



# BIOMECÂNICA DA NATAÇÃO: CONSIDERAÇÕES SOBRE A SELEÇÃO DE MODELOS

---

Ricardo M. L. Barros

Universidade Estadual de Campinas – Brasil

## INTRODUÇÃO

A análise biomecânica de movimentos humanos em meio aquático é particularmente desafiadora e requer uma abordagem complexa para sua realização. Considerando que a biomecânica é uma ciência ou área de conhecimento empírica, as possibilidades de estudo ou contribuição da biomecânica para tratar problemas específicos dos esportes/atividades aquáticas dependem da aplicabilidade de seus modelos de representação da realidade e métodos de investigação. É claro que se pode analisar, por exemplo, um nadador realizando movimentos simulados fora d'água ou estudar variáveis isoladas como força isométrica ou torque isocinético em um laboratório convencional, mas a validade destas medidas é relativa, considerando-se o problema específico do desempenho na atividade.

Por exemplo, em contexto esportivo de alto desempenho, é importante a geração de conhecimento novo e a realização de análises biomecânicas durante a realização da atividade competitiva ou de treinamento. Certamente estudos laboratoriais são importantes e necessários, sendo capazes de fornecer dados em situação controlada e com variáveis isoladas. Contudo, a obtenção de variáveis biomecânicas em situação real de competição é não apenas uma possibilidade, mas uma necessidade e uma tendência de pesquisa em todo o mundo.

Neste trabalho, discutimos alguns aspectos a serem considerados na seleção do modelo biomecânico adotado para o estudo em meio fluido.

## MODELO DINÂMICO

O primeiro passo para a análise biomecânica é a construção de um modelo biomecânico de representação do corpo do sujeito e da situação em análise. Este modelo trata-se de uma idealização, que implica uma simplificação, na qual as características essenciais do sujeito e do fenômeno são representadas e as não essenciais são desconsideradas mediante justificativas plausíveis.

O primeiro aspecto a ser considerado em uma análise dinamométrica em meio fluido é que, além da força peso que atua sobre todos os corpos, outras forças resistivas (arrasto) ou de flutuação (empuxo) são relevantes. Note que o ar também é um fluido e tais forças também estão presentes fora da água contudo, em muitos estudos em biomecânica, os efeitos da resistência/empuxo do ar podem ser desprezados sem prejuízo para a análise. Em meio líquido isto não é possível.

Além de novas forças externas estarem presentes no meio aquático, deve-se acrescentar que estas forças têm características distintas da força peso. Lembremos que a força peso possui intensidade, direção e sentido constantes para um dado corpo (massa), em um dado local (aceleração da gravidade), sendo portanto independente do tempo. A força de arrasto, no entanto, apresenta uma complexa dependência das variáveis envolvidas no problema, por exemplo, se o escoamento entre

o corpo e o fluido é laminar ou turbulento. No fluxo turbulento, a força de arrasto é afetada pelo quadrado da velocidade relativa entre o corpo e o fluido ( $v^2$ ), a densidade ( $\rho$ ) deste último, a área de seção transversal do corpo normal a direção do seu movimento ( $A$ ) e também do coeficiente do arrasto ( $C_d$ ), este último dependente da forma do objeto e variando lentamente em função da velocidade. Já em um fluxo laminar, o arrasto varia com a primeira potência da velocidade ( $v$ ). A Equação 1 mostra o relacionamento entre as variáveis.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (1)$$

O conhecimento destas relações teóricas já fornece, por si só, alguns elementos para a análise do deslocamento em meio aquático e sugere maneiras de melhorar o desempenho. Por exemplo, se o objetivo é nadar mais rápido é fácil perceber que isto depende de quanto a força propulsiva é maior que a resistiva e, portanto, devemos agir para aumentar a primeira e reduzir a segunda.

A redução do arrasto ocorrerá sempre que reduzirmos qualquer termo do lado direito da Equação 1. A redução do coeficiente de arrasto entre o nadador e o fluido foi um ponto central das pesquisas recentes em natação. Começando com os tímidos efeitos dos procedimentos de raspagem de pêlos dos atletas usados nos anos 70, os trajes confeccionados com tecidos especiais como teflon produziram resultados tão significativos nas Olimpíadas de Pequim que o uso de certos tipos de traje foi proibido.

A redução da densidade da água pela elevação da temperatura, e conseqüente redução do arrasto, é outra forma de beneficiar a performance em uma determinada piscina. Outra maneira bastante usada é a redução do arrasto de onda, aquele decorrente da colisão do corpo do nadador com as ondas de fluido produzidas pela movimentação dos nadadores. Para isso, usam-se separadores de raia que absorvem parte da energia mecânica das ondas do fluido transformando-a em movimento de rotação dos anéis plásticos que flutuam na superfície da água. Mais recentemente, a construção das piscinas de competição tem previsto sistemas de escoamento que evitem a reflexão das ondas nas bordas da piscina, além deixar um espaço maior entre os nadadores das raia mais externas da piscina e a borda, com isso parte da energia das ondas é dissipada ao longo do deslocamento. A profundidade da piscina também pode reduzir os efeitos do arrasto de onda.

Contudo, o fato do arrasto variar com a primeira potência da velocidade no escoamento laminar e com a velocidade ao quadrado no escoamento turbulento tem um impacto especialmente importante no desempenho. Lembremos que ao triplicarmos a velocidade de um corpo que enfrenta um fluxo laminar a força que detém este corpo é multiplicada por três, mas se o fluxo for turbulento, a força de arrasto será nove vezes maior. Na verdade, ao analisarmos um atleta nadando, partes do seu corpo estarão enfrentando fluxo turbulento, por exemplo sua perna ao entrar na água, e outras partes, como talvez parte de seu tronco, esteja encontrando um fluxo laminar. Assim, os pesquisadores que se detiveram sobre este assunto enfrentaram o problema de identificar que tipo de fluxo ocorreria em cada parte do corpo do nadador e em que fases do ciclo da braçada, a fim de reduzir a ocorrência de fluxo turbulento.

As forças verticais também são importantes no desempenho do nado. Cada segmento do corpo está sujeito, pelo menos, às forças peso e empuxo. Como o empuxo é igual ao peso do fluido deslocado, esta força varia durante todo o nado na medida em que mais partes do corpo estão submersas.

Assim, um modelo dinâmico de análise em meio aquático deve considerar a inclusão ou não de uma força com base nos possíveis efeitos que poderão ou não ser detectados, a partir desta escolha. Um capítulo à parte deste problema, que não será

abordado neste artigo, é a instrumentação adequada para a realização de análise biomecânica em meio líquido. A dificuldade de obtenção de uma variável também é um determinante da sua inclusão ou não em um modelo.

## O MODELO CINEMÁTICO

A análise cinemática submersa do movimento humano também se constitui em um grande desafio devido à dificuldade em se obter as posições e/ou orientações de pontos/segmentos corporais de interesse ao longo do movimento. Dois tipos principais de modelos cinemáticos de representação do corpo de um atleta/sujeito são usados, o modelo que representação do corpo como um ponto material e o modelo de representação como um conjunto de segmentos rígidos articulados.

No modelo de ponto material, escolhe-se arbitrariamente um ponto anatômico de interesse no atleta, pelve, cabeça, mão ou outro qualquer e analisa-se a sua posição em função do tempo ao longo do movimento, bem como as variáveis derivadas, como velocidade e aceleração.

Em mecânica, ponto material é uma abstração feita para representar qualquer objeto que em virtude do fenômeno tem dimensões desprezíveis, ou seja, dimensões tais que não afetam o estudo do fenômeno. Note que ao modelar o corpo do atleta/sujeito desta forma, desprezamos as possíveis rotações que o mesmo possa realizar sobre si mesmo e os movimentos relativos entre seus membros. Articulando-se as informações cinemáticas e dinâmicas disponíveis, variáveis como impulso, potência entre outras podem ser obtidas. Para sabermos se o modelo é adequado e as eventuais medições são satisfatórias, devemos realizar experimentos específicos que nos permitiram concluir isso.

Quando não é possível ou não se deseja usar o modelo de ponto material para representar o corpo do sujeito, o mais comum é a adoção de um modelo de representação baseado em segmentos rígidos articulados. Nesta abordagem, o corpo do atleta é modelado como um conjunto de segmentos rígidos, isto é, segmentos que não variam sua forma ou dimensão ao longo do tempo. A cada dois segmentos adjacentes do modelo deve-se definir o tipo de articulação entre eles, isto é, aproximadamente, se a articulação realiza apenas flexão-extensão, ou possui também abdução-adução e rotação interna-externa.

Definidos o número de segmentos e articulações do modelo, resta definir se o espaço em que o movimento ocorrerá é bidimensional ou tridimensional. Obviamente o movimento humano se dá em um espaço tridimensional, mas em algumas situações aceita-se analisar apenas uma projeção do movimento sobre um plano. Novamente, para cada simplificação introduzida no modelo deve-se estar seguro de como as variáveis de interesse são afetadas por essas simplificações.

Outro aspecto importante na modelagem é conhecer a “geometria” individualizada do corpo do atleta, isto é, sua antropometria, de maneira a associá-la corretamente ao modelo. Assim, o comprimento da coxa do atleta deve ser conhecido para que se possa atribuir ao modelo. Da mesma forma, é necessária a obtenção de características inerciais dos elementos do modelo, como a massa do segmento, a distribuição desta massa ao longo do segmento (momento de inércia), as posições relativas dos centros de massa segmentares, entre outras variáveis. A antropometria fornece informações relevantes para a caracterização do atleta e da sua evolução ao longo do processo de treinamento/recuperação. Além disso, fornece informações essenciais para o cálculo da posição do centro de massa do corpo como um todo.

Qualquer que seja o modelo de representação do corpo do sujeito em estudo, a análise cinemática submersa irá requerer uma instrumentação especial para realizá-la, mas que também não trataremos neste artigo. Além de proteger os equipamentos, a blindagem é um aspecto essencial para a segurança de todos os envolvidos. Lembremos que o meio líquido é um excelente condutor de eletricidade e que o uso de qualquer instrumento eletricamente alimentado deve seguir regras específicas de segurança.

A presença do duplo meio (ar-líquido) obriga a análise cinemática a tratar o problema dos diferentes índices de refração envolvidos e que pode afetar as análises baseadas em foto-videogrametria e também aquelas baseadas em sensores-transmissores.

Recentemente, em nosso laboratório, desenvolvemos um sistema para análise cinemática tridimensional submersa que trata de alguns dos problemas mais difíceis que é o da calibração não-linear de câmeras submersas. Mais informações podem ser encontradas em (Silvatti et al., 2010).

## CONCLUSÃO

Assim, embora com grandes potencialidades, a análise biomecânica submersa ainda apresenta grandes desafios teóricos e práticos para sua realização com qualidade e rigor acadêmico. A seleção adequada dos modelos de representação do ambiente, sujeitos de interesse, instrumentação ainda é um desafio a ser contornado.

A consolidação e cooperação dos grupos de pesquisa no país envolvidos no assunto deve ser estimulada, bem como a aproximação com praticantes, treinadores e atletas, visando à construção de um conhecimento científico rigoroso e aplicável.

## REFERÊNCIA

SILVATTI, A. P. ; Tiago Telles ; Marcel Rossi ; DIAS, Fabio ; LEITE, Neucimar J ; Barros, Ricardo M. L. . UNDERWATER NON-LINEAR CAMERA CALIBRATION: AN ACCURACY ANALYSIS. In: 28 International Conference on Biomechanics in Sports (2010), 2010, Marquette, Michigan, USA. Proceedings of 28 International Conference on Biomechanics in Sports (2010).

### Contatos

Universidade Estadual de Campinas  
Fone: não fornecido pelo autor  
Endereço: não fornecido pelo autor  
E-mail: [ricardomachado12@yahoo.com.br](mailto:ricardomachado12@yahoo.com.br)

### Tramitação

Recebido em: 15/06/10  
Aceito: 15/10/10