

Estudo numérico da dinâmica de queda de conchas bivalves *Anomalocardia brasiliiana* em regime permanente

Diogo Silveira Stumpf¹, Adriel Vergilio², Ana Luiza de Oliveira Borges³,

Guilherme Henrique Fiorot⁴ & Eduardo Puhl⁵

Resumo: O estudo hidrodinâmico de sedimentos bioclásticos é essencial para compreender os processos de transporte e deposição em ambientes marinhos e costeiros. Entretanto, a irregularidade da geometria de sedimentos bioclásticos torna esta tarefa desafiadora. Neste contexto, este trabalho apresenta uma investigação numérica via CFD da queda livre da concha bivalve *Anomalocardia brasiliiana* em três estágios de crescimento (bebê, jovem e adulto). Através do modelo digitalizado por fotogrametria e de simulações no software HELYX®, com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, o campo fluidodinâmico do escoamento em torno de conchas-modelo e os respectivos coeficientes de arrasto foram analisados. A metodologia superou limitações experimentais ao utilizar a extração automática da área projetada via integração de faces, eliminando erros de aproximação manual. Os resultados demonstram que o coeficiente de arrasto diminui linearmente com o crescimento das conchas (de 0,80 a 0,67), indicando uma otimização hidrodinâmica de 15% com a maturidade. A presença do umbo foi identificada como possível gatilho para o descolamento da camada limite e para a formação de um vórtice toroidal estável, apontando que a evolução morfológica da espécie favorece uma sedimentação mais eficiente e direcionada.

Abstract: The hydrodynamic study of bioclastic sediments is essential for understanding the transport and deposition processes in marine and coastal environments. Meanwhile, the irregularity of the geometry of bioclastic sediments makes this task challenging. In this context, this work presents a numerical investigation via CFD of the free fall of the bivalve shell *Anomalocardia brasiliiana* across three growth stages (baby, young, and adult). Using photogrammetric digitization and simulations in HELYX® software with the $k-\omega$ SST turbulence model, the fluid dynamic field and the drag coefficient were analyzed. The methodology overcame experimental limitations by utilizing automated projected area extraction via face integration, eliminating manual approximation errors. The results demonstrate that the drag coefficient decreases linearly with the shell's growth (from 0.80 to 0.67), indicating a 15% hydrodynamic optimization with their maturity. The presence of the umbo was identified as a possible trigger for boundary-layer separation and the formation of a stable toroidal vortex in the wake, suggesting that the species' morphological evolution favors more efficient, directed sedimentation.

Palavras-Chave: *Anomalocardia brasiliiana*, CFD, velocidade terminal, sedimentação

Keywords: *Anomalocardia brasiliiana*, CFD, terminal velocity, sedimentation

¹ Discente, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS. diogo.stumpf@ufrgs.br

² Discente, Laboratório de Reologia e Escoamentos de Fluidos Não Newtonianos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS. adriel.vergilio@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. ana.borges@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

⁵ 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

INTRODUÇÃO

Conforme descrito por Allen (1984), a deposição de sedimentos bioclásticos é regida por uma complexa interação entre a forma do sedimento e a hidrodinâmica do meio. Essa relação é evidente em conchas bivalves como a *Anomalocardia brasiliiana*, cuja assimetria geométrica impõe condições particulares à sua trajetória e à estabilidade do movimento de queda durante a sedimentação. Tais condições modificam o comportamento da sedimentação de maneira flagrante ao se comparar com aquelas de sedimentos siliciclásticos (esferóides) e, portanto, o emprego de formulações clássicas para esta velocidade não é possível de forma direta. Assim, o estudo do movimento desses corpos torna-se fundamental para a interpretação dos processos de formação de depósitos de sedimentos bioclásticos.

O desafio reside na assimetria da *Anomalocardia brasiliiana*, cuja forma e a presença do umbo (ou *beak*, evidenciado na Figura 1) influenciam significativamente a estrutura hidrodinâmica, conforme os princípios de interação entre morfologia e forças dos fluidos, demonstrados por Allen (1984). Neste contexto, o presente trabalho utiliza uma ferramenta computacional em dinâmica dos fluidos computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) para ampliar o entendimento dessa dinâmica de queda, sobretudo no que diz respeito ao campo fluidodinâmico, complementando as observações experimentais prévias de Puhl *et al.* (2022) ao mapear a distribuição de pressão, velocidade e a formação de esteiras nas imediações da concha, propriedades de difícil medição experimental em laboratório.

MÉTODOS

Análise de Dados

A partir de ensaios experimentais em um tubo de queda (tubo de Griffith) executados no Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD, IPH/UFRGS) para conchas bivalves do tipo *Anomalocardia brasiliiana*. As conchas eram soltas do topo do tubo e seus movimentos de queda filmados. A partir dos vídeos, previamente calibrados com o uso de uma trena, a trajetória dos sedimentos foi identificada e, então, foram determinadas as suas velocidades terminais. Com os parâmetros cinemáticos da sedimentação das conchas (PUHL *et al.*, 2022), foi constatada uma diferença entre as atitudes de queda das conchas: conchas menores sedimentavam através de movimentos oscilatórios em torno de um eixo vertical, cuja amplitude diminuía em função do aumento do tamanho e do peso da concha, enquanto as conchas maiores sedimentavam com baixíssimas oscilações e alcançavam suas velocidades terminais mais rapidamente. Tais movimentos correlacionam-se com os estágios de crescimento e, por consequência, seus tamanhos.

Obtidos os dados de velocidades terminais de sedimentação V_{ss} medidas experimentalmente e as dimensões características das conchas, seguindo a nomenclatura da Figura 1, identificada por Allen (1984): a como o eixo médio, b o eixo maior e c o eixo menor. Então foram calculados o diâmetro nominal D_n médio (Eq. 1) e o coeficiente de alongação El (Eq. 2) médio, este último que varia de 0 a 1 e atua como um descritor morfológico fundamental para quantificar o grau de esticamento da concha (KONG E FONSECA, 2018). Uma análise preliminar do estudo conduziu a uma categorização de natureza biológica em função do diâmetro nominal correspondente a três estágios de crescimento: bebês, jovens e adultos.

$$D_n = (abc)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$El = 1 - \frac{b}{a} \quad (2)$$

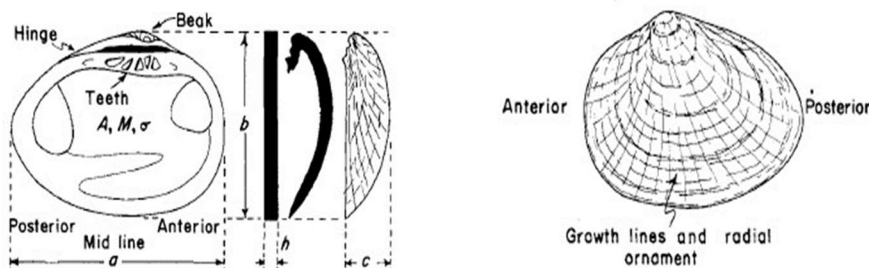


Figura 1 - Definição das dimensões características de conchas bivalves. Estes parâmetros são empregados para o cálculo do parâmetro de elongação El . Adaptado de Allen (1984).

Com os dados experimentais obtidos, foram calculados os valores médios e os desvios-padrão dos diâmetros e das velocidades de queda, e então foi calculado o número de Reynolds Re , conforme a Eq. (3), que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas do fluido:

$$Re = \frac{\rho V_{ss} D_n}{\mu} \quad (3)$$

onde ρ [kg/m³] é massa específica do fluido escoante e μ [Pa/s] é a viscosidade dinâmica da água ($\mu = 0,001002$ Pas). O resumo dos dados experimentais e dos adimensionais de interesse é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros geométricos e hidrodinâmicos experimentais dos três estágios de crescimento avaliados.

Estágio	D_n (cm)		V_{ss} (m/s)		El	Re
Bebê	0,65	$\pm 0,08$	0,19	$\pm 0,01$	0,26	1.232
Jovem	1,00	$\pm 0,13$	0,25	$\pm 0,03$	0,28	2.494
Adulta	1,36	$\pm 0,16$	0,27	$\pm 0,03$	0,26	3.664

Regime de Queda (Allen, 1984)

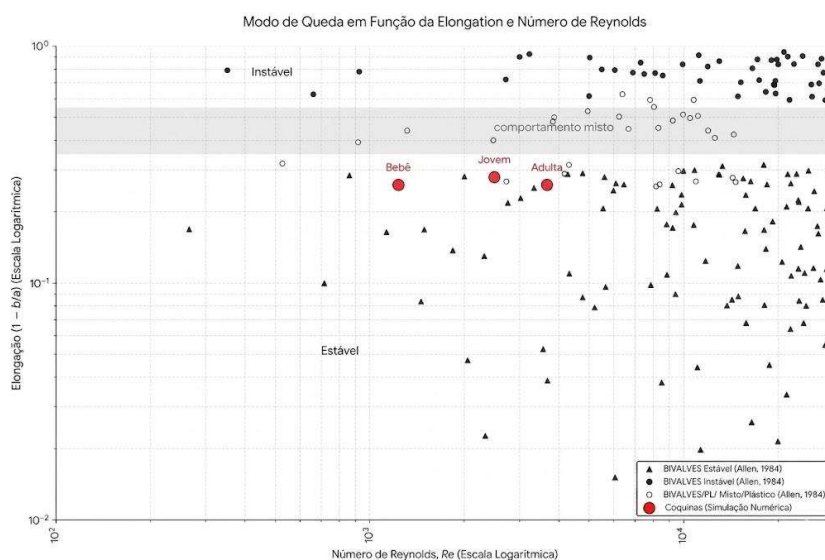


Figura 2 - Diagrama de regimes de queda adaptado de Allen (1984) com o posicionamento dos estágios simulados.

A partir do número de Reynolds (Re) e da elongação (El) calculados para cada estágio de crescimento das conchas, foi possível efetuar uma análise comparativa com resultados clássicos da literatura (Figura 2) que estabelecem empiricamente como deve ser o movimento de sedimentos em queda. Segundo o trabalho de Allen (1984), confirmou-se que a trajetória de queda se situa no regime estável (*steady*), o que, tecnicamente, valida o entendimento de que, nos casos estudados, o regime de queda é estável e permite o estudo em regime permanente.

Geometria Digital e Malha

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, mostrado na Figura 3.

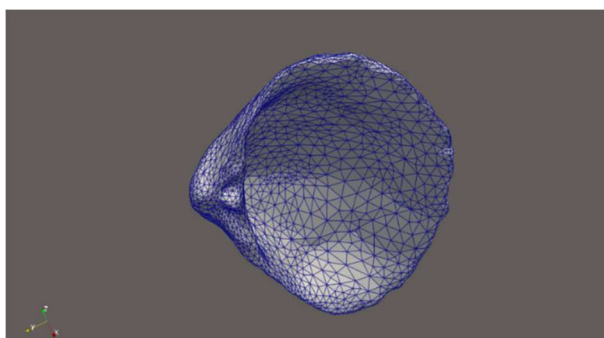


Figura 3 - Geometria digitalizada da *Anomalocardia brasiliana* obtida via fotogrametria.

A malha computacional empregada na simulação (Figura 4) foi gerada no gerador de malha do HELYX, utilizando o algoritmo Extrude, que se destaca por sua capacidade e robustez em gerar malhas em torno de geometrias com formatos complexos. O tamanho do domínio de simulação foi definido como as dimensões do tubo de queda (2,0 m x 0,5 m x 0,5 m) previamente utilizado em laboratório para experimentos físicos.

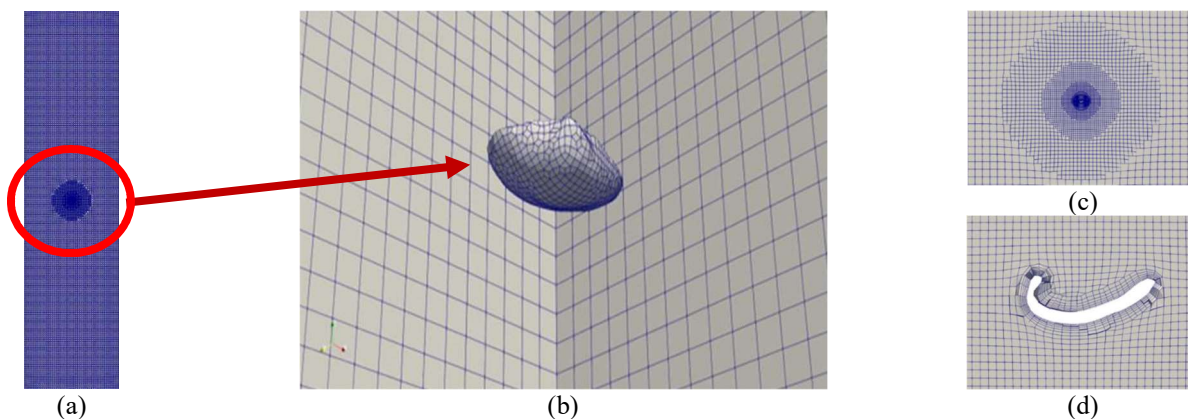


Figura 4 - Malha computacional no tubo de queda virtual. (a) Visão geral do tubo de queda virtual; (b) detalhe da região da concha, posicionada no centro geométrico do domínio; (c) detalhe da seção mediana do domínio, exibindo os diferentes níveis de refinamento em torno da concha; (d) detalhe das camadas de refinamento sobre a concha.

A concha foi posicionada no centro do domínio, de forma a evitar que efeitos artificiais do contorno do domínio afetem os resultados dos campos fluidodinâmicos sobre as conchas (conforme ilustra a Figura 4(a)). A concha foi igualmente orientada com a concavidade para cima, posição normalmente encontrada quando em sedimentação estável (movimento retilíneo), baseada nas observações experimentais de Puhl et al., 2022. Foram estabelecidas quatro regiões de refinamento em formato de esferas próximas (vide Figura 4(c)) à concha, onde cada esfera incrementa um nível de refinamento. Além disso, camadas de prismas (camada limite) foram dispostas sobre a superfície da concha, para capturar adequadamente a subcamada viscosa (Figura 4(d)). A malha final resultou em aproximadamente 778 mil células, conforme a Figura 4.

Condições de Contorno

Para garantir a representação física correta do fenômeno de queda livre, as condições de contorno foram estabelecidas de modo a replicar o escoamento em torno da concha na sua velocidade terminal. Na face de entrada do domínio computacional (*inlet*), foi imposta uma condição de velocidade constante, com valores correspondentes à velocidade de sedimentação para cada estágio, de acordo com a Tabela 1. Na face oposta (*outlet*), definiu-se uma condição de pressão estática nula.

As superfícies da concha foram configuradas como paredes sólidas com condição de não-deslizamento (*no-slip*), onde a velocidade do fluido é nula em relação à parede. Para o tratamento da turbulência junto às paredes, foram aplicadas funções de parede (*wall functions*) para as variáveis de energia cinética turbulenta, taxa de dissipação específica e viscosidade turbulenta, garantindo a captura correta do gradiente de pressão e do descolamento da camada limite, mesmo com a complexidade geométrica do umbo. As fronteiras laterais do domínio foram definidas com condições de simetria.

Setup

As simulações numéricas foram conduzidas no software HELYX 4.4.0, desenvolvido pela Engys. O método RANS (*Reynolds-Averaged-Navier-Stokes*) foi empregado, com o fechamento da turbulência sendo feito pelo modelo $k-\omega$ SST, escolhido pela sua precisão em capturar o descolamento de fluxo em gradientes de pressão adversos. As propriedades do fluido de trabalho foram as da água a 20°C. As três simulações foram realizadas em regime permanente (*steady-state*), com a concha “parada” e o escoamento passando por ela. O algoritmo SIMPLE do solver *helyxSolve* foi empregado para resolução do acoplamento pressão-velocidade. As simulações foram executadas em uma workstation equipada com o processador AMD Ryzen 9 3950X de 16 cores, 32 GB de memória RAM, executando o sistema operacional Windows 10.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Qualitativa do Escoamento

Inicialmente, buscou-se realizar uma avaliação qualitativa dos campos fluidodinâmicos obtidos como solução das simulações em CFD. A Figura 5 exibe, como exemplo, os campos de pressão e de velocidade na direção z para a concha adulta. A partir dos campos de pressão (Figura 5(a)), as simulações revelaram um ponto de estagnação frontal de alta pressão, contrastando com uma zona de sucção (baixa pressão) na face posterior da concha. Tal observação foi igualmente constatada para as três conchas-modelo, alterando apenas em magnitude. Já para o campo de velocidade (Figura 5(b)), nota-se a redução da velocidade na parte convexa (que corresponde ao ponto de estagnação), o aumento da velocidade na região das bordas do corpo e a região de baixa velocidade na parte côncava da concha. Particularmente no estágio adulto, observou-se uma recuperação de pressão mais eficiente na face posterior, o que reduz o gradiente de pressão total e, consequentemente, o arrasto de forma.

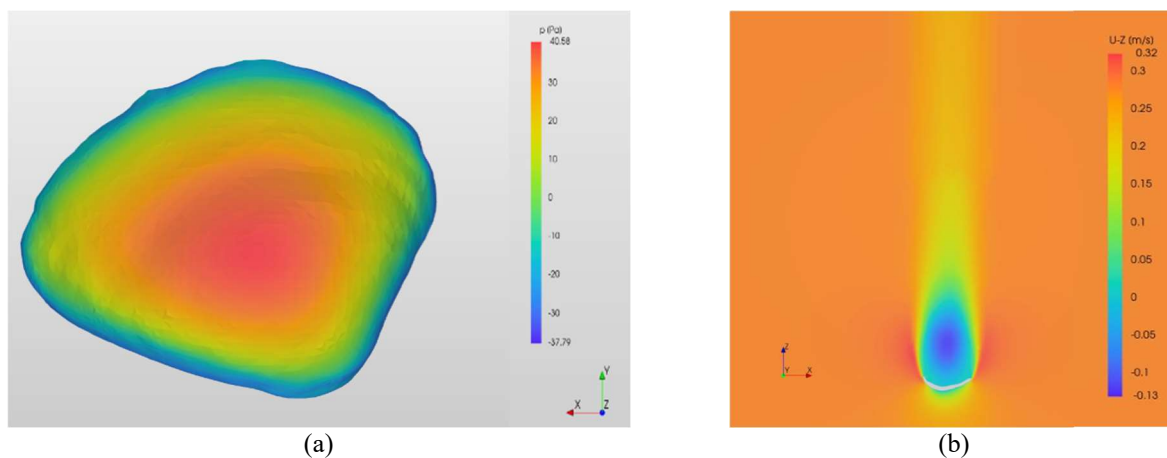


Figura 5 - Campos de pressão (a) e de velocidade na direção z (b) para a concha adulta.

A análise das linhas de corrente (Figura 6) permitiu identificar a estrutura vortical formada na região de baixa pressão situada na concavidade das conchas (ao abrigo do escoamento). Foi identificado que o vórtice toroidal se alinha ao umbo para os três tipos de conchas, conforme evidenciado na Figura 6. A *A. brasiliiana* possui uma geometria com uma proeminência anatômica, o umbo, que parece atuar como um fator geométrico condicionador da formação da esteira sobre a concha. A esteira torna-se proporcionalmente mais estreita com o aumento do tamanho da concha (ou seja, com o aumento do número de Reynolds), o que indica uma diminuição do arrasto de forma.

Por fim, estas análises qualitativas associadas ao posicionamento das conchas, objeto deste estudo, no gráfico de estabilidade do movimento de sedimentação proposto por Allen (1984) validaram que a trajetória de queda se situa no regime estável (*steady*) de queda. Conforme sugerido pelas trajetórias de Braithwaite (1973) e Stringham et al. (1969), partículas nesse regime apresentam queda vertical direta, sem oscilações ou rotações significativas, o que corrobora a precisão dos resultados obtidos via simulação em regime permanente (*steady-state*).

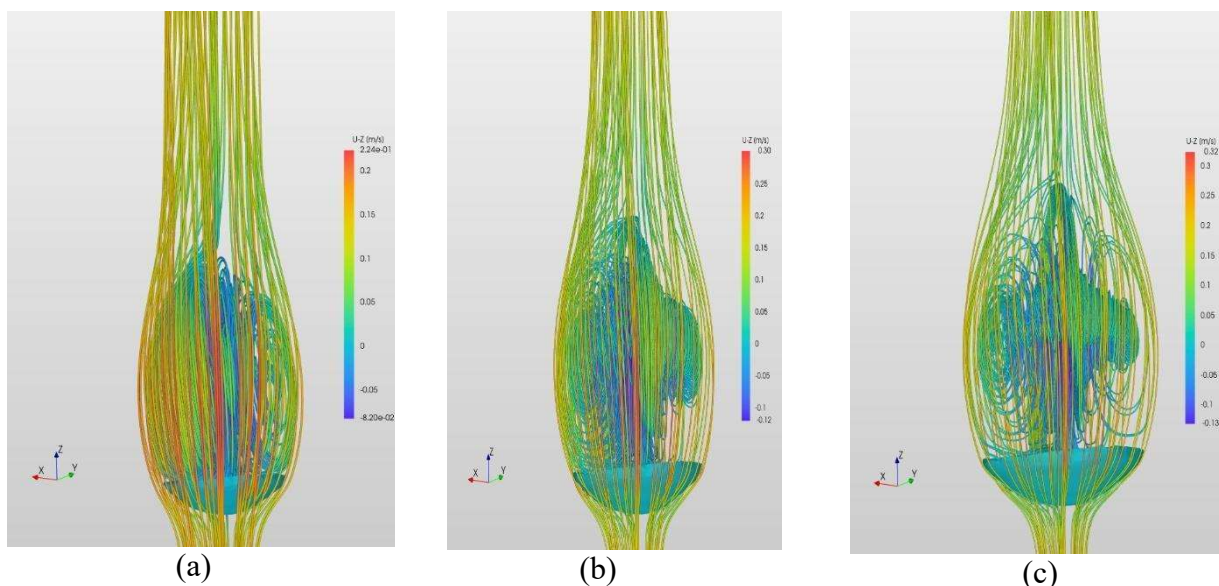


Figura 6 - Visualização das linhas de corrente para a concha (a) bebê, (b) jovem e (c) adulta. As cores representam a magnitude da velocidade no eixo z.

Determinação da Área Projetada e do Coeficiente de Arrasto

A área projetada (A_p) da concha na direção do escoamento foi calculada numericamente utilizando a ferramenta *frontalArea*, inclusa no pacote do HELYX, o que permite obter um resultado mais preciso quando comparado a aproximações manuais ou geométricas simples. Observou-se que o coeficiente de arrasto, calculado de acordo com a Eq. (4), apresenta uma tendência decrescente com o avanço dos estágios (Tabela 2). Essa redução do C_d ocorre em paralelo ao aumento do número de Reynolds (Re), de forma aproximadamente linear, conforme mostrado na Figura 7. Este fenômeno indica uma otimização hidrodinâmica natural da concha conforme o seu crescimento. Embora a área e a velocidade aumentem, a forma da concha adulta torna-se proporcionalmente mais eficiente em romper a resistência do fluido, resultando em uma queda mais rápida e direcionada, com menos oscilações.

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho V_{ss}^2 A_p} \quad (4)$$

onde F_d [N] é a força de arrasto, e A_p [m²] é a área projetada da concha.

Tabela 2 - Valores obtidos de Área Projetada (A_p), Re e C_d para os três tipos de conchas estudadas.

Estágio	A_p (m ²)	V_{ss} (m/s)	Re	C_d
Bebê	2,41E-05	0,19	1.232	0,801
Jovem	5,82E-05	0,25	2.494	0,721
Adulta	1,06E-04	0,27	3.664	0,676

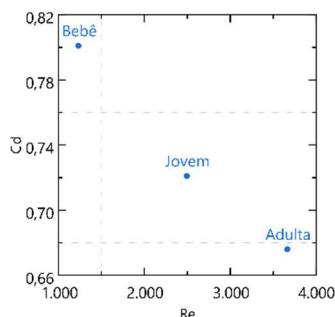


Figura 7 - Coeficiente de arrasto (C_d) em função do número de Reynolds (Re) para as simulações conduzidas.

CONCLUSÃO

A aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional permitiu superar as limitações dos ensaios experimentais de laboratório, possibilitando a visualização detalhada de campos de pressão e de velocidade, bem como das estruturas de vórtice no escoamento de água em torno das conchas, que são difíceis de observar em ensaios desse tipo. A metodologia desenvolvida, que integrou a digitalização do espécime, combinada com a análise do escoamento no software HELYX, demonstrou ser extremamente fiável para o estudo de sedimentos bioclásticos.

O estudo permitiu concluir que o crescimento da *Anomalocardia brasiliiana* não representa apenas um aumento de escala física, mas também uma otimização da sua eficiência hidrodinâmica. A redução de aproximadamente 15% no coeficiente de arrasto entre os estágios bebê e adulto prova

que a forma da concha se torna mais hidrodinâmica com a maturidade, facilitando o seu processo de deposição e soterramento no leito marinho.

A correção dos dados de arrasto foi demonstrada por meio da extração automática da área projetada via integração de faces no solver, o que eliminou erros metodológicos inerentes às aproximações manuais. Essa precisão permitiu identificar uma tendência decrescente e consistente do coeficiente de arrasto (C_d), que reduziu de 0,80 para 0,67 conforme o aumento do número de Reynolds (Re) nos diferentes estágios de crescimento. Cabe lembrar que, para partículas esféricas, o C_d assume valores entre 0,32 e 0,11 para números de Reynolds entre 1000 e 5000 (FORNBERG, 1988), o que demonstra que sedimentos do tipo concha possuem velocidade de sedimentação característica maior que sedimentos esferóides, corroborando a relevância deste tipo de estudo para a correta determinação de indicadores sedimentológicos de depósitos marinhos.

Conclui-se, portanto, que o entendimento de grandezas e propriedades hidrodinâmicas detalhadas é fundamental para o aprimoramento de modelos de transporte de sedimentos, permitindo previsões mais precisas sobre a dinâmica de bancos de conchas e a evolução morfológica de zonas costeiras e estuarinas compostas por sedimentos bioclásticos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro para a realização desta pesquisa na UFRGS (T.C. Nº 0050.0125772.23.9) pelo Consórcio de Libra (Libra Group), que compreende as empresas Petrobras, Shell Brasil, TotalEnergies, CNODC, CNOOC Brasil e Pré-Sal Petróleo S.A. (PPSA). Agradecimentos especiais aos interlocutores do projeto: Leonardo Tedeschi (Petrobras/Libra/AT), Jian Zhao (CNODC/LIBRA/AT) e Cláudio Roisenberg (Petrobras). Os autores agradecem também à Fundação CAPES pelo apoio financeiro e institucional, via PROMEC/UFRGS.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, J. R. L. (1984) “*Sedimentary structures: their character and physical basis.*” Amsterdam: Elsevier.
- BRAITHWAITE, C. J. R. (1973) “*Settling behaviour of some recent fuel particles.*” Geological Magazine, v. 110, n. 2, p. 131-136.
- FORNBERG, B. (1988) “*Steady viscous flow past a sphere at high Reynolds numbers.*” *Journal of Fluid Mechanics*, v. 190, p. 471-489. doi:10.1017/S0022112088001417
- KONG, D.; FONSECA, J. (2018), “Quantification of the morphology of shelly carbonate sands using 3D images”. *Geotechnique*, Vol. 68 No. 3 pp. 249–261, doi: <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.278>
- MAIKLEM, W. R. (1968) “*The specimens of the reef; an individualistic approach to the classification of grain-supported skeletal limestones.*” *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 38, n. 4, p. 1247-1274.
- PUHL, E.; BORGES, A.L.O.; TOLDO Jr., E.E. et al. “*Projeto elaboração de estudo de simulação física da dinâmica lacustre e o seu impacto na geometria e na distribuição das fácies de depósitos de coquinas*”: período 25/06/2018 a 20/12/2021: relatório técnico final. NECOD-IPH. Porto Alegre, 2022 P. 346.
- STRINGHAM, G. E.; SIMONS, D. B. (1969); GUY, H. P. “*The behavior of fine sedimentation in a turbulent stream.*” U.S. Geological Survey Professional Paper, 562-C.