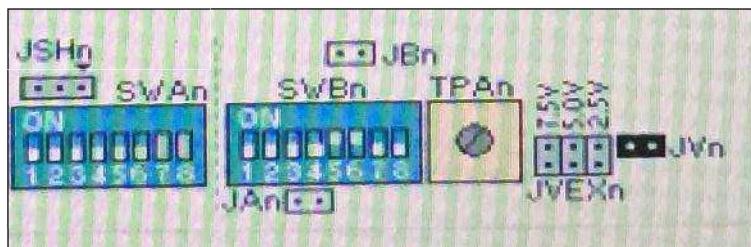


Figura 2 - Zoom In na configuração das chaves que devem ser observadas para cada canal.

Para o bloco de chaves SWAn observado (inferior), as chaves de 1 a 6 devem estar em posição oposta ao “ON”, já as chaves 7 e 8 devem ser postas na posição “ON”.

Para o bloco de chaves SWBn observado (superior), as chaves de 1 a 4 devem estar em posição oposta ao “ON”, já as chaves 5 e 6 devem ser postas na posição “ON”. As chaves 7 e 8 devem estar opostas ao “ON”.

**Anexo III – TCLE (Termo de Consentimento Livre e Esclarecido) assinado pela equipe executora do projeto e voluntária**

**TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO**

Você está sendo convidado (a) para participar da pesquisa intitulada PROTÓTIPO DE ERGÔMETRO PARA AVALIAR CONDICIONAMENTO FÍSICO DURANTE A NATAÇÃO, sob a responsabilidade dos pesquisadores Cleudmar Amaral de Araújo, Silvio Soares dos Santos e Rhaíra Helena Caetano e Souza.

Nesta pesquisa nós estamos buscando desenvolver um novo protótipo de um ergômetro aplicado para treinar ou avaliar o condicionamento físico de nadadores, por meio da avaliação dos níveis de força propulsiva necessária para a realização do ‘deslize’ do nadador durante seu percurso.

O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido será obtido pela pesquisadora Rhaíra Helena Caetano e Souza no momento da realização das medições dos níveis de força do nadador na piscina do Campus Educação Física da Universidade Federal de Uberlândia. Na sua participação você se encontrará dentro da piscina, com um cinto atado ao seu tronco, por meio de uma argola, um cabo de aço será conectado dorsalmente ao seu cinto, o mesmo estará atrelado a uma célula de carga e será posicionado com auxílio de um suporte de ferro externo a piscina de modo que possibilite a sua suspensão. Com este aparato, um sistema de transmissão contará com um motor elétrico que fará a tração deste cabo de aço, possibilitando a coleta dos níveis de força necessários para a realização do seu deslocamento, de 12 metros, por meio de um sistema de aquisição de dados, disposto próximo a piscina. Concomitantemente há filmagem do nadador em dois ângulos distintos, com câmeras posicionadas na piscina ao nível da água e da superfície do corpo do nadador. As imagens obtidas serão do ponto de vista lateral e superior do nadador, marcadores serão posicionados na piscina, informando o deslocamento do nadador e área da seção transversal do tronco do nadador que estará submersa, respectivamente. O nadador será submetido a um questionário pessoal, em que dados de experiência, idade e medidas corporais serão extraídas. Após a extração de informações das filmagens, das áreas do tronco submerso do nadador ao longo dos procedimentos, os vídeos e imagens serão descartados. Há um risco mínimo de identificação do nadador, que será minimizado com a colocação de tarjas pretas sobre seus olhos, quando nas imagens.

É de responsabilidade dos pesquisadores e das instituições participantes, a prestação de assistência integral e acompanhamento do participante da pesquisa que vier a sofrer danos decorrentes direta ou indiretamente da participação no estudo. O participante conta com garantia de indenização diante de eventuais danos decorrentes da pesquisa, sob nenhum argumento haverá renúncia ao direito a indenização por dano. Está garantido o ressarcimento de gastos relacionados ao estudo, como alimentação e transporte.

Em nenhum momento você será identificado. Os resultados da pesquisa serão publicados e ainda assim a sua identidade será preservada. Você não terá nenhum gasto e ganho financeiro por participar na pesquisa.

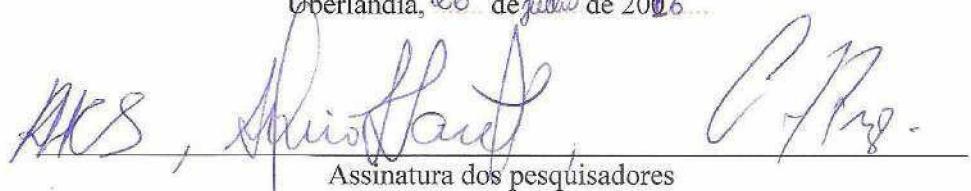
Os riscos consistem em rápida submersão do nadador, caso seu corpo afunde um pouco durante o procedimento, no entanto, serão utilizadas boias em seus braços e pernas, para que não ocorra afogamento. Os benefícios serão diversos, tendo em vista o estudo e avaliação dos níveis de força necessários para se romper o arrasto passivo, sendo este relevante para o melhoramento da performance do nadador, em termos de redução do tempo de execução e correto posicionamento. Você é livre para deixar de participar da pesquisa a qualquer momento sem nenhum prejuízo ou coação.

Uma via original deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido ficará com você.

Rubrica: \_\_\_\_\_ 

Qualquer dúvida a respeito da pesquisa, você poderá entrar em contato com: Cleudmar Amaral de Araújo; Rháira Helena Caetano e Souza, ambos no endereço - Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M – Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner A. Gomide da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC/UFU – Campus Santa Mônica – Uberlândia –MG, CEP: 38408-100 e telefone: (55)34 3239-4147. Poderá também entrar em contato com o Comitê de Ética na Pesquisa com Seres-Humanos – Universidade Federal de Uberlândia: Av. João Naves de Ávila, nº 2121, bloco A, sala 224, Campus Santa Mônica – Uberlândia –MG, CEP: 38408-100; fone: 34-32394131

Uberlândia, 26 de julho de 2016.

  
Assinatura dos pesquisadores

Eu aceito participar do projeto citado acima, voluntariamente, após ter sido devidamente esclarecido.

  
\_\_\_\_\_  
Participante da pesquisa