



Fatores intrínsecos do custo energético da locomoção durante a natação*

Fabrizio Caputo, Mariana Fernandes Mendes de Oliveira, Benedito Sérgio Denadai e Camila Coelho Greco

RESUMO

A quantidade de energia metabólica gasta em transportar a massa corporal de um sujeito por unidade de distância tem sido definida como custo energético da locomoção, ou especificamente para natação, o custo de nado. As diferenças no custo de nado entre os indivíduos parecem ser influenciadas por dois principais fatores, a resistência hidrodinâmica e habilidade técnica do nadador. O menor custo de nado apresentado pelas mulheres tem sido atribuído a menor resistência hidrodinâmica decorrente de menor tamanho corporal, maior percentagem de gordura e melhor posicionamento horizontal. Porém, essas diferenças no custo de nado entre homens e mulheres desaparecem quando corrigidos para o tamanho corporal. Em relação às crianças, o maior custo de nado comparado com o dos adultos quando corrigidos para o tamanho corporal pode ser explicado principalmente por menor habilidade técnica apresentada por elas. Para indivíduos com as mesmas características antropométricas, melhor habilidade técnica e maior tamanho da superfície de propulsão, associados a aumento na eficiência propulsiva, podem reduzir o custo de nado. Quando se comparam os diferentes estilos, o mais econômico é o *crawl* seguido pelo de costas em qualquer velocidade de nado. O borboleta é o estilo menos econômico a baixas velocidades ($< 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Entretanto, acima dessa velocidade o peito passa a ser o estilo menos econômico.

ABSTRACT

Intrinsic factors of the locomotion energy cost during swimming

The amount of metabolic energy spent in transporting the body mass of the subject over a unit of distance has been defined as the energy cost of locomotion, or regarding to swimming, cost of swimming. The differences in the cost of swimming between the individuals seem to be influenced by two main factors, the hydrodynamic resistance and technical skill of the swimmer. The lower cost of swimming showed by females has been attributed to a smaller hydrodynamic resistance due to their smaller size, larger percentage fat and more streamlined position. However, the difference in cost of swimming between males and females disappears when correcting for body size. With regard to children, the higher energy cost of swimming when correcting for body size may be caused by the lower swimming technique showed by them. For individuals with the same anthropometric characteristics, the better swimming technique and larger size of propelling surface, associated with higher propelling efficiency, may decrease the energy cost of swimming. When comparing different types of strokes, the most economical stroke is crawl, followed by back-

Palavras-chave: Custo de nado. Gênero. Idade. Estilo de nado.

Keywords: Cost of swimming. Gender. Children. Swimming strokes.

Palabras-clave: Desgaste de nado. Gênero. Edad. Estilo de nado.

stroke, irrespective the swimming velocity. Butterfly is the less economical at low velocities ($< 0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). However, above that velocity the breaststroke become the less economical stroke.

RESUMEN

Factores intrínsecos del desgaste energético de locomoción durante la natación

La cantidad de energía metabólica gastada en transportar la masa corporal de un individuo por unidad de distancia ha sido definida como el desgaste energético de locomoción, o específicamente para la natación, el desgaste de nado. Las diferencias en el desgaste de nado entre los individuos parecen ser influenciadas por dos principales factores, la resistencia hidrodinámica y la habilidad técnica del nadador. El menor desgaste de nado presentado por las mujeres ha sido atribuido a una menor resistencia hidrodinámica proveniente de un menor tamaño corporal, mayor porcentaje de grasa, y mejor posicionamiento horizontal. Sin embargo, estas diferencias en el desgaste de nado entre hombres y mujeres desaparece cuando se corrige el tamaño corporal. En relación a los niños, el mayor desgaste de nado comparado a los adultos cuando se corrige el tamaño corporal puede ser explicado principalmente por una menor habilidad técnica presentada por los mismos. Para individuos con las mismas características antropométricas, una mejor habilidad técnica y mayor tamaño de superficie de propulsión, asociados a un aumento en la eficacia de propulsión, pueden reducir el desgaste de nado. Cuando se comparan los diferentes estilos, el más económico es el de pecho seguido por el de espalda a cualquier velocidad de nado. El estilo mariposa es el estilo menos económico a bajas velocidades ($< 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). A pesar de esto, por encima de esta velocidad el estilo pecho pasa a ser el estilo menos económico.

INTRODUÇÃO

A resistência da água ou arrasto é a principal força a ser vencida durante a locomoção aquática. Como a densidade da água é aproximadamente 800 vezes maior que a do ar (998,2 vs. 1,205kg·m⁻³ a 20°C e 760mmHg), isso requer elevado gasto energético. Outra importante característica da locomoção aquática é a grande quantidade de energia que é transferida para a água durante a realização do movimento. Ao contrário da maioria das atividades terrestres, onde o impulso é realizado contra a terra que não pode ser acelerada, durante a natação a propulsão é feita contra a água, a qual pode sofrer aceleração. Dessa forma, para gerar força propulsiva o nadador acelera determinada massa de água transferindo uma quantidade de energia cinética. Isso faz com que uma parte da energia produzida pelo nadador seja utilizada para movimentar a água para trás ao invés de movimentar o nadador para frente. Conseqüentemente, a eficiência bruta na natação parece variar

* Laboratório de Avaliação da Performance Humana – UNESP, Rio Claro, SP.

Recebido em 6/3/06. Versão final recebida em 31/7/06. Aceito em 13/9/06.

Endereço para correspondência: C.C. Greco, Laboratório de Avaliação da Performance Humana, IB-UNESP, Avenida 24A, 1.515, Bela Vista – 13506-900 – Rio Claro, SP, Brasil. E-mail: greco@rc.unesp.br

entre 3 e 10%, dependendo da velocidade e do estilo de nado empregado⁽¹⁾, enquanto outros esportes terrestres variam entre 20 e 40%⁽²⁾. Ambos esses fatores fazem da natação uma atividade com elevado custo energético de deslocamento e velocidades máximas bem reduzidas⁽²⁾.

As características envolvendo tanto as forças resistivas como propulsivas descritas anteriormente reforçam o grande componente técnico presente na natação. Entretanto, a principal questão não é simplesmente como maximizar a força propulsiva e minimizar a resistência, mas, certamente, como realizar isso em conjunto com finitas capacidades metabólicas. Dessa forma, o máximo desempenho na natação é conseguido por meio da associação entre a máxima potência metabólica (aeróbia e anaeróbia) e economia de locomoção do atleta (maximizar propulsão e minimizar resistência). Com base nesses aspectos, discutiremos mais detalhadamente nesta revisão o custo energético da natação e alguns de seus fatores determinantes.

MEDIDAS DE GASTO ENERGÉTICO

Diferentes procedimentos têm sido usados para a determinação do gasto energético na natação. A medida do consumo de oxigênio ($\dot{V}O_2$) durante e imediatamente após o exercício oferece um método indireto para estimar o gasto energético. O $\dot{V}O_2$ está diretamente relacionado com o gasto energético quando a intensidade do esforço é realizada em um estado estável ou em intensidades abaixo do limiar de lactato (LL)⁽²⁾. Muitas técnicas têm sido desenvolvidas para tentar estimar o $\dot{V}O_2$ durante o nado⁽³⁻⁴⁾. Inicialmente, Montpetit *et al.*⁽³⁾ introduziram uma técnica que consistiu na retroextrapolação da curva de recuperação do $\dot{V}O_2$ para se determinar o $\dot{V}O_2$ durante o nado. Nesse protocolo, o gás expirado era continuamente coletado pelos primeiros 20 ou 40 segundos após o nado⁽³⁻⁴⁾. Tais procedimentos têm a grande vantagem de permitir que o atleta realize o nado sem restrições apresentadas por alguns instrumentos de avaliação. Além disso, esse método (retroextrapolação) tem-se mostrado válido ($r = 0,99$) e reproduzível ($r = 0,92$) para determinar o $\dot{V}O_{2max}$ ⁽⁴⁾. Recentemente, medidas contínuas de $\dot{V}O_2$ têm sido feitas durante o nado atado⁽⁴⁾, *swimming flume*⁽⁵⁾ e nado livre^(1,6).

A única maneira de quantificar a economia do nadador ou o custo de nado é determinando o gasto energético para dada atividade. A quantidade de energia metabólica gasta em transportar a massa corporal de um sujeito por unidade de distância tem sido definida como custo energético da locomoção ou, especificamente para natação, o custo de nado (Cn , $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}$)⁽²⁾. O Cn tem sido usualmente medido através da razão entre o $\dot{V}O_2$ e sua correspondente velocidade de progressão para velocidades dentro da zona de intensidades aeróbias^(2,6-8). Além disso, o Cn tem sido também estimado em velocidades supramáximas em que a contribuição da energia anaeróbia é considerada no cálculo do balanço energético total do exercício⁽⁹⁻¹⁰⁾. Resultados de alguns estudos que investigaram o Cn têm sugerido que a estatura (E)⁽¹¹⁻¹²⁾, massa corporal (M)⁽¹¹⁾, área de superfície corporal (ASC)⁽⁶⁻⁷⁾, torque passivo⁽⁹⁾, flutuação⁽⁶⁾, e diferenças na técnica⁽¹³⁾ podem influenciar o Cn na natação.

EFEITO DO GÊNERO

Na literatura, tem sido reconhecido que as nadadoras são mais econômicas que os nadadores^(2,4,14). Contudo, os motivos para essa diferença são bastante controversos. Em nadadores competitivos, o Cn no *crawl* a $0,9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ é aproximadamente 30% menor em mulheres quando comparado com o dos homens⁽¹⁴⁾. Para o nado de costas, Klentrou e Montpetit⁽¹⁵⁾ encontraram uma diferença de 14% no Cn entre homens e mulheres em todas as velocidades analisadas. No estudo de Pendergast *et al.*⁽¹⁴⁾, as diferenças persistiram mesmo quando o Cn é ajustado pela ASC . Entretanto, alguns es-

tudos têm demonstrado que essas diferenças entre os gêneros desaparecem quando o Cn foi ajustado pela M e ASC ^(6-7,16). Essa diferença no Cn que ocorre entre homens e mulheres pode ser explicada pela diferente densidade corporal e características antropométricas. De fato, quando um corpo está horizontalmente imerso em água, o tórax tende a flutuar enquanto os membros inferiores tendem a afundar. Isso gera um torque (força rotacional), dado pelo produto do peso dos pés imersos na água vezes a distância do pés ao centro de volume dos pulmões⁽⁹⁾. As mulheres, em média, têm maiores depósitos de gordura corporal quando comparadas com os homens. A gordura é menos densa que a água, enquanto músculos e ossos são mais densos; dessa forma, as mulheres são caracterizadas por menor torque que os homens. Assim, elas podem necessitar menos energia para manter o corpo na posição horizontal, já que uma posição mais horizontal pode reduzir de forma significativa o arrasto.

Durante uma velocidade constante de nado, considerável fração do gasto energético é utilizada para vencer o arrasto⁽²⁾. Quando se relacionou o gasto energético com a potência necessária para vencer o arrasto, nenhuma diferença foi encontrada entre homens e mulheres⁽¹⁷⁾. Em outras palavras, os homens não gastam energia adicional para flutuar. Os 30% na diferença do gasto energético mostrado por Pendergast *et al.*⁽¹⁴⁾ podem ser explicados pela menor resistência encontrada nas mulheres quando comparadas com homens a uma velocidade de $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ no nado *crawl*⁽¹⁸⁾. O mesmo grupo de autores também demonstrou alta correlação entre massa corporal e arrasto ($r = 0,83$). Menor valor no arrasto tem sido também relacionado a diferenças na área frontal⁽¹⁹⁾. Isso segue a linha de observações feitas por Montpetit *et al.*⁽¹⁶⁾, segundo os quais as diferenças no gasto energético entre homens e mulheres desaparecem quando corrigidos para o tamanho corporal. Além disso, Montpetit *et al.*⁽¹⁶⁾ demonstraram que a M pode representar 40% da variabilidade presente no Cn entre homens e mulheres, valores próximos aos 31% encontrados por Chatard *et al.*⁽⁶⁾ para um grupo heterogêneo de nadadores homens. Valores ainda mais extremos foram demonstrados por Kjendlie *et al.*⁽¹¹⁾ quando comparados, em um mesmo grupo, adultos com a M média equivalente ao dobro do apresentado pelas crianças. Nesse estudo, a M pode representar 74% da variabilidade presente no Cn . Esses aspectos demonstram que a demanda energética para nadar grande variação de velocidades é claramente afetada pelo tamanho do nadador. Entretanto, esses resultados não devem apenas ser atribuídos a diferenças na massa corporal (maior taxa metabólica de repouso), mas, como citado anteriormente, na sua relação com o arrasto.

EFEITO DA IDADE

As modificações que ocorrem da infância para a adolescência são importantes, pois concernem a mudanças nas características morfológicas, fisiológicas e capacidades mecânicas⁽²⁰⁾. Crianças tendem a flutuar com menor torque passivo que adultos, principalmente pela menor distância entre o centro de massa e o centro de flutuação, que são os dois pontos que interferem na posição em que o indivíduo fica ao ser submerso na água^(9,21). Tem sido sugerido também que o torque passivo é o principal determinante do Cn , independente do gênero e habilidade do nadador⁽²²⁾. Isso provavelmente ocorre devido a sua forte relação com o arrasto ativo⁽²¹⁾, principalmente em velocidades acima de $1,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ⁽⁹⁾. No entanto, é importante ressaltar que os movimentos das mãos e dos pés durante o nado causam um torque ativo que é provavelmente diferente do torque passivo medido com o nadador parado⁽²³⁾. Portanto, mesmo que as crianças tenham torque passivo menor que os adultos, não significa necessariamente que elas também tenham menor torque ativo.

Em nadadores com similar *performance*, estudos têm demonstrado que crianças de 11-12 anos^(11,20) apresentam valores absolu-

tos de Cn menores que os relatados em adolescentes (14 anos) e adultos^(6,11). Além disso, os valores absolutos de Cn foram semelhantes entre os adolescentes e adultos⁽⁶⁾. Esses dados sugerem que os valores absolutos do Cn parecem aumentar apenas entre 12 e 14 anos, uma vez que não houve diferenças no Cn dos 14 aos 21 anos^(6,11). Quando o Cn é expresso em função da ASC , os resultados se invertem, as crianças e adolescentes passando a ter o mesmo valor de Cn e ambos apresentando valores maiores que os dos adultos (≥ 17 anos)^(6,20,24). No entanto, quando o Cn é expresso em função da estatura (E), nenhuma diferença é encontrada entre crianças e adultos⁽²⁴⁾. Em adição, apenas a M e a distância entre o centro de massa e o centro de flutuação ainda se correlacionam com o Cn quando removido o efeito do tamanho do nadador (i.e., $Cn \cdot E^{-7}$)⁽¹¹⁾. Em outras palavras, mesmo não aparecendo diferenças no $Cn \cdot E^{-7}$ entre adultos e crianças, quando analisados como um único grupo, indivíduos de maior M apresentam maior $Cn \cdot E^{-7}$. Como a M e o torque têm demonstrado alta correlação com o arrasto, indivíduos mais pesados e com maior torque apresentam valores maiores de arrasto^(9,19). Dessa forma, Kjendlie *et al.*⁽¹¹⁾ sugerem que efeitos opostos entre a melhor técnica demonstrada pelos adultos (p.ex., maior comprimento de braçada, maior área de superfície para propulsão) e menor arrasto das crianças (p.ex., menor M e menor torque) podem explicar a semelhança no $Cn \cdot E^{-7}$ entre crianças e adultos.

Um estudo longitudinal realizado durante 2,5 anos no período de crescimento em nadadores (idade inicial média de 12,9 anos), encontrou que a magnitude da atividade do arrasto total não se alterou significativamente, apesar do aumento de 16% na área de secção transversa⁽²⁵⁾. Estes dados reforçam, em parte, a idéia de que o crescimento (maior estatura) reduz significativamente o arrasto de onda, mesmo com aumento nos arrastos de pressão e fricção devido a maior ASC ⁽²⁶⁾. Além disso, melhora na habilidade técnica pode também ter diminuído o arrasto total. Portanto, mais pesquisas ainda são necessárias para determinar se a diferença no arrasto entre crianças e adultos é devida a diferenças no tamanho corporal ou diferença na técnica de nado, já que indivíduos mais velhos em muitos casos possuem melhor técnica.

Poujade *et al.*⁽²⁰⁾ encontraram que em crianças o Cn não foi correlacionado com diferentes variáveis como flutuação e antropométricas (E , M e ASC). Esses resultados contrastam com estudos similares realizados com adultos, nos quais a M e E foram correlacionados com o Cn ^(12,16). Em adição, no estudo de Chatard *et al.*⁽¹²⁾ os nadadores que apresentaram maior flutuação possuíam um menor Cn . É importante ressaltar que o torque passivo não foi medido no estudo de Poujade *et al.*⁽²⁰⁾ e, como citado anteriormente, esse é um dos parâmetros com grande influência no Cn . Portanto, para uma população específica de crianças, habilidade técnica, maturação, metabolismo energético e torque passivo parecem ser os principais determinantes do Cn .

EFEITO DO NÍVEL DE PERFORMANCE E ESPECIALIDADE

O Cn a uma dada velocidade varia muito de um nadador a outro. Essas variações dependem principalmente da habilidade técnica do nadador^(4,6,14,16,27). Chatard *et al.*⁽⁶⁾ analisaram o Cn em 101 nadadores e dividiram estes em três grupos com diferentes níveis de *performance*. Diferenças no valor absoluto do Cn não foram encontradas entre os três grupos. Contudo, os autores observaram que, quanto maior o nível de *performance*, maior o tamanho do nadador. Assim, o maior tamanho corporal do grupo de melhor *performance* dificultou a análise do efeito do nível técnico sobre o Cn . Entretanto, quando o Cn foi expresso em função da ASC ($Cn \cdot ASC^{-1}$), a diferença entre os grupos apareceu, demonstrando que nadadores mais habilidosos têm menor $Cn \cdot ASC^{-1}$ para uma mesma velocidade. Resultados semelhantes foram também encontrados por Chatard *et al.*⁽⁷⁾ em um grupo de 58 nadadoras. Como o Cn aumenta com a ASC para indivíduos de mesma habilidade

técnica, os indivíduos maiores levam desvantagem em provas de longa distância⁽⁶⁻⁷⁾. Assim, os melhores nadadores de longa distância são menores e mais leves, como revisado por Lavoie e Montpetit⁽²⁸⁾, enquanto em provas de velocidade, nadadores mais altos e com maior massa muscular podem nadar mais rápido, principalmente porque eles podem produzir grandes quantidades de energia em um curto período de tempo⁽⁶⁾.

Chatard *et al.*⁽⁶⁾ demonstraram em seu estudo que, para nadar a uma mesma velocidade, nadadores de longas distâncias utilizam em média duas pernadas por ciclo de braçada, enquanto os nadadores de velocidade, seis pernadas por ciclo de braçada. Nadadores que utilizaram menor número de pernadas por ciclo de braçada (nadadores de braçada) têm-se mostrado mais econômicos que os nadadores que utilizam maior número de pernadas por ciclo de braçada (nadadores de perna)⁽⁶⁻⁷⁾. Holmer⁽²⁷⁾ e Hollander *et al.*⁽²⁹⁾ têm mostrado que a perna é de 3 a 4 vezes menos eficiente que a braçada. A perna requer proporcionalmente maior consumo de oxigênio que a braçada e contribui pouco na propulsão. Esses resultados não concluem que nadadores de braçada são mais rápidos que os nadadores de pernadas. Ao contrário, os nadadores de perna podem nadar mais rapidamente que os nadadores de braçada se eles tiverem grande potência aeróbia e anaeróbia. No entanto, vale a pena ressaltar que alta potência aeróbia e alta eficiência não são necessariamente relacionadas⁽⁶⁾.

EFEITO DOS DIFERENTES ESTILOS DE NADO

O Cn dos diferentes estilos é demonstrado na figura 1 e tabela 1. Na tentativa de ir além da simples apresentação dos diferentes achados da literatura, a figura 1 foi criada a partir dos dados de diversos estudos e, através de regressões lineares e não-lineares, foi possível gerar equações específicas entre o Cn e a velocidade para cada estilo. Para o *crawl* e o de costas, o Cn demonstrou aumento exponencial em relação à velocidade de nado. Entretanto, para o de peito esse aumento foi linear e, para o borboleta, o aumento teve uma característica polinomial. Como pode ser observado na tabela 1 e demonstrado também por Capelli *et al.*⁽¹⁰⁾, o estilo mais econômico é o *crawl* seguido pelo de costas em qualquer velocidade de nado. Já o borboleta é o estilo menos econômico a baixas velocidades ($< 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Entretanto, acima dessa velocidade, o de peito passa a ser o estilo menos econômico. Esses dados são diferentes daqueles reportados por Holmer⁽³³⁾, segundo os quais o borboleta foi o estilo menos econômico em todas as velocidades analisadas. Essa diferença pode ter sido decorrente de variações na composição corporal e nível de *performance* entre os sujeitos dos estudos, além de as equações geradas na presente revisão representarem uma "média" dos diferentes estudos.

Os altos valores de Cn a baixas velocidades no borboleta (característica polinomial) podem ter sido causados pelo maior gasto energético para agir contra a tendência de o corpo afundar durante o movimento de ondulação corporal, que nas velocidades mais lentas não está sendo oposta por apropriada força de sustentação nesse tipo de braçada simétrica. Com o aumento da velocidade, ocorre aumento da força de sustentação e a contribuição relativa das diversas fontes de dissipação de energia podem alterar-se, levando a diminuição temporária do Cn ⁽¹⁰⁾. No de peito, outro estilo de nado simétrico, a grande variação intraciclo na velocidade ocorre quando o atleta tenta compensar, durante a fase de aceleração, a desaceleração presente durante a fase não propulsiva do ciclo. Portanto, a energia requerida para acelerar o corpo é elevada e provavelmente constitui uma grande fração do Cn total. É possível também que, com o aumento da velocidade, a maior frequência de braçadas e pernadas, portanto menor variação intraciclo na velocidade (menor desaceleração, menor gasto energético), amenize o aumento exponencial do gasto energético devido ao aumento exponencial do arrasto. Esses fatores poderiam explicar

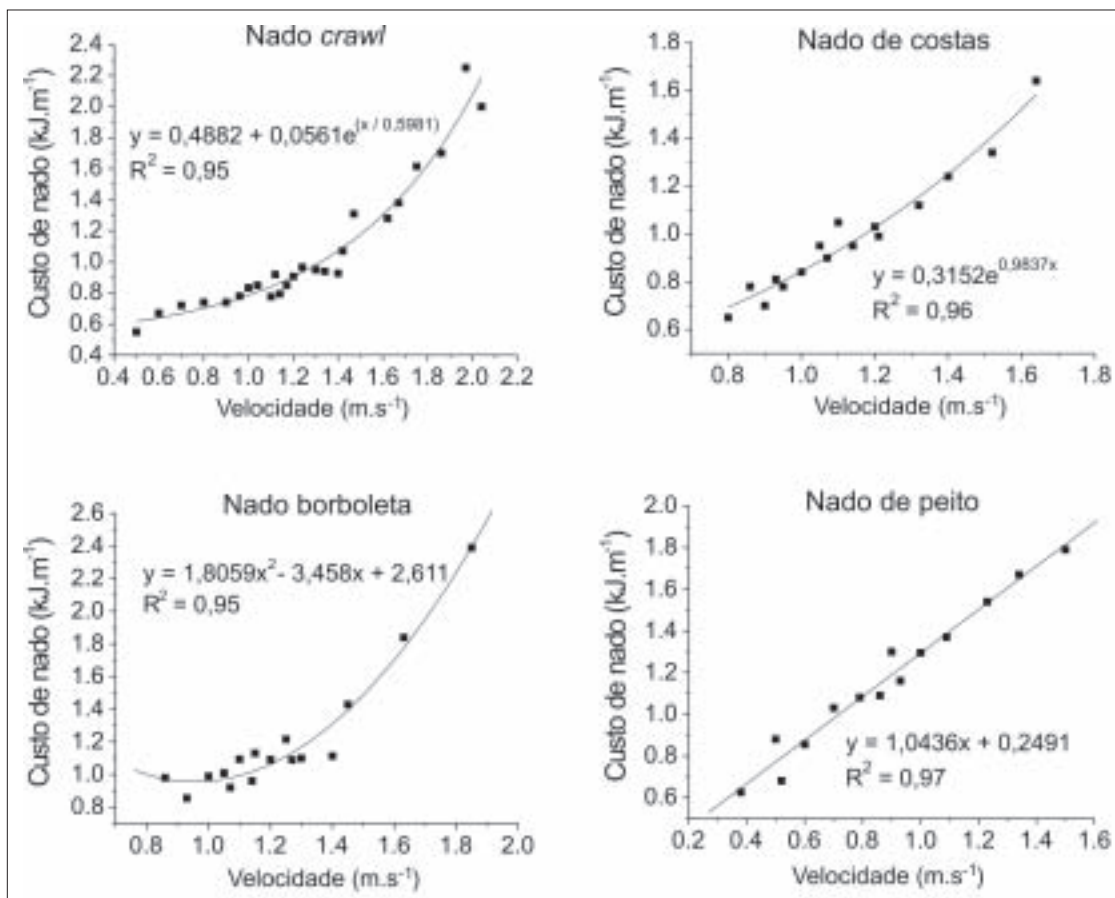


Figura 1 – Relação entre o custo de nado (C_n) e velocidade nos diferentes estilos da natação. Cada ponto na figura representa o valor médio do C_n obtido em um estudo ou a média de diferentes estudos que analisaram o C_n para uma mesma velocidade. Referências do nado crawl^(2,4,6,8-11,13,22,30-34), nado de costas^(10,15,33,35), nado borboleta^(10,36-37) e nado de peito^(10,33,38-39).

TABELA 1
Valores do custo de nado ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}$) nos diferentes estilos calculados a partir das equações descritas na figura 1

Velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Peito ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}$)	Borboleta ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}$)	Costas ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}$)	Crawl ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}$)
0,8	1,08	1,00	0,69	0,70
0,9	1,18	0,96	0,76	0,74
1,0	1,29	0,95	0,84	0,79
1,1	1,39	0,99	0,93	0,84
1,2	1,50	1,06	1,03	0,91
1,3	1,60	1,16	1,13	0,98
1,4	1,71	1,30	1,25	1,07
1,5	1,81	1,48	1,38	1,18
1,6	1,91	1,70	1,52	1,30
1,7	2,02	1,95	1,68	1,45

o aumento linear e o elevado C_n a médias velocidades demonstradas durante o nado de peito. É importante ressaltar, também, que o nado de peito é o em que se atingem as menores velocidades máximas de todos os estilos.

EFEITOS DO NÍVEL DE HABILIDADE TÉCNICA

Tem sido demonstrado que a técnica de nado influencia o arrasto e, portanto, o gasto energético na natação^(13,26). Alguns estudos têm observado mudanças nas características antropométricas dos nadadores e a melhora na *performance* ao longo das últimas décadas. De 1964 até 1992, dados demonstraram que nadadores olímpicos aumentaram sua estatura sem aumento correspondente na massa corporal⁽⁴⁰⁻⁴²⁾. Embora algumas variáveis antropométricas

não possam determinar melhor *performance*, o tamanho dos braços, mãos, pernas e pés influencia o comprimento de braçada (C_b) e a frequência de braçada (F_b) que um nadador combina para alcançar determinada velocidade⁽⁴³⁾. Craig *et al.*⁽⁴⁴⁾ analisaram nadadores olímpicos em 1984 e observaram que as mudanças no C_b e na F_b estavam associadas a melhores tempos que em 1976. As maiores velocidades foram atingidas com maior C_b e com F_b menores ou iguais.

De acordo com diversos autores^(26,30,44), o C_b é um índice que reflete a eficiência propulsiva (E_p , capacidade de transformar trabalho mecânico em deslocamento); assim, quanto maior o C_b maior é a E_p e vice-versa. Diversos estudos têm demonstrado que um aumento na velocidade (de 1 a 1,7-1,8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) é obtido principalmente aumentando a F_b , enquanto o C_b permanece quase inalterado ($v = C_b \cdot F_b$)⁽⁴⁴⁻⁴⁵⁾. Portanto, as alterações no C_n observadas nessas velocidades não são atribuídas a mudanças na E_p ; especificamente, elas refletem aumento no arrasto, o qual aumenta com o quadrado da velocidade. Acima dessas velocidades, aumentos adicionais da F_b são acompanhados por diminuição no C_b ⁽⁴⁴⁾. Nesse caso, um aumento no C_n é devido a uma associação entre a diminuição da E_p e aumento no arrasto. Além disso, o aumento no C_n pode resultar também da contração de músculos não-propulsivos e de aumento no uso das pernas⁽⁶⁾.

Como o C_b é um índice que reflete a E_p , a deterioração da braçada apresentada por indivíduos fadigados poderia levar a progressivo aumento no C_n . Recentemente, Zamparo *et al.*⁽⁶⁾ demonstraram que, após um teste de 2km, o C_n e a F_b foram aumentados, o C_b diminuído e que isso poderia estar relacionado com o desenvolvimento da fadiga. Realmente, Craig *et al.*⁽⁴⁴⁾ observaram que para provas de 200m ou mais longas, o C_b tende a diminuir com o desenvolvimento da fadiga. Segundo os autores, os nadadores de

melhor *performance* poderiam compensar a queda no *Cb* mantendo ou aumentando a *Fb* a fim de manter a velocidade constante. Analisando de maneira crônica (*i.e.*, efeito do treinamento), diversos autores têm demonstrado que aumento no *Cb* leva a diminuição no *Cn* para dada velocidade. Como exemplo, Termin e Pendergast⁽⁴⁶⁾ demonstraram que a melhora na *performance* com o treinamento (100 e 200 jardas) se correlacionou com os 20% de redução no *Cn* e com os 16% de aumento no *Cb*. Resultados similares foram obtidos por Wakayoshi *et al.*⁽⁴⁷⁾, em que os nadadores que puderam manter maior *Cb* para dada velocidade também reduziram o *Cn*.

Um interessante trabalho foi realizado por Toussaint⁽¹³⁾ para avaliar a influência da habilidade técnica na *Ep*. Dois grupos de atletas de *endurance* altamente treinados, nadadores e triatletas, foram comparados em níveis iguais de gasto energético, que representava potência metabólica de 1.000W ou $\dot{V}O_2$ de $\sim 2,86L \cdot \text{min}^{-1}$. Os resultados demonstraram que com o mesmo nível de potência metabólica ($\dot{V}O_2$) os triatletas nadaram a velocidade de $0,95m \cdot s^{-1}$, enquanto os nadadores nadaram a $1,17m \cdot s^{-1}$, 23% mais rápidos. Essa diferença não pode ser explicada pela eficiência bruta, *Fb*, e trabalho por braçada, uma vez que não foram encontradas diferenças entre essas variáveis nos nadadores e triatletas, respectivamente. Entretanto, houve uma diferença no *Cb* (2,46 vs. 1,84m), e no *Cn* (0,85 vs. $1,05kJ \cdot m^{-1}$) entre nadadores e triatletas respectivamente. O maior *Cb* e menor *Cn* apresentados pelos nadadores foram devidos a uma diferença na *Ep*, 44% para os triatletas e 61% para os nadadores. Em outras palavras, os nadadores usaram 61% do trabalho por braçada para vencer o arrasto, enquanto somente 39% foram convertidos em energia cinética para água durante a braçada. Portanto, os nadadores tiveram maior *Cb* que os triatletas, os quais, em contraste “desperdiçaram” 56% da energia disponível por braçada em movimentar a água. Estes dados enfatizam a importância da técnica em aperfeiçoar a *Ep* e como um valioso determinante do desempenho.

Para testar se o aumento da superfície de propulsão aumentaria a *Ep*, Toussaint *et al.*⁽⁴⁸⁾ e Ogita e Tabata⁽⁵⁾ analisaram o *Cn* e *Ep* para nadar a uma mesma velocidade com e sem a utilização de palmares. Em uma mesma velocidade, a utilização de palmares diminuiu o *Cn* em 6% e aumentou a *Ep* em 8%. Do mesmo modo, Chatard *et al.*⁽⁶⁾ demonstraram que o comprimento do braço e mãos juntos influencia diretamente o *Cn*. Para uma dada estatura, quanto maior o comprimento dos braços, menor o *Cn*; uma variação de 4cm correspondeu a um ganho de 12% no *Cn*⁽⁶⁻⁷⁾. Isso concorda com os dados demonstrados por Grimston e Hay⁽⁴³⁾, nos quais os

nadadores de alto nível tinham maior superfície de mãos e braços comparados com os nadadores de nível mais baixo.

Tem sido demonstrado mais recentemente que utilização de pés-de-pato pode reduzir em 10% o *Cn* durante o *crawl*. Essa redução foi devida principalmente a diminuição do trabalho mecânico total. Conseqüentemente, valores 20% maiores na *Ep* foram encontrados com a utilização dos pés-de-pato⁽³⁰⁾. É interessante notar que o uso de pés-de-pato no *crawl* não induz somente redução na frequência de pernadas, mas também decréscimo na *Fb*. Isso indica que os pés-de-pato não somente melhoram a *Ep* dos membros inferiores, mas também influenciam de alguma forma na *Ep* dos braços. De fato, o aumento na *Ep* no *crawl* com uso de pés-de-pato foi o dobro quando comparado com o aumento demonstrado com a utilização de palmares^(5,30,48). O efeito da ação das pernas em aumentar as forças propulsivas totais tem sido previamente sugerido também por outros autores. Deschodt *et al.*⁽⁴⁹⁾ demonstraram que a pernada (durante o nado completo) não permitiu somente aumento de 10% na velocidade máxima em um tiro de 25m (comparado com os braços somente), mas também a pernada influenciou diretamente a cinemática da braçada modificando a trajetória do pulso e aumentando o *Cb*.

CONCLUSÕES

Entre os principais fatores que interferem no custo de nado estão o gênero, a idade, o nível de habilidade técnica e o estilo de nado. As mulheres apresentam um menor *Cn*, porém esta diferença desaparece quando corrigido pelo tamanho corporal. O maior *Cn* apresentado pelas crianças parece estar relacionado à menor habilidade técnica e por características morfológicas, fisiológicas e capacidades mecânicas que não estão ainda totalmente desenvolvidas. Para indivíduos com características antropométricas similares, melhor habilidade técnica e maior superfície de propulsão parecem contribuir para a redução no *Cn*. Com relação aos diferentes estilos, o mais econômico é o *crawl*, seguido pelo de costas em qualquer velocidade de nado. O borboleta é o estilo menos econômico a baixas velocidades ($< 0,8m \cdot s^{-1}$). Entretanto, acima dessa velocidade, o de peito passa a ser o estilo menos econômico. O entendimento da interação desses fatores pode auxiliar nos processos de avaliação e prescrição do treinamento nessa modalidade.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

REFERÊNCIAS

1. Toussaint HM, Knops W, De Groot G, Hollander AP. The mechanical efficiency of front crawl swimming. *Med Sci Sports Exerc.* 1990;22:402-8.
2. Di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med.* 1986;7:55-72.
3. Montpetit RR, Leger LA, Lavoie JM, Cazorla G. $\dot{V}O_2$ peak during free swimming using the backward extrapolation of the O_2 recovery curve. *Eur J Appl Physiol.* 1981;47:385-91.
4. Costill DL, Kovaleski J, Porter D, Kirwan J, Fielding R, King D. Energy expenditure during front crawl swimming: predicting success in middle-distance events. *Int J Sports Med.* 1985;6:266-70.
5. Ogita F, Tabata I. Effect of hand paddle aids on oxygen uptake during arm-stroke-only swimming. *Eur J Appl Physiol.* 1993;66:489-93.
6. Chatard JC, Lavoie JM, Lacour JR. Analysis of determinants of swimming economy in front crawl. *Eur J Appl Physiol.* 1990;61:88-92.
7. Chatard JC, Lavoie JM, Lacour JR. Energy cost of front-crawl swimming in women. *Eur J Appl Physiol.* 1991;63:12-6.
8. Zamparo P, Bonifazi M, Faina M. Energy cost of swimming of elite long-distance swimmers. *Eur J Appl Physiol.* 2005;94:697-704.
9. Zamparo P, Capelli C, Cautero M, Di Nino A. Energy cost of front-crawl swimming at supra-maximal speeds and underwater torque in young swimmers. *Eur J Appl Physiol.* 2000;83:487-91.
10. Capelli C, Pendergast DR, Termin B. Energetics of swimming at maximal speeds in humans. *Eur J Appl Physiol.* 1998;78:385-93.
11. Kjendlie PI, Ingjer F, Stallman RK, Stray-Gundersen J. Factors affecting swimming economy in children and adults. *Eur J Appl Physiol.* 2004;93:65-74.
12. Chatard JC, Padilla S, Carzola G, Lacour JR. Influence of body height, weight, hydrostatic lift and training on the energy cost of the front crawl. *NZL Sports Med.* 1985;13:82-4.
13. Toussaint HB. Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. *Med Sci Sports Exerc.* 1990;22:409-415.
14. Pendergast DR, Di Prampero PE, Craig AB Jr, Wilson DR, Rennie DW. Quantitative analysis of the front crawl in men and women. *J Appl Physiol.* 1977;43:475-9.
15. Klentrou PP, Montpetit RR. Energetics of backstroke swimming in males and females. *Med Sci Sports Exerc.* 1992;24:371-5.
16. Montpetit RR, Carzola G, Lavoie JM. Energy expenditure during front crawl swimming: a comparison between males and females. In: Ungerechts BE, Wilke K, Reischle K, editors. *Swimming science*. Champaign, IL: Human Kinetics, 1988; 5:229-35.
17. Toussaint HM, Knops W, De Groot G, Hollander AP. The mechanical efficiency of front crawl swimming. *Med Sci Sports Exerc.* 1990;22:402-8.
18. Toussaint HM, De Groot G, Savelberg HH, Vervoorn K, Hollander AP, Van Ingen Schenau GJ. Active drag related to velocity in male and female swimmers. *J Biomech.* 1988;21:435-8.
19. Huijing PA, Clarys JP, Toussaint HM, et al. Active drag related to body dimensions. In: Ungerechts B, editors. *Abstracts 5th International symposium of biomechanics and medicine in swimming*. Bockenem: Fahnenmann, 1986:48.

20. Poujade B, Hautier CA, Rouard A. Determinants of the energy cost of front-crawl swimming in children. *Eur J Appl Physiol.* 2002;87:1-6.
21. Zamparo P, Capelli C, Termin B, Pendergast DR, Di Prampero PE. Effect of the underwater torque on the energy cost, drag and efficiency of front crawl swimming. *Eur J Appl Physiol.* 1996;73:195-201.
22. Capelli C, Zamparo P, Cigalotto A, Francescato MP, Soule RG, Termin B, et al. Bioenergetics and biomechanics of front crawl swimming. *J Appl Physiol.* 1995;78:674-9.
23. Yanai T. Rotational effect of buoyancy in front crawl: does it really cause the legs to sink? *J Biomech.* 2001;34:235-43.
24. Kjendlie PL, Ingjer F, Madsen O, Stallman RK, Stray-Gundersen J. Differences in the energy cost between children and adults during front crawl swimming. *Eur J Appl Physiol.* 2004;91:473-80.
25. Toussaint HM, de Looze M, Van Rossem B, Leijdekkers M, Dignum H. The effect of growth on drag in young swimmers. *Int J Sports Biomech.* 1990;6:18-28.
26. Toussaint HM, Hollander AP, Van den Berg C, Vorontsov A. Biomechanics of swimming. In: Garrett WE, Kirkendall DT, editors. *Exercise and Sport Science.* Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins, 2000;639-60.
27. Holmer I. Physiology of swimming man. *Acta Physiol Scand Suppl.* 1974;407:1-55.
28. Lavoie JM, Montpetit RR. Applied physiology of swimming. *Sports Med.* 1986;3:165-89.
29. Hollander PA, De Groot G, Van Ingen Schenau GJ, Kahman R, Toussaint HM. Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming. In: Ungerechts BE, Wilke K, Reischle K, editors. *Swimming science.* Champaign, IL: Human Kinetics, 1988;5:39-44.
30. Zamparo P, Pendergast DR, Mollendorf J, Termin A, Minetti AE. An energy balance of front crawl. *Eur J Appl Physiol.* 2005;94:134-44.
31. Pendergast D, Zamparo P, Di Prampero PE, Capelli C, Cerretelli P, Termin A, et al. Energy balance of human locomotion in water. *Eur J Appl Physiol.* 2003;90:377-86.
32. Zamparo P, Pendergast DR, Termin B, Minetti AE. How fins affect the economy and efficiency of human swimming. *J Exp Biol.* 2002;205:2665-76.
33. Holmer I. Energy cost of arm stroke, leg kick, and the whole stroke in competitive swimming styles. *Eur J Appl Physiol.* 1974;33:105-18.
34. Ogita F, Hara M, Tabata I. Anaerobic capacity and maximal oxygen uptake during arm stroke, leg kicking and whole body swimming. *Acta Physiol Scand.* 1996;157:435-41.
35. Smith HK, Montpetit RR, Perrault H. The aerobic demand of backstroke swimming, and its relation to body size, stroke technique, and performance. *Eur J Appl Physiol.* 1988;58:182-8.
36. Barbosa TM, Keskinen KL, Fernandes R, Colaço P, Lima JP, Vilas-Boas JP. Energy cost and intracyclic variation of the velocity of the center of mass in butterfly stroke. *Eur J Appl Physiol.* 2005;93:519-23.
37. Barbosa TM, Keskinen KL, Fernandes R, Colaco P, Carmo C, Vilas-Boas JP. Relationships between energetic, stroke determinants, and velocity in butterfly. *Int J Sports Med.* 2005;26:841-6.
38. Choi SW, Kurokawa T, Ebisu Y, Kikkawa K, Shiokawa M, Yamasaki M. Effect of wearing clothes on oxygen uptake and ratings of perceived exertion while swimming. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci.* 2000;19:167-73.
39. Holmer I. Propulsive efficiency of breaststroke and freestyle swimming. *Eur J Appl Physiol.* 1974;33:95-103.
40. Chengalur SN, Brown PL. An analysis of male and female Olympic swimmers in the 200-meter events. *Can J Sport Sci.* 1992;17:104-9.
41. Kennedy P, Brown PL, Chengalur SN, Nelson RC. Analysis of male and female Olympic swimmers in the 100-meter events. *Int J Sport Biomech.* 1990;6:187-97.
42. Arellano R, Brown P, Cappaert J, Nelson RC. Analysis of 50-, 100- and 200-m freestyle swimmers at the 1992 Olympic Games. *J Appl Biomech.* 1994;10: 189-99.
43. Grimston SK, Hay JG. Relationships among anthropometric and stroking characteristics of college swimmers. *Med Sci Sports Exerc.* 1986;18:60-8.
44. Craig AB Jr, Skehan PL, Pawelczyk JA, Boomer WL. Velocity, stroke rate, and distance per stroke during elite swimming competition. *Med Sci Sports Exerc.* 1985;17:625-34.
45. Caputo F, Lucas RD, Greco CC, Denadai BS. Características da braçada em diferentes distâncias no estilo crawl e correlações com performance. *Rev Bras Ciên Mov.* 2000;8:7-13.
46. Termin B, Pendergast DR. Training using the stroke frequency-velocity relationship to combine biomechanical and metabolic paradigms. *J Swimming Res.* 2000;14:9-17.
47. Wakayoshi K, D'Acquisto LJ, Cappaert JM, Troup JP. Relationship between oxygen uptake, stroke rate and swimming velocity in competitive swimming. *Int J Sports Med.* 1995;16:19-23.
48. Toussaint HM, Janssen T, Klufft M. Effect of propelling surface size on the mechanics and energetics of front crawl swimming. *J Biomech.* 1991;24:205-11.
49. Deschodt VJ, Arsac LM, Rouard AH. Relative contribution of arms and legs in humans to propulsion in 25-m sprint front-crawl swimming. *Eur J Appl Physiol.* 1999;80:192-9.