



Avaliação numérica em CFD dos esforços hidrodinâmicos sobre concha marinha do tipo *Anomalocardia brasiliana* no limiar do transporte

Adriel Vergilio¹, Felipe Rafael Secco da Silva², Eduardo Puhl³ & Guilherme Henrique Fiorot⁴

Resumo: O conhecimento das condições hidrodinâmicas que desencadeiam o início do movimento de sedimentos auxilia a refinar as interpretações de ambientes deposicionais. Particularmente, sedimentos de origem biológica como conchas de moluscos, de geometria variada, geralmente assimétrica, são um desafio para estudos hidrodinâmicos. Neste contexto, compreender o processo de transporte e sedimentação destes sedimentos permite aprimorar os modelos preditivos da evolução sedimentológica bem como a gestão das zonas costeiras. Assim, o presente estudo visa identificar as forças que atuam na concha bivalve da espécie *Anomalocardia brasiliana* sob a influência de um escoamento turbulento de água, focando no limiar do movimento. Utilizando simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST em regime permanente, investiga-se as forças hidrodinâmicas sobre a concha quando a mesma se apresenta em quatro orientações distintas com relação a incidência do escoamento, com a concavidade voltada para baixo. Os resultados revelam variações significativas nas forças de arrasto e de sustentação em função da orientação da concha, permitindo a identificação da configuração mais estável e daquela mais suscetível ao início do movimento. Esses resultados corroboram observações experimentais anteriores da literatura.

Abstract: The knowledge of the hydrodynamic conditions that trigger the initiation of sediment movement helps refine interpretations of depositional environments. Particularly, sediments of biological origin, such as mollusk shells with varied and generally asymmetrical geometry, pose a challenge for hydrodynamic studies. In this context, understanding the transport and sedimentation process of these sediments makes it possible to improve predictive models of sedimentological evolution as well as the management of coastal zones. Therefore, the present study aims to identify the forces acting on the bivalve shell of the species *Anomalocardia brasiliana* under the influence of turbulent water flow, focusing on the threshold of movement. Using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations with the $k-\omega$ SST turbulence model in a steady state, the hydrodynamic forces on the shell are investigated when it is positioned in four different orientations relative to the flow incidence, with the concavity facing downward. The results reveal significant variations in drag and lift forces depending on the shell's orientation, allowing the identification of the most stable configuration and the one most susceptible to the initiation of movement. These findings corroborate previous experimental observations in the literature.

Palavras-Chave: concha bivalve; *Anomalocardia brasiliana*; simulação CFD; transporte de sedimentos, limiar de movimento.

Keywords: Bivalve shell; *Anomalocardia brasiliana*; CFD simulation; Sediment transport; Threshold of motion.

1) Discente, Laboratório de Reologia e Escoamentos de Fluidos Não Newtonianos, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. adriel.vergilio@ufrgs.br

2) Discente, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. felipe.secco@ufrgs.br

3) Docente, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. eduardo.puhl@ufrgs.br

4) Docente, Laboratório de Reologia e Escoamentos de Fluidos Não Newtonianos, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. guilherme.fiorot@ufrgs.br



INTRODUÇÃO

Estudar o limiar de movimento das conchas marinhas, ou seja, entender como o escoamento é capaz de iniciar o transporte de conchas, contribui para o avanço das ciências geológicas e ambientais. O transporte de sedimentos de origem biológica apresenta uma dificuldade adicional daquelas de origem mineral (como areias e argilas) pois usualmente possuem geometrias complexas que, na interação com uma corrente apresentam comportamento hidrodinâmico fortemente dependente das condições do escoamento e do próprio grão. Assim, compreender de maneira mais íntima como o início do movimento das conchas se dá é útil para a melhoria de modelos geológicos e a construção de outros mais precisos (Silva *et al.*, 2023). O comportamento hidrodinâmico das conchas, incluindo as forças de arrasto e sustentação oferecidas pelo escoamento, desempenha um papel significativo na sua captura e no seu transporte, impactando subsequentemente a estabilidade dos sedimentos e o desenvolvimento de formas de leito e depósitos (Olivera; Wood, 1997). Usualmente, a tensão de cisalhamento que o escoamento exerce sobre o leito é empregada como fator determinante para estabelecer as condições hidrodinâmicas necessárias para o início do movimento. A complexidade do transporte destes sedimentos pode ser percebida, por exemplo, pela análise da orientação das conchas durante o transporte, que pode revelar padrões históricos de correntes e energia das ondas, fornecendo informações sobre o contexto geológico e climático do passado (Nagle, 1967). Neste contexto, entender a hidrodinâmica dos sedimentos é fundamental para refinar as interpretações dos ambientes deposicionais no registro fóssil e aprimorar modelos numéricos preditivos da evolução e gestão das zonas costeiras (Rieux *et al.*, 2019).

A análise do limiar do início de movimentação do sedimento pode ser abordada tanto para situações em que a água se encontra em fluxo unidirecional, quanto em casos de correntes oscilatórias geradas por ondas. Além disso, é possível analisar esse problema considerando que a concha repousa sobre um leito rugoso (composto de outras partículas de tamanhos e formas similares), ou considerando que a concha está depositada em um leito liso (composto de grãos significativamente menores). A desestabilização do grão em repouso é resultado do balanço de forças e momentos atuantes no grão: arrasto, sustentação, peso e empuxo (Dey; Ali, 2019).

Fick *et al.* (2020) ao compararem dados da literatura sobre o início de movimento de conchas de moluscos, observaram diferenças entre experimentos conduzidos com uma única concha isolada em leito liso daqueles conduzidos com as conchas sobre um leito rugoso. No caso das conchas isoladas, a tensão de cisalhamento sobre o leito necessária para alcançar o ponto de início de movimento é menor em comparação com a situação em que a concha repousa sobre um leito rugoso. Algumas pesquisas (Fisher; Sill; Clark, 1983; Ramsdell; Miedema; Talmon, 2011; Wiberg; Smith, 1987) mostram que, independentemente do número de Reynolds do grão, a tensão crítica de cisalhamento diminui com o aumento da razão entre o diâmetro da partícula analisada e do diâmetro médio das partículas que compõe o leito. Uma consequência disto é a redução na tensão de cisalhamento relativa necessária para iniciar o movimento das conchas quando comparado com as partículas não biológicas do leito.

A espécie de concha escolhida para os estudos é a *Anomalocardia brasiliiana*, pertencente à classe bivalvia, e encontrada na costa sudeste brasileira. Esses materiais biogênicos são encontrados em concentrações bioclásticas densas localizadas no ambiente de retrobarreira (pacote Holocênico) da planície costeira de Jaguaruna/Laguna, estado de Santa Catarina, Brasil (Fornari; Giannini; Nascimento, 2012). A seleção dessa espécie foi motivada pela realização de estudos experimentais sobre o limiar de início de movimento pelos pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS (IPH).

O presente trabalho tem como objetivo geral identificar as características dinâmicas de um sedimento tipo concha *Anomalocardia brasiliiana* no limiar do movimento quando submetido a um escoamento turbulento de água, empregando um estudo em Dinâmica dos Fluidos Computacional



(CFD). O processo envolve o desenvolvimento de um modelo numérico que leva em consideração a geometria real de uma concha e o escoamento turbulento incidente sobre ela em condições que remetem ao limiar do transporte. O escoamento é resolvido empregando o software OpenFOAM e, na etapa de pós-processamento, as forças de arrasto e de sustentação são exploradas.

METODOLOGIA

As simulações numéricas foram realizadas utilizando o OpenFOAM, um software de CFD de código aberto baseado no método dos volumes finitos. Este software se destaca por ser completamente gratuito e oferecer ampla flexibilidade na personalização das configurações de simulação. Para o problema em questão, optou-se por uma modelagem tridimensional, dada a assimetria da geometria da concha estudada. O escopo geral é de um escoamento sobre uma placa plana com o modelo da concha fixo à placa.

Pré-análise

O estudo aqui apresentado trata da identificação dos esforços hidrodinâmicos aos quais um sedimento do tipo concha *Anomalocardia brasiliiana* se encontra submetido devido a um escoamento turbulento, quando as condições são próximas ao limiar do movimento, ou seja, o balanço de forças sobre a concha é tal que ela pode ser transportada pelo escoamento. Considera-se, portanto o esquema da Figura 1(a), onde se nota: o peso submerso (F_g); a força normal (N); a força de atrito que deve se manifestar entre a concha e o leito (F_s); a força de arrasto (F_D); e a força de sustentação (F_L).

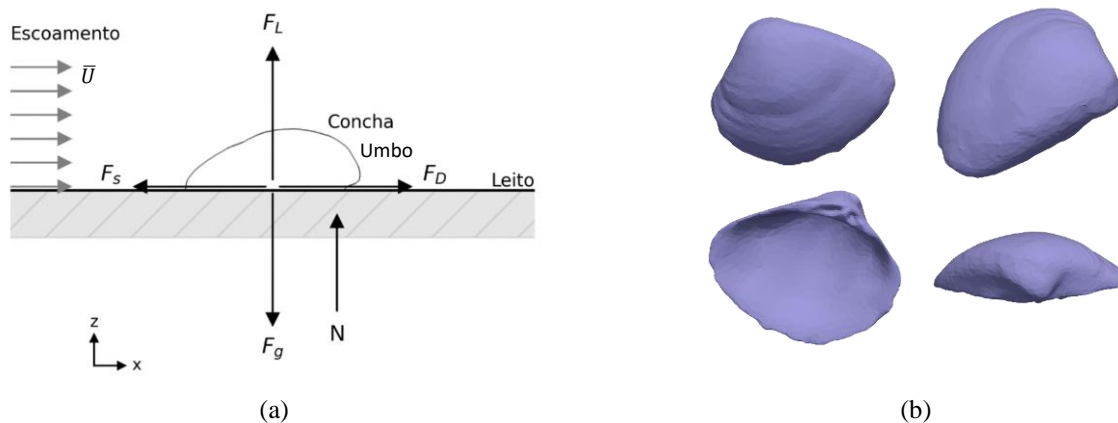


Figura 1 – Representação esquemática do problema: (a) representação das forças atuantes sobre a concha em função do escoamento; (b) modelo digital 3D da *Anomalocardia brasiliiana*.

As dimensões da concha digital (Figura 1(b)) são semelhantes às da amostra número 8 do estudo realizado por Silva *et al.* (2023). As dimensões características da concha são de 31,31 mm de comprimento, 25,16 mm de largura 9,83 mm de altura. Destaca-se aqui a região do umbo da concha (a parte mais antiga da concha, localizada na borda dorsal), que servirá como referencial geométrico para os estudos de caso. As condições de escoamento adotadas nas simulações foram baseadas nos dados experimentais do limiar de movimento específicos para esta amostra. No experimento conduzido pelos pesquisadores, a concha atingiu o limiar de movimento sob um escoamento em canal com velocidade média (\bar{U}) de 0,69 m/s e profundidade (h) de 59 mm, apresentando o número de Shields de $5,62 \times 10^{-3}$. O número de Reynolds calculado para o canal (Re_x)⁵ foi de $3,7 \times 10^6$, enquanto

⁵ $Re_x = \frac{\rho U x}{\mu}$, onde ρ é a massa específica, μ é a viscosidade, U é a velocidade média no canal e x é a distância da concha em relação ao início do canal.



o número de Reynolds associado à concha (Re_S)⁶ atingiu $9,8 \times 10^4$. Esses valores indicam que o regime de escoamento ao redor da concha é predominantemente turbulento.

Com base nestas observações, estimou-se um perfil de velocidades na entrada do escoamento utilizando a lei de potência de 1/7 que fornece uma boa aproximação para perfis de velocidade média em escoamentos turbulentos sob regime de gradiente de pressão favorável (De Chant, 2005). Dessa forma, a velocidade de corrente livre (U_∞) calculada para o escoamento em questão é de 0,789 m/s.

Estudos de caso

Com base no estudo conduzido por Silva *et al.* (2023), foi observado que, para uma mesma condição hidrodinâmica do escoamento, as conchas do tipo *A. brasiliiana* demonstram maior estabilidade quando sua concavidade está voltada para baixo e o umbo está direcionado no sentido do escoamento. Em outras condições, as conchas podem ser transportadas por curtas distâncias com o umbo a montante, até que se reorientem e adotem uma postura mais estável. Nestas circunstâncias, a *A. brasiliiana* pode se depositar com o eixo mais longo alinhado à direção do escoamento, resultando no umbo apontando perpendicularmente ao fluxo. Com base nestas observações, foram definidos quatro tipos diferentes de orientações para realizar as simulações: umbo apontando na direção do escoamento (0°); umbo perpendicular ao escoamento (90° e 270°); e umbo contra o escoamento (180°). A Figura 2 ilustra estas posições definidas para as simulações.

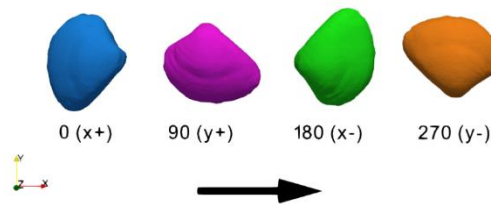


Figura 2 – Representação esquemática das quatro orientações empregadas para a concha *A. brasiliiana* em relação ao escoamento nas simulações. A seta indica a direção do escoamento. As cores serão empregadas como identificadores das simulações.

Para a criação do modelo tridimensional, inicialmente, escolheu-se um exemplar específico para ser escaneado. Em seguida, para facilitar o processo de captura de imagens, uma linha de nylon foi presa à concha, permitindo que ela permanecesse suspensa e estável durante a sessão fotográfica. Com a concha devidamente preparada, procedeu-se à captura de um total de 100 fotografias, cobrindo uma ampla gama de ângulos para garantir a completa digitalização do espécime. Essas fotografias foram posteriormente carregadas e processadas pelo software *ReCap Photo*. Para aprimorar ainda mais o modelo, foram realizados ajustes de escala e efetuados cortes de superfícies indesejadas utilizando o software *3dsMax*, de onde foi exportado o modelo final.

Malha

A malha utilizada na simulação foi gerada com as ferramentas de malha integradas no pacote OpenFOAM, especificamente *blockMesh* e *snappyHexMesh*. Optou-se por uma malha do tipo *Hex-dominant*. Uma visão geral em corte desta malha pode ser observada na Figura 3(a).

O tamanho do domínio de simulação foi definido como aproximadamente 10 vezes a maior dimensão da concha na direção do escoamento e 7 vezes essa dimensão na direção transversal. A concha foi posicionada a um terço do tamanho total do domínio a partir da área de entrada. A altura do domínio, em relação à superfície inferior, foi estabelecida em 59 mm, que corresponde à lâmina da água do canal experimental.

⁶ $Re_S = \frac{\rho U D_n}{\mu}$ onde D_n é o diâmetro de uma esfera com o mesmo volume da concha.

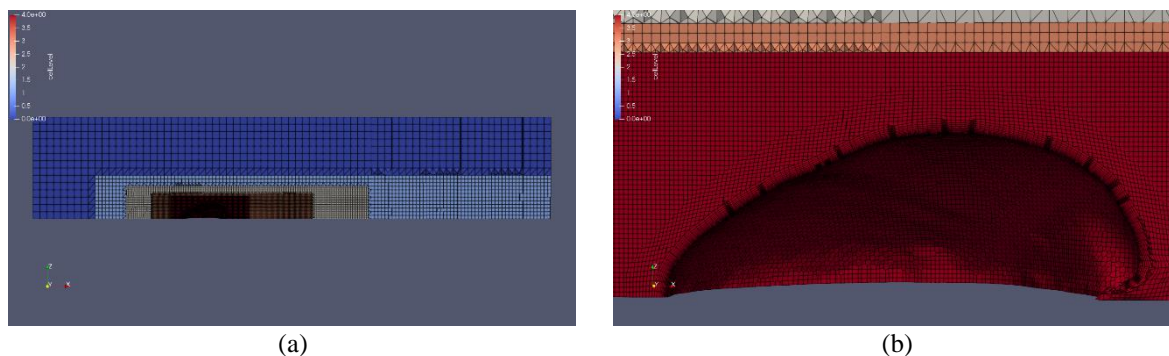


Figura 3 – Visão em corte da malha: (a) malha total e (b) região da camada limite. Coloração: nível de refinamento da célula: vermelho indica alto nível de refinamento; azul, baixo nível de refinamento.

Para o refinamento da malha, foram estabelecidas quatro regiões circunscritas de refinamento em formato de paralelepípedo ao redor da concha. Além disso, um refinamento específico foi aplicado na superfície da concha para capturar adequadamente a subcamada viscosa, garantindo um tamanho mínimo do elemento de malha de $3,38 \times 10^{-5}$ m. Esta camada foi configurada com 15 subdivisões, tendo uma taxa de expansão de 1.2. A Figura 3(b) ilustra a região próxima à camada limite.

Condições de contorno

As condições de contorno aplicadas no domínio da simulação estão representadas na Figura 4. Na entrada, a condição de contorno foi estabelecida como um perfil de velocidade seguindo a lei da potência de 1/7, com a intensidade de turbulência fixada em 1% — um valor recomendado para cenários de baixa turbulência (Guerrero, 2023). Na saída, adotou-se uma pressão manométrica igual a zero, visando simular um ponto distante da entrada. Para os planos superior e laterais, utilizou-se a condição de simetria, de modo a impedir o fluxo de fluido por essas regiões. A superfície da concha foi definida com a condição de não deslizamento. Na superfície inferior, empregou-se a função de parede '*nutURoughWallFunction*', com uma altura de rugosidade de 0,8 mm, correspondente ao valor do leito de areia no experimento de Silva *et al.* (2023).

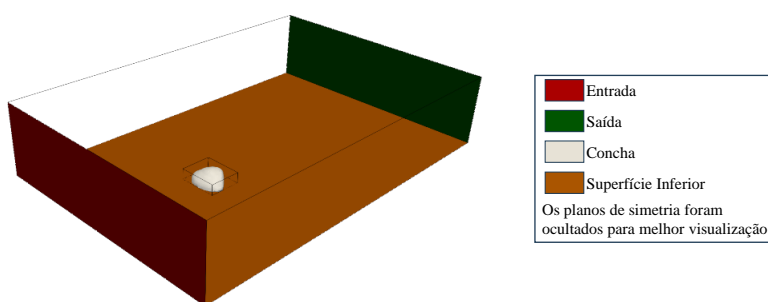


Figura 4 – Condições de contorno do domínio.

Setup

A simulação foi conduzida em regime permanente e incompressível e realizada utilizando o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, um modelo do tipo RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Para o fluido de trabalho, escolheu-se água a 20° C, com massa específica de $998,2 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade dinâmica de $1 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ (*Water Viscosity Calculator*). As configurações de energia turbulenta e dissipação turbulenta específica foram adotadas de acordo com a documentação do OpenFOAM (*OpenFOAM Documentation*) e de acordo com Guerrero (2023). Para a resolução do acoplamento pressão-velocidade, o algoritmo SIMPLE foi utilizado, com fatores de relaxação variando entre 0,5 e 0,9. Esses fatores foram ajustados durante a execução para facilitar a convergência da simulação. Os resíduos almeçados nas simulações foram de 0,01 para a pressão e 0,001 para os demais campos. A simulação foi realizada em uma máquina equipada com o processador Intel Core i7-8700 de 8ª



geração, 50 GB de memória RAM, executando o sistema operacional Linux Mint 20 (Ulyana), garantindo o desempenho necessário para o processamento dos cálculos computacionais.

Análise de dados

As forças hidrodinâmicas que atuam sobre a concha são calculadas integrando numericamente a pressão normal sobre a superfície da concha e adicionada ao resultado da integração da tensão de cisalhamento sobre a superfície da concha. Em seguida, a força resultante é dividida em duas componentes: a força de arrasto F_D que atua na direção do escoamento e a força de sustentação F_L que atua na direção perpendicular. O coeficiente de arrasto (C_D) é calculado por:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U_\infty^2 A_p} \quad (1)$$

onde U_∞ é a velocidade de corrente livre e A_p é a área projetada da concha na direção do escoamento, e o coeficiente de sustentação (C_L) é calculado por:

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U_\infty^2 A_p} \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As forças de arrasto e sustentação, bem como os respectivos coeficientes estão plotados na Figura 5. A análise dos gráficos revela que a configuração na qual o umbo da concha está orientado a montante do escoamento (180°) resultou nos maiores valores observados tanto para a força quanto para o coeficiente de arrasto. De forma similar, esta configuração também exibiu os valores mais elevados para a força de sustentação e seu coeficiente correspondente. Adicionalmente, conforme ilustrado na Figura 5(c), o caso com a orientação a 180° apresentou a maior razão de sustentação-arrasto entre todas as configurações estudadas. Estes resultados indicam que essa orientação confere uma menor estabilidade na concha, aumentando sua propensão para iniciar movimento dado que há maior força vertical para cima, contrária a força peso, sendo exercida. Essa observação de menor estabilidade com a orientação inicial do umbo a montante foi observado experimentalmente por Silva *et al.* (2023).

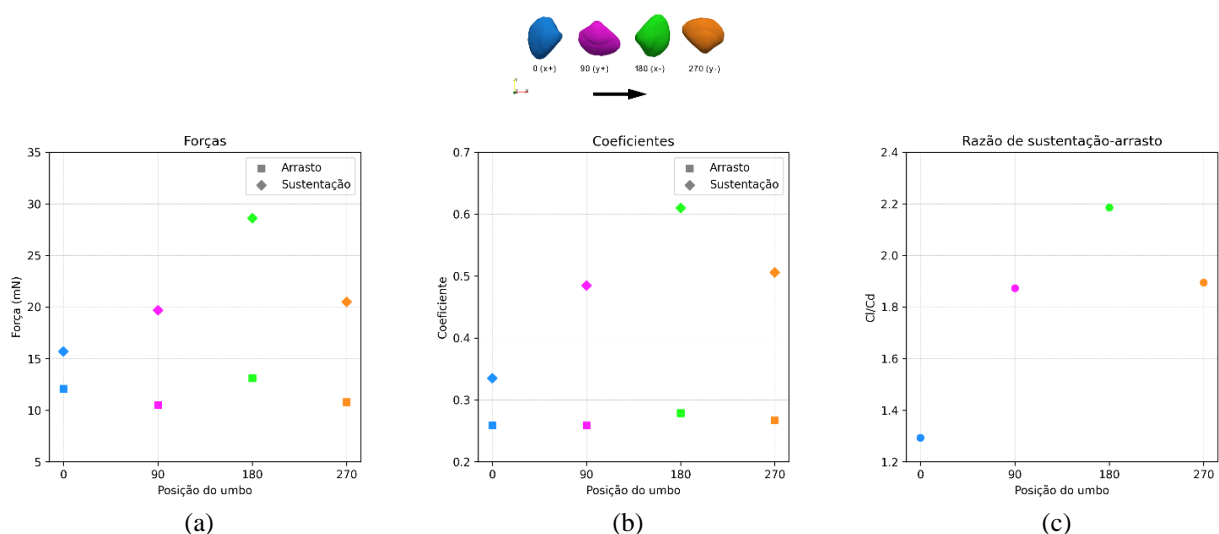


Figura 5 – Resultados para as (a) forças e (b) os coeficientes de arrasto e sustentação e para a (c) razão de sustentação-arrasto (C_L/C_D) em função da orientação da concha.

Em relação às configurações em que o umbo da concha está orientado transversalmente ao escoamento (90° e 270°), foi observado que essas apresentaram as menores forças de arrasto.



Entretanto, os coeficientes de arrasto nessas orientações permaneceram dentro da mesma faixa observada para a orientação 0° . Portanto essa redução nas forças de arrasto, em comparação com a orientação de 0° , pode ser atribuída primordialmente à diminuição da área de seção transversal exposta ao escoamento. Além disso, nas orientações 90° e 270° , os valores tanto das forças quanto dos coeficientes de sustentação situaram-se intermediariamente entre aqueles registrados para as orientações do umbo na direção do escoamento (0° e 180°). Assim, a razão de sustentação-arrasto nesses casos também se posicionou entre os valores observados para as orientações 0° e 180° .

A orientação a 0° , a concha demonstra ser a mais estável, caracterizada pela menor razão de sustentação-arrasto; contudo, não é essa a configuração que apresenta a menor força de arrasto. Com base na Figura 5(a), a menor força de arrasto é observada quando o umbo está alinhado transversalmente ao escoamento (90°) e incide sobre o lado anterior da concha. Essa observação está alinhada com os resultados experimentais de Silva *et al.* (2023), que constataram que conchas que começam o movimento com o umbo voltado para montante (180°) tendem a girar em seu plano horizontal, alcançando uma posição mais estável e então cessam o movimento no leito de areia.

CONCLUSÃO

Este estudo abordou a análise das forças de arrasto e sustentação, bem como os coeficientes de arrasto e sustentação associadas a quatro distintas orientações da concha da espécie *Anomalocardia brasiliiana*, posicionadas com a concavidade voltada para baixo, submetidas a um escoamento turbulento e em condição de limiar do movimento. A investigação foi conduzida por meio de simulações numéricas empregando o software OpenFOAM.

Na análise dos resultados, constatou-se que a configuração com o umbo orientado a jusante exibiu a menor razão sustentação-arrasto, destacando-se como a configuração mais estável e, conseqüentemente, a menos propensa à iniciação de movimento. Em contrapartida, as configurações com o umbo orientado transversalmente ao escoamento registraram as menores forças de arrasto. Em contraste, a orientação com o umbo a montante obteve a maior força de arrasto, sustentação e razão sustentação-arrasto, sinalizando uma estabilidade reduzida e uma maior propensão à mobilização. Esse padrão de estabilidade com a concha alinhada ao escoamento mostrando-se mais estável e a posição contrária como menos estável está em consonância com as observações de estudos experimentais anteriores.

Apesar de fornecer uma visão média ao longo do tempo, a simulação RANS em regime estacionário alinhou-se consistentemente com o comportamento observado experimentalmente, corroborando tais resultados e permitindo um entendimento qualitativo das forças envolvidas neste fenômeno. Entretanto, entende-se que é necessária uma validação experimental quantitativa do modelo numérico desenvolvido. Tal validação permitiria a corroboração da distribuição de forças sobre as conchas em função de variações de parâmetros do escoamento e permitiria melhor entender o campo fluido dinâmico circunvizinho as conchas e sua relação com o balanço de forças. E ainda, no presente trabalho, a condição de contorno de função de parede adotada no leito evidentemente apresenta uma simplificação do cenário real, em leitos sedimentares, sendo necessário portanto uma readequação numérica quando de confrontações quantitativas contra dados experimentais e de aplicações.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) pelo fornecimento da geometria digital da concha e pelo suporte técnico na elaboração deste trabalho. Também agradecem ao Laboratório de Matemática Aplicada e Oceanografia Computacional pelo fornecimento dos recursos computacionais para a execução das simulações. Além disso, agradecem à CAPES - Brasil pelo apoio financeiro parcial e incentivo à pesquisa.



REFERÊNCIAS

- DE CHANT, L. J. The venerable 1/7th power law turbulent velocity profile: a classical nonlinear boundary value problem solution and its relationship to stochastic processes. *Applied Mathematics and Computation*, [s. l.], v. 161, n. 2, p. 463–474, 2005.
- DEY, S.; ALI, S. Z. Bed sediment entrainment by streamflow: State of the science. *Sedimentology*, [s. l.], v. 66, n. 5, p. 1449–1485, 2019.
- FICK, C.; PUHL, E.; TOLDO, E. E. Threshold of motion of bivalve and gastropod shells under oscillatory flow in flume experiments. *Sedimentology*, [s. l.], v. 67, n. 1, p. 627–648, 2020.
- FISHER, J. S.; SILL, B. L.; CLARK, D. F. Organic detritus particles: Initiation of motion criteria on sand and gravel beds. *Water Resources Research*, [s. l.], v. 19, n. 6, p. 1627–1631, 1983.
- FORNARI, M.; GIANNINI, P. C. F.; NASCIMENTO, D. R. Facies associations and controls on the evolution from a coastal bay to a lagoon system, Santa Catarina Coast, Brazil. *Marine Geology*, [s. l.], v. 323–325, p. 56–68, 2012.
- GUERRERO, J. OpenFOAM advanced training. Turbulence modeling in general CFD and OpenFOAM - Theory and applications. [s. l.], 2023. Disponível em: https://figshare.com/articles/presentation/OpenFOAM_advanced_training_Turbulence_modeling_in_general_CFD_and_OpenFOAM_-_Theory_and_applications/19310162.
- NAGLE, J. S. Wave and Current Orientation of Shells. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 1124–1138, 1967.
- OLIVERA, A. M.; WOOD, W. L. Hydrodynamics of Bivalve Shell Entrainment and Transport. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, [s. l.], v. 67, n. 3, p. 514–526, 1997.
- OPENFOAM DOCUMENTATION - K- Ω SHEAR STRESS TRANSPORT (SST). [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://doc.openfoam.com>. Acesso em: 6 jan. 2024.
- RAMSDELL, R. C.; MIEDEMA, S. A.; TALMON, A. M. Hydraulic Transport of Sand/Shell Mixtures. In: *ASME 2011 30TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING*, 2011, Rotterdam, The Netherlands. Volume 6: Ocean Engineering. Rotterdam, The Netherlands: ASMEDC, 2011. p. 533–547. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings/OMAE2011/44380/533/347587>. Acesso em: 30 abr. 2024.
- RIEUX, A. et al. Threshold of motion and settling velocities of mollusc shell debris: Influence of faunal composition. *Sedimentology*, [s. l.], v. 66, n. 3, p. 895–916, 2019.
- SILVA, F. R. S. D. et al. Threshold of motion and orientation of bivalve shells under current flow. *Brazilian Journal of Geology*, [s. l.], v. 53, n. 1, p. e20220080, 2023.
- WATER VISCOSITY CALCULATOR. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.omnicalculator.com/physics/water-viscosity>. Acesso em: 6 jan. 2024.
- WIBERG, P. L.; SMITH, J. D. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*, [s. l.], v. 23, n. 8, p. 1471–1480, 1987.