

# ANÁLISE DAS FORÇAS DE SUSTENTAÇÃO DE UM CORPO ELÍPTICO EM TRAJETÓRIA EM FORMA DE OITO UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Núcleo de Estudos de Transição e Turbulência

## INTRODUÇÃO

Atletas de natação e nado sincronizado realizam o movimento de sustentação na água, denominado Palmateio, o qual é feito com as mãos em trajetória em forma de oito, a fim de proporcionar sustentação ao corpo. Este movimento é utilizado na natação e outras modalidades aquáticas, sendo conhecido por seu efeito propulsivo. O objetivo principal deste estudo foi, através de simulações computacionais, recriar o movimento de Palmateio, modificando a posição da mão e analisar o comportamento das forças envolvidas.

A mão foi representada por meio de uma elipse, de dimensões semelhantes às das mãos das atletas, onde se variou o ângulo de ataque na virada do movimento. O coeficiente de sustentação foi analisado, verificando diferentes variações da força propulsiva efetiva. A pesquisa se desenvolveu em duas partes, sendo a primeira com apenas uma elipse, e a segunda com duas elipses representando as mãos. Através destas análises pretendeu-se identificar a trajetória mais efetiva, ou seja, onde a força de sustentação aponta para cima durante uma maior parte do tempo.

## METODOLOGIA

Para a análise do movimento, foi utilizado o código de cálculo Incompact3d (Laizet e Lamballais, 2009), baseado em um esquema de diferenças finitas compacto de sexta ordem (discretização espacial) e um esquema de Runge-Kutta de baixa armazenagem de terceira ordem. Com este código é possível simular escoamentos incompressíveis utilizando as equações adimensionalizadas de Navier-Stokes e da Continuidade, dadas por:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\omega} \otimes \vec{u} = -\nabla \Pi + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \vec{u} + \vec{F},$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0,$$

onde  $\vec{u}$  é a velocidade do escoamento,  $\vec{\omega}$  é a vorticidade,  $\Pi$  é a pressão modificada e  $\text{Re}$  é o número de Reynolds. O Método das Fronteiras Imersas (IBM) foi utilizado para incluir a presença da elipse, na forma de um campo de força externo,  $\vec{F}$ , nos pontos do domínio onde estaria localizado o corpo.

## PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

A elipse escolhida possui eixos  $R_a = 1$  (eixo maior) e  $R_b = 0.4$  (eixo menor), cuja razão de aspecto  $R_a/R_b=2.25$ , semelhante à de uma mão de atleta feminina. Em todas as simulações, a elipse percorre uma trajetória em forma de oito de amplitude  $a = 2$  e comprimento  $b=5$ . O Número de Reynolds escolhido foi igual a 300, e o passo de tempo foi  $\Delta t=0.01$ . Todos estes termos foram mantidos constantes durante todas as simulações.

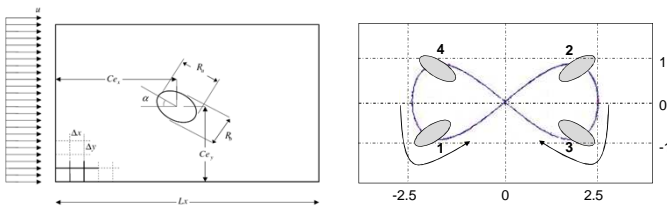


Figura 1. Malha cartesiana utilizada e parâmetros (à esquerda) e trajetória da elipse (à direita).

A trajetória da elipse foi definida de acordo com o ângulo de ataque  $\alpha$  (ângulo com o qual a mão inicia o movimento, em relação ao eixo horizontal), como mostrado no gráfico da função Giro em função do tempo (Fig. 2), onde foram marcados os quatro momentos em que a mão muda de direção durante o palmateio. Na trajetória do ponto 1 para o 2 e na trajetória do ponto 3 para o 4 (Fig. 1, dir.), o ângulo  $\alpha$  permanece constante, e o giro da elipse propriamente dito acontece de 2 para 3 e de 4 para 1.

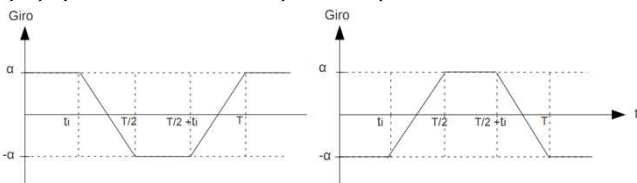


Figura 2. Funções do movimento da mão esquerda e direita, respectivamente.

## RESULTADOS

A partir dos campos de velocidade e pressão, foi calculado o coeficiente de sustentação, pelo método de balanço integral de quantidade de movimento sobre um volume de controle arbitrário. Durante a primeira parte estudo, trinta e quatro diferentes ângulos de ataque ( $\alpha$ ) foram simulados, entre  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , observando as mudanças que ocorriam no coeficiente de sustentação ( $C_L$ ). A figura 3 mostra o coeficiente de sustentação médio,  $C_L$ , e a porcentagem de tempo em que o coeficiente é positivo, em função do ângulo de ataque.

Após estas simulações, mais uma elipse foi inserida na malha cartesiana, de dimensões iguais à primeira, com trajetória simétrica com relação à primeira. O objetivo foi analisar os coeficientes de arrasto e de sustentação, procurando evidenciar as diferenças com relação ao movimento de apenas uma elipse. Com base nas simulações para uma única elipse, foram simulados apenas os ângulos onde houve mudanças de comportamento dos coeficientes e da esteira de vórtices, resultando em quinze ângulos de ataque diferentes. Os mesmos gráficos também foram feitos para estas simulações (Fig. 4).

Todos os quatro gráficos abaixo apresentam o mesmo padrão de comportamento, ou seja, os valores crescem até um determinado valor e em seguida decrescem. Nota-se que quando inserimos mais uma elipse, os valores são ligeiramente maiores comparados aos de apenas uma elipse até aproximadamente  $45^\circ$ , e em seguida passam a ser menores. Isto ocorre porque a presença de uma nova esteira de vórtices faz com que haja uma interação com a primeira, modificando os resultados.

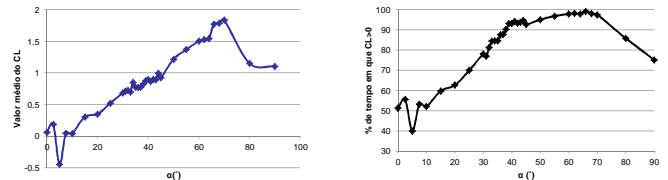


Figura 3. Gráficos da porcentagem de tempo em que o coeficiente de sustentação é positivo e do coeficiente de sustentação médio para o movimento com uma elipse, ambos em função do ângulo de ataque.

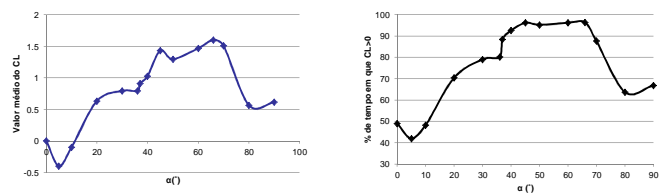


Figura 4. Gráficos da porcentagem de tempo em que o coeficiente de sustentação é positivo e do coeficiente de sustentação médio para o movimento com duas elipses, ambos em função do ângulo de ataque.

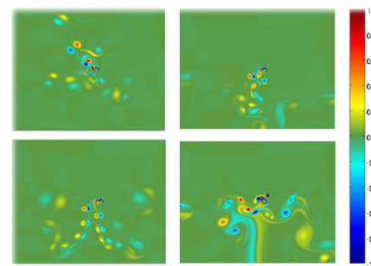


Figura 5. Exemplos de campos de vorticidade para uma elipse, para os ângulos 5, 37 e 90.

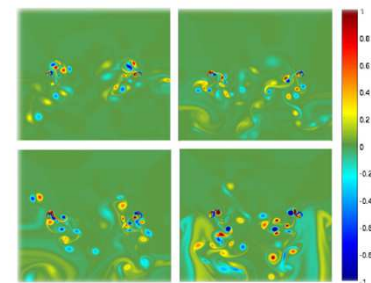


Figura 6. Exemplos de campos de vorticidade para duas elipses, para os ângulos 5, 37, 70 e 90.

## CONCLUSÃO

Para deduzir os motivos da sustentação de um corpo através do palmateio foi necessário utilizar um código computacional que recriasse esse movimento, analisando uma variável em particular. Neste estudo, analisamos a variável ângulo de ataque ( $\alpha$ ) da mão de um atleta por simulações computacionais, em um intervalo que vai de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Após isso, foi possível concluir o ângulo com o qual a trajetória é a mais efetiva dentre as outras, e também as razões pelas quais isso ocorreu, sendo que, -a maior porcentagem de tempo em que o coeficiente de sustentação é positivo e o seu maior valor médio ocorrem, ambos, em  $\alpha = 66^\circ$ ; -em ângulos pequenos os vórtices se concentravam na parte superior da elipse, o que influenciou negativamente o movimento, explicando os valores baixos encontrados; -a presença de uma nova elipse fez com que houvesse interação entre as duas esteiras de vórtices, aumentando o arrasto e diminuindo a sustentação entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

## REFERÊNCIAS

- Laizet, S.; Lamballais, E. 2009. "High order compact schemes for incompressible flows".
- Gomes, Lara Elena. 2010. "Comparação entre forças propulsivas efetivas calculada e medida durante um palmateio de sustentação".
- Sanders, R. 1999. "Hydrodynamic characteristics of a swimmer's hand".
- White, F. 2010. "Mecânica dos fluidos".