

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO NUMÉRICO DA HIDRODINÂMICA DE CONCHA MARINHA TIPO
ANOMALOCARDIA BRASILEIRA NO LIMIAR DO TRANSPORTE

por

Adriel Vergilio

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, fevereiro de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Vergilio, Adriel
Estudo numérico da hidrodinâmica de concha marinha
tipo Anomalocardia brasiliana no limiar do transporte
/ Adriel Vergilio. -- 2024.
30 f.
Orientador: Guilherme Henrique Fiorot.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. concha bivalve. 2. Anomalocardia brasiliana. 3.
simulação CFD. 4. transporte de sedimentos. 5. limiar
de movimento. I. Fiorot, Guilherme Henrique, orient.
II. Título.

Adriel Vergilio

**ESTUDO NUMÉRICO DA HIDRODINÂMICA DE CONCHA MARINHA TIPO
ANOMALOCARDIA BRASILEIRA NO LIMAR DO TRANSPORTE**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Guilherme Henrique Fiorot

Comissão de Avaliação:

Prof. Guilherme Henrique Fiorot (Presidente)

Prof. Diogo Elias Da Vinha Andrade

Prof. Felipe Roman Centeno

Prof. Eduardo Puhl

Porto Alegre, fevereiro de 2024.

Ao meu pai (*in memoriam*) e a minha mãe que sempre me incentivaram a seguir meus sonhos e que me apoiaram incansavelmente em todas as etapas da minha jornada acadêmica. Sou grato por tudo o que fizeram por mim.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão e reconhecimento a todas as pessoas e instituições que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Guilherme Fiorot, sou grato pela orientação excepcional e pelos valiosos conhecimentos compartilhados ao longo deste projeto. Sua visão e apoio foram cruciais em cada etapa desta jornada.

Expresso minha sincera gratidão ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas pelo generoso fornecimento da geometria digital da concha, um recurso sem o qual este trabalho não teria a mesma profundidade.

Além disso, sou grato ao Laboratório de Matemática Aplicada e Oceanografia Computacional pelo acesso aos recursos computacionais, facilitando as simulações e análises necessárias para a realização deste estudo.

Finalmente, agradeço imensamente à minha família pelo suporte incansável, palavras de encorajamento e por estarem sempre ao meu lado, proporcionando o ambiente necessário para que eu pudesse me dedicar integralmente a este trabalho.

Tudo flui, nada permanece.

Heráclito

Vergilio, Adriel. **Estudo numérico da hidrodinâmica de concha marinha tipo *Anomalocardia brasiliana* no limiar do transporte.** 2024. 15 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

Este estudo visa identificar as características dinâmicas da 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 o comportamento fluidodinâmico da concha em quatro orientações distintas, com a concavidade voltada para baixo. Os resultados revelam variações significativas nas forças de arrasto e de sustentação em função da orientação da concha, identificando a configuração mais estável e aquela mais suscetível ao início do movimento. Essas descobertas corroboram com as observações experimentais anteriores e contribuem para a compreensão das interações fluido-estrutura em ambientes aquáticos turbulentos.

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

Vergilio, Adriel. **Numerical study of the hydrodynamics of *Anomalocardia brasiliiana* type marine shell at the threshold of motion**. 2024. 15 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

This study aims to identify the dynamic characteristics of the shell from the species *Anomalocardia brasiliiana* under the influence of turbulent water flow, focusing on the motion threshold. Using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations with the $k-\omega$ SST turbulence model in a steady state, the fluid-dynamic behavior of the shell is investigated in four distinct orientations, with the concavity facing downward. The results reveal significant variations in drag and lift forces depending on the shell's orientation, identifying the most stable configuration and the one most susceptible to the threshold of motion. These findings corroborate previous experimental observations and contribute to the understanding of fluid-structure interactions in turbulent aquatic environments.

KEYWORDS: Bivalve shell; *Anomalocardia brasiliiana*; CFD simulation; Sediment transport; Threshold of motion.

NOMENCLATURA

Símbolos

A_p	Área da concha projetada na direção do escoamento	[m ²]
C_D	Coefficiente de arrasto	
C_L	Coefficiente de sustentação	
c	Comprimento da concha na direção do escoamento	[m]
c'	Distância da separação da camada limite	[m]
D	Diâmetro característico da partícula de sedimento	[m]
D_n	Diâmetro nominal	[m]
D_q	Diâmetro de sedimentação	[m]
D_{sv}	Diâmetro de peneira	[m]
F_D	Força de arrasto	[N]
F_g	Força de peso submerso	[N]
F_L	Força de sustentação	[N]
F_s	Força de atrito	[N]
h	Profundidade do fluxo	[m]
N	Força normal	[N]
Re^*	Número de Reynolds do grão	
Re_s	Número de Reynolds da concha	
Re_x	Número de Reynolds do canal	
\bar{U}	Velocidade média de escoamento	[m s ⁻¹]
U_∞	Velocidade de corrente livre	[m s ⁻¹]
u^*	Velocidade de cisalhamento	[m s ⁻¹]
V	Volume da concha	[m ³]

Símbolos gregos

θ	Número de Shields	
ν	Viscosidade cinemática do fluido	[m ² s ⁻¹]
ρ	Massa específica do fluido	[kg m ⁻³]
ρ_s	Massa específica da concha	[kg m ⁻³]
τ_w	Tensão de cisalhamento no leito	[Pa]

Abreviaturas e acrônimos

IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO	11
2.1	LIMIAR DE TRANSPORTE	11
2.2	MORFOLOGIA DA CONCHA BIVALVE	11
2.3	SELEÇÃO DO PROBLEMA	12
2.4	FORÇAS ATUANDO NA CONCHA	12
2.5	DIAGRAMA DE SHIELDS	13
2.6	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	PRÉ-ANÁLISE	16
3.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	17
3.2.1	Modelagem do Problema	17
3.2.2	Malha	17
3.2.3	Setup de simulação	19
4	RESULTADOS	20
4.1	PRESSÃO	20
4.2	SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE	21
4.3	FORÇAS	22
5	CONCLUSÃO	24
	REFERÊNCIAS	25
	APÊNDICE A — SISTEMA DE VÓRTICES	27

1 INTRODUÇÃO

Conchas, como os restos de organismos marinhos como moluscos ou microrganismos são indicadores úteis para a presença de rochas sedimentares com potencial para abrigar depósitos de petróleo. O estudo dos padrões de deposição destes fósseis se enquadra no campo da sedimentologia, que envolve examinar as características das rochas sedimentares e seus processos de formação (Prothero; Schwab, 2014).

Quando se trata de exploração de petróleo, as rochas sedimentares são de particular interesse porque frequentemente contêm restos fossilizados de organismos marinhos. Essas rochas podem formar reservatórios de petróleo e gás, à medida que o material orgânico é enterrado e sofre calor e pressão ao longo de milhões de anos, eventualmente se transformando em hidrocarbonetos (Prothero; Schwab, 2014).

Certos tipos de conchas estão mais frequentemente associados a ambientes específicos, como ambientes marinhos rasos ou águas profundas. Portanto ao estudar como ocorreu a distribuição, a abundância e outras características dessas conchas dentro das camadas sedimentares, os geólogos podem inferir o ambiente de deposição em que as rochas se formaram.

Explorar a dinâmica dos sedimentos biogênicos é crucial para entender os processos sedimentares, especialmente considerando sua prevalência em ambientes costeiros antigos e modernos (Fick; Puhl; Toldo, 2020; Muniz; Bosence, 2018). Estas investigações são fundamentais para o desenvolvimento de modelos geológicos, pois fornecem informações sobre os mecanismos de transporte de sedimentos (Fick; Puhl; Toldo, 2020). Particularmente, acumulações densas de conchas, incluindo coquinas, pavimentos de conchas e leitos de conchas, tem recebido atenção significativa (Silva *et al.*, 2023). Seu estudo tornou-se cada vez mais relevante nas últimas décadas, não apenas devido à sua frequente ocorrência em registros geológicos e ambientes costeiros atuais, mas também por seu papel como potenciais reservatórios de petróleo (Muniz; Bosence, 2018; Silva *et al.*, 2023).

A formação de depósitos ricos em conchas dominados por moluscos está comumente ligada a ambientes costeiros e de águas rasas, tanto em contextos marinhos quanto lacustres. Essas configurações são caracterizadas pela ação de ondas e correntes, fundamentais no retrabalho e transporte de sedimentos. A compreensão do limiar de movimento e da orientação das conchas oferece pistas sobre o comportamento dos grãos esqueléticos sob várias condições de fluxo. Esse conhecimento é essencial para o refinamento de modelos geológicos, particularmente na previsão da localização e características dos reservatórios de petróleo (Fick; Puhl; Toldo, 2020).

1.1 OBJETIVO

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 turbulência. Em seguida, a resolução do escoamento será realizada. Na etapa subsequente de pós-processamento, serão avaliados os campos de velocidade, pressão e vorticidade. Posteriormente, a análise das forças de arrasto e sustentação será conduzida.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 LIMIAR DE TRANSPORTE

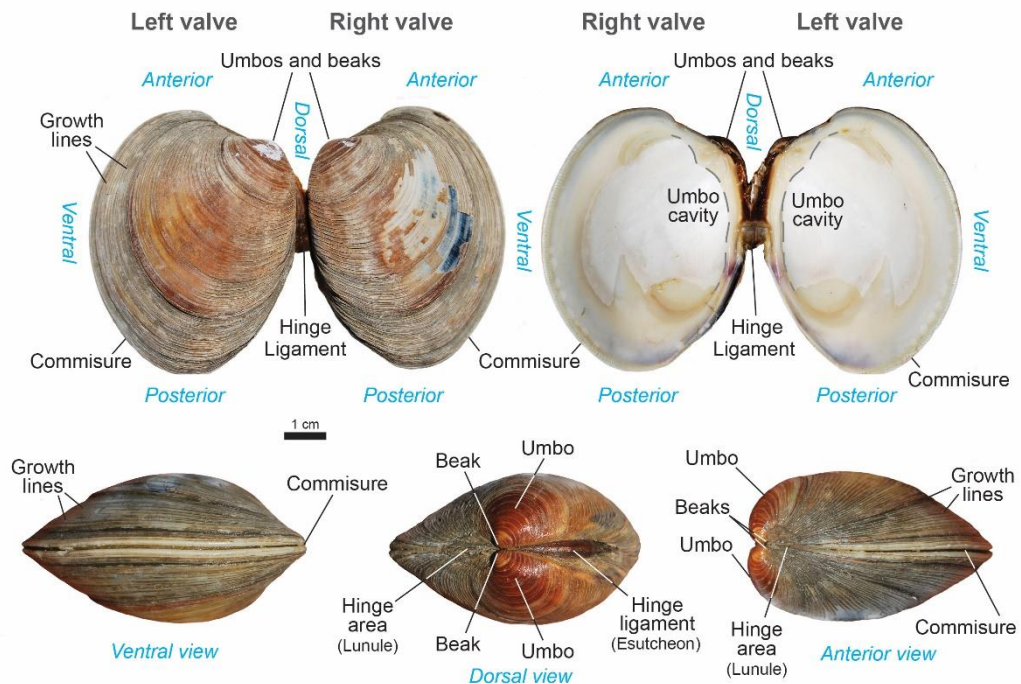
Neste tipo de análise, o problema consiste em analisar o limiar de início de movimentação de uma concha depositada no leito marinho. Esse problema pode ser abordado tanto para situações em que a água se encontra em fluxo unidirecional, quanto em casos de correntes oscilatórias geradas por ondas. Além 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).

Fick *et al.* (2020) observaram uma diferença entre os experimentos conduzidos com uma única concha isolada no leito liso e os 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.

2.2 MORFOLOGIA DA CONCHA BIVALVE

Composta principalmente de carbonato de cálcio, a concha da classe *bivalvia* exibe uma morfologia distintiva, conforme ilustrado na Figura 1. Central para esta estrutura está o umbo, que é a parte mais antiga da concha, localizada na borda dorsal. Este ponto, caracteristicamente elevado, não apenas serve como um indicador do padrão de crescimento do bivalve, mas também reflete seus hábitos de vida. A partir do umbo, a concha se expande para fora, evidenciando o desenvolvimento contínuo do organismo (Kentucky Geological Survey, University of Kentucky).

Figura 1: Anatomia da concha da classe *bivalvia*, exibindo as valvas esquerda (left) e direita (right), umbo e linhas de crescimento (growth lines), em vistas externas e internas.



Fonte: Kentucky Geological Survey. University of Kentucky.

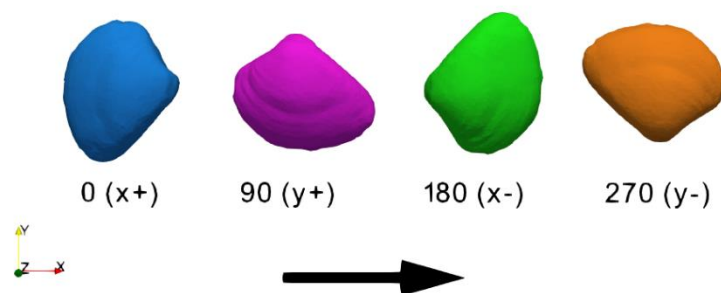
A concha de um bivalve é dividida em duas valvas, geralmente simétricas entre si, conhecidas como valva direita e valva esquerda. Essas duas metades são unidas por um ligamento chamado *hinge*, geralmente posicionado próximo ao umbo, facilitando a abertura e o fechamento da concha (Carter *et al.*, 2012). Esse arranjo único das duas valvas e do ligamento *hinge* conectando-as forma um aspecto chave da anatomia e funcionalidade do bivalve.

2.3 SELEÇÃO DO PROBLEMA

A espécie de concha escolhida para os estudos é a *Anomalocardia brasiliana*, 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 boa quantidade de estudos experimentais disponíveis na literatura, bem como pela realização de estudos experimentais sobre o limiar de início de movimento pelos pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS (IPH).

Com base no estudo conduzido por Silva *et al.* (2023), foi observado que a concha demonstra maior estabilidade quando sua concavidade está voltada para baixo e o umbo está direcionado no sentido do escoamento. Além disso, em determinadas 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. brasiliana* pode se depositar com o eixo mais longo alinhado à direção do escoamento, resultando no umbo apontando perpendicularmente ao fluxo. Com base nessa observação, 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 essas posições definidas para a simulação.

Figura 2: Representação esquemática das quatro orientações da concha *A. brasiliana* em relação ao escoamento para as simulações. A seta indica a direção do escoamento.



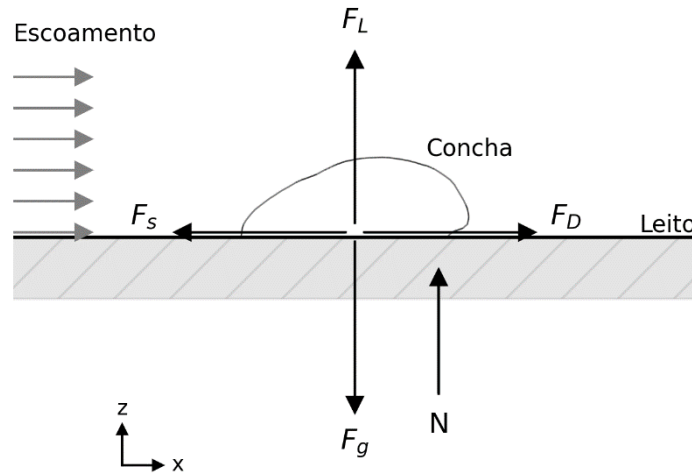
2.4 FORÇAS ATUANDO NA CONCHA

As forças atuantes em uma concha em repouso no leito são ilustradas na Figura 3. A Força de Peso Submerso (F_g), resultante do peso da concha submersa, é descrita pela Equação 1:

$$F_g = (\rho_s - \rho)gV \quad (1)$$

onde ρ_s e ρ representam as massas específicas da concha e do fluido, respectivamente, g é a aceleração da gravidade e V o volume da concha. Além disso, a Força Normal Vertical (N) atua como a reação do leito sobre a concha, e a Força de Atrito Horizontal (F_s) se manifesta entre a concha e o leito.

Figura 3: Diagrama das forças atuantes em uma concha em repouso no leito.



Em relação às forças hidrodinâmicas, a Força de Arrasto (F_D) é dada por:

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

onde C_D é o coeficiente de arrasto, U_∞ é a velocidade de corrente livre e A_p é a área projetada da concha na direção do escoamento. De maneira similar, a Força de Sustentação (F_L) é calculada por:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U_\infty^2 A_p \quad (3)$$

onde C_L é o coeficiente de sustentação.

Quando a concha está prestes a se mover, ou seja, quando $F_D = F_s$, a força de atrito é determinada de acordo com a Equação 4:

$$F_s = (F_g - F_L) \tan \Phi \quad (4)$$

onde $\tan \Phi$ representa o ângulo de fricção entre a concha e o leito.

2.5 DIAGRAMA DE SHIELDS

O Número de Shields, frequentemente referido como parâmetro de Shields ou critério de Shields, é um número adimensional usado no campo do transporte de sedimentos em fluxo de fluido. O Número de Shields é construído como a razão entre a tensão de cisalhamento no topo do leito de partículas e o peso aparente de uma única partícula (Ouriemi *et al.*, 2007). Ele é calculado usando a Equação 5:

$$\theta = \frac{\tau_w}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (5)$$

Onde τ_w é a tensão de cisalhamento no leito e D é um diâmetro característico de partícula do sedimento.

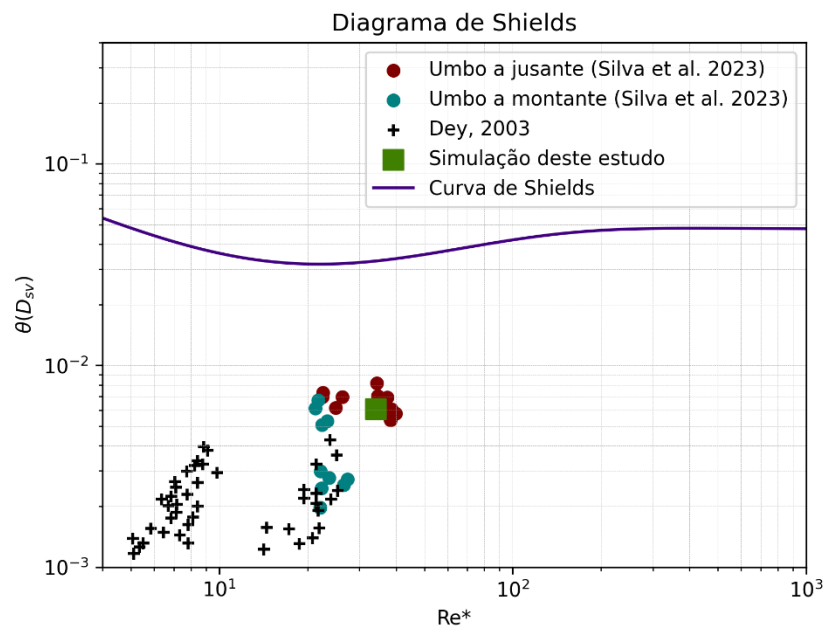
Para colocá-lo em uma análise gráfica, o parâmetro de Shields tem sido associado ao número de Reynolds do grão (Re^*), calculado de acordo com a Equação 6:

$$Re^* = \frac{u^* D}{\nu} \quad (6)$$

Onde $u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ é a velocidade de cisalhamento, ν é a viscosidade cinemática do fluido e D corresponde ao diâmetro de peneira do grão que compõe o leito.

Assim, o diagrama de Shields foi estabelecido com uma curva que indica regiões de movimento do sedimento (acima da curva) ou sem movimento (abaixo da curva). Esta curva, calculada em função do diâmetro de peneira (D_{sv}), é apresentada na Figura 4. Adicionalmente, a figura exhibe um conjunto de dados experimentais relacionados a conchas orientadas com o umbo voltado tanto para montante quanto para jusante, conforme investigado por Silva *et al.* (2023) e Dey (2003). Além disso, a figura inclui o ponto onde constitui o presente trabalho.

Figura 4: Diagrama de Shields. Curva adaptada de Paphitis (2001).



Como é possível notar pelo gráfico, as conchas apresentam grandes dispersões e possuem o ponto de limiar de início de movimento abaixo da curva de Shields. Tal fenômeno pode ser atribuído a suas formas não esféricas e heterogêneas, que influenciam no início do movimento. Além disso, estas formas irregulares do material bioclástico podem dificultar a medição do tamanho do grão (D) na avaliação do parâmetro de Shields. Isso ocorre porque o tamanho do grão é geralmente definido pelo diâmetro de peneira (D_{sv}), o qual é geralmente recomendado para grãos esféricos. Medidas alternativas do tamanho do grão, como o diâmetro nominal (D_n , que equivale ao diâmetro de uma esfera com o mesmo volume), e o diâmetro equivalente de sedimentação (D_q , diâmetro de uma esfera com a mesma massa específica e mesma velocidade de sedimentação) têm sido usados para reduzir os efeitos da forma e proporcionar uma melhor comparação com grãos siliciclásticos (Paphitis *et al.*, 2002).

2.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

No âmbito da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), a resolução das equações de Navier-Stokes é fundamental para a análise de escoamentos fluidodinâmicos. Dado que essas equações são notoriamente complexas e carecem de soluções analíticas para a maioria dos casos práticos, torna-se necessário recorrer ao método dos volumes finitos. A Equação 7 apresenta a equação da conservação da massa e a Equação 8 apresenta o princípio da conservação da

quantidade de movimento, onde t é o tempo, ρ é a massa específica do fluido, p é a pressão, u é a velocidade, g é a força de campo e τ é o tensor de tensão desviatório (OpenFOAM Documentation).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u \otimes u) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot \tau \quad (8)$$

No trabalho em questão, o método RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) é empregado, no qual as equações de Navier-Stokes são médias no tempo, decompondo as velocidades em componentes médias e instantâneas, a fim de simplificar a análise do escoamento turbulento. Esta técnica resulta em termos adicionais, conhecidos como tensões de Reynolds, que representam os efeitos da turbulência (Alfonsi, 2009; Markatos, 1986). Após a decomposição, a equação de Navier-Stokes é reescrita de acordo com a Equação 9, onde $\bar{\tau}$ é o tensor de tensão médio no tempo e R é o tensor de Reynolds.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \otimes \bar{u}) = \rho g + \nabla \cdot (\bar{\tau}) - \nabla \cdot (\rho R) \quad (9)$$

O tensor de Reynolds introduz seis variáveis adicionais que não são explicitamente conhecidas e precisam ser solucionadas. Uma abordagem para resolvê-las é pela aplicação do método *Eddy Viscosity Models* (EVM), que consiste em modelos de turbulência empregados para estimar o tensor de Reynolds. Estes modelos são fundamentados na hipótese de Boussinesq, a qual estabelece uma analogia entre as tensões de Reynolds em fluxos turbulentos e as tensões viscosas em escoamentos laminares (Versteeg; Malalasekera, 2007).

Neste estudo, o modelo $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) proposto por Menter (1992) é adotado para o cálculo da viscosidade turbulenta. Este modelo combina as qualidades distintas do modelo padrão $k-\omega$, eficaz na resolução da turbulência próxima à parede, e do modelo $k-\varepsilon$, aplicável em regiões distantes da parede. A ideia central do modelo $k-\omega$ SST reside em sua abordagem híbrida, que captura as forças de cisalhamento de maneira eficaz tanto em regiões próximas às paredes quanto em fluxos livres.

O modelo $k-\omega$ SST incorpora duas equações de transporte fundamentais: uma para a energia cinética turbulenta (κ) e outra para a taxa de dissipação específica (ω). As equações são:

$$\frac{D}{Dt} (\rho \kappa) = \nabla \cdot (\rho D_{\kappa} \nabla \kappa) + \rho G - \frac{2}{3} \rho \kappa (\nabla \cdot u) - \rho \beta^* \omega \kappa + S_{\kappa} \quad (10)$$

$$\frac{D}{Dt} (\rho \omega) = \nabla \cdot (\rho D_{\omega} \nabla \omega) + \frac{\rho \gamma G}{\nu} - \frac{2}{3} \rho \gamma \omega (\nabla \cdot u) - \rho \beta \omega^2 - \rho (F_1 - 1) C D_{\kappa \omega} + S_{\omega} \quad (11)$$

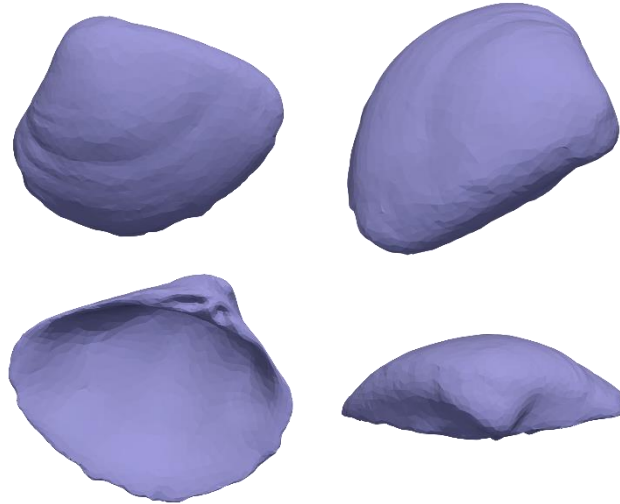
Onde G é a produção de energia cinética turbulenta, ν é a viscosidade cinemática molecular, D_{κ} e D_{ω} são calculados, β , β^* , γ , $C D_{\kappa \omega}$ são constantes do modelo, e F_1 é uma função de mistura que transita entre o regime $k-\omega$ próximo à parede e o regime $k-\varepsilon$ em áreas afastadas da parede.

3 METODOLOGIA

3.1 PRÉ-ANÁLISE

A geometria digital da concha, utilizada neste estudo, foi fornecida pela equipe de pesquisa do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). As dimensões da concha são de 31,31 mm de comprimento, 25,16 mm de largura e 9,83 mm de altura. Diferentes vistas da concha estão ilustradas na Figura 5.

Figura 5: Geometria digital da concha.



As dimensões desta concha são particularmente semelhantes às da amostra número 8 do estudo realizado por Silva *et al.* (2023). Em virtude dessa semelhança, 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 uma velocidade média de escoamento no canal (\bar{U}) de 0,69 m/s, com uma profundidade de fluxo (h) de 59 mm. O número de Reynolds calculado para o canal (Re_x) foi de $3,7 \times 10^6$, enquanto o número de Reynolds associado à concha (Re_S) 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 *one-seventh power law* (Equação 12). Essa lei fornece uma boa relação para perfis de velocidade média turbulenta em escoamentos sob regime de gradiente de pressão favorável (De Chant, 2005). A equação é expressa como:

$$u(z) = U_\infty \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (12)$$

Onde $u(z)$ representa a velocidade na altura z , e δ denota a espessura da camada limite. Ao integrar a Equação 12 ao longo da altura total do canal, estabelece-se uma relação entre a velocidade média e a velocidade de corrente livre, conforme indicado na Equação 13:

$$\bar{U} = \frac{7}{8} U_\infty \quad (13)$$

Dessa forma, a velocidade de corrente livre calculada para o escoamento em questão é de 0.789 m/s.

3.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

3.2.1 Modelagem do Problema

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.

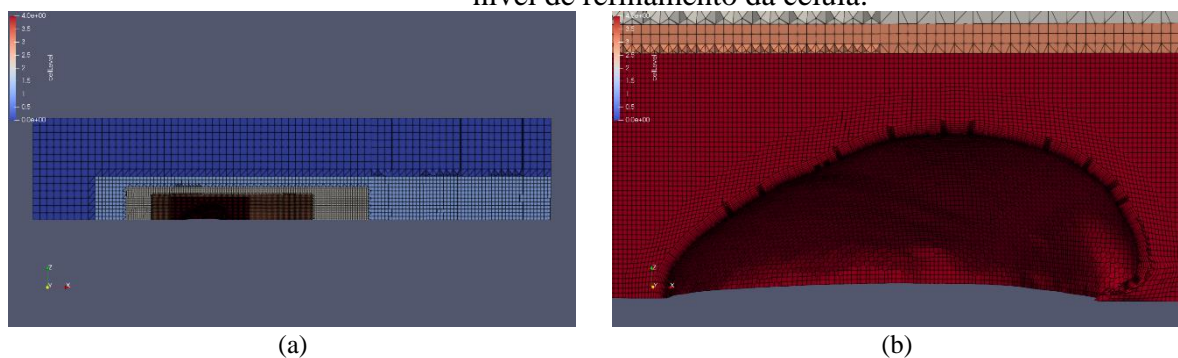
Para o problema em questão, optou-se por uma modelagem tridimensional, dada a assimetria da geometria da concha estudada. O escopo geral é de um escoamento sobre uma placa plana com um obstáculo montado (fixado) na placa.

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.

3.2.2 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 6(a).

Figura 6: Visão em corte da malha: (a) malha total e (b) região da camada limite. Coloração: nível de refinamento da célula.

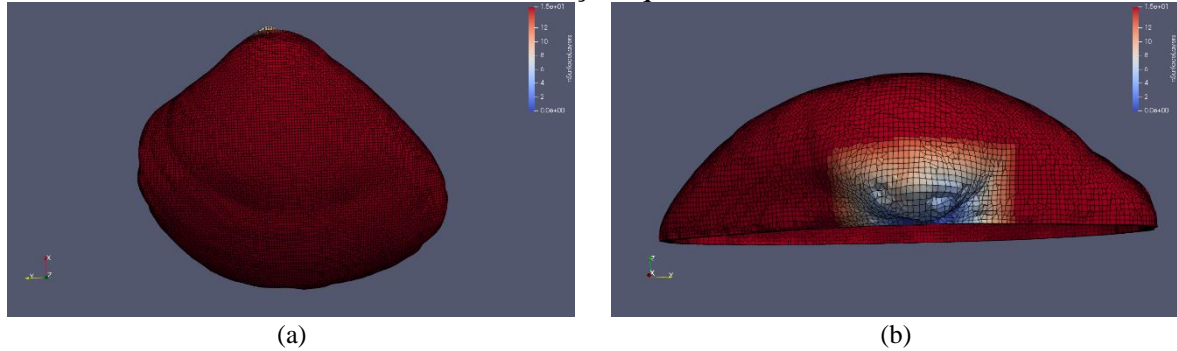


O tamanho do domínio de simulação foi definido como aproximadamente 10 vezes a maior dimensão da concha na direção do escoamento e 7 vezes essa dimensão na direção transversal. A concha foi posicionada a um terço do tamanho total do domínio a partir da área de entrada. A altura do domínio, em relação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

Para o refinamento da malha, foram estabelecidas quatro regiões de refinamento em formato de paralelepípedo, uma circunscrita dentro da outra, ao redor da concha. Além disso, um refinamento específico da camada limite foi aplicado na superfície da concha para capturar adequadamente a camada limite viscosa. Esta camada limite foi configurada com 15 camadas, tendo uma taxa de expansão de 1.2. A Figura 6(b) ilustra a região próxima à camada limite. Conforme mostrado na Figura 7(a), o *snappyHexMesh* foi eficiente na geração das 15 camadas ao longo da maior parte da superfície da concha. Contudo, como evidenciado na Figura 7(b),

houve uma pequena área na região do umbo onde o algoritmo não conseguiu gerar todas as 15 camadas, resultando em menos camadas nessa parte específica.

Figura 7: Células da camada limite da superfície da concha. (a) vista superior e (b) região do umbo. Coloração: quantidade de camadas.



A malha final conta com 3 milhões de células, das quais 2 milhões estão concentradas na região de refinamento adjacente à superfície da concha (região ilustrada em vermelho na Figura 6), para permitir uma captura detalhada da geometria da concha. Todas as células cumprem os parâmetros de qualidade pré-definidos pela ferramenta *checkMesh* do OpenFoam.

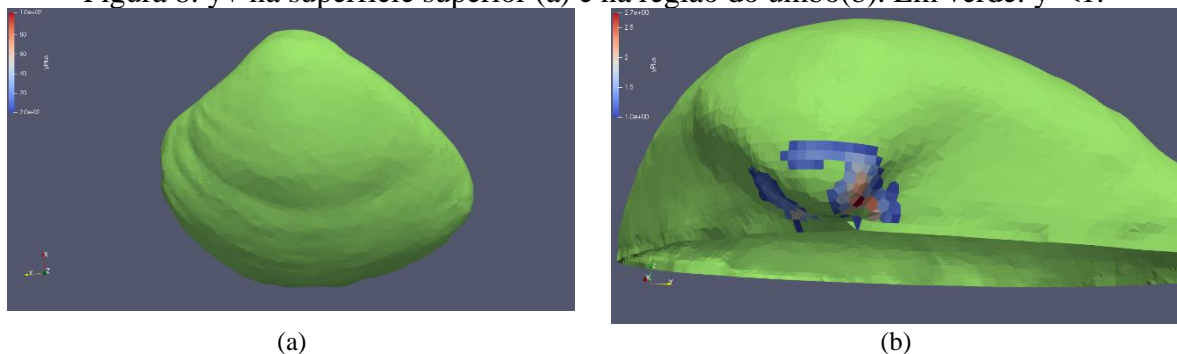
Para garantir que a malha obtivesse um resultado de qualidade, foi calculado o tamanho no menor elemento de malha desejado na camada limite através do y^+ . Para resolver a subcamada viscosa na superfície da concha, o valor de y^+ deve ser menor que 5 e idealmente menor do que 1 (Tu; Yeoh; Liu, 2018). Utilizando a Equação 14 e estimativas da velocidade de cisalhamento (u^*), foi possível calcular o tamanho adequado da célula imediatamente adjacente à superfície da concha.

$$y = \frac{\nu}{u^*} y^+ \quad (14)$$

Portanto, o tamanho da célula adjacente à superfície da concha foi determinado em $3,38 \times 10^{-5}$ m, ou aproximadamente 0,03 mm. Esse valor foi utilizado para configurar adequadamente a quantidade de camadas na camada limite, garantindo a presença de células desse tamanho específico na superfície da concha, e ao mesmo tempo, uma transição suave no tamanho das células entre a camada limite e as demais regiões da malha.

Após a conclusão da simulação, realizou-se uma verificação dos valores de y^+ na superfície da concha. Conforme ilustrado na Figura 8, a maior parte da superfície da concha exibiu valores de y^+ inferiores a 1. A única exceção foi na região do umbo, onde os valores alcançaram cerca de 2. Estes resultados indicam que as condições de controle da malha foram satisfatórias para resolver adequadamente a subcamada limite viscosa.

Figura 8: y^+ na superfície superior (a) e na região do umbo(b). Em verde: $y^+ < 1$.

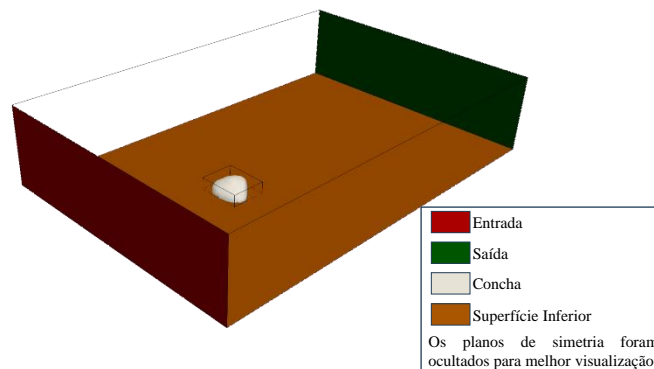


3.2.3 Setup de simulação

A simulação foi realizada utilizando o modelo de turbulência $k-\omega$ SST em regime permanente e incompressível. Para o fluido de trabalho, escolheu-se água a 20° C, e suas propriedades foram obtidas do site 'Water Viscosity Calculator' (Water Viscosity Calculator).

As condições de contorno aplicadas no domínio da simulação estão representadas na Figura 9. Na entrada, a condição de contorno foi estabelecida como um perfil de velocidade seguindo a lei da potência de um sétimo (*one-seventh law*), 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 (*Symmetry Plane*), de modo a impedir o fluxo de fluido por essas regiões. A superfície da concha foi definida com a condição de *No-Slip*, isto é, velocidade zero. 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 9: Condições de contorno do domínio.



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, o algoritmo SIMPLE foi utilizado, com fatores de relaxação variando entre 0.5 e 0.9. Esses fatores foram ajustados durante a execução (*runTime*) para facilitar a convergência da simulação.

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.

4 RESULTADOS

4.1 PRESSÃO

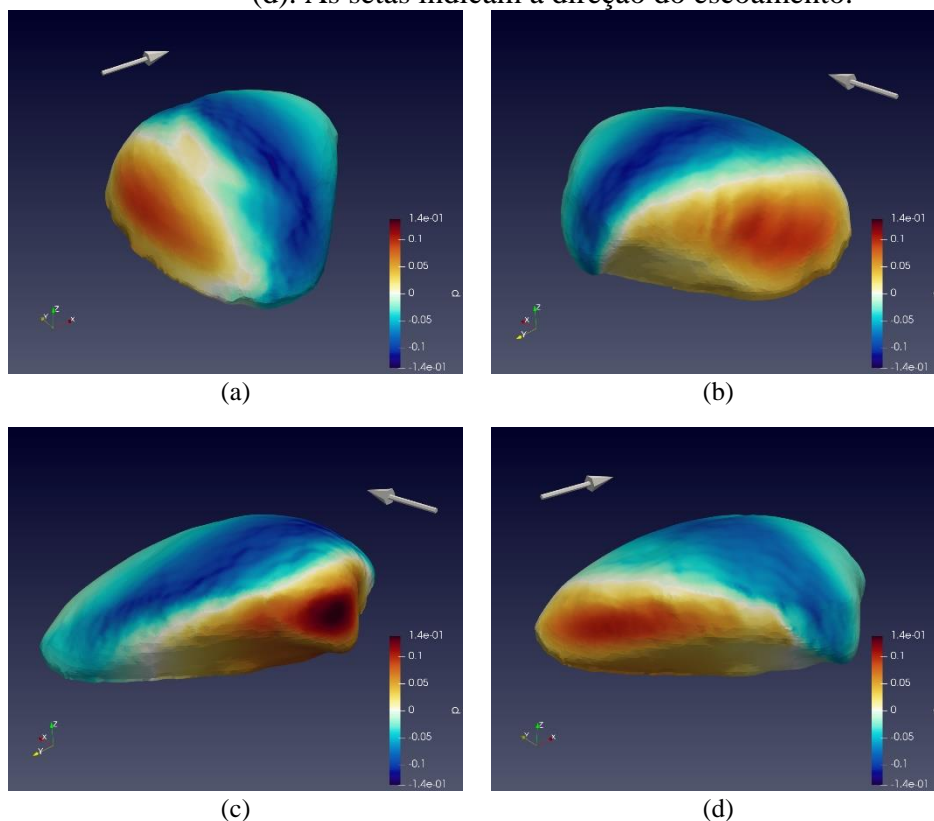
Conforme apresentado na Tabela 1, são evidenciados os valores de pressão específica (p/ρ) de estagnação máxima associados a diversas orientações da concha. Adicionalmente, a Figura 10 ilustra o campo de pressão na superfície da concha, correspondente a cada orientação estudada.

Tabela 1: Valores da pressão máxima de estagnação para cada orientação do umbo.

	0° (x+)	90° (y+)	180° (x-)	270° (y-)
Pressão Máxima Específica (m^2/s^2)	0,097	0,101	0,14	0,107

Nota-se que a configuração com o umbo direcionado a jusante do fluxo (orientação x+) resultou na menor pressão de estagnação máxima, em comparação às demais configurações. Por outro lado, as orientações em que o umbo se posiciona transversalmente ao fluxo (orientações y+ e y-) exibiram valores de pressão de estagnação máxima quase idênticos. Destaca-se que a orientação com o umbo voltado na direção a montante do fluxo (orientação x-) registrou o valor mais elevado de pressão de estagnação. De maneira geral, observa-se que as pressões de estagnação são relativamente similares nas orientações onde o fluxo incide sobre as superfícies ventral, posterior e anterior da concha (x+, y+ e y-), sendo aproximadamente 40% superiores nos casos em que o fluxo incide diretamente na superfície do umbo (x-).

Figura 10: Campo de pressão na superfície da concha. Umbo com orientação a jusante x+ (a), orientação a montante x- (c) e com orientação na direção transversal y+ e y- (b) e (d). As setas indicam a direção do escoamento.



4.2 SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE

A separação da camada limite na superfície superior da concha foi observada, como evidenciado pelas linhas de corrente apresentadas na Figura 11. Este fenômeno é corroborado pela identificação do ponto onde a velocidade na direção a jusante do escoamento se anula, como ilustrado no Iso-Volume da Figura 12(a), e pela inversão do sentido da tensão de cisalhamento na superfície da concha (Figura 12(b)).

Figura 11: Linhas de correntes na esteira da concha com o umbo orientado a jusante ($x+$).

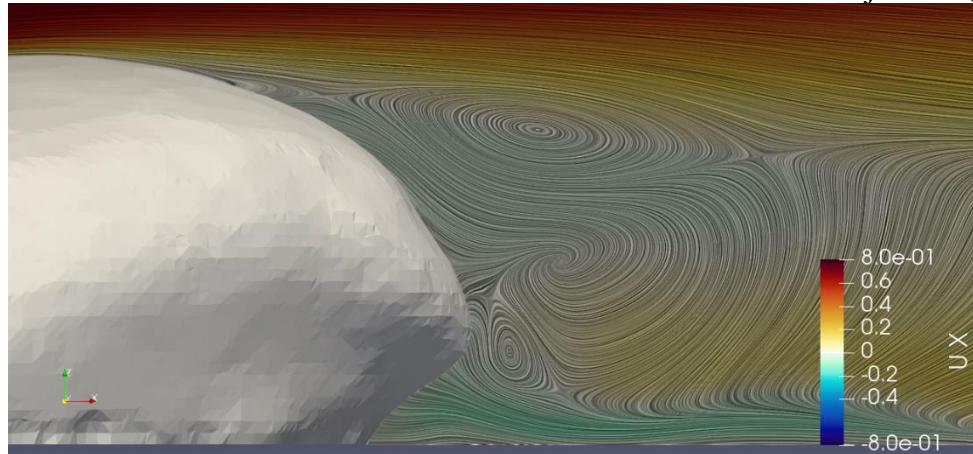
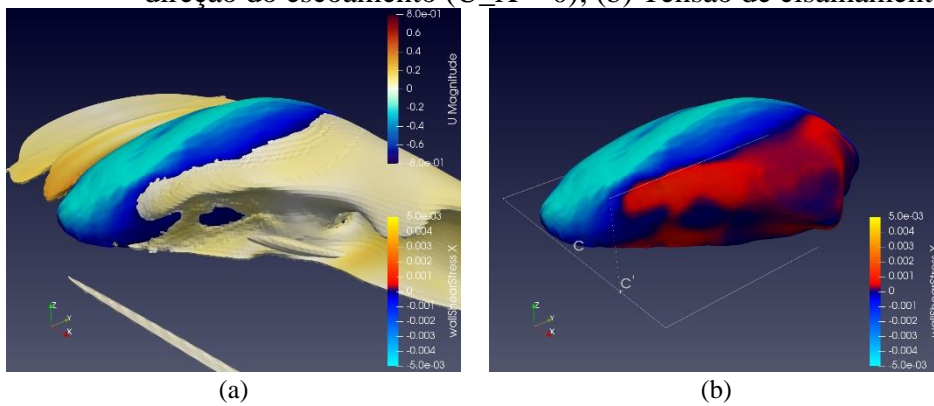


Figura 12: Superfície da concha com orientação $x+$. (a): Iso-Volume para velocidade zero na direção do escoamento ($U_X = 0$); (b) Tensão de cisalhamento.



A Tabela 2 resume a distância da separação da camada limite (c') no plano XZ , em relação ao comprimento total da concha na direção do escoamento (c). Nota-se que, nas orientações com o umbo direcionado a jusante ($x+$) e nas orientações transversais ($y+$ e $y-$), a separação da camada limite ocorreu aproximadamente entre 70% e 80% do comprimento total da concha na direção do escoamento. Em contraste, na configuração em que o umbo está orientado a montante do escoamento ($x-$), a separação da camada limite foi observada quase na metade da superfície da concha.

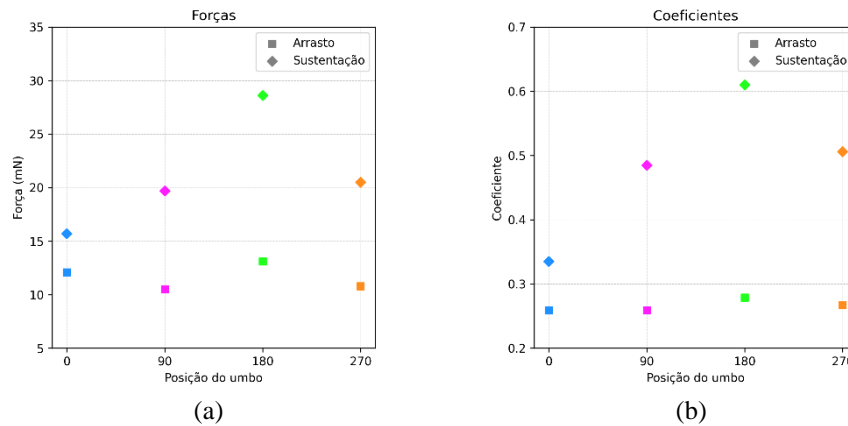
Tabela 2: Distância relativa da separação da camada limite na superfície da concha em diferentes orientações do escoamento.

	0° ($x+$)	90° ($y+$)	180° ($x-$)	270° ($y-$)
c'/c	0,81	0,74	0,53	0,70

4.3 FORÇAS

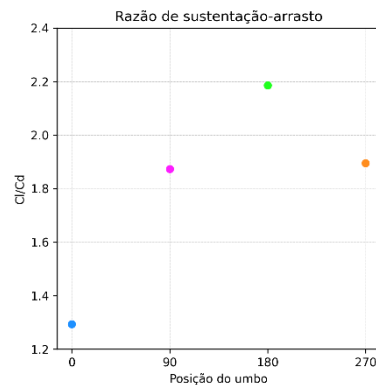
A análise dos gráficos apresentados na Figura 13 revela que a configuração na qual o umbo da concha está orientado a montante do escoamento (orientação x-) resultou nos maiores valores observados tanto para a força quanto para o coeficiente de arrasto. De forma similar, esta configuração também exibiu os valores mais elevados para a força de sustentação e seu coeficiente correspondente. Adicionalmente, conforme ilustrado na Figura 14, o caso com a orientação x- 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. Essa observação de menor estabilidade com a orientação inicial do umbo a montante foi observado experimentalmente por Silva et al. (2023),

Figura 13: Gráficos para as forças (a) e os coeficientes (b) de arrasto e sustentação em função da orientação da concha.



Em relação às configurações em que o umbo da concha está orientado transversalmente ao escoamento (y+ e y-), 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 x+. Portanto essa redução nas forças de arrasto, em comparação com a orientação x+, pode ser atribuída primordialmente à diminuição da área de seção transversal exposta ao escoamento. Além disso, nas orientações y+ e y-, 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 (x+ e x-). Assim, a razão de sustentação-arrasto nesses casos também se posicionou entre os valores observados para as orientações x+ e x-.

Figura 14: Gráfico da razão de sustentação-arrasto (C_l/C_d) em função da orientação da concha.



A orientação $x+$ da concha demonstra ser a mais estável, caracterizada pela menor razão de arrasto-sustentação; contudo, não é essa a configuração que apresenta a menor força de arrasto. Com base na Figura 13, a menor força de arrasto é observada quando o umbo está voltado para a transversal do escoamento ($y+$) 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 ($x-$) tendem a girar em seu plano horizontal, alcançando uma posição mais estável e então cessam o movimento no leito de areia.

5 CONCLUSÃO

Este estudo abordou a análise da pressão de estagnação, do fenômeno de descolamento da camada limite e das forças de arrasto e sustentação associadas a quatro distintas orientações da concha da espécie *Anomalocardia brasiliiana*, posicionadas com a concavidade voltada para baixo. A investigação foi conduzida por meio de simulações numéricas turbulentas 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 mais resistente 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. Além disso, a simulação RANS em regime estacionário, apesar de fornecer uma visão média ao longo do tempo, alinhou-se consistentemente com o comportamento observado experimentalmente.

O parâmetro de Shields, usado em transporte de sedimentos, considera a dimensão característica do objeto, a força de arrasto através da tensão de cisalhamento e o peso submerso, porém, não leva em conta a força de sustentação. Portanto, sob a perspectiva da dinâmica dos fluidos, recomenda-se uma revisão futura desse parâmetro para abranger a influência da sustentação, particularmente em estudos de conchas em leitos, visando uma caracterização mais abrangente para o transporte de sedimentos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão das simulações CFD para abranger uma gama mais ampla de ângulos de rotação da concha, assim como a variação das condições de escoamento, como velocidade e níveis de turbulência. Além disso, é pertinente explorar simulações em regime transiente para investigar a evolução temporal do comportamento dinâmico do escoamento. Outra sugestão é a utilização de tecnologias modernas em CFD, tais como malhas dinâmicas e a metodologia *Immersed Boundary Method* (IBM) para simular o movimento da concha no fluido.

REFERÊNCIAS

- ALFONSI, G. Reynolds-Averaged Navier–Stokes Equations for Turbulence Modeling. **Applied Mechanics Reviews**, [s. l.], v. 62, n. 4, p. 040802, 2009.
- BIVALVES (PELECYPODS, CLAMS, ETC.), FOSSILS, KENTUCKY GEOLOGICAL SURVEY, UNIVERSITY OF KENTUCKY. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.uky.edu/KGS/fossils/fossil-pelecypoda.php>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- CARTER, J. G. *et al.* Treatise Online no. 48: Part N, Revised, Volume 1, Chapter 31: Illustrated Glossary of the Bivalvia. **Treatise Online**, [s. l.], v. 0, n. 0, 2012. Disponível em: <https://journals.ku.edu/treatiseonline/article/view/4322>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- 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. Incipient Motion of Bivalve Shells on Sand Beds under Flowing Water. **Journal of Engineering Mechanics**, [s. l.], v. 129, n. 2, p. 232–240, 2003.
- 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.
- 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.
- MARKATOS, N. C. The mathematical modelling of turbulent flows. **Applied Mathematical Modelling**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 190–220, 1986.
- MENTER, F. R. **Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows**. [S. l.]: NASA, 1992. Technical Memorandum. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930013620>. Acesso em: 6 jan. 2024.
- MUNIZ, M. C.; BOSENCE, D. W. J. Lacustrine carbonate platforms: Facies, cycles, and tectosedimentary models for the presalt Lagoa Feia Group (Lower Cretaceous), Campos Basin, Brazil. **AAPG Bulletin**, [s. l.], v. 102, n. 12, p. 2569–2597, 2018.
- OPENFOAM DOCUMENTATION - HOME. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://doc.openfoam.com>. Acesso em: 27 jan. 2024.
- OURIEMI, M. *et al.* Determination of the critical Shields number for particle erosion in laminar flow. **Physics of Fluids**, [s. l.], v. 19, n. 6, p. 061706, 2007.
- PAPHITIS, D. Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 3–4, p. 227–245, 2001.

PAPHITIS, D. *et al.* Settling velocities and entrainment thresholds of biogenic sands (shell fragments) under unidirectional flow. **Sedimentology**, [s. l.], v. 49, n. 1, p. 211–225, 2002.

PROTHERO, D. R.; SCHWAB, F. L. **Sedimentary geology: an introduction to sedimentary rocks and stratigraphy**. 3. ed. New York, NY: Freeman, 2014.

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.

TU, J.; YEOH, G.-H.; LIU, C. Practical Guidelines for CFD Simulation and Analysis. *In*: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. [S. l.]: Elsevier, 2018. p. 255–290. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081011270000076>. Acesso em: 6 jan. 2024.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. ed. Harlow, England ; New York: Pearson Education Ltd, 2007.

WATER VISCOSITY CALCULATOR. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.omnicalculator.com/physics/water-viscosity>. Acesso em: 6 jan. 2024.

APÊNDICE A — SISTEMA DE VÓRTICES

Na região a montante da concha, próxima à superfície, observou-se a formação de um sistema de vórtices em ferradura (horseshoe vortex system), conforme evidenciado pelas linhas de corrente e pelo Iso-Volume baseado no critério Q (conforme ilustrado na Figura 15), além das linhas de corrente apresentadas na Figura 16(a). Esse mesmo padrão de vórtice foi constatado em todas as orientações das conchas estudadas (Figura 16).

Figura 15: Linhas de correntes e Iso-Volume do critério Q.

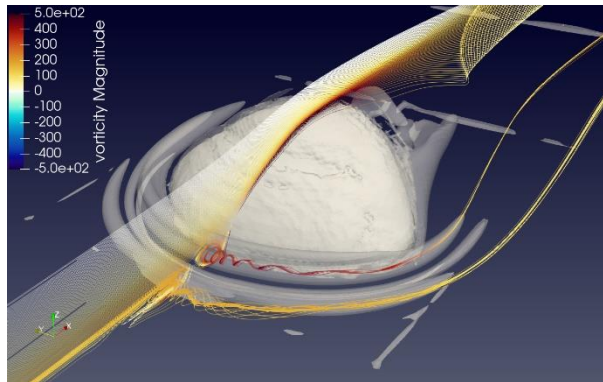
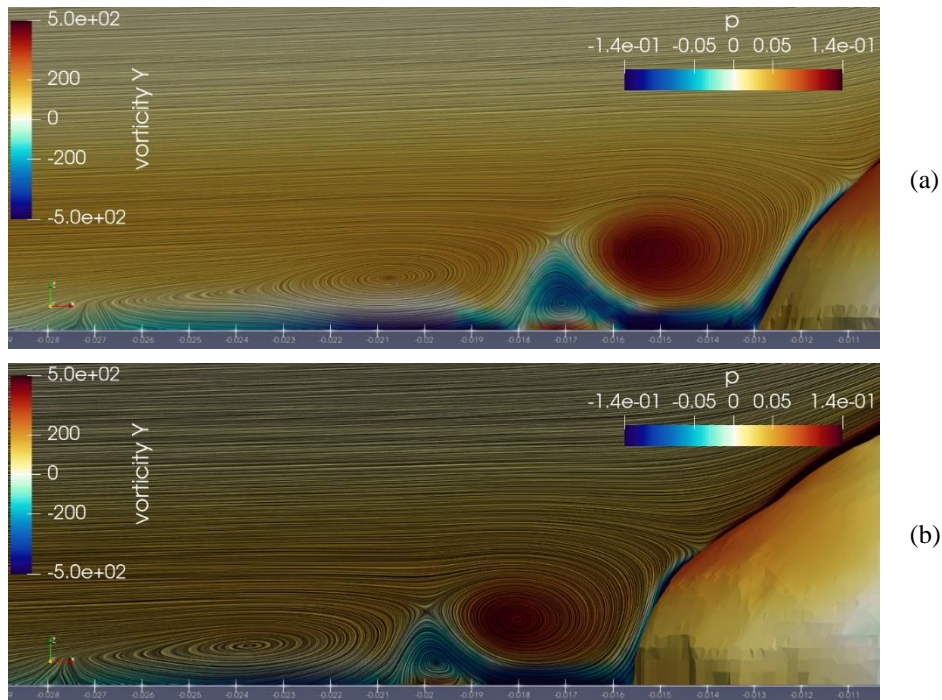
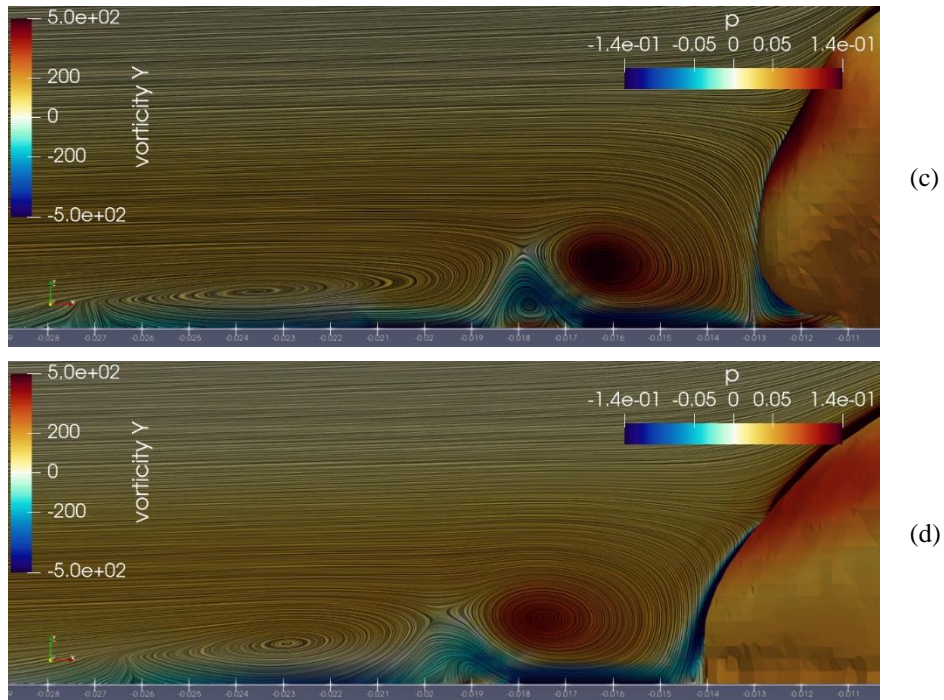


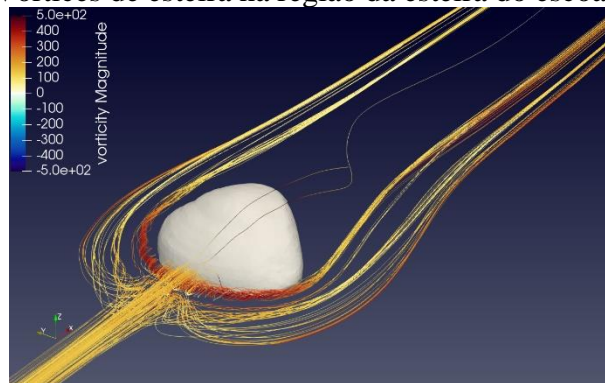
Figura 16: Visualização das linhas de correntes a montante do umbo com orientação x+ (a), y+ (b), x- (c) e y- (d).





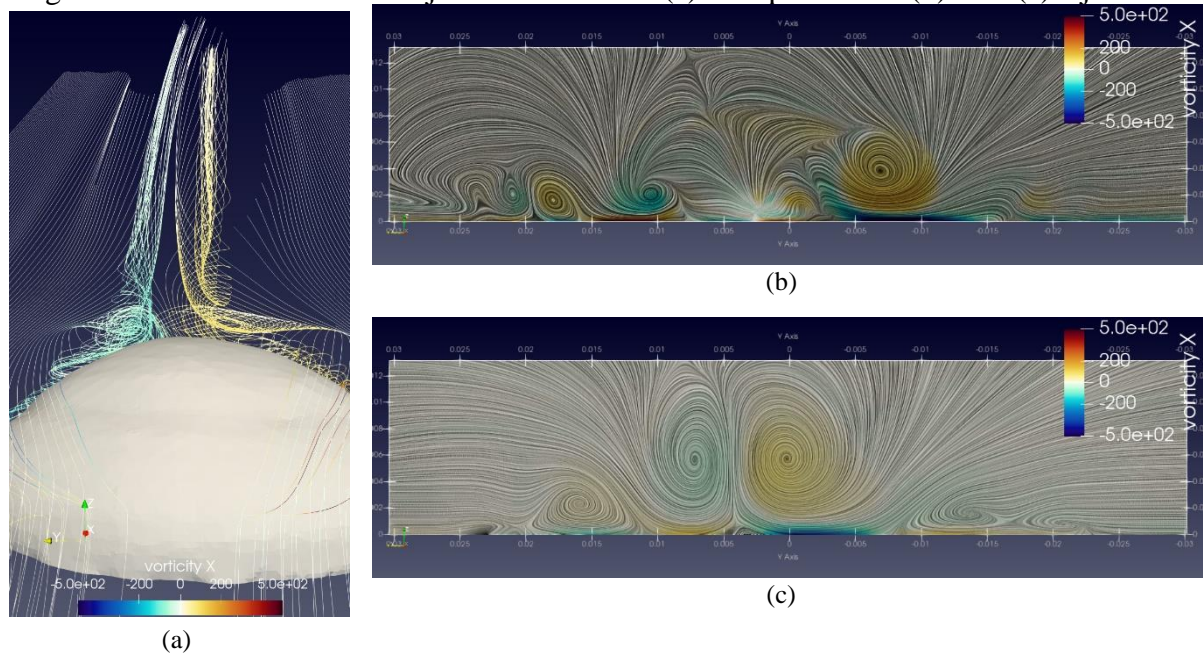
O ponto de origem desses vórtices, assim como o ponto de separação da camada limite na superfície da placa, ocorreu na mesma localização para todas as orientações da concha simuladas. Os vórtices em ferradura são caracterizados por um fluxo complexo, onde o fluido se enrola em um padrão semelhante a uma ferradura ao redor de um obstáculo. Essa configuração levou à formação de vórtices de esteira (trailing vortices) a jusante do escoamento, como observado na Figura 17.

Figura 17: Vórtices de esteira na região da esteira do escoamento.



Na zona de esteira (Wake zone), observou-se a formação de um par de vórtices contra-rotativos (counter-rotating vortex pair), conforme ilustrado na Figura 18. Esses vórtices são caracterizados por dois fluxos rotativos opostos que emergem atrás de um corpo submerso em um fluido, resultando em um padrão distintivo de movimento do fluido.

Figura 18: Linhas de corrente a jusante da concha (a) e no plano 0.5c (b) e 1c (c) a jusante.



Na zona de esteira dos casos com o umbo perpendicular ao escoamento (orientações $y+$ e $y-$), verificou-se um vórtice contra-rotativo de maior intensidade em comparação com seu par. No caso do $y+$, a intensidade predominante do vórtice foi no sentido horário, enquanto no caso $y-$, a intensidade predominante foi no sentido anti-horário, como evidenciado pela vorticidade observada nos planos apresentados na Figura 19. Além disso, a trajetória do vórtice a jusante apresentou uma leve inclinação, procurando alinhar-se com a orientação do umbo.

Figura 19: Planos de corte a 1c, 2c, 4c e 6c a jusante na direção do escoamento para a orientação $x+$ (a), $y+$ (b), $x-$ (c) e $y-$ (d).

