



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – UFRJ

INSTITUTO DE FÍSICA – UFRJ

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DE FINAL DE CURSO

A FÍSICA DA NATAÇÃO

ANDERSON JOHNSON MEDEIROS MIRON

Rio de Janeiro
Novembro de 2009

ANDERSON JOHNSON MEDEIROS MIRON
DRE:105047781

A FÍSICA DA NATAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Rio de Janeiro

ANDERSON JOHNSON MEDEIROS MIRON
DRE:105047781

A FÍSICA DA NATAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

COMISSÃO EXAMINADORA

_____ Prof.

_____ Prof.

_____ Prof.

Rio de Janeiro, ____ de _____ de 2009

Dedicatória e agradecimentos

Agradeço,

A Deus, que sempre me mostrou a possibilidade da volta por cima;

A minha mãe e irmã, pela assistência e carinho;

Ao meu falecido pai, por ser um grande exemplo em minha vida;

A minha turma do instituto de Física e aos amigos da natação da UFRJ, pela amizade sem igual e ótimo humor;

Ao meu orientador, Carlos Eduardo, pela dedicação e orientação no meu trabalho;

Aos demais professores do Instituto de Física que se preocupam com a formação do professor.

Resumo

A física dos esportes é um campo de estudos potencialmente motivador para os alunos, sejam eles de segundo grau ou universitários. Apesar da riqueza de conteúdos e do interesse que costumam despertar, temas desse tipo não são geralmente tratados nos livros textos de física básica, que deixam de aproveitar suas potencialidades pedagógicas.

Abordamos neste trabalho alguns aspectos da física da natação. Através desse esporte promovemos discussões sobre vários temas de mecânica, indo da cinemática à dinâmica, passando pela estática e, é claro, a mecânica de fluidos. Busca-se com isso despertar a atenção dos alunos, auxiliar a aprendizagem de mecânica, e criar uma ponte interdisciplinar entre o esporte e a sala de aula.

Índice

1. INTRODUÇÃO	7
2. CINEMÁTICA DA NATAÇÃO	8
2.1. Provas de nado livre	9
2.2. Efeito cinemático dos saltos e viradas	12
2.3. Análise comparativa dos diferentes estilos de nado	18
2.4. Evolução dos recordes	22
Referências do capítulo 2	24
3. ESTÁTICA DA FLUTUAÇÃO	25
3.1. Flutuabilidade	25
3.2. Empuxo e o princípio de Arquimedes	27
3.3. Centro de gravidade	27
3.4. Centro de flutuação	28
3.5. Torque na flutuação	30
Referências do capítulo 3	31
4. DINÂMICA DA NATAÇÃO	32
4.1. Propulsão: arrasto ou sustentação?	33
Referências do capítulo 4	36
5. COMENTÁRIOS FINAIS	37

1. Introdução

O presente trabalho consiste numa coletânea de tópicos de Física presentes na prática desportiva da natação. Seu objetivo é promover discussões relacionando o ensino de física com a física dos esportes, aproveitando o interesse que tal conexão costuma despertar entre os estudantes. O trabalho tem três partes principais. Na primeira (capítulo 2) discutimos a cinemática do nado, e tentamos estimar as velocidades máximas alcançadas em cada estilo olímpico de natação. Além da velocidade, calculamos também o tempo que os nadadores ganham com a largada e com as viradas. Na segunda parte do trabalho (capítulo 3), estudamos a estabilidade da flutuação do corpo humano na água, introduzindo conceitos úteis como o centro de empuxo. Por fim, no capítulo 4, falamos das forças propulsivas que movem o nadador e discutimos sua origem hidrodinâmica.

2. Cinemática da natação

Você já se perguntou com que velocidade o ser humano pode nadar? Esta questão aparentemente inocente é ambígua. O corpo humano não é um ponto material, trata-se de um corpo extenso. Ao nadar, movemos diferentes regiões do corpo, cada uma com sua respectiva velocidade. Essa velocidade também varia de acordo com a fase do ciclo de braçada, como mostra a figura 2.1.

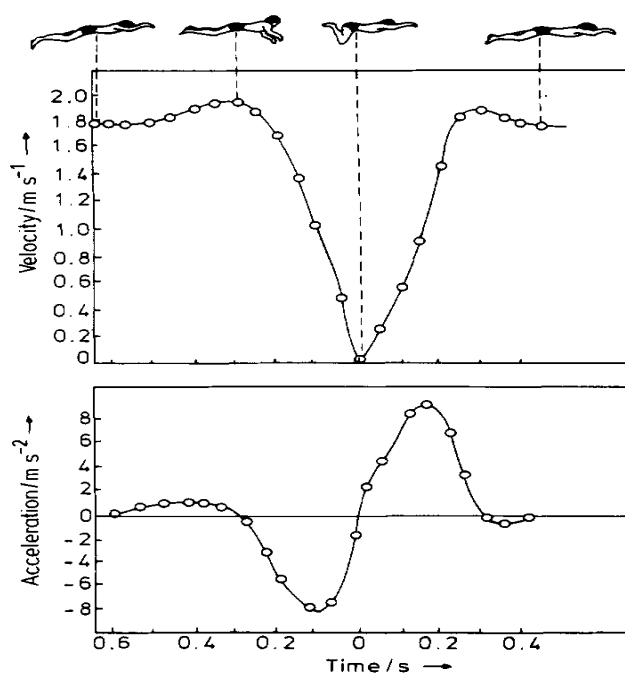


Figura 2.1 Velocidade e aceleração durante um ciclo de nado peito [1].

Uma forma de se determinar a velocidade de um nadador consiste em usar um sensor de movimento; tal recurso é utilizado por técnicos para obter dados precisos dos desempenhos dos atletas, como os mostrados na figura 2.1. Determinar a velocidade do nado usando dados de sensores, no entanto, é difícil

por vários motivos. Tais dados são difíceis de encontrar, e medidas diretas em atletas de ponta são muito trabalhosas e caras para os propósitos de uma atividade didática. Uma alternativa seria utilizar vídeos para calcular a velocidade de nadadores. Embora esse método seja mais simples que o uso de sensores, ele ainda é relativamente complicado, demandando programas de análise de vídeo, calibrações, etc. Outra possibilidade, que investigaremos neste trabalho, é explorar os tempos recordes em provas de diferentes distâncias nos estilos olímpicos, obtendo daí os dados necessários para calcular a velocidade máxima com que uma pessoa pode nadar nos dias de hoje. A grande vantagem desse método é o fácil acesso aos dados e um procedimento de análise bastante simples.

2.1. Provas de nado livre

A tabela abaixo nos fornece o tempo recorde para as provas de 50 até 1500 metros no estilo nado livre, para homens e mulheres [2].

Prova (m)	Recorde masc. (s)	Recorde fem. (s)
50	20.94	23.73
100	46.91	52.07
200	102.00	112.98
400	220.07	239.15
800	452.12	494.10
1500	874.56	942.54

Tabela 2.1. Tempos recorde no nado livre em piscinas de 50m, masculino e feminino [2].

Podemos tentar obter as velocidades médias do nado nessas provas, utilizando a relação cinemática

$$V_m = D / T \quad (1)$$

onde D é a distância percorrida e T o tempo de percurso. Com os dados da tabela 2.1, obteremos as seguintes velocidades médias:

Prova (m)	V_m masc. (m/s)	V_m fem. (m/s)
50	2.39	2.11
100	2.13	1.92
200	1.96	1.77
400	1.82	1.67
800	1.77	1.62
1500	1.72	1.59

Tabela 2.2. Velocidades médias no nado livre masculino e feminino.

Analisando os resultados da tabela 2.2, nota-se uma grande diferença de velocidade (da ordem de 10%) entre as prova de 50 e 100 metros. Tal diferença poderia ser creditada ao cansaço do atleta. No entanto, essa explicação é problemática, pois se compararmos a prova de 800 metros com a de 1500 metros, a distância praticamente dobra (assim como nas provas de 50 e 100 metros) e o decréscimo de velocidade não é tão grande (~2–3%). A disparidade entre as velocidades médias das provas de curta distância pode ser justificada pelo ganho de tempo do nadador na largada (o salto para a piscina), além das viradas de 50 em 50 metros. Esses detalhes passam despercebidos pela relação definida na equação 1. Como veremos mais à frente, a largada e as viradas explicam as diferenças na velocidade média melhor que o efeito do cansaço.

Uma análise mais detalhada da velocidade no nado livre pode ser realizada com o auxílio de gráficos. Na figura 2.2 mostramos os recordes das provas de 50 a 1500 metros (os dados da tabela 2.1), na forma de gráficos *distância x tempo* [3].

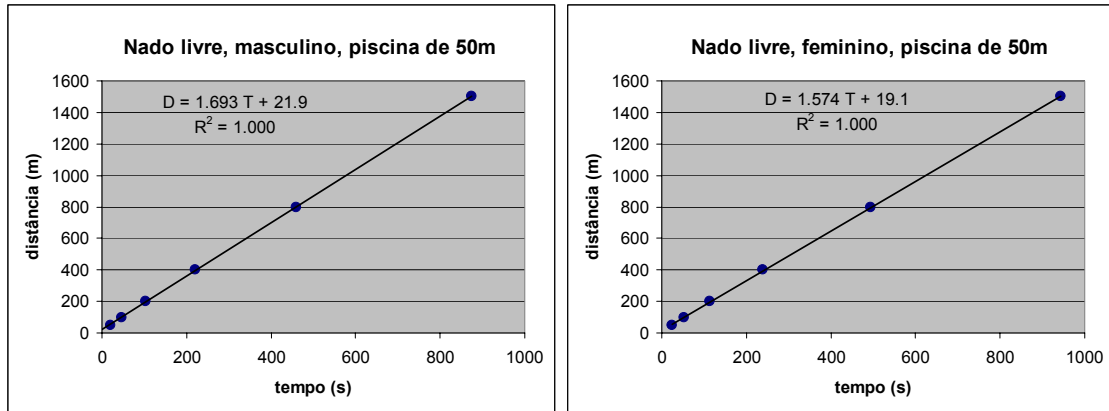


Figura 2.2. Distância percorrida vs. tempo recorde no nado livre masculino e feminino.

Uma linha reta foi ajustada aos pontos de cada gráfico da figura 2.2. Essas retas podem ser escritas como

$$D = U T + D_0 \quad (2)$$

onde D é a distância da prova, U é o coeficiente angular (que está relacionado à velocidade do nadador), T o tempo recorde do percurso e D_0 é o coeficiente linear (que, como veremos, depende do tempo ganho na largada e viradas). A tabela 2.3 mostra os parâmetros obtidos no ajuste da figura 2.2.

	U (m/s)	D_0 (m)	Índice de correlação
Masculino	1,693	21,9	$R^2 = 1,000$
Feminino	1,574	19,1	$R^2 = 1,000$

Tabela 2.3. Parâmetros ajustados às provas de nado livre entre 50 e 1500m.

O coeficiente de correlação R^2 é um indicador que varia entre 0 e 1 e descreve a confiança na hipótese de que os dados estão sobre uma linha reta.

Quanto mais confiável a hipótese, mas próximo o valor de R^2 estará de 1. Vemos que em ambos os casos os dados são muito bem descritos por uma linha reta.

A linearidade dos dados mostrados na figura 2.2 fornece uma “velocidade” (o parâmetro U) praticamente independente da distância da prova. O coeficiente linear D_0 descreve o efeito da largada que foi ignorado na tentativa de obter a velocidade do nado usando a equação 1. Na próxima seção discutiremos detalhadamente o significado dos parâmetros U e D_0 . Como veremos, a velocidade do nado ainda não pode ser identificada com o valor do parâmetro U , pois esse contém o efeito das viradas que ocorrem a cada 50 metros.

2.2. Efeito cinemático dos saltos e viradas

Analisaremos agora a influência do salto e das viradas nas provas de natação, e veremos como o resultado modifica nossa estimativa da velocidade de nado. Com essa análise poderemos responder algumas perguntas interessantes sobre a natação competitiva. Por exemplo, quanto tempo é ganho com o salto? Ou ainda, um nadador de alta performance ganha ou perde tempo ao efetuar uma virada na borda da piscina?

Sabemos que comprimento de uma piscina olímpica utilizada nas competições é de 50 metros. Para tais provas o atleta não parte dando braçadas; é permitido saltar na piscina. Isso lhe dá um ganho de tempo, pois o salto é mais vantajoso do que os ciclos de braçada. Para provas acima de 50 metros surge um outro fator, as viradas. Não sabemos, *a priori*, se elas são vantajosas, ou seja, se o atleta faz uma economia de tempo ao virar a cada 50 metros ou se seria melhor

que ele simplesmente cumprisse a prova num percurso reto, em piscinas de 100 ou 200 metros de comprimento, por exemplo.

Nossa análise cinemática do que ocorre nas provas de natação é baseada num modelo muito simples, que descreveremos a seguir. Numa prova de percurso D o nadador percorre a piscina N vezes, onde

$$N = D / L \quad (3)$$

e L é o comprimento da piscina. O tempo gasto na prova é

$$T = D / V - T_L - (N - 1) T_V \quad (4)$$

onde V é a velocidade do nadador, T_L é o tempo *ganho* na largada (por isso o sinal negativo) e T_V é o tempo *ganho* em cada uma das $N - 1$ viradas. Estamos supondo que haverá um ganho nas viradas; se isso não ocorrer obteremos um valor negativo para T_V . Substituindo a equação (3) na (4) encontramos

$$T = D / V - T_L - (D/L - 1) T_V \quad (5)$$

que pode ser escrito como

$$T = D (1 / V - T_V / L) - T_L + T_V \quad (6)$$

Definindo

$$1 / U = 1 / V - T_V / L \quad (7)$$

e

$$D_0 = (T_L - T_V) U \quad (8)$$

a equação (6) pode ser colocada na forma

$$D = U T + D_0 \quad (9)$$

que é a mesma que usamos para analisar os dados na seção anterior. Os valores dos parâmetros U e D_0 que obtivemos nessa análise dão informações sobre as

quantidades que nos interessam: a velocidade de nado V e os ganhos na largada e virada, T_L e T_V . Mas, infelizmente, com apenas dois parâmetros não podemos determinar completamente essas três quantidades – precisamos de mais informação.

Essa informação pode vir da comparação entre provas realizadas em piscinas curtas (25m) e piscinas longas (50m). Se a prova é realizada numa piscina de comprimento $L' \neq L$, o tempo de percurso será

$$T' = D (1/V - T_V/L') - T_L + T_V \quad (10)$$

onde fizemos a hipótese (bem razoável) de que a velocidade do nadador e seus tempos de virada e largada não dependem do tamanho da piscina. A diferença entre os tempos nas duas piscinas é, então,

$$\Delta T = T - T' = T_V D (1/L' - 1/L) \quad (11)$$

Tomando $L' = 25$ metros e $L = 50$ metros, a relação acima torna-se

$$\Delta T = (T_V / 50 \text{ m}) D \quad (12)$$

ou seja, num gráfico ΔT vs. D , os pontos devem alinhar-se numa reta que passa pela origem e tem coeficiente angular $T_V / 50 \text{ m}$.

As diferenças entre os tempos recordes em piscinas de 50 e 25 metros, em provas de nado livre masculinas, estão listadas na tabela 2.4.

Distância (m)	T₅₀ (s)	T₂₅ (s)	ΔT (s)
50	20.94	20.30	0.64
100	47.05	44.94	2.11
200	102.96	100.83	2.13
400	220.07	214.58	5.49
800	458.65	443.42	15.23
1500	874.56	850.10	24.46

Tabela 2.4. Diferença entre os recordes em piscinas de 50 e 25 metros, em provas masculinas de nado livre.

A diferença ΔT está mostrada na figura 2.3 como função de D . Podemos verificar que a dependência linear prevista pela eq. 12 é razoavelmente seguida pelos dados. Vemos também que ΔT é positivo, ou seja, as viradas são *vantajosas* e realmente dão um ganho de tempo ao nadador (T_V é positivo). As provas em piscina de 25 metros têm mais viradas e por isso são mais rápidas.

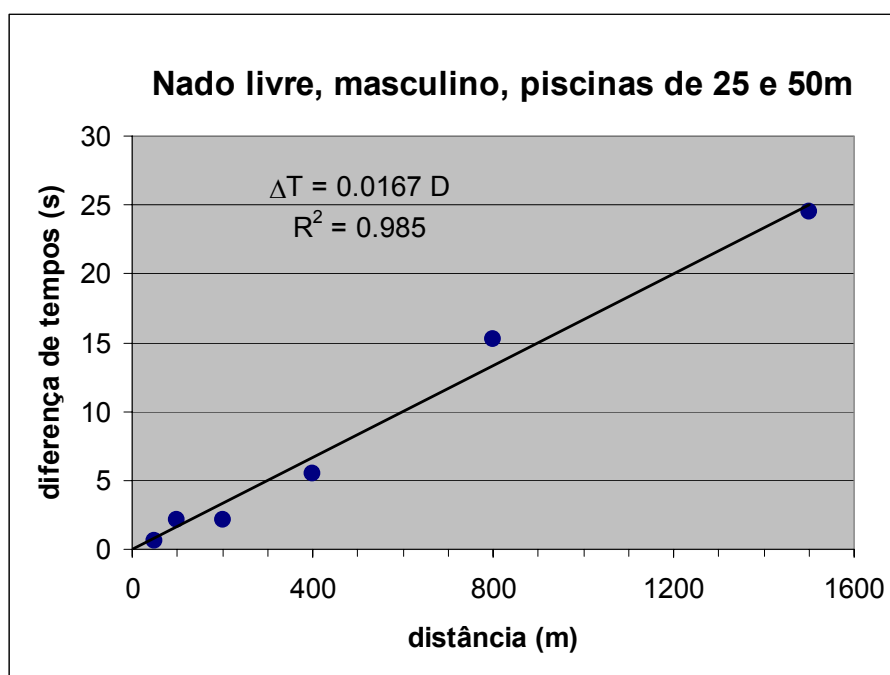


Figura 2.3. Diferença de tempo entre piscinas de 50 e 25 metros como função da distância percorrida. As provas são de nado livre masculino.

O coeficiente angular do gráfico na figura 2.3 é 0,0167 s/m. Portanto, pela eq. 12 obtemos

$$T_V = (0,0167 \text{ s/m}) \times (50 \text{ m}) = 0,84 \text{ s} \quad (13)$$

Esse é um valor relativamente pequeno, se considerarmos que numa piscina de 50 m as viradas ocorrem a cada 25 s, aproximadamente. Vemos que o

efeito da virada sobre a velocidade média do nadador deve ser da ordem de 3% (talvez um pouco menos se, para o mesmo percurso, a velocidade média dos nadadores em piscinas de 25 m for maior que nas piscinas de 50 m). Isso não parece muito, mas pequenas variações nesse ganho podem ser decisivas em provas que são definidas por centésimos de segundos. Para confirmar esse valor, façamos o seguinte raciocínio: numa prova de 50 metros não há virada na piscina olímpica; no entanto, na piscina curta, o atleta percorre 25 metros, faz a virada e nada mais 25 metros. Logo, se subtrairmos o tempo de execução dessas duas provas obteremos a vantagem que o atleta leva ao efetuar tal manobra. Observando a primeira linha da tabela 2.4, vemos que esse ganho corresponde a 0,64 segundos. Tal valor é bem próximo do obtido graficamente, que leva em consideração todos os tipos de prova.

Com esse valor de T_V e com os parâmetros U e D_0 da tabela 2.3, podemos calcular a velocidade V e o tempo de largada T_L . Das equações (7) e (8) temos que

$$T_L = T_V + D_0 / U \quad (14)$$

e

$$V = U / (1 + U T_V / L) \quad (15)$$

que leva aos resultados

$$T_L = 13,7 \text{ s} \quad (16)$$

e

$$V = 1,65 \text{ m/s} \quad (17)$$

O tempo de largada que encontramos, aproximadamente 14 s, parece exageradamente grande. Isso provavelmente se deve a um efeito que não

consideramos no nosso modelo: a diminuição da velocidade nas provas mais longas. Nós fizemos a hipótese de que a velocidade V é independente da prova, o que certamente é apenas uma aproximação. Uma abordagem mais precisa deve supor que a velocidade é função da distância da prova, $V = V(D)$, com $dV(D)/dD < 0$. Não tentaremos, aqui, desenvolver modelos para a função $V(D)$, o que complicaria a análise dos dados. No entanto, podemos notar que efeito da variação da velocidade com a distância não será tão grande se incluirmos apenas as “provas rápidas” na análise. Isso está feito na figura 2.4, que mostra a relação entre distância e tempo restrita às provas de 50, 100 e 200 metros.

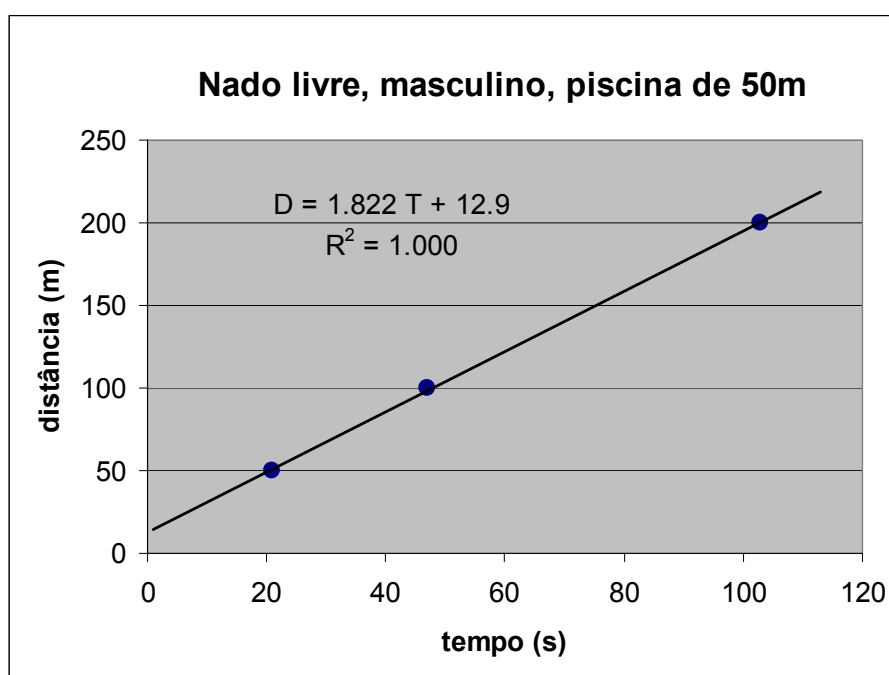


Figura 2.4. Distância vs. tempo nas provas “rápidas” de nado livre masculino.

O ajuste da linha reta aos dados da figura 2.4 conduz aos valores

$$T_L = 7,9 \text{ s} \quad (18)$$

e

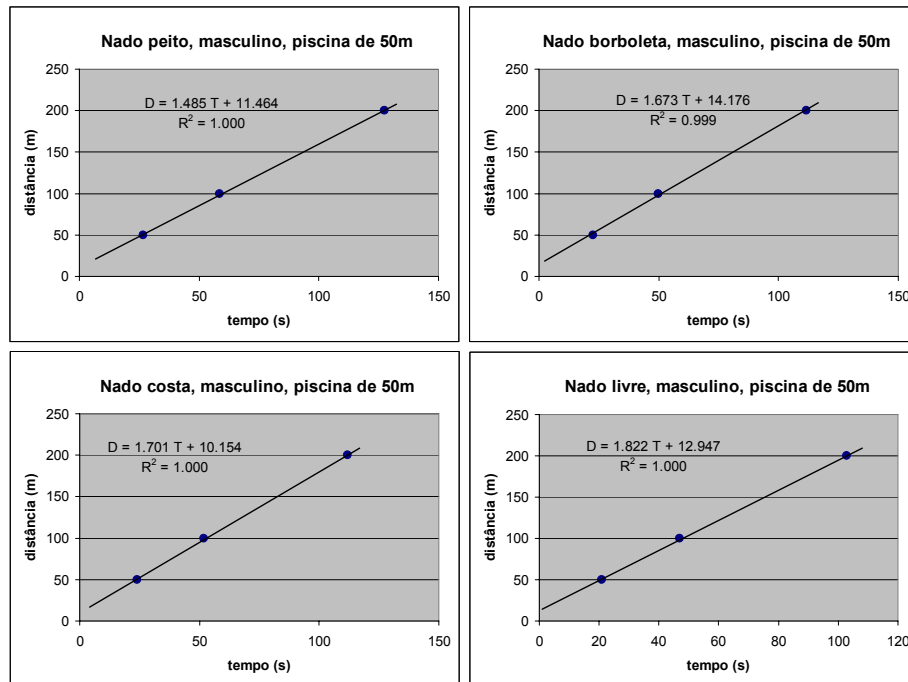
$$V = 1,77 \text{ m/s} \quad (19)$$

para o tempo de largada e a velocidade (o tempo de virada T_V não depende de V e, portanto, não muda). Vemos que a velocidade aumenta um pouco quando nos restringimos à provas mais curtas, como seria de se esperar, mas o principal efeito da restrição é reduzir substancialmente do tempo de largada para 7,9 s. Esse valor é bem mais razoável que o tempo de 13,7 s obtido anteriormente, embora ainda pareça alto (valores mais realistas deveriam ser da ordem de 2–4 s).

Assim, e esse é nosso principal resultado, concluímos que um atleta de ponta é capaz de nadar distâncias apreciáveis a 1,8 m/s, ganha cerca de 8 s na largada da prova (provavelmente bem menos), e a cada virada tem um ganho extra de aproximadamente 0,8 s. O tempo ganho na largada é o parâmetro cuja determinação é mais incerta, mas um cálculo melhor exigiria modelos mais sofisticados para a cinemática das provas.

2.3. Análise comparativa dos diferentes estilos de nado

Podemos repetir a análise do nado livre para os outros estilos de natação. A figura 2.5 mostra gráficos da distância x tempo recorde para as provas clássicas olímpicas (50 metros, 100 metros e 200 metros) nos estilos peito, borboleta e costa, para homens [2]. O nado livre também foi incluído, para facilitar a comparação, embora já tenha sido discutido na seção anterior.



Figuras 2.5. Distância vs. tempo recorde nas provas masculinas de 50, 100 e 200 metros no estilo peito, borboleta, costa e livre [2].

As linhas retas mostradas nos gráficos da figura 2.5 foram ajustadas aos dados. Assim como na seção anterior, podemos escrever a equação dessas linhas como $D = U T + D_0$ (veja a eq. 9). Os parâmetros U e D_0 que resultam dos ajustes estão mostrados na tabela 2.5. Na tabela também mostramos os valores de $T_0 = D_0 / U$.

	U (m/s)	D_0 (m)	T_0 (s)
Livre	1,82	12,9	7,1
Costas	1,70	10,2	6,0
Borboleta	1,67	14,2	8,5
Peito	1,49	11,5	7,7

Tabela 2.5. Parâmetros ajustados às provas masculinas de 50, 100 e 200 metros. O tempo T_0 é dado por D_0/U .

Como vimos na seção anterior, os parâmetros U e $T_0 = D_0 / U$ estão relacionados à velocidade do nado e ao tempo ganho na largada por (veja as eqs. 14 e 15)

$$T_L = T_0 + T_V$$

e

$$V = U / (1 + U T_V / L).$$

Também já vimos, no caso do nado livre, que o tempo ganho na virada é relativamente pequeno, bem menor que o tempo ganho na largada ou o gasto para percorrer a piscina (ou seja, $T_V \ll T_0$ e $T_V \ll L / U$). Assim, podemos simplificar nossa análise considerando que $T_V \approx 0$ e, portanto,

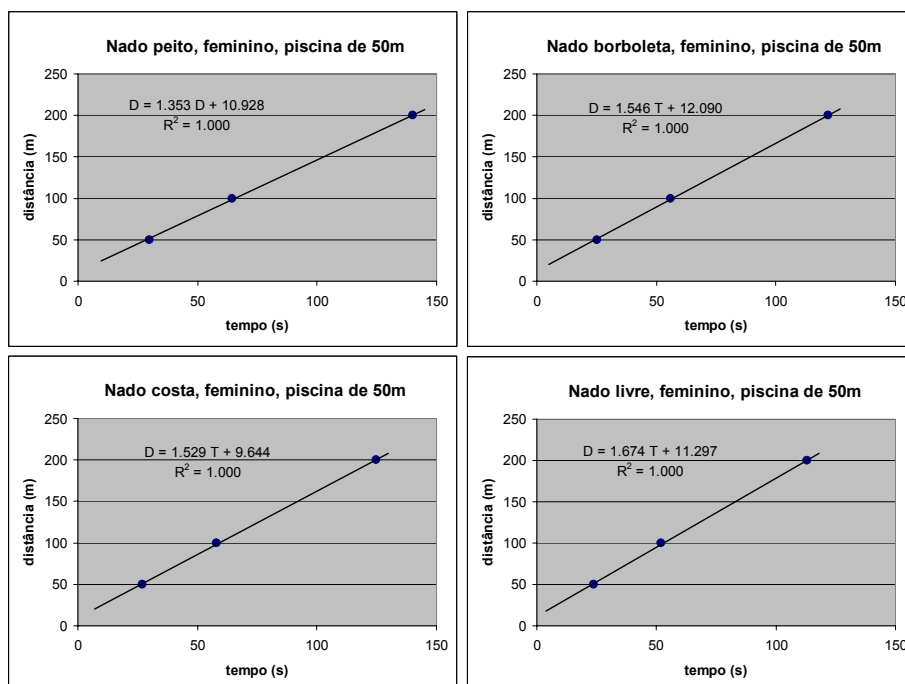
$$T_L \approx T_0 \tag{20}$$

e

$$V \approx U \tag{21}$$

Com essa aproximação, a tabela 2.5 nos dá diretamente a velocidade e o tempo ganho na largada dos diversos tipos de nado. Observa-se que o nado livre é o mais rápido de todos, seguido pelo de costas, borboleta e peito. O fato do nado de costa aparecer mais veloz que o borboleta provavelmente é um efeito de termos desprezado a redução da velocidade com a distância da prova. Essa aproximação é mais questionável nas provas de borboleta (reconhecidamente o estilo mais desgastante) que nas demais, o que deve estar distorcendo os resultados relativos. O mesmo efeito deve ser responsável pelo tempo de largada encontrado no estilo borboleta ser o mais elevado de todos.

Nas provas femininas encontramos resultados semelhantes. A figura 2.6 mostra os gráficos da distância vs. tempo recorde para as provas de 50 a 200 metros, nos quatro estilos.



Figuras 2.6. Distância vs. tempo recorde nas provas femininas de 50 a 200 metros nos estilos peito, borboleta, costa e livre [2].

Os parâmetros U e D_0 correspondentes às retas ajustadas aos dados da figura 2.6 estão listados na tabela 2.6, assim como o valor de $T_0 = D_0 / U$.

	U (m/s)	D_0 (m)	T_0 (s)
Livre	1,67	11,3	6,8
Costas	1,53	9,6	6,3
Borboleta	1,55	12,1	7,8
Peito	1,35	10,9	8,1

Tabela 2.6. Parâmetros ajustados às provas femininas de 50, 100 e 200 metros. O tempo T_0 é D_0 / U .

Assim como nas provas masculinas, o nado livre foi o mais rápido dos 4 estilos. Desta vez o segundo mais veloz foi o borboleta, seguido de perto pelo nado de costa. O nado mais lento, como no masculino, continua sendo o peito. Vemos também que as velocidades nos nados femininos em todos os estilos são menores que as das provas masculinas. O ganho no tempo de largada, por outro lado, não parece depender muito do sexo do nadador.

2.4. Evolução dos recordes

Recordes são quebrados com o passar dos anos. A evolução das técnicas de nado, largada, virada, treinamento, e as novas tecnologias, como as polêmicas “fastskins”, têm colaborado para tal avanço. Observando um gráfico da evolução temporal de recordes, nos deparamos com uma curva interessante que se assemelha a um decaimento exponencial. Isso pode ser visto, por exemplo, na figura 2.7, que mostra a evolução dos recordes na prova de 50 m, nado livre masculino.

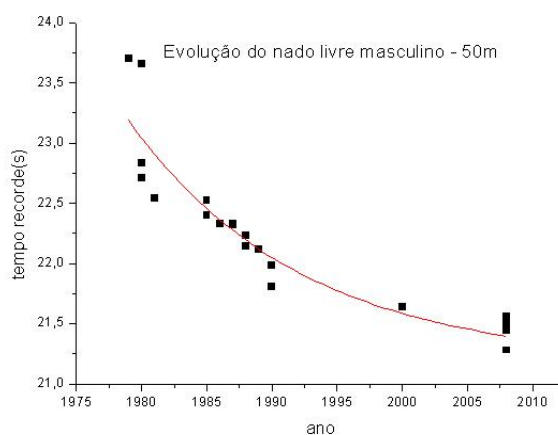


Figura 2.7. Evolução dos recordes na prova masculina de 50 metros, nado livre [2].

Um aspecto digno de nota nessa figura é o acúmulo de recordes nos últimos anos, que se deve à introdução dos trajes especiais. A linha traçada sobre os pontos representa um decaimento exponencial ajustado a esses dados:

$$T = A + B \exp\left(\frac{-t}{C}\right) \quad (22)$$

onde T é o recorde e t é o ano em que ele foi estabelecido. Os parâmetros importantes nesse modelo são A , o “tempo mínimo” em que a prova pode ser corrida, e C , o “tempo de relaxação” do recorde. Com os dados da figura 2.7 encontramos

$$A = 21,2 \text{ s} \pm 0,3\text{s}$$

$$C = 13 \text{ anos} \pm 4 \text{ anos}$$

No nado feminino, os resultados estão na figura 2.8.

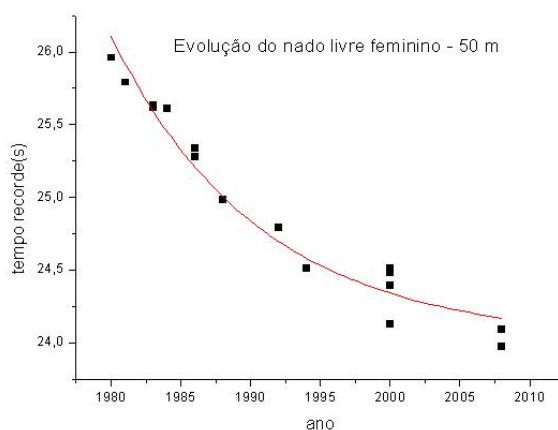


Figura 2.8. Evolução dos recordes na prova feminina de 50 metros, nado livre [2].

O ajuste da curva exponencial dada pela eq. 22 leva aos seguintes parâmetros, nesse caso:

$$A = 24.0 \text{ s} \pm 0.2 \text{ s}$$

$$C = 11 \text{ anos} \pm 2 \text{ anos}$$

Vemos que os tempos de relaxação C são semelhantes nos dois casos, mas os tempos mínimos A são bem distintos.

Referências do capítulo 2

- [1] M.R. Kent, *The Physics of Swimming*, Physics Education, v.15, pp.275-279, 1980
- [2] *List of world records in swimming*, Wikipedia, 2009
- [3] R. A. Brandt and M. A. Pichowsky, *Conservation of Energy in Competitive Swimming*, Journal of Biomechanics, v.28, pp.925-933, 1995

3. Estática da flutuação

Por que não conseguimos nos manter em equilíbrio de cabeça para baixo dentro da água? Por que precisamos movimentar as mãos para manter uma posição horizontal na água?

Para responder tais questões, é importante conhecer o conceito de massa específica ou densidade. A massa específica ρ de um corpo homogêneo é a razão entre sua massa e volume:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

Nas provas de natação, é importante controlar a densidade da água para que esta fique dentro das normas estabelecidas pelos comitês desportivos. Por exemplo, a água salgada tem densidade um pouco superior à da água doce. Como consequência, um homem flutua melhor no mar que na piscina, o que pode ser notado visivelmente em casos mais extremos, como nas águas do Mar Morto.

3.1. Flutuabilidade

Flutuabilidade é a capacidade que um corpo tem de flutuar num dado fluido. De uma forma simplificada, quando a massa específica de um corpo for maior que a da água ele afunda, caso contrário ele flutua.

A densidade do corpo humano varia de indivíduo para indivíduo de acordo com o tipo morfológico, etc. Em média, ela é aproximadamente 1,065 vezes maior que a densidade da água. O tecido adiposo humano tem densidade inferior à

média do corpo humano, e por isso pessoas mais gordas tem maior capacidade de flutuação. O corpo humano tem capacidade de variar seu volume, pela inspiração do ar nos pulmões. Isso permite que o mesmo se torne menos ou mais denso que a água, conforme a vontade da pessoa. Por isso podemos nadar na superfície ou submersos. Tal facilidade tem duas limitações básicas: precisando respirar o homem tem um tempo de submersão limitado pelo seu fôlego; por outro lado, ao submergir com os pulmões cheios precisa fazer algum esforço mecânico para se manter submerso.

Nesse ponto pode-se fazer uma comparação entre um navio de superfície, um submarino e o homem.

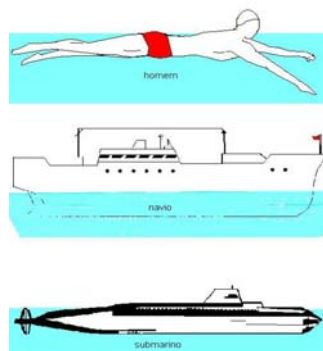


Figura 3.1. Flutuabilidade do homem, navio e submarino.

O navio flutua numa linha d'água que corresponde ao deslocamento de água produzido pelo seu casco. Toda parte acima do navio corresponde a uma reserva de flutuabilidade que pode ser utilizada caso o mesmo seja sobrecarregado. Já um submarino tem pequena reserva de flutuabilidade, permitindo que o mesmo consuma essa reserva de forma rápida e volte à condição de submersão. Para o homem tal reserva é praticamente nula e como foi dito, pode fazer uso dos pulmões como elemento flutuador.

3.2. Empuxo e o princípio de Arquimedes

Se um nadador está flutuando em equilíbrio, pode-se dizer que seu peso está contrabalançado pela força que a água e o ar exercem sobre seu corpo (figura 3.1). O princípio de Arquimedes, um dos princípios mais conhecidos da mecânica de fluidos, descreve essa força, que é chamada de empuxo. Segundo Arquimedes, “um corpo inteira ou parcialmente submerso em um fluido sofre um empuxo que é igual ao peso do fluido deslocado” [1]. Assim, o empuxo E é dado por

$$E = \rho V g \quad (3.2)$$

onde ρ é a densidade do fluido, V é o volume de fluido deslocado e g é a aceleração gravitacional.

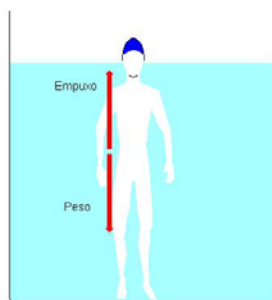


Figura 3.2. Diagrama de forças na flutuação do corpo de um nadador na vertical.

3.3. Centro de gravidade

Sabemos que o peso de um corpo está distribuído por toda sua extensão. No entanto, existe um ponto denominado centro de gravidade onde podemos supor que toda a sua massa está lá concentrada, para dessa forma, simplificar o

cálculo de vários efeitos. Se o corpo tiver dimensões pequenas, de forma que o campo gravitacional possa ser considerado constante no seu interior, pode-se demonstrar que o centro de gravidade coincide com o centro de massa. É preferível então usar o conceito de centro de massa, ao invés de centro de gravidade.

Para um sistema formado por um conjunto de massas pontuais, o centro de massa pode ser calculado como

$$\vec{R}_{cm} = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i} \quad (3.3)$$

onde m_i é a massa da partícula i e \vec{r}_i a sua posição.

No corpo humano o centro de massa situa-se aproximadamente ao nível das três últimas vértebras lombares, mas isso varia de indivíduo para indivíduo. Existem alguns procedimentos simples para se determinar esse ponto. Uma atividade interessante que pode ser realizada na aula de física é encontrar o centro de massa dos alunos. Para isso basta deitá-los numa gangorra, deixando que eles se movam até que o equilíbrio horizontal se torne possível. O centro de massa será o ponto do corpo que está sobre o apoio da gangorra.

3.4. Centro de flutuação

O centro de flutuação de um corpo (ou centro de empuxo) é o centro de massa da água deslocada pelo corpo. Ou seja, é o ponto onde podemos considerar que a resultante das forças de empuxo está aplicada. Assim como o

centro de massa, o centro de empuxo também varia de um corpo para o outro (figura 3.3).

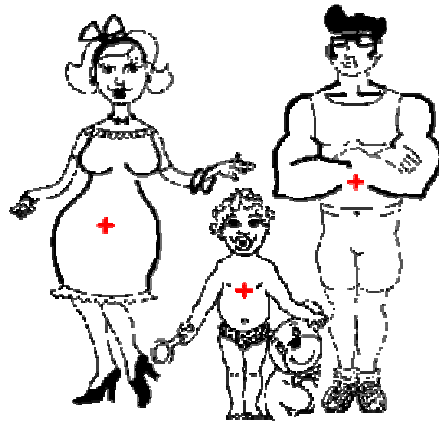
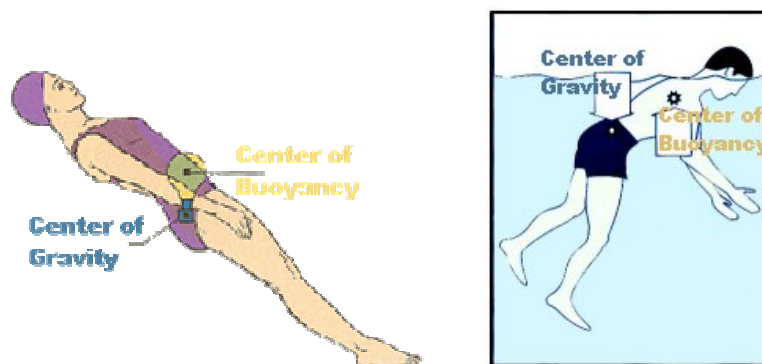


Figura 3.3. Diferentes centros de empuxo (marcados com um X) para diferentes biótipos [2].

No corpo humano submerso, o centro de flutuação está localizado logo acima do centro de gravidade (figura 3.4) [2]. Sabendo que o peso pode ser considerado como aplicado no centro de gravidade, e que o empuxo pode ser considerado como aplicado no centro de flutuação, vemos que essas forças formam um binário: pode haver um torque atuando sobre o corpo.



Figuras 3.4. Centros de flutuação e gravidade [2].

3.5. Torque na flutuação

Agora podemos responder a pergunta feita no início deste capítulo: por que não conseguimos nos manter em equilíbrio de ponta cabeça ou horizontalmente sob a superfície da água, sem efetuar movimentos com as mãos? Como acabamos de observar, o centro de gravidade do nadador não coincide com o centro de aplicação do empuxo, o que gera um torque sobre seu corpo. Como o centro de empuxo está mais próximo da cabeça que o centro de massa, o torque tenta levar o corpo para a posição vertical, de cabeça para cima (figura 3.5).

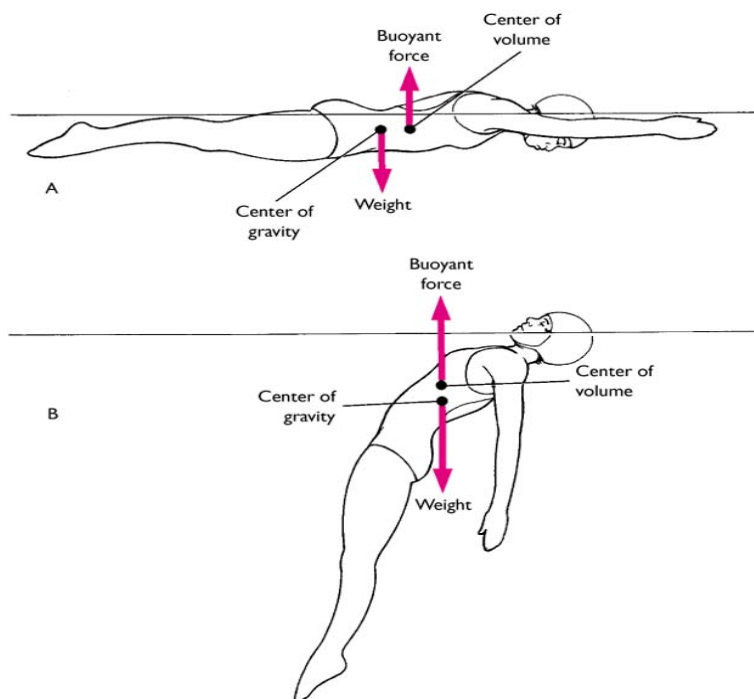


Figura 3.5. (a) A nadadora sofre a ação de um torque devido aos centros de gravidade e empuxo não estarem na mesma linha. (b) Ao modificar a posição corpórea, o peso e o empuxo atuam numa mesma linha vertical e estabelecem um equilíbrio de forças [3].

O torque é então responsável pela instabilidade que experimentamos ao tentar boiar de cabeça para baixo, ou ao deitarmos na água em posição horizontal.

Flutuando de cabeça para cima temos estabilidade, pois as forças estão aplicadas numa mesma linha de modo a compor um equilíbrio estável. Ao sair dessa posição criamos um torque que tenta restaurar a posição original do corpo. De cabeça para baixo temos um equilíbrio instável, pois o torque não restitui a posição inicial e tende a acentuar o giro do corpo. Esta é a razão pela qual uma pessoa, em repouso e imersa, irá flutuar principalmente na posição vertical, com a parte superior do corpo sobre ou perto da superfície e com as pernas penduradas para baixo.

Referências do capítulo 3

[1] P. Tipler e G. Mosca, *Física*, vol.1, LTC, 2009.

[2] L. Kidogushi, *Aquatopics*, http://spot.pcc.edu/~lkidoguc/Aquatics/AqEx/Water_Buoyancy.htm

[3] Susan J. Hall, *Basic Biomechanics* (cap.15, *Human Movement in a Fluid Medium*), McGraw-Hill, 2006.

4. Dinâmica da Natação

Que forças atuam sobre um nadador? Que mecanismos produzem a propulsão necessária ao nado? Para responder essas questões temos que estudar a dinâmica da natação.

Para entrar em movimento o nadador tem que fazer com que a água o empurre para frente. Ele realiza isso através das sucessivas braçadas e pernadas. Quando elas cessam o nadador mantém-se por um tempo em movimento, até que a velocidade seja anulada pela ação da água. Isso significa que a água é responsável tanto pela propulsão do nadador quanto pela resistência que ele encontra.

Pela segunda lei de Newton, sabemos que a aceleração do nadador é proporcional à soma de todas as forças atuantes sobre o nadador. Na direção vertical as forças são, essencialmente, o peso e o empuxo, com alguma contribuição das pernadas e braçadas. Como o nadador move-se praticamente na horizontal, as forças verticais tendem a se anular.

Na direção horizontal a força pode ser dividida em propulsão e resistência (figura 4.1). Então, para que um nadador se desloque de forma contínua é necessário que, em média, a força propulsiva tenha intensidade pelo menos igual à da força de resistência imposta pela água. Se a propulsão for inferior à resistência, o nadador fica sujeito a uma aceleração negativa, perdendo velocidade.

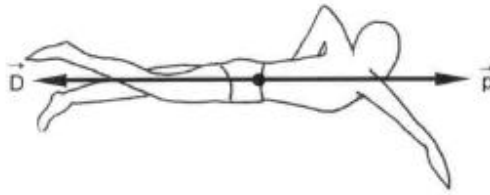


Figura 4.1. Forças horizontais que agem sobre o nadador. A força propulsiva é \vec{p} e a resistência da água é \vec{D} [1].

4.1. Propulsão: arrasto ou sustentação?

Como o nadador consegue obter propulsão na água? A propulsão é a força que impulsiona o nadador para frente e deriva de esforços musculares. Ao nadar, a força criada pelos braços e pernas deverá ser empregada para superar a resistência criada pela água. A forma indicada para executar as braçadas baseia-se na imitação de um remo: as braçadas devem se processar de forma rápida e com boa profundidade, e as mãos devem imitar o formato de uma concha. A fase de recuperação da braçada deve se processar pelo alto, ficando mãos e braços fora da água para não gerar nenhuma resistência adicional. A única recuperação que não é feita fora da água é a do nado peito, onde as mãos ficam submersas.

A observação detalhada de provas de natação mostra que alguns atletas se valem de braçadas mais sinuosas que outros. Um bom exemplo é dado por dois velocistas de ponta no nado livre, o francês Alain Bernard da França, com braçadas mais sinuosas, e o brasileiro César Cielo, cujas braçadas são mais retas. A que se devem tais preferências e que conceitos as explicam?

Há uma discussão sobre o que gera a propulsão mais eficiente no nado, se é o arrasto ou a sustentação. Para entender essa discussão precisamos saber o que são essas forças. Um corpo que se move através de um fluido sente uma força que pode ser dividida em duas componentes perpendiculares: o arrasto e a sustentação. O arrasto aponta na direção oposta à velocidade do corpo em relação ao meio, e a sustentação (quando existe) tem direção perpendicular à essa velocidade. A figura 4.2 mostra essas forças em um avião em vôo. A sustentação é a força responsável por manter o avião no ar, já que ela se opõe ao peso do aparelho.

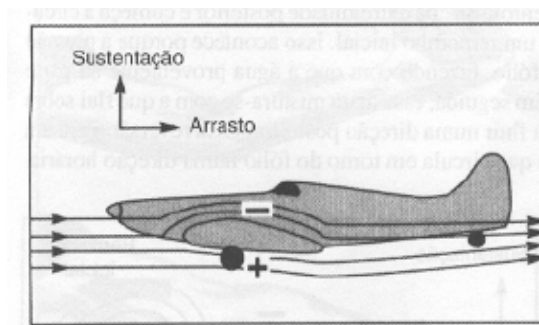


Figura 4.2. Forças de arrasto e sustentação sobre um avião em vôo.

Antes do início da década de 70, acreditava-se que uma propulsão seria mais efetiva se simplesmente o nadador puxasse o braço para trás com a mão perpendicular ao fluxo da água, conforme a figura 4.3. Tal raciocínio considera que a melhor propulsão possível vem da força de arrasto produzida pelo movimento da mão através da água.

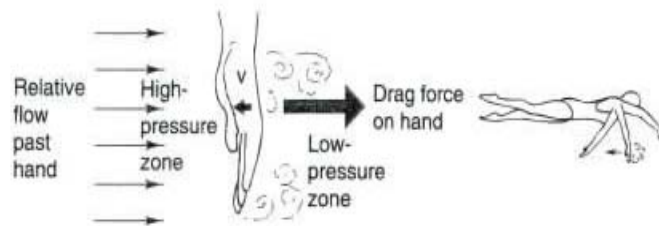


Figura 4.3. Propulsão devida ao arrasto da mão na água [2].

No entanto, observou-se que campeões de natação davam braçadas em trajetórias curvas durante a fase de puxada. Estabeleceu-se que os nadadores faziam isso com as mãos um tanto inclinadas em relação ao fluxo da água, de maneira a utilizar a força de sustentação assim criada como forma de propulsão.

Como numa asa de avião, e graças ao princípio de Bernoulli, a força de sustentação decorre da diferença de pressão gerada pela maior velocidade de escoamento no lado externo da mão. Se o ângulo entre o plano da mão e o fluxo da água for pequeno, a propulsão será mais devida à sustentação que ao arrasto.

Como a mão percorre uma trajetória sinuosa dentro da água, é natural achar então que há um predomínio de forças de sustentação. No entanto, por volta de 1994, surgiram argumentos convincentes a favor do arrasto como a força propulsora dominante no nado livre. A força propulsora seria, em grande parte, produzida pelo antebraço. Devido ao seu formato roliço, quase toda a força gerada nele deve ser creditada ao arrasto. Assim, a técnica do nado livre pode ser direcionada a gerar propulsão a partir do arrasto no antebraço, em vez da sustentação na mão.

Pesquisas realizadas Instituto de Pesquisa Hidráulica de Iowa em 1997 [3] demonstraram que as maiores forças propulsoras são obtidas quando o plano da mão está próximo a 90 graus em relação ao fluxo. Neste ângulo, a força é devido quase que inteiramente ao arrasto. A sustentação dá a sua maior contribuição à força resultante em ângulos próximos a 45 graus. Mas, mesmo neste ângulo, a contribuição do arrasto é quase tão grande quanto a da sustentação. O que podemos concluir, por fim, é que tanto o arrasto quanto a sustentação contribuem para a propulsão.

Referências do capítulo 4

[1] J. P. Vilas-Boas e R. Fernandes, *Arrasto hidrodinâmico activo e potência mecânica máxima em nadadores pré-juniores de Portugal*, Revista Portuguesa de Ciências do Desporto, vol.1, n.3, pp.14–21, 2001.

[2] Susan J. Hall, *Basic Biomechanics (cap.15, Human Movement in a Fluid Medium)*, McGraw-Hill, 2006.

[3] R. Sanders, *Lift or Drag? Let's Get Skeptical About Freestyle Propulsion*, Sports Science News, May-June 2008, <http://www.sportsci.org/news/biomech/skeptic.html>

5. Comentários finais

Esperamos ter mostrado com este trabalho o quanto a física da natação é rica em conteúdo, e como ela pode ser utilizada para produzir material didático atraente aos estudantes. Nós investigamos a cinemática da natação, a estática da flutuação do corpo humano e a dinâmica da propulsão no nado. É interessante notar que nosso estudo envolveu partes da mecânica cujo ensino é frequentemente alvo de (justificadas) críticas: a cinemática e a estática. Há quem proponha até a retirada desses tópicos dos currículos introdutórios de física. Acreditamos que a má fama associada ao ensino desses temas não é intrínseca a eles, mas deve-se principalmente às aplicações artificiais e descontextualizadas que geralmente são utilizadas para ilustrar seus conceitos. Com exemplos ligados a situações reais e que atraiam o interesse dos alunos, é possível explorar com proveito até mesmo temas tidos como pouco produtivos pedagogicamente.