

# Contributos da investigação científica na Universidade do Porto para o desenvolvimento do treino em Natação

**J. Paulo Vilas-Boas, Ph.D**

Professor Catedrático, treinador olímpico, membro do SG-BMS-WCSS

L. Costa; S. Santos; F. Pereira; N. Oliveira; M. Rebocho; L. Monteiro; S. Oliveira; K. de Jesus; K. de Jesus; P. Figueiredo; S. Pereira; A.B. Lima; T. Barbosa; D. Marinho; A. Rouboa; A.J. Silva; M. Vaz; P. Tavares; P. Gonçalves; S. Soares; F. Sousa; L. Machado; R. Fernandes

INEGI-FE-UP; UTAD; IPB; UFC; UFSC



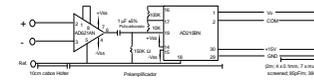
**Desenvolvimento electrónico**

**Biomecânica da natação (investigação, avaliação e aconselhamento)**  
**Fisiologia da natação (investigação, avaliação e aconselhamento)**  
**Biofísica da natação (investigação, avaliação e aconselhamento)**  
**Treino de nadadores (investigação, avaliação e aconselhamento)**

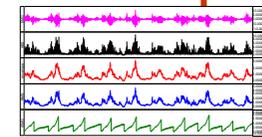


**Dinamometria por plataforma de forças e célula de carga**

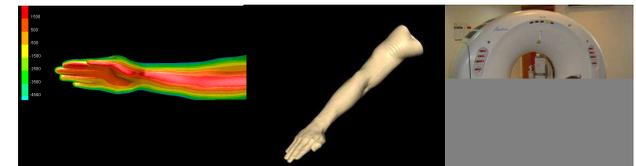
**Cinemetría 3D videométrica (APAS, Peak, SIMI) + outra cinemetría**



**EMG**



**Oximetría directa + [La-]**



# Biomecânica



## Sumário da exposição

- (i) determinação do arrasto passivo por dinâmica inversa em duas posições de deslize na técnica de braços;
- (ii) exemplos do recurso a soluções de simulação computacional (CFD) em hidrodinâmica propulsiva e resistiva
- (iii) determinação dinamométrica de parâmetros caracterizadores da onda produzida por nadadores de elite nas quatro técnicas de nado a diferentes velocidades;
- (iv) caracterização biomecânica de partidas de nado ventral e dorsal em natação;
- (v) caracterização biomecânica de diferentes variantes da viragem de estilo livre;
- (vi) fadiga, flutuações intracíclicas da velocidade de nado e custo energético;
- (vii) avaliação e aconselhamento do treino técnico e prescrição do exercício com base em velocimetria mecânica;
- (viii) caracterização EMG de duas variantes da recuperação do membro superior na técnica de crol;
- (ix) caracterização EMG de movimentos elementares de pólo-aquático (retropedalagem, salto e remate) e
- (x) Levantamento 3D de forma: “nova” antropometria biomecânica.

# Biomecânica



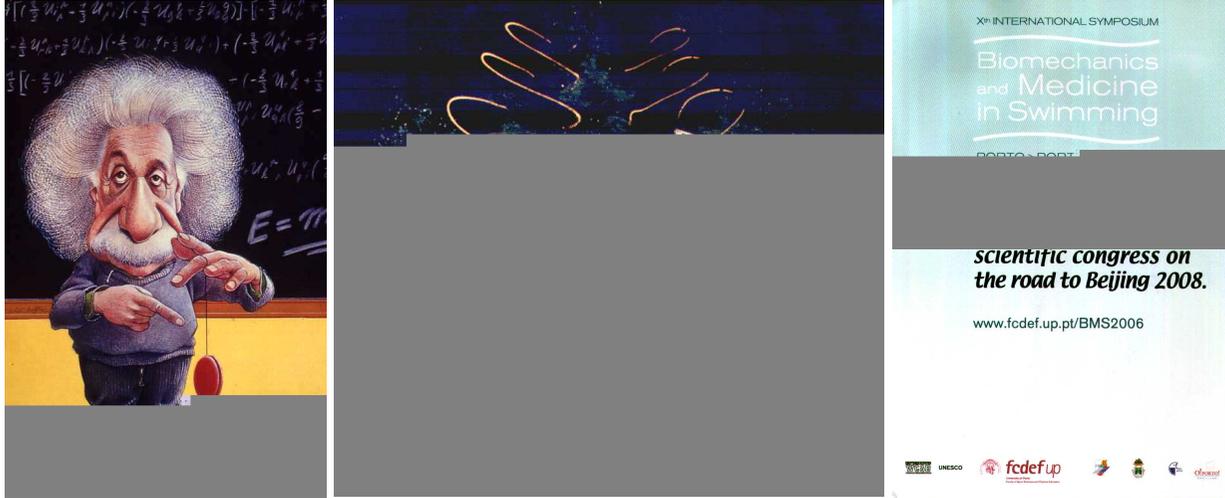
## Sumário da exposição

- (i) **determinação do arrasto passivo por dinâmica inversa em duas posições de deslize na técnica de braços;**

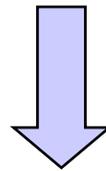
# Hidrodinâmica da natação



**fundamentos para o  
entendimento da  
propulsão e do  
arrasto**



**A teoria da técnica**



**A razão do movimento**



**Arrasto hidrodinâmico (pressão, fricção, onda)**



**Propulsão hidrodinâmica (arrasto propulsivo, asa, vórtices)**

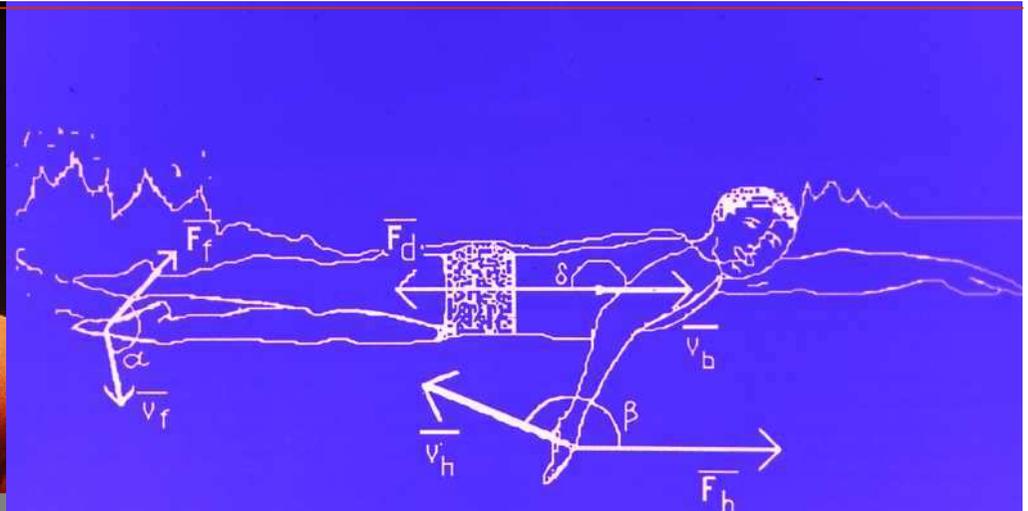


Figure 1: Free body diagram of a swimmer at time  $t$ .  $F_f$  and  $F_h$  represent the propulsive forces acting on feet and hands.  $F_d$  represents the drag force acting on the swimmer,  $v_f$ ,  $v_h$ , and  $v_b$  represent the respective velocities of the point of application of the forces.

$$\vec{p} + \vec{D} = m * \vec{a}$$

$$|\vec{p}| > |\vec{D}| \rightarrow \vec{a} \text{ é positiva}$$

$$|\vec{p}| < |\vec{D}| \rightarrow \vec{a} \text{ é negativa}$$

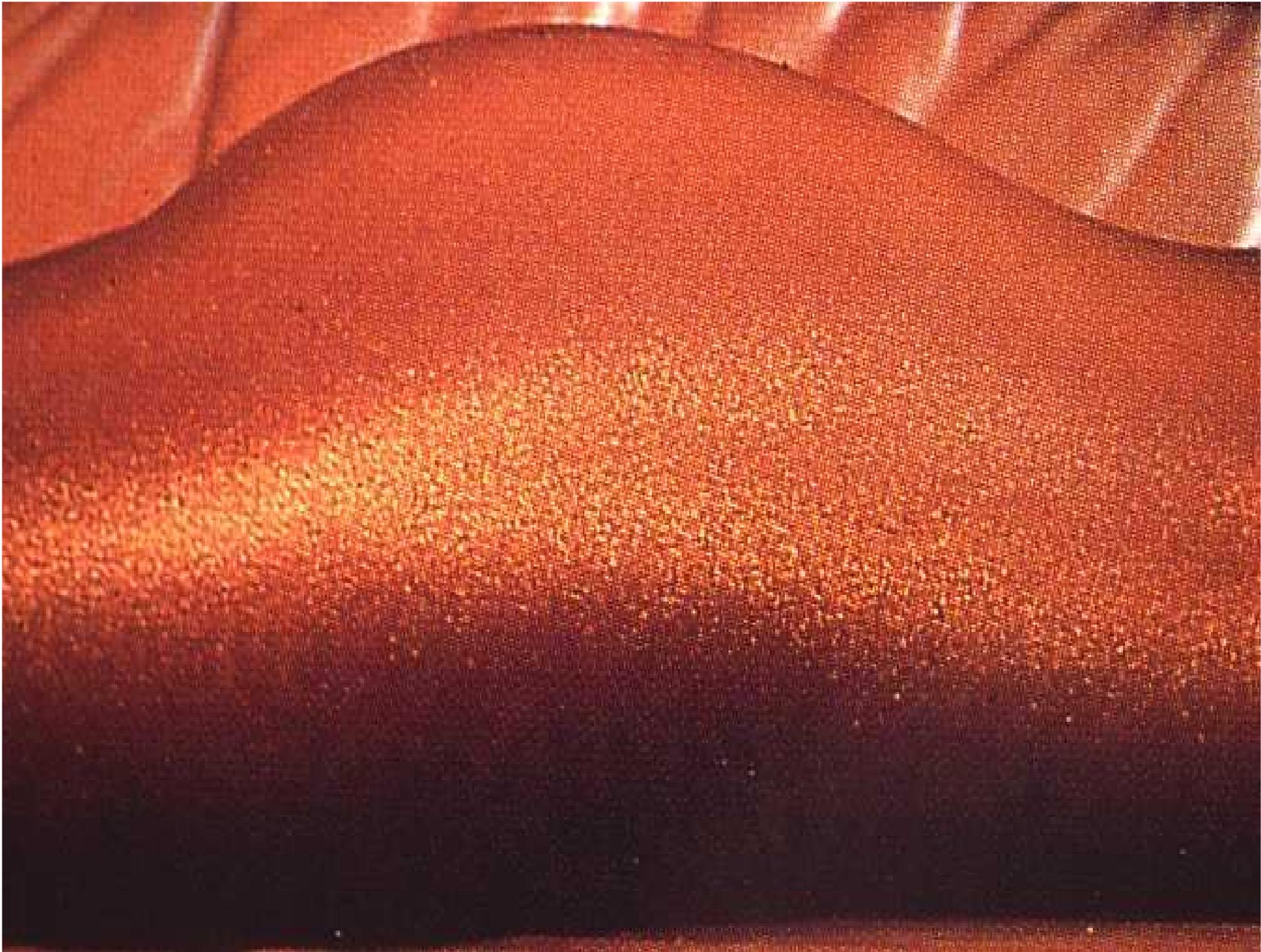
$$|\vec{p}| = |\vec{D}| \rightarrow \vec{a} = \mathbf{0} \rightarrow \vec{v} = \text{constante}$$

# **Arrasto hidrodinâmico (arrasto corporal ou de perfil)**











## Equação newtoniana da **força de arrasto**:

$$D = 0.5 \rho C_D V^2 S$$

D = força de arrasto hidrodinâmico

$\rho$  = massa específica da água

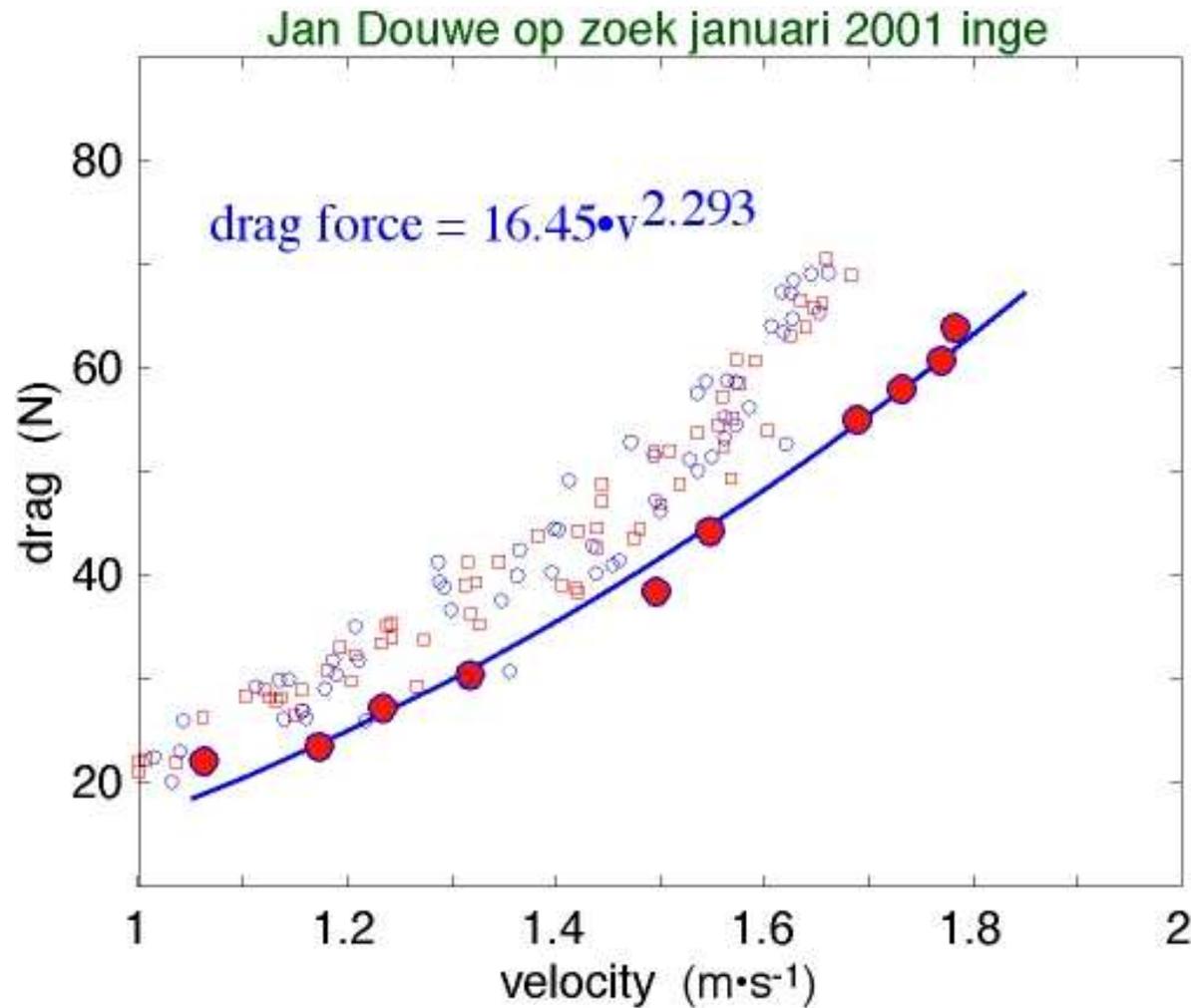
$C_D$  = coeficiente de arrasto

V = velocidade

S = área de secção máxima transversal à direcção de D

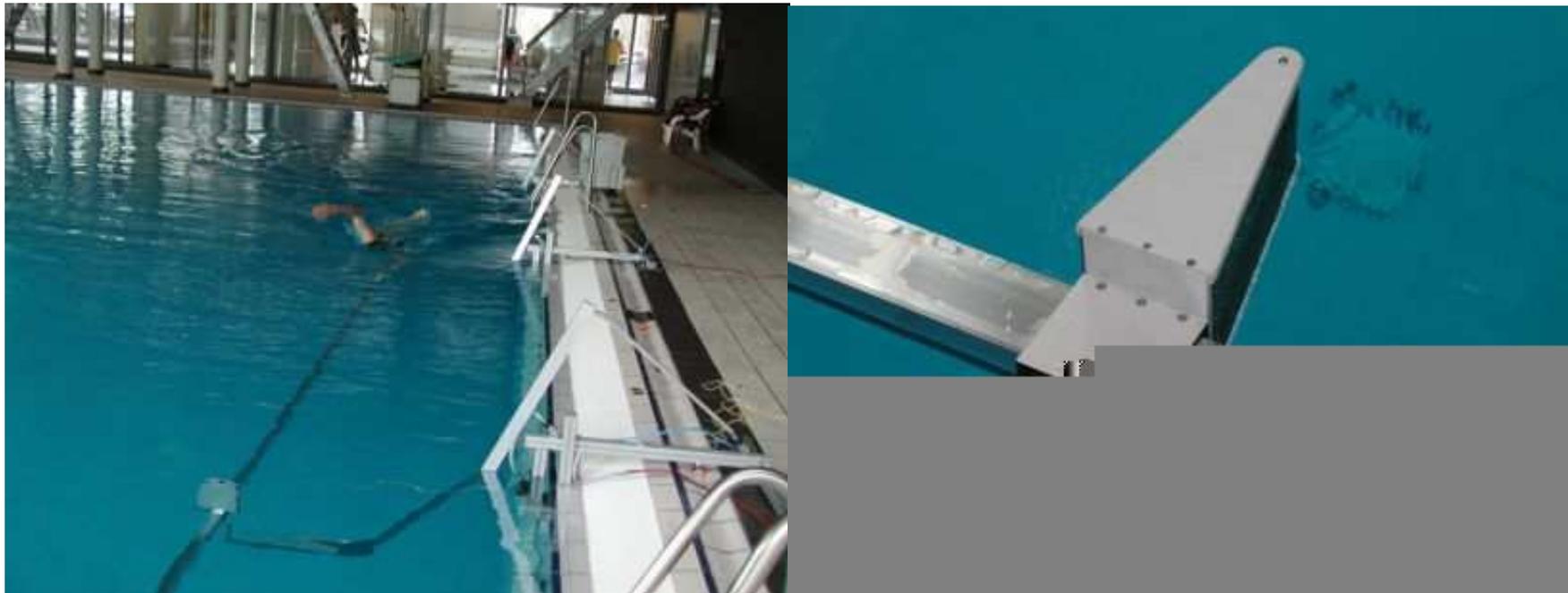
# MAD - System

Toussaint (2001)



**Toussaint (2002)**

# **MAD - System**

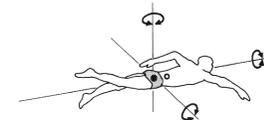


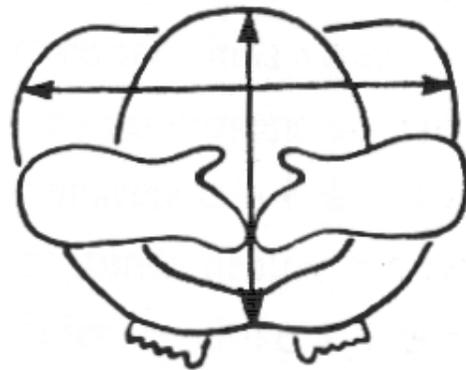
**S**

# Dimensões corporais

Forma do corpo

Posição do corpo  
(orientação)



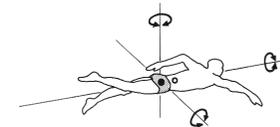


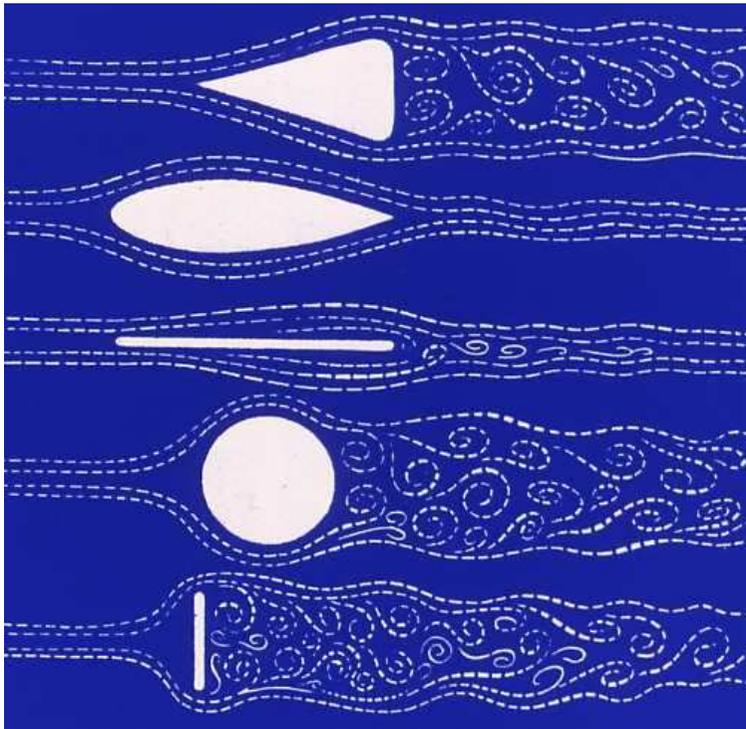
# Dimensões corporais

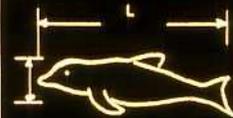
**C<sub>D</sub>**

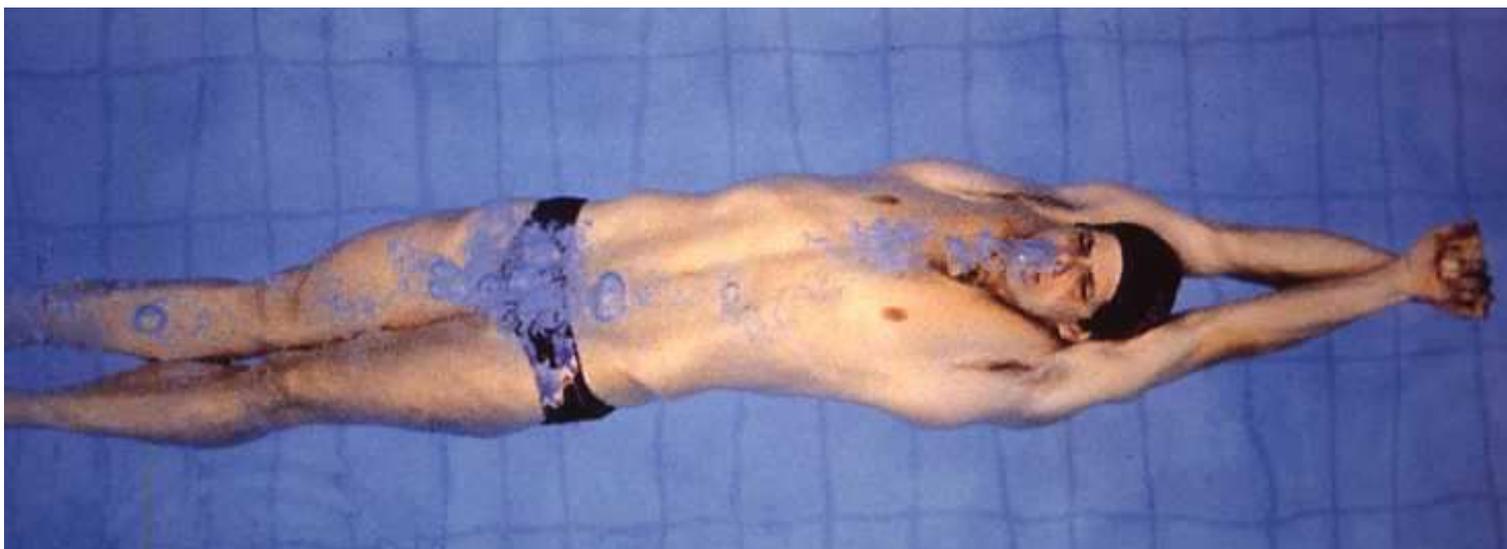
**Forma do corpo**

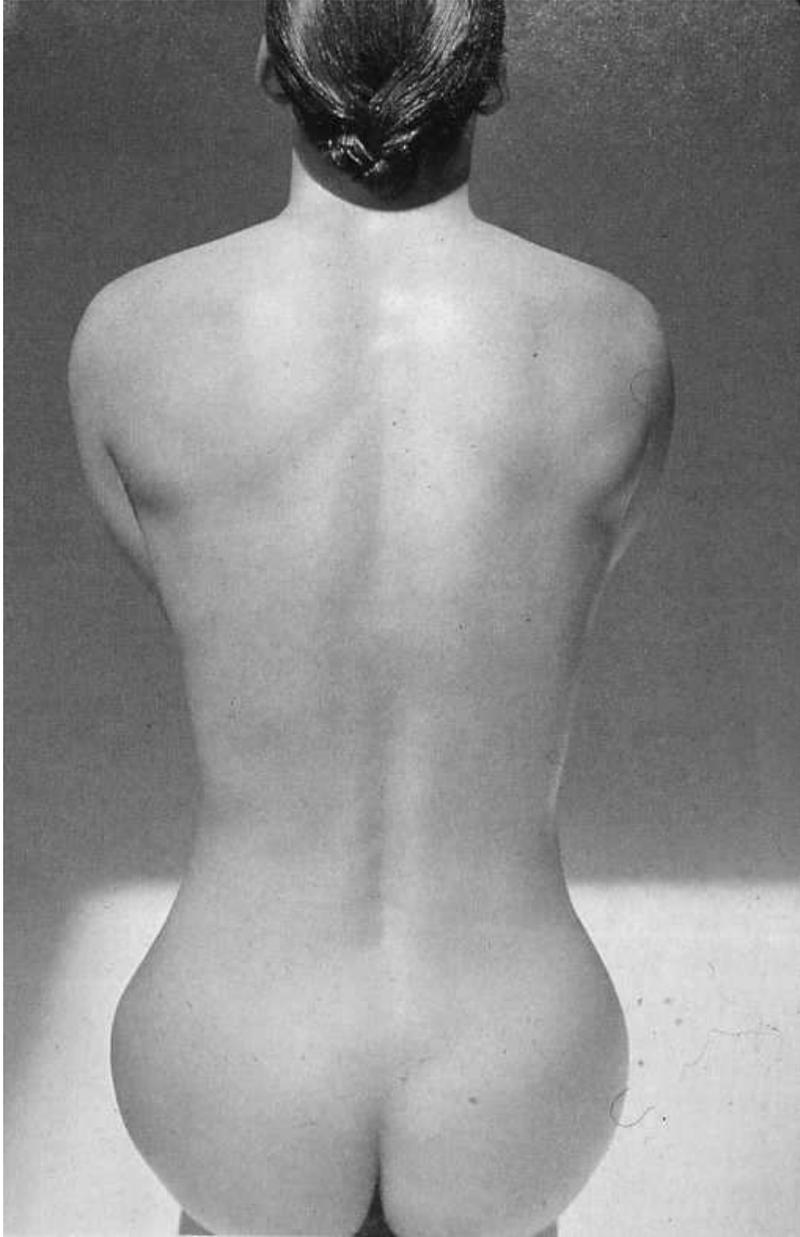
**Posição do corpo  
(orientação)**



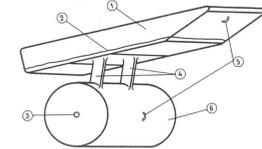


Cazoris (1978)		COEFFICIENT DE TRAINEE	NOMBRE DE REYNOLDS
PROFIL LAMINAIRE		0,05	$10^4 < R < 10^8$
DAUPHIN		$0,05 < C_D < 0,08$	$7,5 \cdot 10^4 < R < 7,0 \cdot 10^7$
CORPS HUMAIN		$0,58 < C_D < 1,04$	$6,6 \cdot 10^5 < R < 3,9 \cdot 10^8$



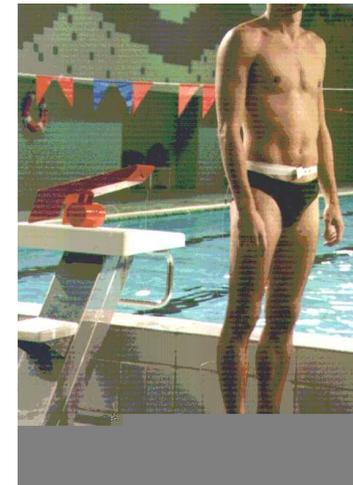
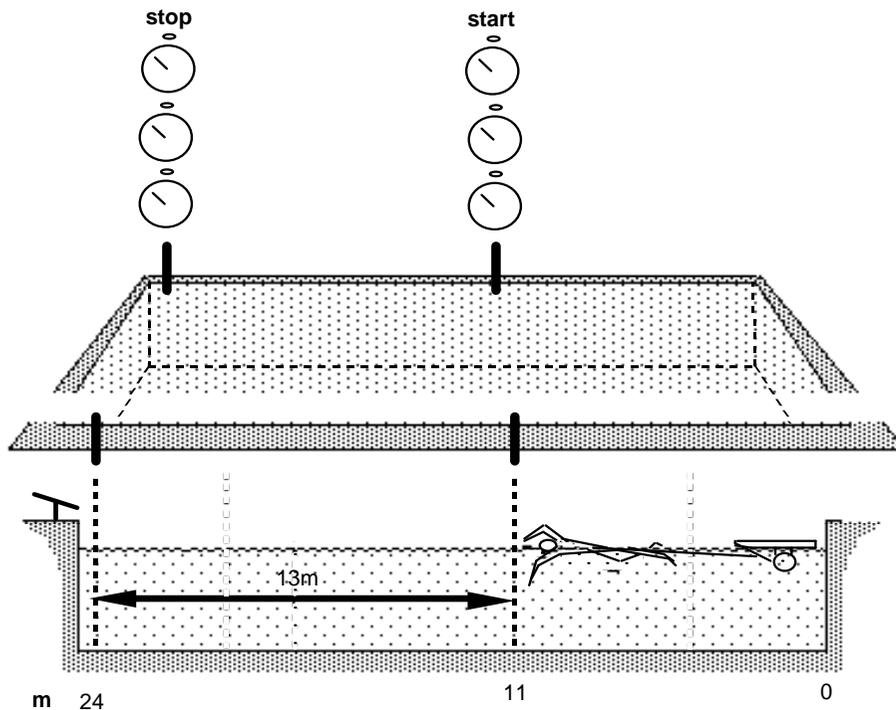


## Avaliação do arrasto activo



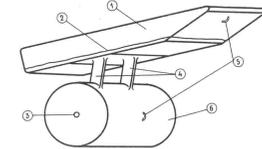
Kolmogorov, Lyapin, Rumyantseva, Vilas-Boas (2000). *Technology for decreasing active drag at the maximal swimming velocity.*

Vilas-Boas, Fernandes e Kolmogorov (2001). *Arrasto hidrodinâmico activo e potência mecânica máxima em nadadores pré-juniões de Portugal.*



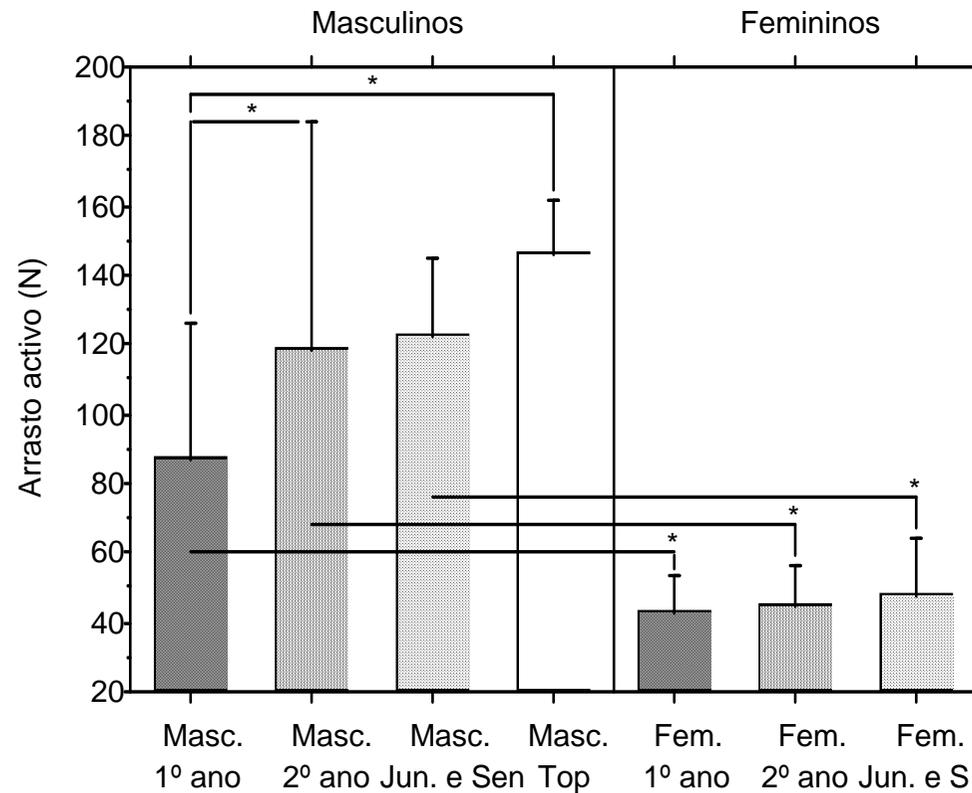
$$0.5 C_D \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = 0.5 C_D \cdot \rho \cdot S \cdot V'^3 + D_{HB} \cdot V'$$

## Avaliação do arrasto activo



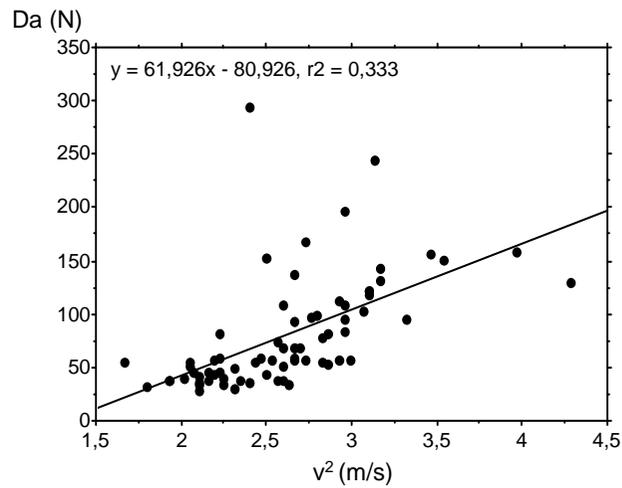
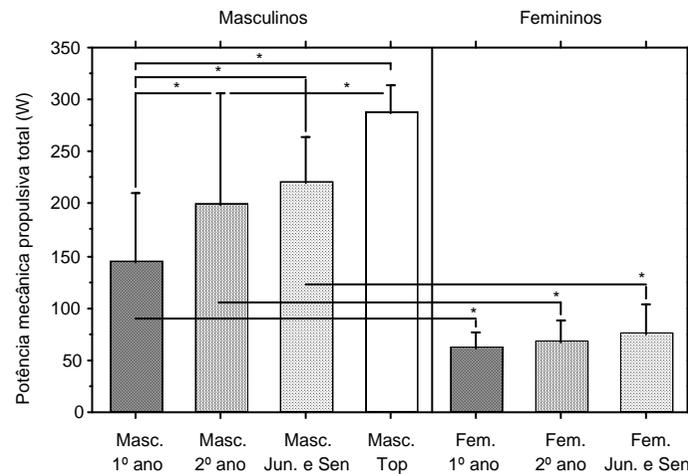
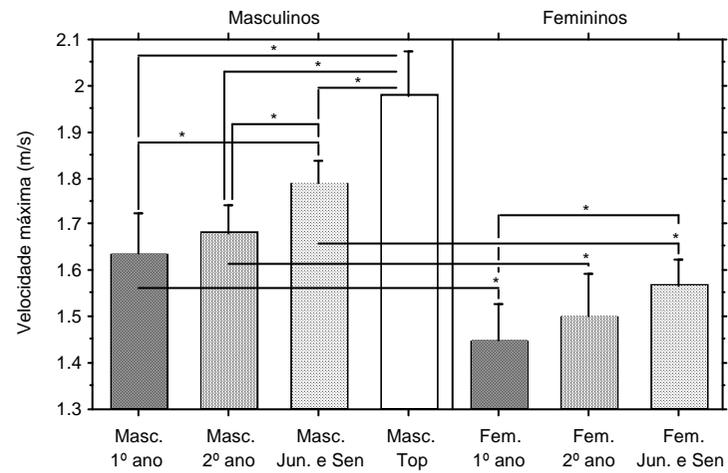
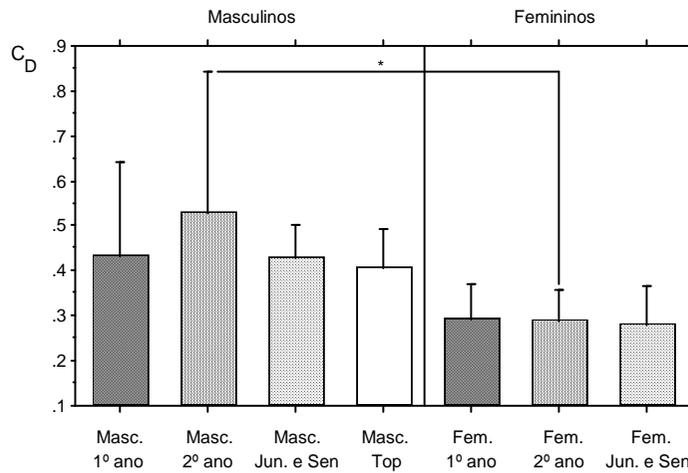
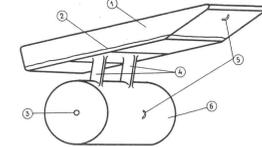
Kolmogorov, Lyapin, Rummyantseva, Vilas-Boas (2000). *Technology for decreasing active drag at the maximal swimming velocity.*

Vilas-Boas, Fernandes e Kolmogorov (2001). *Arrasto hidrodinâmico activo e potência mecânica máxima em nadadores pré-juniores de Portugal.*



# Avaliação do arrasto activo

Vilas-Boas, Fernandes e Kolmogorov (2001). *Arrasto hidrodinâmico activo e potência mecânica máxima em nadadores pré-juniores de Portugal.*



**Duas posições  
fundamentais de deslize  
em natação**



## Dinâmica inversa:

## Métodos:

### Amostra:

10 nadadores de nível nacional e internacional (4 homens e 6 mulheres)

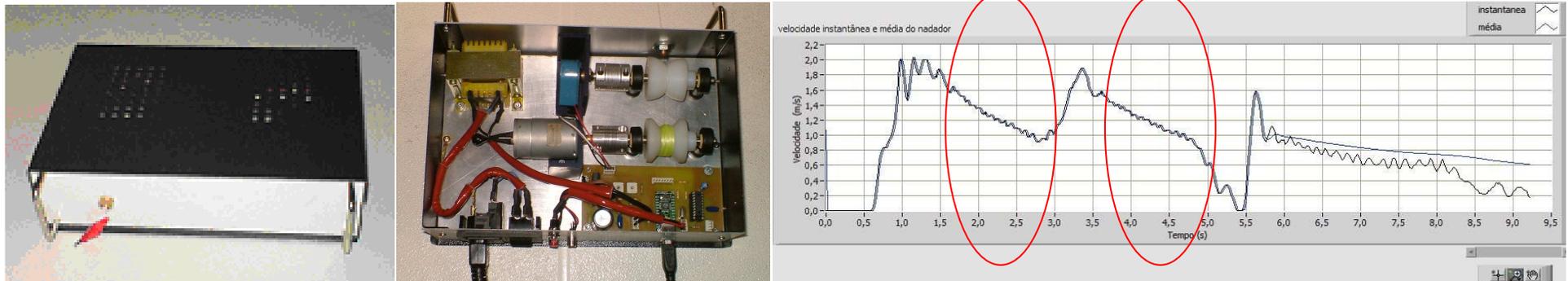
15.2 ± 1.89 e 16.8 ± 3.18 **anos**

178.7 ± 10.5 e 165.8 ± 3.92 cm, **altura**

60.7 ± 12.73 e 57.8 ± 4.91 kg, **peso**

**Piscina de 25 m, 2 m profundidade, temperatura da água a 27.5°C.**

$$\Sigma F = m * a$$



Lima, A.B.; Semblano, P.; Fernandes, D.; Gonçalves, P.; Morouço, P.; Sousa, F.; Fernandes, R.; Barbosa, T.; Correia, M.V.; Tani, G.; Vilas-Boas, J.P. (2006). *A kinematical, imagiological and acoustical biofeedback system for the technical training in breaststroke swimming.*

## Dinâmica inversa:

### Métodos:

$$\Sigma F = m \cdot a$$



A função de variação da aceleração com o tempo foi obtida através de derivação numérica da função  $v(t)$  filtrada:

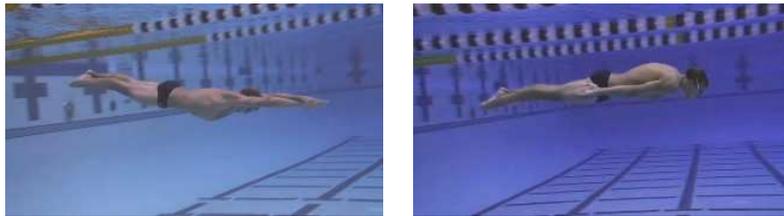
$$a_i = \frac{2v_{i-2} - 16v_{i-1} + 16v_{i+1} - 2v_{i+2}}{24 \Delta t}$$

$$D = m \cdot a$$

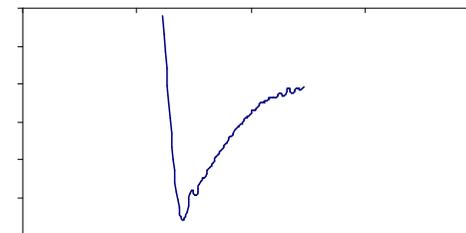
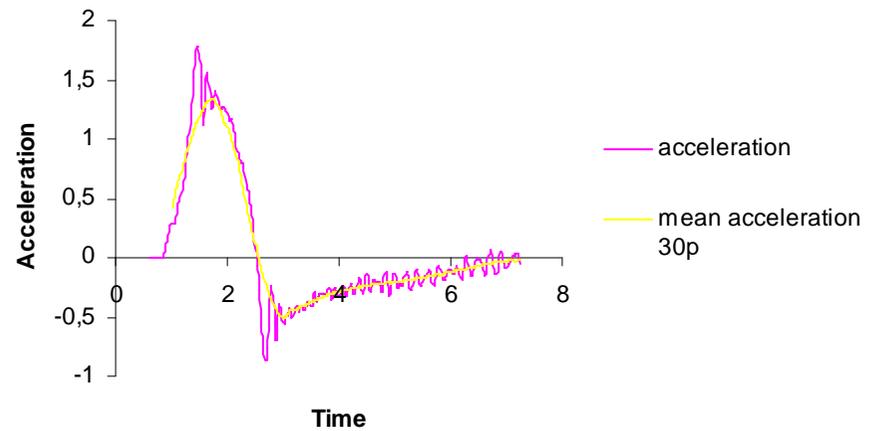
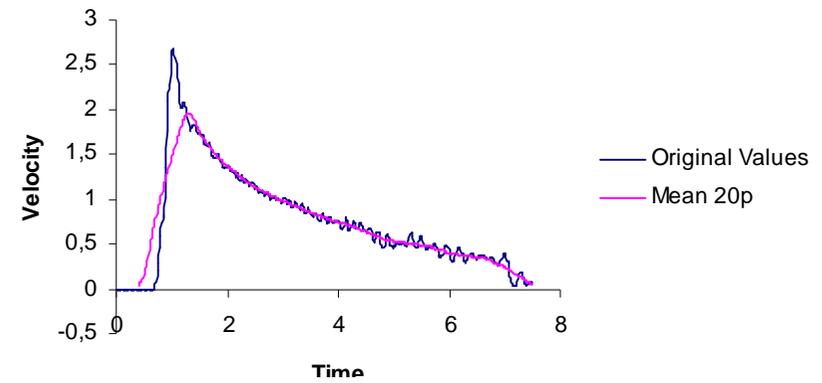
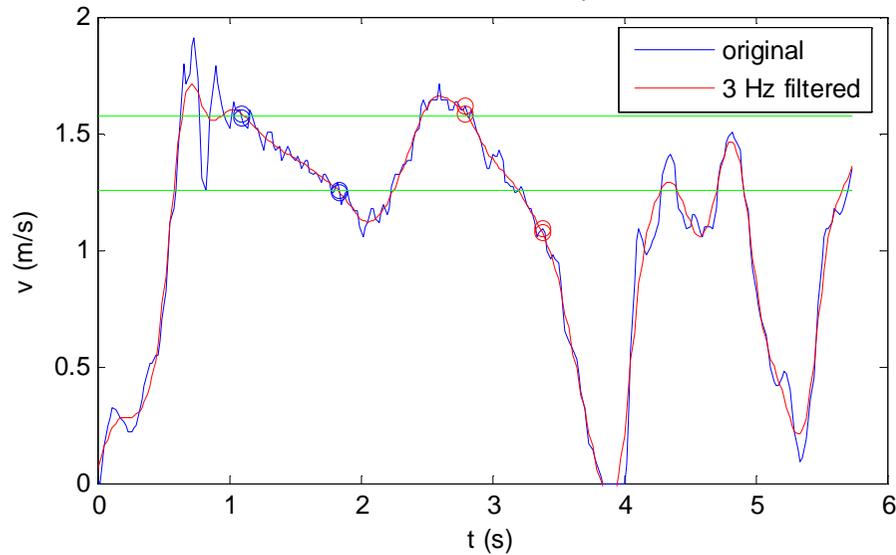
$$C_D = 2 D / \rho S v^2$$

$$\rho = 1 \text{ g.cm}^3 \text{ }^{-1}$$

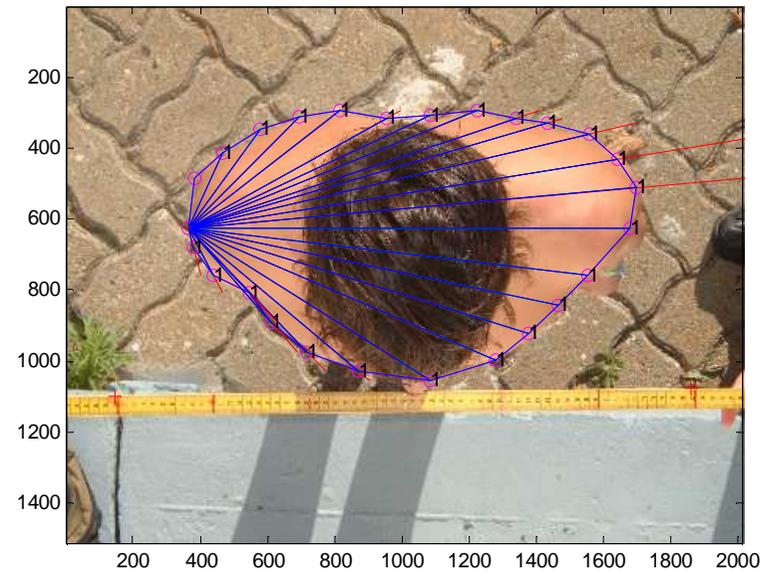
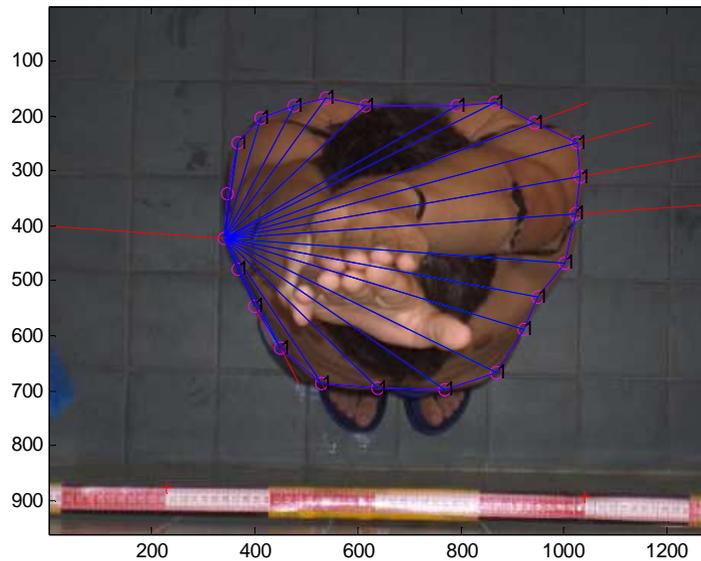
# Determinação de D passivo por dinâmica inversa



measured velocity



**$S [ D = 0.5 \rho C_D S V^2 ]$   
foi determinada por planimetria (Clarys, 1979),  
decompondo a área em triângulos (MatLab)**



## Dinâmica inversa:

## Resultados e discussão:

$$\Sigma F = m * a$$

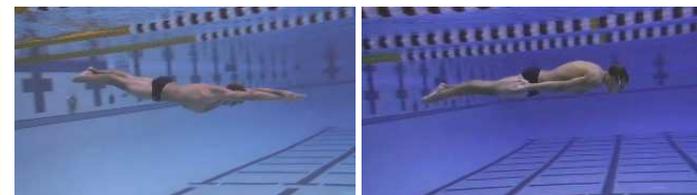


Grupo	$v_1^a_P$ (m.s <sup>-1</sup> )	$v_2^a_P$ (m.s <sup>-1</sup> )	$D_1^a_P$ (N)	$D_2^a_P$ (N)
♂ N=4 (Média ± SD)	1.38 ± 0.16	1.38 ± 0.16	36.12 ± 9.54	43.29 ± 6.41
♀ N=6 (Média ± SD)	1.36 ± 0.10	1.36 ± 0.10	<b>28.68 ± 2.82</b>	<b>49.58 ± 7.47*</b>
<b>Total (Média ± SD)</b>	1.37 ± 0.12	1.37 ± 0.12	<b>31.66 ± 7.04</b>	<b>47.06 ± 7.44*</b>

\* (p ≤ 0.05)

### Velocidades de 1.4 ms<sup>-1</sup> já foram estudadas:

(Counsilman, 1955; Charbonier, 1975; Chatard et al., 1985, 1990; Clarys, 1979; Van Manen et al, 1975, and Miyashita and Tsunoda, 1978; Strojnik and Strumbelj, 1999).



**D [35.3N mulheres (Miyashita and Tsunoda, 1978); 51.9N homens (Clarys, 1979)]**

## Dinâmica inversa:

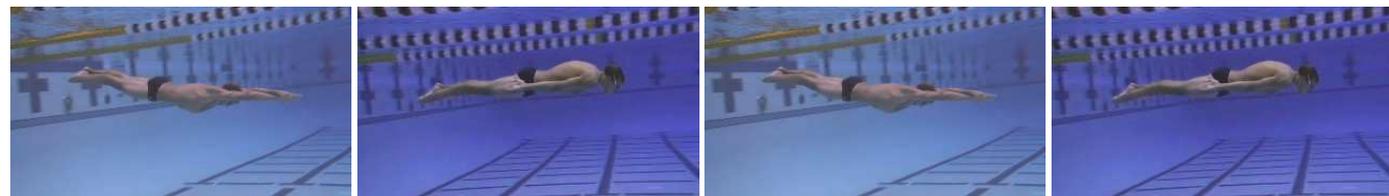
## Resultados e discussão:

$$\Sigma F = m * a$$

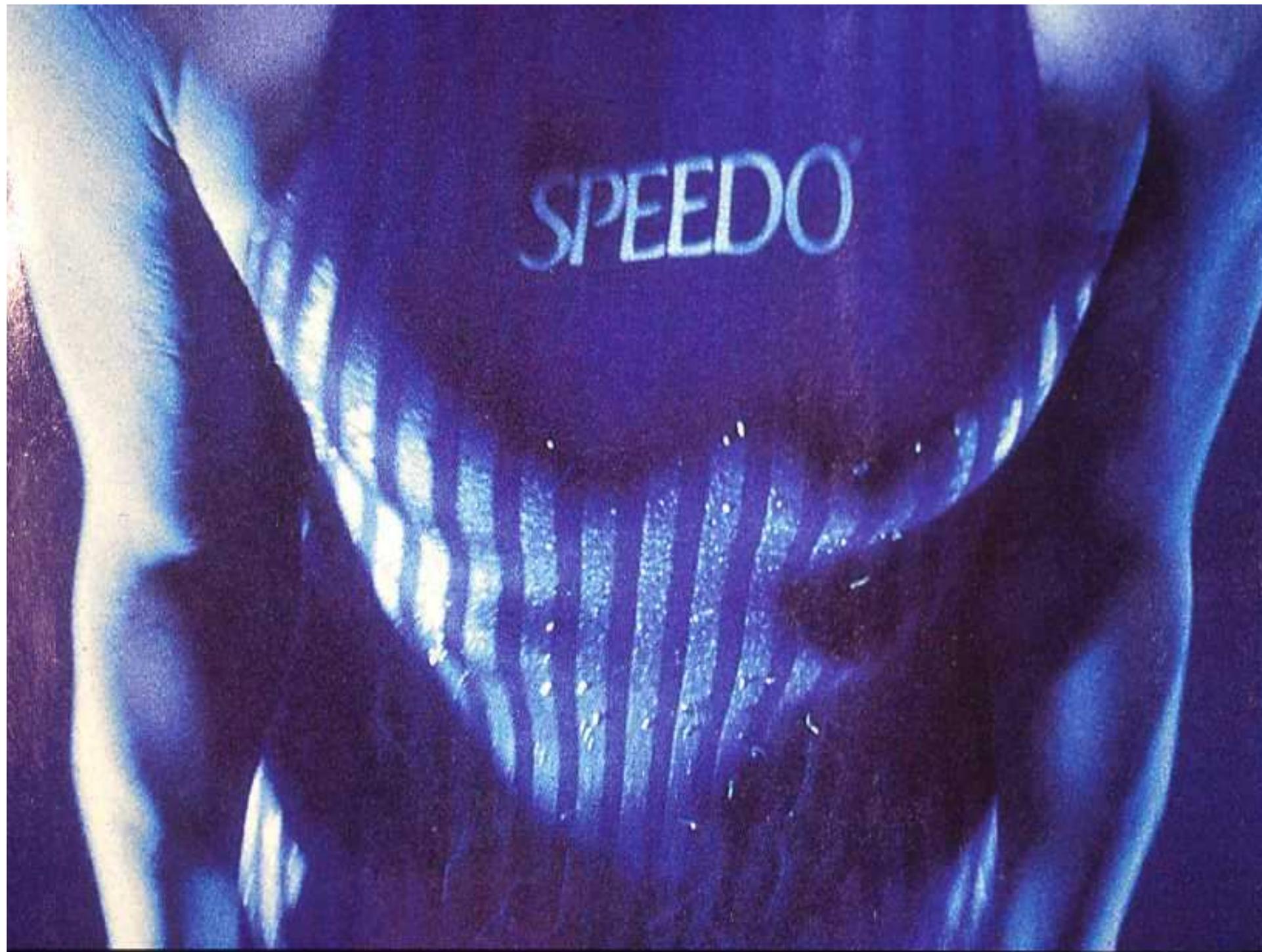


Grupo	$S_1^a_P$ (cm <sup>2</sup> )	$S_2^a_P$ (cm <sup>2</sup> )	$C_{D1}^a_P$	$C_{D2}^a_P$
♂ N=4 (Média ± SD)	755 ± 147	817 ± 122	0.497 ± 0.043	0.649 ± 0.303
♀ N=6 (Média ± SD)	<b>717 ± 82</b>	<b>758 ± 82*</b>	<b>0.441 ± 0.082</b>	<b>0.763 ± 0.166*</b>
<b>Total (Média ± SD)</b>	<b>732 ± 106</b>	<b>782 ± 98*</b>	<b>0.463 ± 0.072</b>	<b>0.717 ± 0.222*</b>

(p ≤ 0.05)



Os valores de S concordam com Clarys (1979) recorrendo a método similar: 766.66±123.887cm<sup>2</sup>



# Biomecânica



## Sumário da exposição

- (ii) exemplos do recurso a soluções de simulação computacional (CFD) em hidrodinâmica propulsiva e resistiva

**II Congreso Internacional de Biomecánica de Venezuela**  
*Isla de Margarita, Venezuela, del 9 al 13 de Septiembre*  
2008

**Determinación del arrastre hidrodinámico en dos  
posiciones de deslice, por dinámica inversa e por  
simulación computacional (CFD)**

Vilas-Boas, Costa, Fernandes, Ribeiro, Figueiredo, Marinho,  
Silva, Rouboa, Machado

**1 sujeito “protótipo”**

**187 cm altura**

**237 cm e 192 cm**

**Comprimento máximo**

**$v = 1.6$  a  $2.0 \text{ ms}^{-1}$**

**(aumentos de 0.1)**

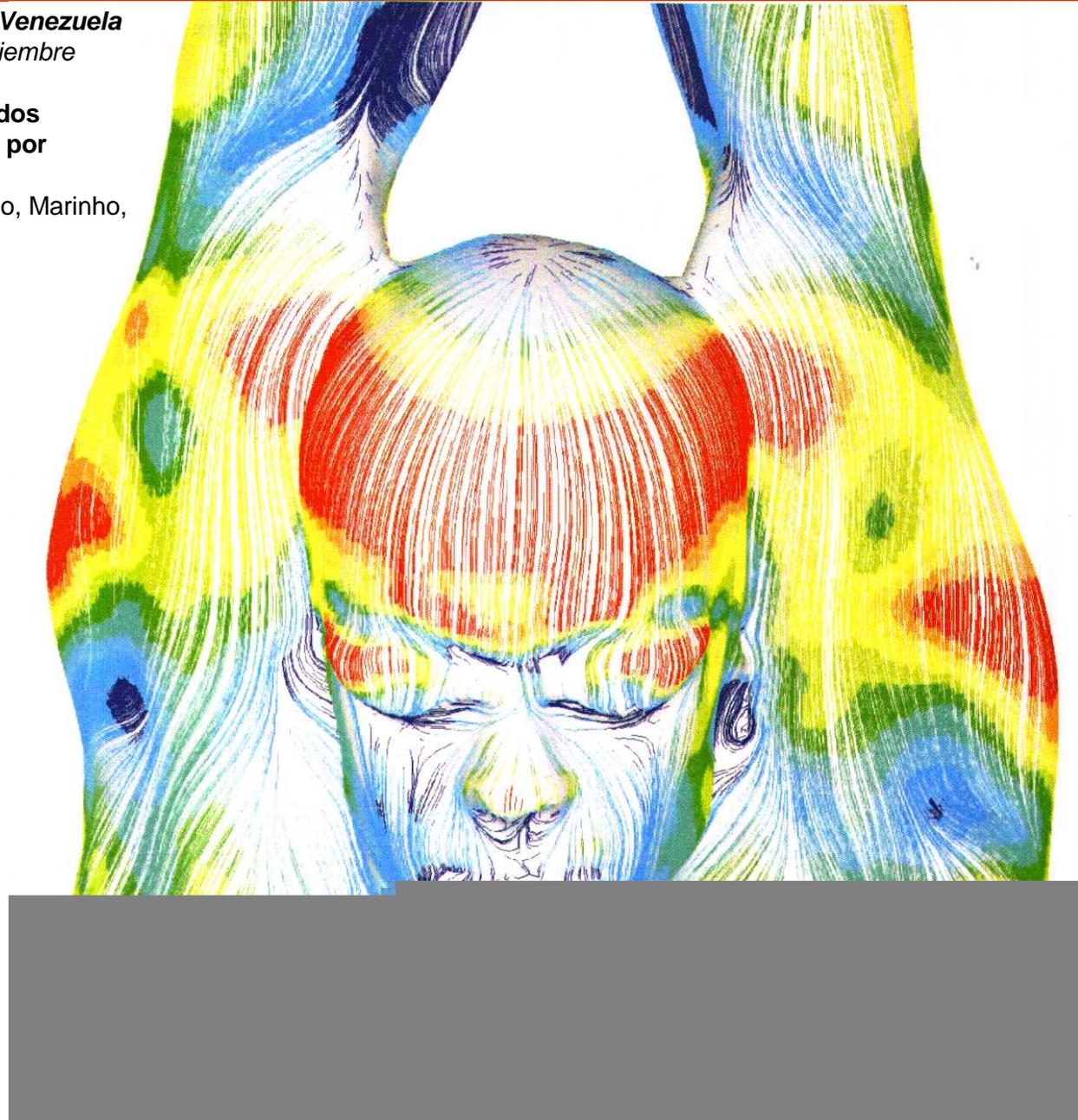
**0.9 m profundidade**

**$\alpha = 0^\circ$**

**$t = 28^\circ\text{C}$**

**$\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$**

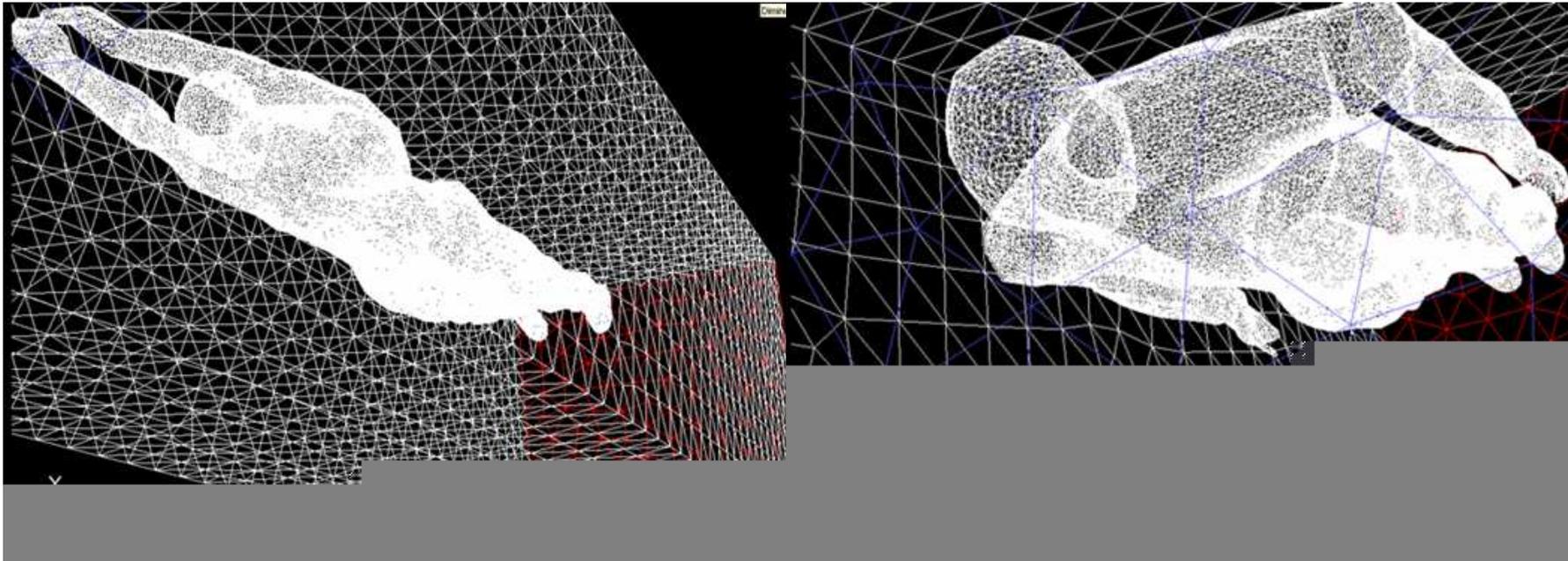
**$\mu = 0.001 \text{ kg/(m.s)}$**



## CFD- Computer Flow Dynamics

### *Fluent*® software

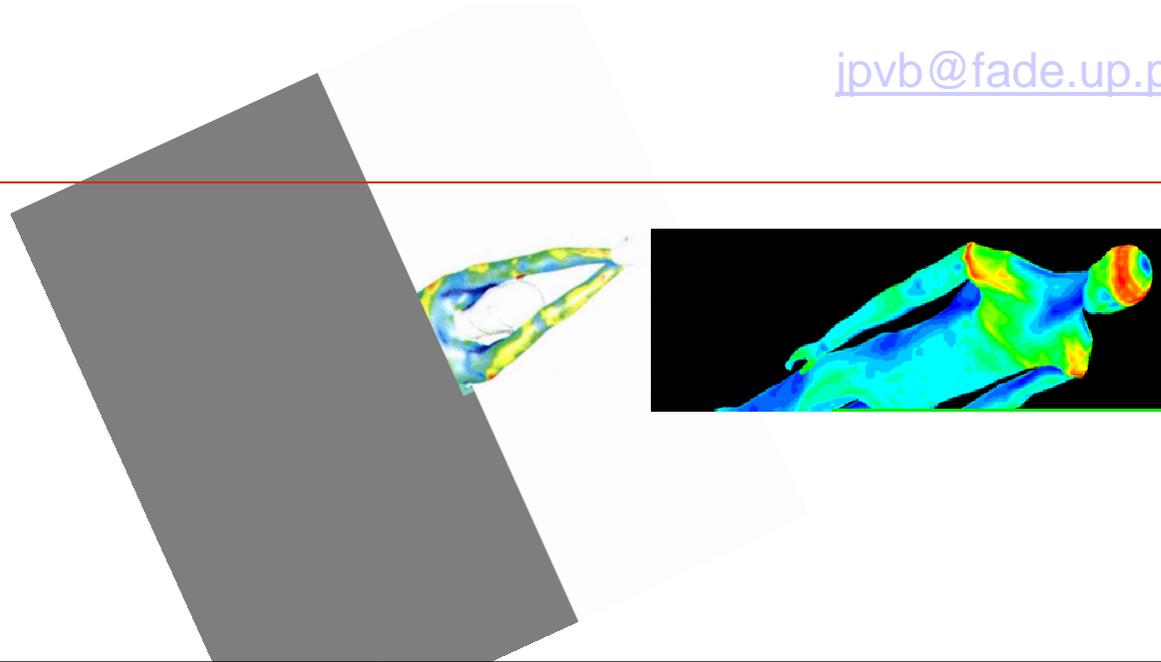
O domínio total foi tramado através de 900 milhões de células prismáticas e piramidais.



A trama foi criada por *Gambit*, aplicação para modelação geométrica *Fluent*.

O código *Fluent* resolve problemas de escoamento substituindo as equações de **Navier-Stokes** por expressões algébricas discretizadas que resolve por computação iterativa.

**Condições de fronteira:** 180 profundidade x 250 largura x (8.0 ou 7.55 comprimento; 200 e 336 para as superfícies anterior e posterior) m – **próximo das condições numa pista.**

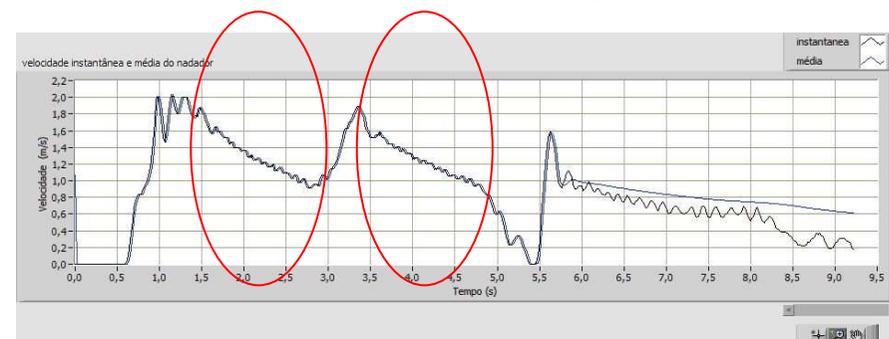


v (ms <sup>-1</sup> )	Coeficiente de arrasto hidrodinâmico (C <sub>D</sub> )					Coeficiente de arrasto hidrodinâmico (C <sub>D</sub> )				
		Primeira posição de deslize (1ªP)					Segunda posição de deslize (2ªP)			
	C <sub>D</sub>	C <sub>D</sub> Pressão		C <sub>D</sub> Fricção		C <sub>D</sub>	C <sub>D</sub> Pressão		C <sub>D</sub> Fricção	
1.6	<b>0.480</b>	0.417	86.95%	0.063	13.05%	<b>0.824</b>	0.758	91.98%	0.066	8.02%
1.7	<b>0.475</b>	0.413	86.98%	0.062	13.02%	<b>0.782</b>	0.719	91.99%	0.063	8.01%
1.8	<b>0.432</b>	0.376	87.01%	0.056	12.99%	<b>0.763</b>	0.702	92.01%	0.061	7.99%
1.9	<b>0.431</b>	0.375	87.03%	0.056	12.97%	<b>0.762</b>	0.701	92.04%	0.061	7.96%
2.0	<b>0.428</b>	0.373	87.04%	0.055	12.96%	<b>0.736</b>	0.677	92.05%	0.059	7.95%

## Comparação entre os resultados de dinâmica inversa e CFD:



	Velocidade de deslize (ms <sup>-1</sup> )	Altura (cm)	$C_D$ $D = 0.5 \rho C_D v^2 S$	$C_D$ $D = 0.5 \rho C_D v^2 S$
Dinâmica inversa	1.37 ± 0.12	178.7 ± 10.5 165.8 ± 3.92	<b>0.463</b> ± 0.072	<b>0.717</b> ± 0.222*
CFD	1.6	187	<b>0.480</b>	<b>0.736</b>



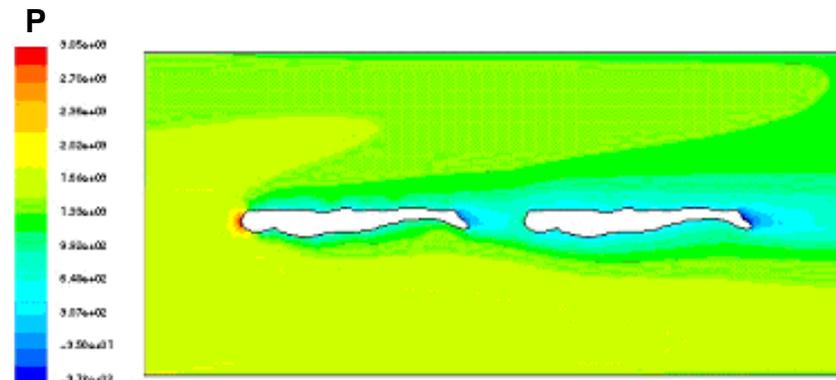
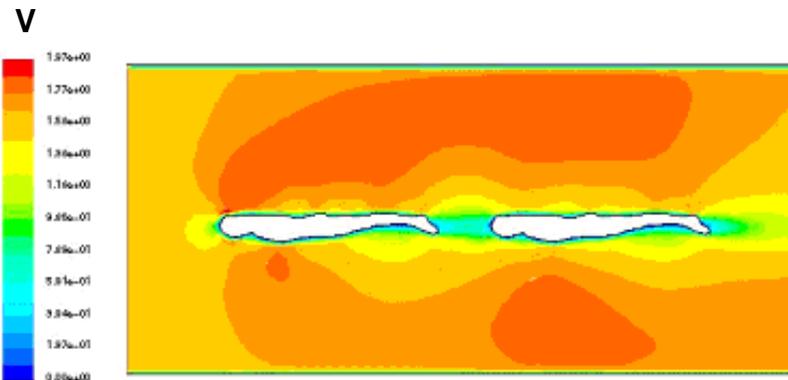
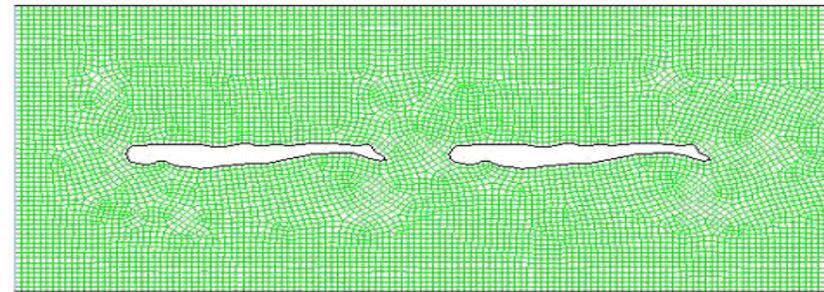
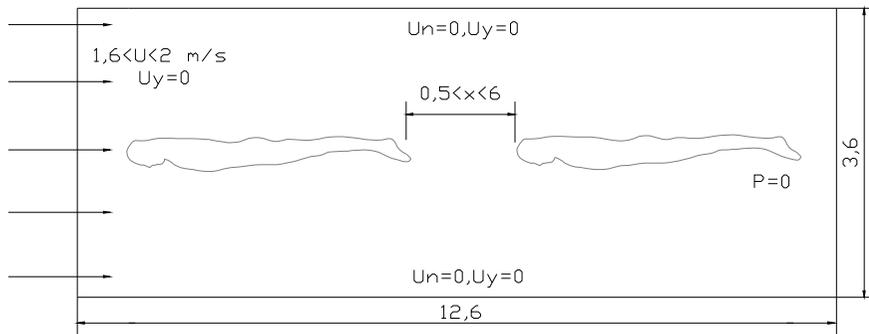
# CFD- Computer Flow Dynamics

## Fluent® software

Moreira, Silva, Rouboa, Reis, Alves, Marinho, Vilas-Boas, Machado (2007).  
 APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TO THE SWIMMING  
 IN TANDEM

Valores médios da relação percentual entre CD em tandem (Cd2) e em natação livre (Cd1) tendo em consideração a distância entre nadadores

	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	8.00
Média	52.70	52.96	53.27	56.84	60.66	60.66	62.46	65.50	67.85	71.45	76.93	79.47	80.75
DP	1.47	1.41	1.34	1.57	1.52	2.91	1.79	0.87	1.65	2.42	2.98	3.11	3.33



# Mecanismos de produção de **propulsão** hidrodinâmica

De acordo com a

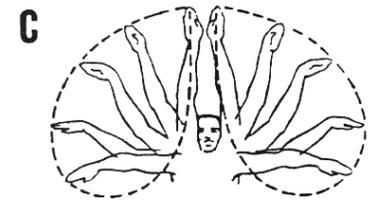
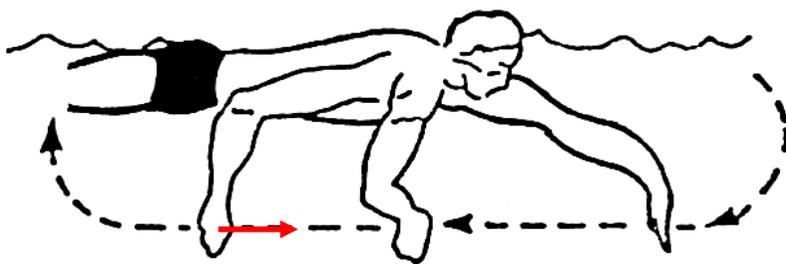
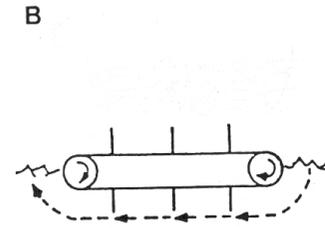
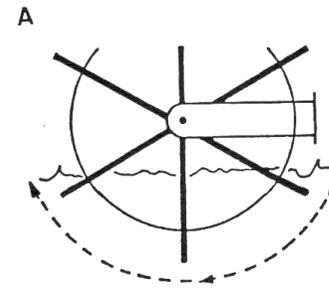
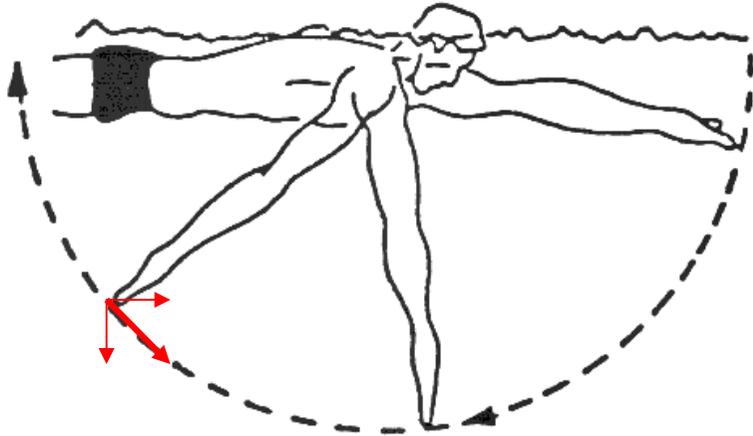
## **Teoria do arrasto propulsivo:**

Os nadadores propulsionam-se através de acções segmentares sucessivas que visam impulsionar água para trás relativamente à direcção pretendida para o deslocamento do corpo.



Fundamentação teórica:

### **Terceira lei de Newton (acção / reacção)**



Schleihauf (1974, 1979, 1984, 1986)

Schleihauf et al. (1983, 1988)

Wood (1979)

Berger (1996)

Berger et al. (1996)

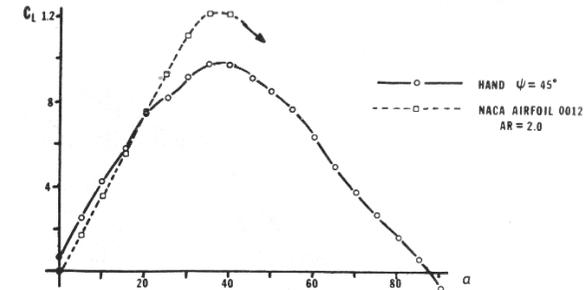
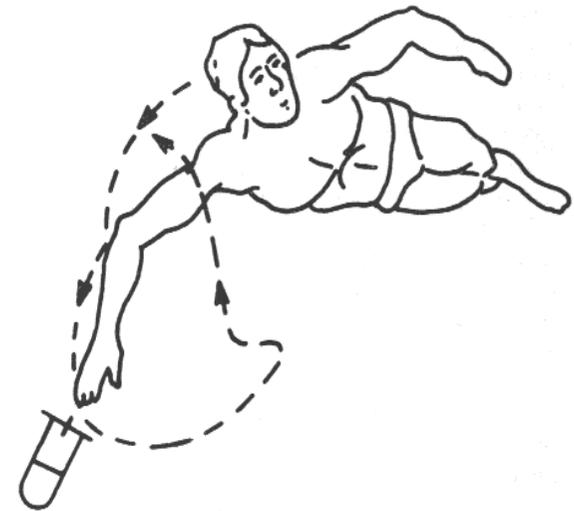
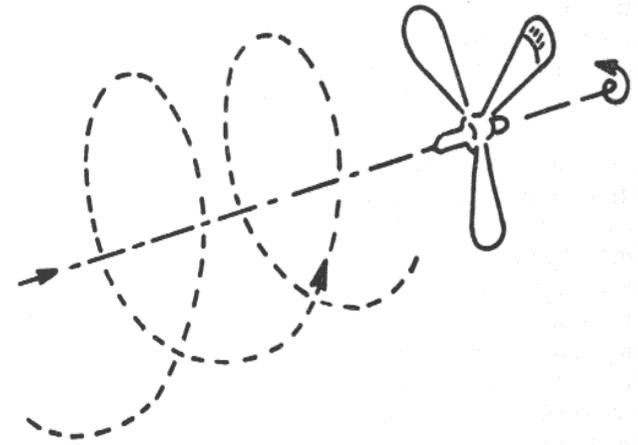
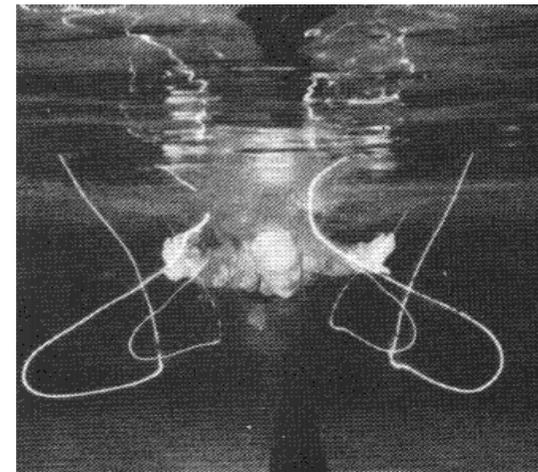
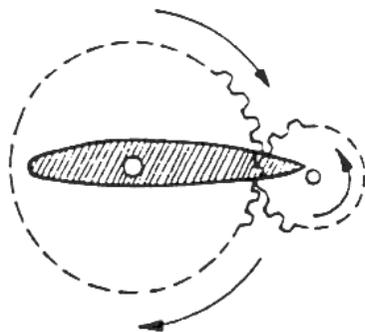
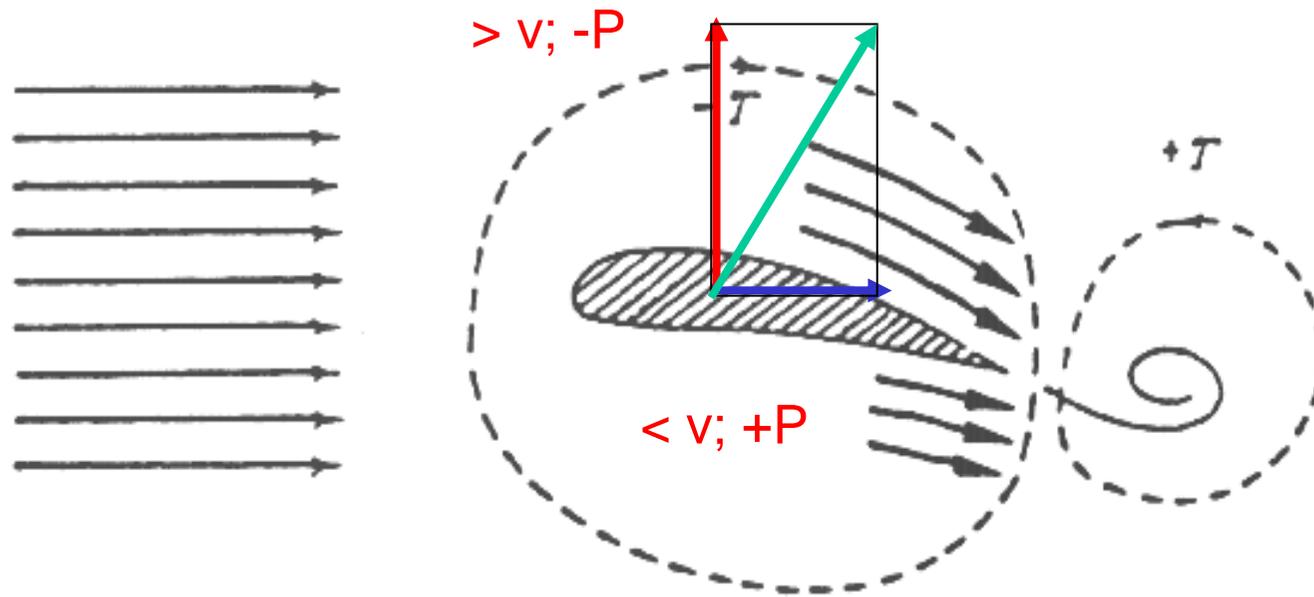
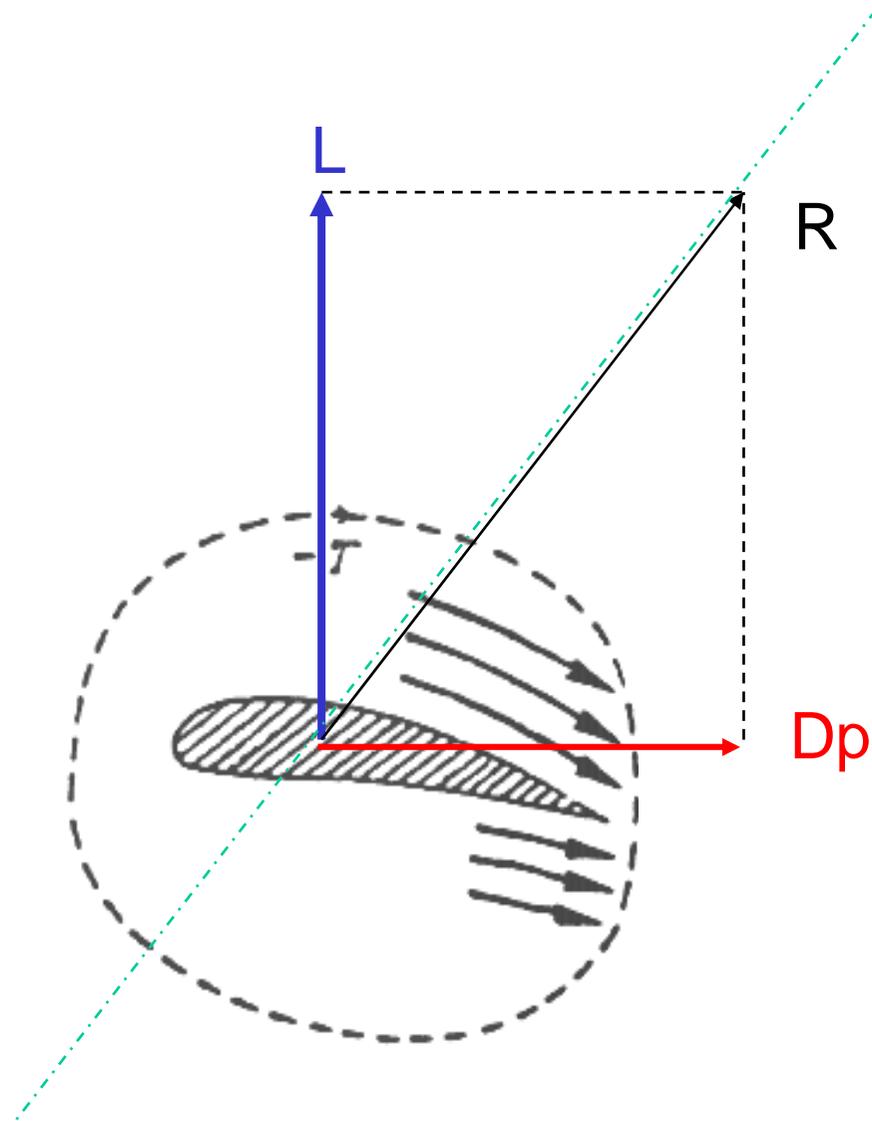


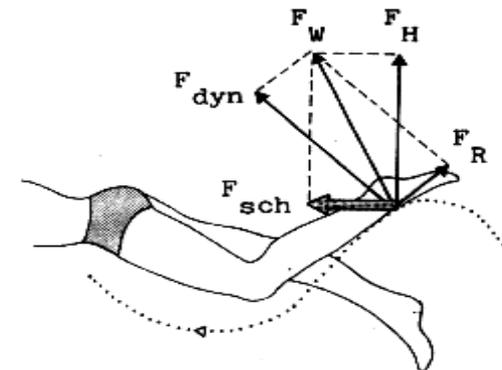
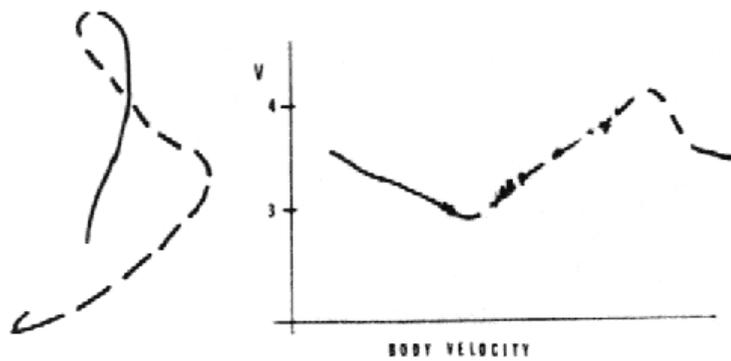
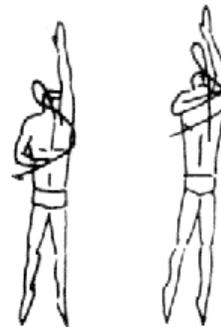
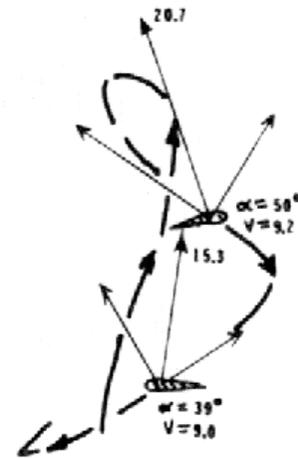
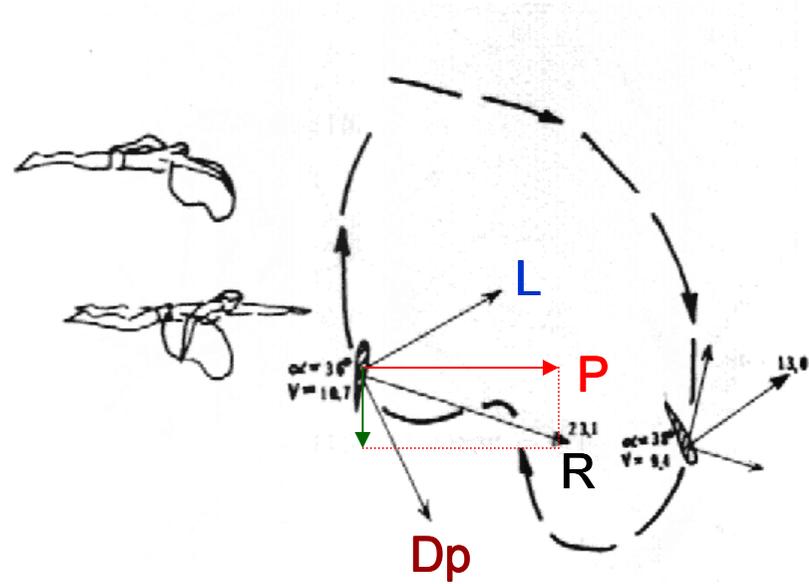
Figure 5. Lift characteristics, hand versus wing (Schleihauf, Jr., 1977).

**A mão humana (e o antebraço) são capazes de produzir força ascensional hidrodinâmica devido à similaridade das suas formas com a forma de uma asa.**

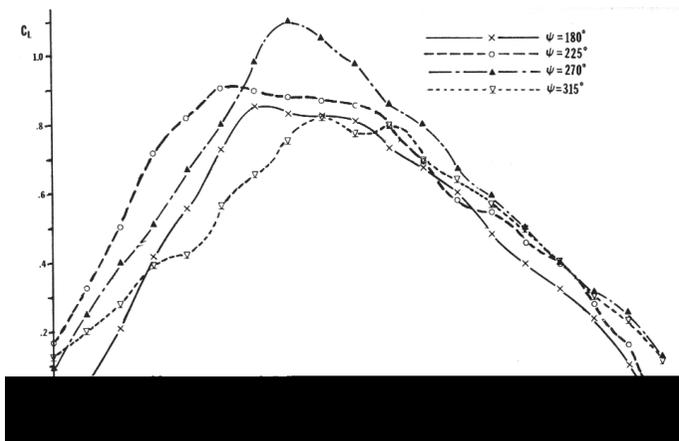
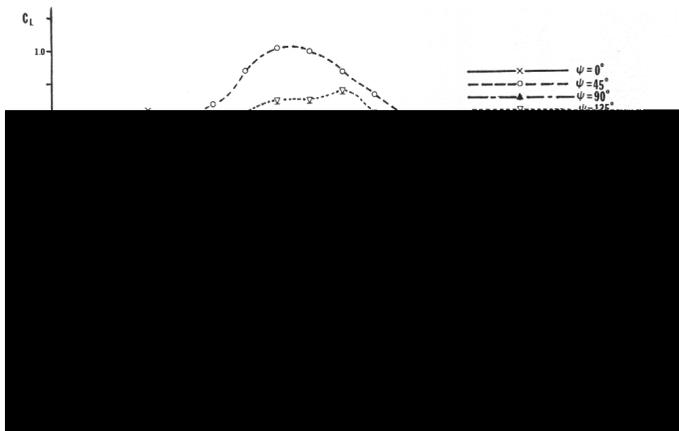




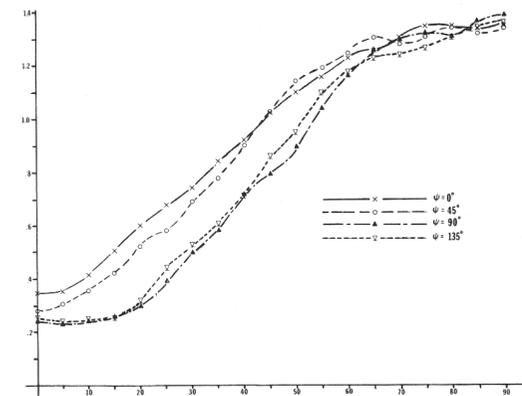




## Valores de $C_L$

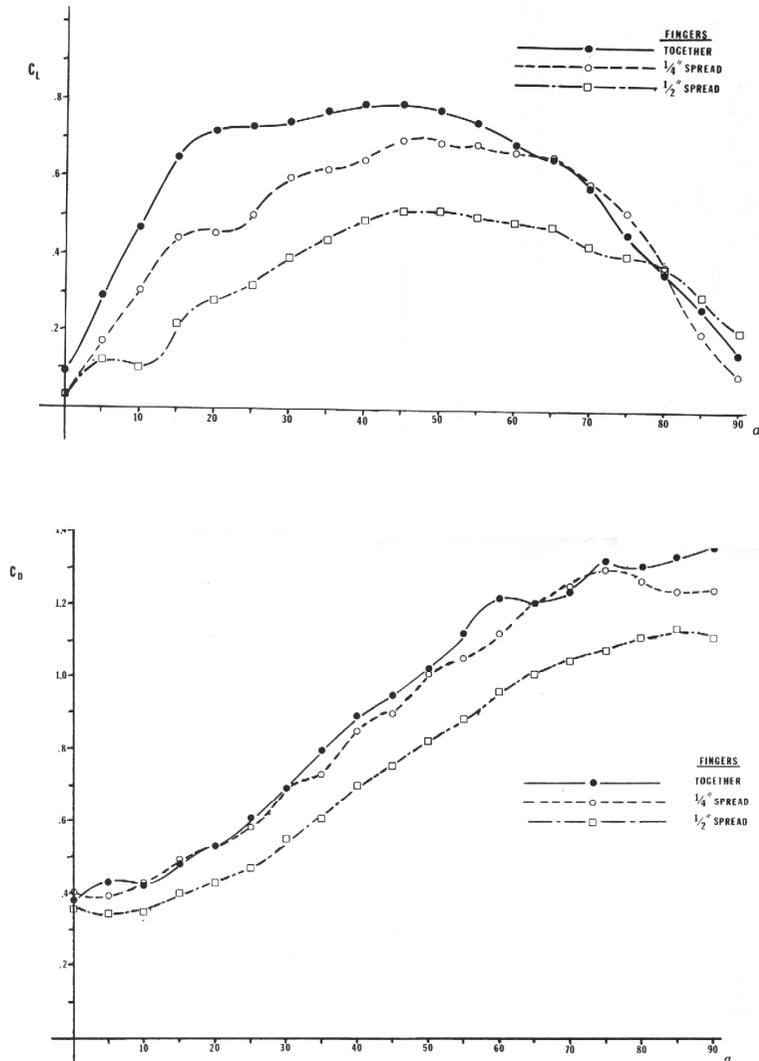


## Valores de $C_D$



Robert Schleihauf Jr. (1979)

## Posição dos dedos



## Posição do polegar

