

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**MOVIMENTO INCIPIENTE E ORIENTAÇÃO DE CONCHAS
DE MOLUSCOS BIVALVES SOB A AÇÃO DE CORRENTES**

FELIPE RAFAEL SECCO DA SILVA

ORIENTADOR - Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr

COORIENTADORA - Prof^a. Dr^a. Ana Luiza de Oliveira Borges

Porto Alegre, 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**MOVIMENTO INCIPIENTE E ORIENTAÇÃO DE CONCHAS
DE MOLUSCOS BIVALVES SOB A AÇÃO DE CORRENTES**

FELIPE RAFAEL SECCO DA SILVA

ORIENTADOR - Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr

COORIENTADORA - Prof^a. Dr^a. Ana Luiza de Oliveira Borges

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Erthal – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr^a. Inaiê Malheiros Miranda – Universidade Federal do Pará

Dr. Matias Ritter – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do Título de
Mestre em Ciências.

Porto Alegre, 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

CIP - Catalogação na Publicação

Secco da Silva, Felipe Rafael
MOVIMENTO INCIPIENTE E ORIENTAÇÃO DE CONCHAS DE
MOLUSCOS BIVALVES SOB A AÇÃO DE CORRENTES / Felipe
Rafael Secco da Silva. -- 2020.
81 f.
Orientador: Elírio Ernestino Toldo Jr..

Coorientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Conchas de moluscos bivalves. 2. Início de
movimento. 3. Orientação de conchas transportadas por
correntes. 4. Diagrama de Shields. I. Ernestino Toldo
Jr., Elírio, orient. II. de Oliveira Borges, Ana
Luiza, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

RESUMO

Três espécies de conchas dos moluscos bivalves *Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia orbicularis* e *Divaricella quadrisulcata* foram experimentalmente avaliados em canais de laboratório com o intuito de determinar as condições de início de movimento e a orientação final das conchas após cessado o transporte. Um total de 150 experimentos foram realizados, nos quais conchas isoladas, dispostas em um leito fixo de textura arenosa, foram submetidas a ação de correntes. Este estudo relata que conchas posicionadas com a convexidade para cima são resistentes mais a ação do escoamento quando o umbo está apontando para jusante. Nessa posição inicial, a variação de tamanho das conchas possui relação direta com a energia do escoamento necessária para pô-las em movimento. Já conchas mobilizadas com a convexidade para cima e com o umbo apontando para a montante, além de serem mais facilmente mobilizadas, são menos sensíveis a variação de tamanho. Em relação à forma da concha, esta pesquisa mostra que as espécies com maior área frontal tendem a serem mais facilmente mobilizadas. Os resultados de tensão de cisalhamento crítica obtidos nessa pesquisa foram normalizados em termos do parâmetro adimensional de Shields, e exibem valores muito abaixo da curva de previsão de início de movimento para grãos esféricos de Shields e possuem uma boa correlação com dados da literatura adquiridos sob condições semelhantes de escoamento e leito. Com relação à orientação das conchas, foi visto que as conchas que possuem valvas de geometria circular, quando transportadas com a convexidade para cima tendem a se orientar com o umbo apontando para jusante. Já as conchas de formato elíptico tendem a serem orientadas com o eixo de maior comprimento paralelo à ação do escoamento, possuindo um comportamento em que o umbo das valvas espelhadas (valvas direita e esquerda) apontam para margens opostas do escoamento. Esse comportamento também foi testado e confirmado em outro cenário experimental, no qual submeteu-se um leito inteiramente composto por valvas da espécie *Anomalocardia brasiliiana* sob a ação de correntes. A maior parte das medições de orientação das valvas neste cenário (Média = 69%, desvio padrão = 12%) mostram que o umbo da valva direita tende a apontar para a margem direita do escoamento, já as valvas esquerdas apontam o umbo para o lado esquerdo do escoamento.

Palavras-chave: Conchas de moluscos bivalves, início de movimento, orientação, hidrodinâmica.

ABSTRACT

Three bivalve mollusc shell species *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia orbicularis*, and *Divaricella quadrisulcata* were experimentally tested in laboratory flumes in order to determine the threshold of motion condition and the final orientation of the shells. A total of 150 current flow experiments were conducted for single shells resting in a fixed sand bed. This study demonstrates that shells in the convex-up position are more resistant to the flow action when umbo is pointing to downstream rather than upstream. With regard to the shell shape, this research shows that species which have higher frontal areas tend to be entrained at lower flow magnitudes. The critical shear stress results were normalized in terms of the nondimensional Shields parameter, exhibiting values far below the Shields curve in good agreement with previous data in the literature under similar flow and bed conditions. Concerning the shell orientation, it was seen that circular shells in a convex-up position have a tendency to be orientated with the umbo pointing downstream. Elliptical-shaped shells transported in the convex-up position tend to be oriented with the long axis parallel to the flow direction, thus, presenting a bimodal pattern in which the umbo of the right valve is positioned opposite to that of the left valve. This behavior was also tested and confirmed in another scenario, in which current flow experiments were performed over a shell bed formed by Elliptical-shaped shells. Most of the valve orientation measurements (average = 69%, standard deviation = 12%) show that the right valve umbo tend to point to the right flow margin and the left valves point that to the left flume side. These results have direct application in the shells' incipient motion predictions and in palaeocurrent field analysis.

Keywords: mollusk bivalve shells, Threshold of motion, orientation, hydrodynamic.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema das forças que atuam no transporte unidirecional de sedimentos. D - Diâmetro do grão analisado; k_s - diâmetro característico das partículas do leito. F_L - Força de sustentação; F_D - Força de arraste; W - Peso submerso; P - Ponto de contato entre o grão analisado e o grão adjacente à jusante; ψ - ângulo de inclinação do leito; ϕ - ângulo de repouso. 15
- Figura 2. Velocidade da corrente para o início de movimento de grãos que vão de areia muito grossa a calhau. Modificado de Owens (1908). 16
- Figura 3. Diagrama de Hjulström (1935). Curvas pretas limitam campos de erosão, transporte e deposição. Linhas vermelhas são dos resultados de transporte de Owens (1908). Modificado de Hjulström (1935). 17
- Figura 4. Diagrama de Shields. Eixo da ordenadas: parâmetro de Shields (θ). Eixo das abscissas: número de Reynolds do grão (Re^*). A disposição das linhas oblíquas representa a curva de Shields de movimento incipiente dos grãos. Modificado de Shields (1936). 19
- Figura 5. Curvas de Shields ajustadas para diferentes relações de D/ k_s . A) Curvas calculadas por Wiberg & Smith (1987). B) Curvas calculadas por Ramsdell & Miedema (2010). Em ambos diagramas: a curva D/ k_s = 1 representa a curva original de Shields (1936) e a distribuição de pontos são os dados medidos por Fisher *et al.* (1983). Modificado de Wiberg & Smith (1987) e de Ramsdell & Miedema (2010). .. 21
- Figura 6. Velocidade de início de movimento das conchas *Glycimeris glycimeris*, *Mytilus edulis* e *Petricola pholadiformis* em função da posição inicial do umbo. A seta preta no canto superior esquerdo indica o sentido da corrente. Modificado de Futterer (1978). 22
- Figura 7. Velocidade de início de movimento de valvas das conchas *Donax scortum* em função do seu eixo de maior comprimento. Círculo fechado - conchas frescas. Quadrado aberto conchas abradidas. N - Quantidade de medições. Linhas verticais representam o desvio padrão. Modificado de Chattopadhyay *et al.* (2013). 23

- Figura 8. Compilação dos resultados de Dey (2003) e de Diedericks *et al.* (2018) no diagrama de Shields (1936). Curvas de Ramsdell & Miedema (2010) para $D/k_s = 6$ e 20 também são apresentadas. 24
- Figura 9. Número de mobilidade (M_n) em função do número de Reynolds do grão (Re^*) para fragmentos bioclásticos. A) Modificado de Paphitis *et al.* (2002). B) Modificado de Weill *et al.* (2010). 26
- Figura 10. Compilação de dados experimentais de θ_{cr} versus D^* (D_{sv}) para bioclastos transportados sob a ação de ondas e de correntes. O diagrama apresenta também as curvas de Shields (1936) e de Paphitis (2001) bem como o envelope de Paphitis (2001) para siliciclastos esféricos. Modificado de Fick *et al.* (2020). 28
- Figura 11. Terminologia para a descrição da orientação de conchas em perfil e em planta. Modificado de Kidwell *et al.* (1986). 29
- Figura 12. A) Orientação final de conchas transportadas pela ação de correntes. B) Orientação final de conchas transportadas pela ação ondas. As setas pretas indicam o sentido das leituras de orientação. A seta vermelha indica o sentido da corrente e de propagação de ondas. C) Imagem das espécies experimentadas por Nagle (1967): 1 - Bivalve *Mytilus edulis*; 2 - Gastrópode *Turritella mortoni*; 3 - Gastrópode *Turritella plebia*; 4 - Braquiópode *Spirifer cyclopterus* (fóssil); 5 - *Anadara ovalis*; 6 - Braquiópode *Rhipidomella sp.* (fóssil). Modificado de Nagle (1967) 30
- Figura 13. Conchas de geometria elíptica e suas orientações após serem transportadas por correntes. Conclusões de Behrens & Watson (1969), Futterer (1978) e Newell *et al.* (2007). As setas pretas indicam a orientação final da extremidade posterior das valvas. 31
- Figura 14. A) Orientação final das conchas *Venerupis rhomboides*, *Mytilus edulis* e *Nucula turgida*, transportadas sobre leito arenoso e lamoso. As setas pretas indicam a direção das leituras de orientação. B) Trajetória de *V. rhomboides* sobre leito arenoso. C) Trajetória de *M. edulis* sobre leito arenoso. D) Trajetória de *M. edulis* sobre leito lamoso. A seta vermelha indica o sentido da corrente para os itens A, B, C e D. Modificado de Brenchley & Newall (1970). 32

- Figura 15. Fotografia das espécies *Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia orbicularis* e *Divaricella quadrisulcata*. 33
- Figura 16. A) Eixos das conchas. Ponto vermelho indica a posição de medição de espessura. B) Esquema indicando o lado da valva. C) Da esquerda para direita, seções perpendiculares ao eixo a de *Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia orbicularis* e *Divaricella quadrisulcata*. 34
- Figura 17. Relação entre a massa e a área projetada no plano composto pelos eixos inferior e superior (S_{ac}). 35
- Figura 18. Canal de alvenaria. a) Registro gaveta (200 mm de diâmetro). b) vertedor. c) bacia de dissipação, d) posição onde as conchas são colocadas nos experimentos. e) comporta de jusante. As setas pretas indicam as posições em que as pontas linimétricas de medição de profundidade foram instaladas. 36
- Figura 19. Ponta linimétrica. a) Ponta de aço. b) Haste de 1,5 m de comprimento (cortada para ajustar a foto na página). c) Escala de medição em nônio. d) Porcas de ajustes. 37
- Figura 20. Distribuição granulométrica das valvas da espécie *Anomalocardia brasiliiana* que compõem a amostra de 1Kg. 39
- Figura 21. Desenho esquemático e fotografias do canal de vidro. a) bombas; b) reservatório de 1000 litros; c) registro gaveta - 3/4"; d) registro esfera - 3/4"; e) escala de medição de profundidade; f) cuba de jusante. 40
- Figura 22. Relação da vazão e a abertura do registro gaveta. 40
- Figura 23. Fotografia do leito. Os quadrados marrons representam a área onde foi medida a orientação das conchas. 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Massa; massa específica (ρ) eixos a, b e c; espessura; diâmetro de peneiramento (D_{sv}) e nominal (D_n); área projetada (S_{ac}) no plano composto pelos eixos (a) e (c).	35
Tabela 2. Vazão e velocidade dos experimentos.	41

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área molhada (m^2)

a = eixo de maior comprimento da concha (m)

b = eixo intermediário da concha (m)

c = eixo de menor comprimento da concha (m)

D_n = diâmetro nominal (m)

D_{sv} = diâmetro de peneiramento (m)

D/k_s = razão entre o diâmetro do grão analisado e o diâmetro médio das partículas que compõem o leito

F_D = força de arraste (N)

F_L = força de sustentação (N)

H = profundidade do escoamento (m)

P = perímetro molhado (m)

Q = vazão ($m^3 s^{-1}$)

Re^* = número de Reynolds do grão

S = declividade do leito

Sac = área projetada no plano formado pelos eixos de maior e de menor comprimento da concha (m^2)

u^* = velocidade de cisalhamento ($m s^{-1}$)

V = volume da concha (m^3)

W = peso submerso (N)

γ = peso específico da água ($N m^{-3}$)

γ_s = peso específico do grão ($N m^{-3}$)

θ_{cr} = parâmetro crítico de Shields

ρ = massa específica da água ($Kg m^{-3}$)

ρ_s = massa específica do grão ($Kg m^{-3}$)

$\tau_{b,cr}$ = tensão de cisalhamento crítica (Pa)

ψ = ângulo de inclinação do leito

ψ_r = ângulo de repouso das partículas que compõem o leito

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
3 ESTADO DA ARTE	14
3.1 Princípios físicos do início de movimento de grãos por correntes	14
3.2 Revisão bibliográfica	16
3.2.1 Início de movimento	16
3.2.2 Transporte de conchas pela ação de correntes	21
3.2.3 Transporte de leitos de conchas e seus fragmentos	25
3.2.4 Orientação preferencial de conchas transportadas como carga de fundo	28
4 METODOLOGIA	33
4.1 Experimentos com conchas solitárias	33
4.1.1 As conchas	33
4.1.2 Canal e equipamentos	36
4.1.3 Procedimentos	37
4.2 Experimentos com leito de conchas	39
4.2.1 As conchas	39
4.2.2 Canal e equipamentos	39
4.2.3 Procedimentos	41
5 CARTA DE SUBMISSÃO	43
6 ARTIGO	44
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
8 REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo visa investigar experimentalmente o início de movimento de conchas de moluscos bivalves, bem como sua propensão a se orientar quando transportadas por escoamentos unidirecionais. A relevância de pesquisas com este viés está na geração de ferramentas que permitam validar interpretações geológicas de assembleias fósseis acerca dos processos hidrodinâmicos presentes em estudos bioestratinômicos.

Neste contexto, conchas de moluscos bivalves são um dos principais constituintes do arcabouço de rudstones e grainstones bioclásticos, informalmente denominados como coquinas. O retrabalhamento e transporte das conchas que compõem estas litologias, seja por ação de ondas e também por correntes, é altamente dependente da forma das partículas. Logo, torna-se necessário compreender o comportamento hidrodinâmico desse sedimento, dado a sua geometria de longe distante dos grãos siliciclásticos.

A tensão de cisalhamento do escoamento necessária para mobilizar um grão é o parâmetro mais utilizado para caracterizar o comportamento hidrodinâmico de sedimentos submetidos a mecanismos transitivos de transporte. O interesse na temática experimental de início de movimento de material sedimentar tem seu estabelecimento no pioneiro trabalho de Shields (1936). Onde o referido autor examinou a erosão de sedimentos esféricos orgânicos e inorgânicos através da ação de correntes em laboratório. Constituiu-se assim a curva de Shields, que separa regiões de repouso e transporte de grãos, definida pela relação entre parâmetros adimensionais que consideram a interação do escoamento com o sedimento. Desde então o diagrama de Shields fora utilizado, para além de sedimentos siliciclásticos, em estudos de início de movimento de fragmentos calcários (Pathitis, *et al.*, 2002; Smith & Cheung, 2004;) bem como para conchas não fragmentadas (Diedericks *et al.*, 2018; Fick *et al.* 2020).

Seguindo esta linha, este trabalho apresenta dados de início de movimento e de orientação preferencial das conchas bivalves *Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia orbicularis* e *Divaricella quadrisulcata*, produzidos através de experimentos em canais de laboratório. A etapa experimental foi realizada no Laboratório de Ensino de Hidráulica e no Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD), ambos vinculados ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

2 OBJETIVOS

De acordo com o Plano de Atividades estabelecido para o desenvolvimento da Dissertação de Mestrado, foram propostos alguns objetivos para o estudo experimental de movimento incipiente e orientação de conchas de moluscos bivalves sob a ação de correntes. Em escoamentos desenvolvidos sobre um leito de textura quartzosa de tamanho areia bem selecionada ($D_{sv} = 0,8$ mm), os principais objetivos são:

1. Mensurar experimentalmente a tensão de cisalhamento do escoamento próxima ao leito na condição de início de movimento das conchas bivalves *Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia orbicularis* e *Divaricella quadrisulcata*;
2. Mensurar a orientação final dessas mesmas espécies de conchas após cessado o transporte.
3. Adimensionalizar os dados gerados de início de movimento, expô-los e compará-los com dados provenientes da literatura no diagrama de Shields (1936);

Em escoamentos desenvolvidos sobre um leito de granulometria polimodal ($D_{sv} = 3,8$ a $22,25$ mm) composto por valvas da espécie *Anomalocardia brasiliiana*, os principais objetivos são:

1. mensurar a orientação final das valvas após cessado o transporte;
2. Comparar os dados obtidos de orientação das conchas com aqueles já registrados na literatura;

3 ESTADO DA ARTE

3.1 Princípios físicos do início de movimento de grãos por correntes

Segundo Cardoso (1998), o início de movimento dos grãos que repousam sobre o leito de um canal ocorre em uma condição crítica, na qual a soma das forças hidrodinâmicas do escoamento (forças de arraste e de sustentação) são praticamente iguais ao peso submerso dos grãos. A força de arraste (F_D) pode ser representada através da seguinte equação (1):

$$F_D = C_1 \tau_b D^2 \quad (1)$$

onde,

C_1 = é o coeficiente de arraste;

τ_b = é a tensão de cisalhamento que o escoamento promove junto ao leito (Pa);

D = é o diâmetro característico das partículas que compõem o leito (m).

Uma vez que a sustentação e o arraste não são independentes, C_1 contempla também os efeitos provenientes da força de sustentação (F_L). O peso do grão submerso (W) é dado por (2):

$$W = C_2 (\gamma_s - \gamma) D^3 \quad (2)$$

onde,

C_2 = é um coeficiente geométrico (= $1/6 \pi$ para uma esfera);

γ_s = é o peso específico do grão (Nm^{-3});

γ = é o peso específico do fluido (Nm^{-3});

Considera-se também a inclinação do leito (ψ) e o ângulo de repouso (ϕ) (ver Fig. 1), este último só é levado em conta nos transportes por arraste e por rolamento de grãos. Substituindo W e F_D por suas respectivas expressões, o balanço das forças na condição crítica de início de movimento é dada por (3):

$$C_2 (\gamma_s - \gamma) D^3 \cos \psi \operatorname{tg} \phi = C_1 \tau_{b,cr} D^2 + C_2 (\gamma_s - \gamma) D^3 \operatorname{sen} \psi \quad (3)$$

(forças resistivas) (forças hidrodinâmicas)

Onde,

$\tau_{b,cr}$ = é a tensão crítica de cisalhamento junto ao fundo, ou a tensão de cisalhamento mínima necessária para por os grãos em movimento (Pa).

Por fim, em um leito horizontal, a equação anterior conduz ao seguinte resultado (4):

$$\frac{\tau_{b,cr}}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg}\phi \quad (4)$$

Sendo o termo do lado esquerdo da equação uma razão entre as forças hidrodinâmicas e o peso submerso.

Sobre o ângulo de repouso, ressalta-se que para leitos com textura granulométrica bem selecionada compostos por grãos siliciclásticos esféricos, ϕ apresenta valores entre 30 a 32° (Robert, 2003). No entanto quando o diâmetro do grão analisado a ser posto em movimento (D) é diferente do diâmetro característico das partículas do leito, chamado aqui de k_s (Fig.1), ϕ torna-se uma função da razão de D/k_s . Miller & Byrne (1966), a partir de experimentos com partículas esféricas compostas de quartzito moído, esfera de vidro e areia natural, verificaram que ϕ diminui com o aumento da razão D/k_s através da seguinte relação (Eq. 5):

$$\phi = C \left(\frac{D}{k_s} \right)^{-0,3} \quad (5)$$

onde:

C = um coeficiente que leva em conta a forma do grão. Igual a 68° para quartzito moído, 52° para esfera de vidro e 62° para areias naturais.

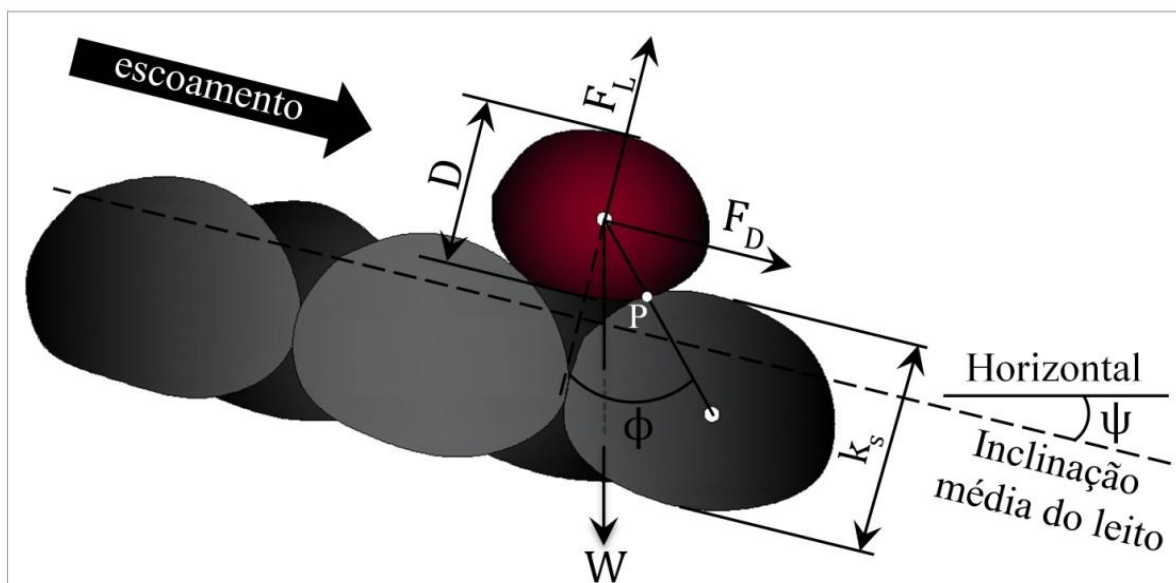


Figura 1. Esquema das forças que atuam no transporte unidirecional de sedimentos. D - Diâmetro do grão analisado; k_s - diâmetro característico das partículas do leito. F_L - Força de sustentação; F_D - Força de arraste; W - Peso submerso; P - Ponto de contato entre o grão analisado e o grão adjacente à jusante; ψ - ângulo de inclinação do leito; ϕ - ângulo de repouso.

3.2 Revisão Bibliográfica

3.2.1 Início de movimento

Uma das primeiras abordagens do fenômeno de início de movimento vem da pesquisa de Owens (1908), que realizou experimentos em pequenos canais de maré na costa de Wash, Norfolk, Inglaterra. Este autor trabalhou com partículas de quartzo microcristalino (flint) de tamanhos entre areia muito grossa a calhau (*sensu* Wentworth, 1922) com intuito de gerar um gráfico de previsão de início de movimento (Fig. 2) com base na velocidade média do escoamento.

Owens (1908) concluiu que a partícula posta em movimento (em termos de seu diâmetro) é função proporcional ao quadrado da velocidade da corrente e inversa ao peso submerso da partícula. Como o peso das partículas é proporcional ao cubo do diâmetro, o autor ainda destaca que, o peso da partícula carregada varia com a sexta potência da velocidade da corrente. Ou seja, uma corrente de velocidade igual a 2 ms^{-1} é capaz de mover uma partícula quatro vezes maior em diâmetro e 64 vezes maior em peso do que uma corrente de 1 m s^{-1} . Segundo Dey (2014, p. 189), esta constatação já teria sido feita por Brahms em 1753.

Outros trabalhos de maior notoriedade que geraram diagramas de início de movimento foram as pesquisas de Hjulström (1935) e de Shields (1936). O primeiro autor relacionou a velocidade de início de movimento com o tamanho do grão e o segundo trabalhou com parâmetros adimensionais que consideram a interação do escoamento com o sedimento.

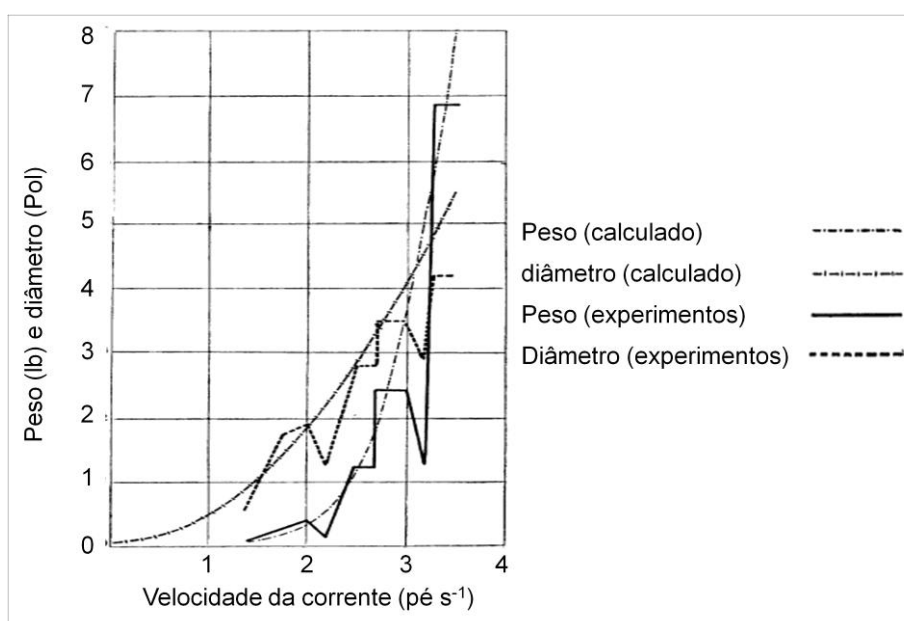


Figura 2. Velocidade da corrente para o início de movimento de grãos que vão de areia muito grossa a calhau. Modificado de Owens (1908).

Contando com medições de campo, experimentos em laboratório e uso da bibliografia, Hjulström (1935) elaborou um diagrama (Fig. 3) composto pela velocidade média do escoamento (fluvial) em função do tamanho do grão. Este diagrama separa regiões de erosão, transporte e deposição através de duas curvas. A curva que limita a região inferior do campo de erosão é representada através de uma banda e não uma linha, isto segundo o autor (*apud Sherman et al., 2013*), devido a natureza aleatória da condição crítica de início do processo erosivo. Por último, o diagrama ainda apresenta (linhas vermelhas) a interpretação de Hjulström dos resultados de Owens (1908) para o início de transporte de partículas grossas.

Shields (1936), em canais de laboratório, avaliou separadamente o comportamento de leitos de granulometria uniforme com diferentes tamanhos médios de grão ($D_{sv} = 0,36$ a $3,44$ mm) e de diferentes composições mineralógicas (âmbar, carvão mineral, granito e barita moídos) sob a ação de escoamentos fluviais. O autor ainda incorporou aos seus resultados dados do mesmo fenômeno para areias quartzosas advindos das pesquisas de Gilbert (1914), Kramer (1932), Casey (1935) e de dados da U.S. Army Waterways Experimental Station.

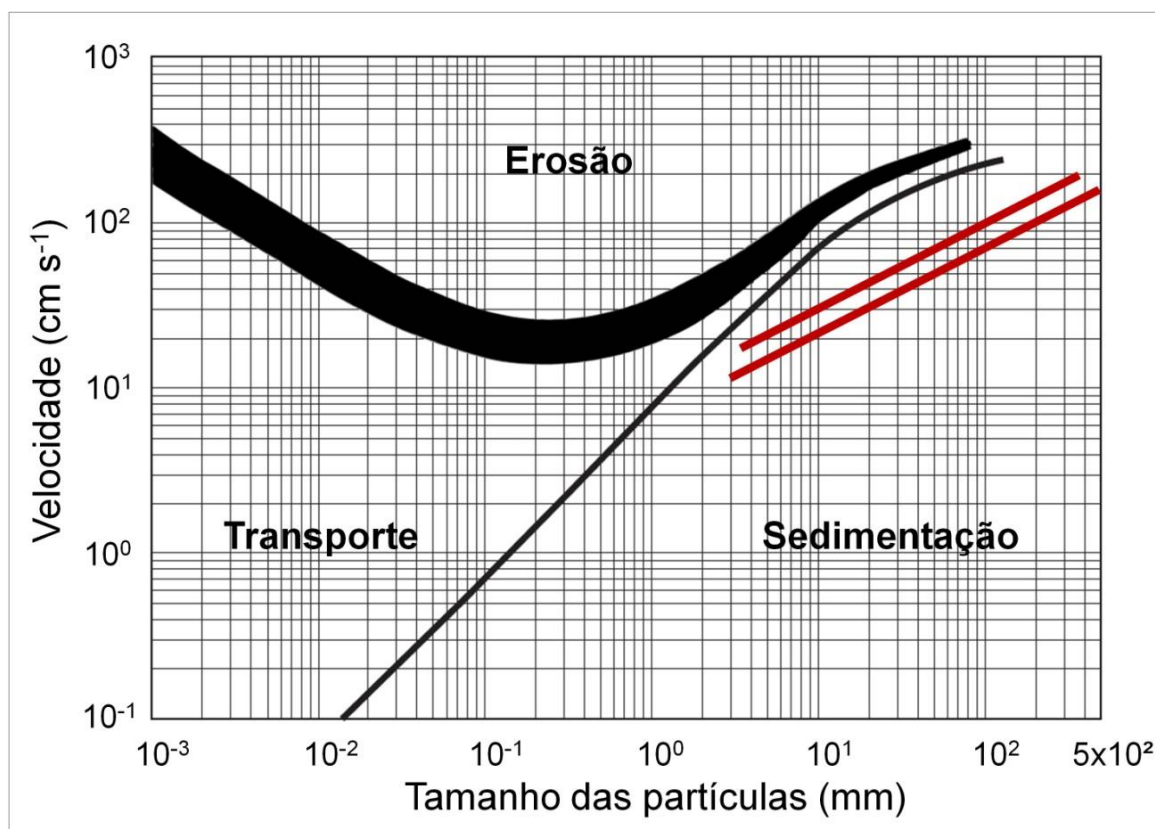


Figura 3. Diagrama de Hjulström (1935). Curvas pretas limitam regiões de erosão, transporte e deposição. Linhas vermelhas são a interpretação de Hjulström dos resultados de início de movimento de Owens (1908). Modificado de Hjulström (1935).

Shields (1936) propôs um coeficiente de força trativa, posteriormente conhecido como parâmetro de Shields (θ), elaborado a partir de deduções matemáticas acerca das forças que atuam na interação escoamento/leito e baseando-se na lei da parede (ver Schlichting & Gersten, 2000, p. 522-533). A expressão de θ (Eq. 6) representa uma razão da força trativa do escoamento sobre a resistência tangencial do leito por unidade de área (forças resistivas), e é dada por:

$$\theta = \frac{\gamma_{s,cr} R S}{(\gamma_s - \gamma) D} = \frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma) D} \quad (6)$$

onde,

R = é o raio hidráulico ($=A/P$);

A = é a área da seção transversal do escoamento (m^2);

P = é o comprimento das paredes do canal em contato com o escoamento (m);

S = é a declividade do leito;

γ_s, γ, D e τ_b = ver Equações 1 e 2;

Este autor não deixa claro os critérios utilizados para definir os valores críticos da tensão de cisalhamento ($\tau_{b,cr}$). Alguns autores (Kenedy, 1995; Buffington; 1999) discutem a possibilidade de que Shields tenha extrapolado a taxa de sedimento transportado a um valor próximo de zero a partir de suas medições. Além disso, técnicas de visualização similares às de Kramer (1935) podem ter sido utilizadas, uma vez que sua pesquisa de doutorado era uma continuação das pesquisas de Kramer e de Casey (Kennedy, 1995).

A fim de representar graficamente θ , Shields (1936) associou seu parâmetro ao número de Reynolds do grão (Re^*), um coeficiente adimensional que expressa os efeitos que as partículas promovem na dissipação de energia mecânica do fluido escoado próximo ao leito. Este número classifica os escoamentos em: turbulento liso ($Re^* \leq 5$), transicional ($5 < Re^* < 70$) e turbulento rugoso ($Re^* \geq 70$). Re^* é expresso por (Eq. 7):

$$Re^* = \frac{u^* D}{\nu} \quad (7)$$

onde,

u^* = é a velocidade de cisalhamento ($= \sqrt{\tau_b / \rho}$);

ρ = é a massa específica do fluido ($Kg\ m^{-3}$);

ν = é a viscosidade cinemática do fluido ($m^2\ s^{-1}$);

$$D^* = \left[\frac{(\rho_s - 1)}{\rho} \right]^{1/3} \frac{D}{\nu} \quad (8)$$

onde:

ρ_s = massa específica do grão (Kg m^{-3});

ρ = massa específica do fluido (Kg m^{-3});

ν = é a viscosidade cinemática do fluido ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

Conforme detalha o Estado da Arte de Dey (2019), vários autores calcularam θ_{cr} em função de D^* a partir de dados experimentais. Sendo os resultados gerados por Cao *et al.* (2006 *apud* Dey, 2019) aqueles que possuem maior coeficiente de correlação (R^2) e menor erro (RMSE) ao comparar dados medidos com calculados.

A curva de Shields (1936) para previsão de início de movimento de grãos submetidos a escoamentos unidirecionais abrange as situações em que o leito possui textura granulométrica uniforme. Ou seja, a razão entre o diâmetro do grão a ser transportado (D) e um diâmetro característico que representa a altura das partículas que compõem a rugosidade do leito (k_s) é aproximadamente igual a 1. A fim de melhor compreender este fenômeno nas situações em que $D/k_s \neq 1$, a soma das pesquisas de alguns autores (Miller & Byrne 1966; Fisher *et al.* 1983; Wiberg & Smith 1987; Ramsdell & Miedema 2010), que trabalharam de forma experimental e analítica, gerou curvas de previsão de início de movimento nessas condições.

Fisher *et al.* (1983) realizaram experimentos com escoamentos unidirecionais em canais de laboratório, onde testaram o início de movimento de partículas orgânicas (casca de nozes moída, sementes, bolotas de carvalho e outros grãos) sobre leitos siliciclásticos para relações de $D/k_s \neq 1$. Os autores relatam que, quando as partículas do leito são mais grossas que o detrito orgânico a ser mobilizado pela ação da corrente, há um aumento na tensão crítica de cisalhamento ($\tau_{b,cr}$). Inversamente quando o detrito orgânico é maior que as partículas do leito ocorre uma diminuição de $\tau_{b,cr}$.

Fisher *et al.* (1983) apresentam seus dados de início de movimento no diagrama de Shields (1936) utilizando D_q como diâmetro característico, este sendo um diâmetro equivalente ao de uma esfera que possui velocidade de queda igual à do grão analisado. Esses resultados mostram, para escoamentos transicionais ($5 < Re^* < 70$), que razões de $D_q/k_s \approx 10^{-2}$ geram valores de θ_{cr} até 10 vezes superior

aos da curva de Shields. De forma inversa, na mesma faixa de Re^* , quando $D_q/k_s \approx 5,3$ os valores de θ_{cr} medidos baixaram na ordem de 6,6 vezes em relação a curva de Shields.

Wiberg & Smith (1987) e Ramsdell & Miedema (2010) calcularam de forma analítica o parâmetro de Shields apoiado em deduções matemáticas (análogas às Eq. 1, 2, 3 e 4) acerca do equilíbrio das forças resistivas e hidrodinâmica para diferentes razões de D/k_s . Ambos utilizaram a função de ϕ (Eq. 5) de Miller & Byrne (1966) para o valor de entrada do ângulo de repouso. As diferenças existentes para curvas de mesma relação (D/k_s) entre esses dois autores (Fig. 5 A e B) vem, sobretudo, da escolha de cada um para os coeficientes de arraste, de sustentação e de um coeficiente geométrico relacionado ao peso submerso [α , presente em: Eq. 7 de Wiberg & Smith (1987) e em Eq. 25 de Ramsdell & Miedema (2010)]. A figura 5 ainda mostra os dados medidos de início de movimento de Fisher *et al.* (1983).

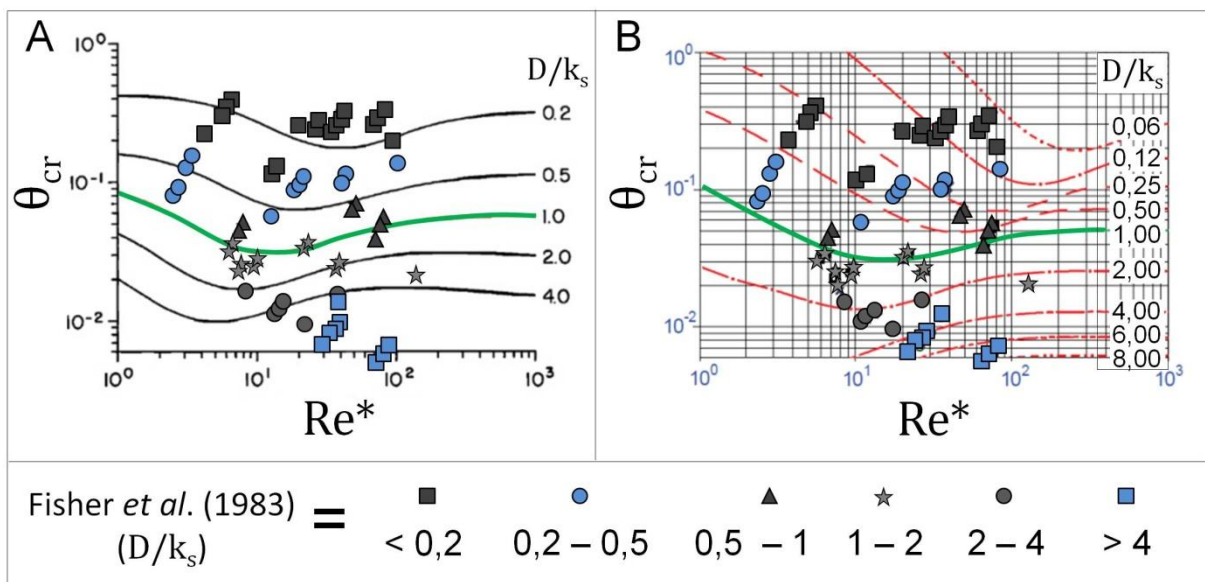


Figura 5. Curvas de Shields ajustadas para diferentes relações de D/k_s . A) Curvas calculadas por Wiberg & Smith (1987). B) Curvas calculadas por Ramsdell & Miedema (2010). Em ambos diagramas: a curva verde ($D/k_s = 1$) representa a curva original de Shields (1936) e a distribuição de pontos são os dados medidos por Fisher *et al.* (1983). Modificado de Wiberg & Smith (1987) e de Ramsdell & Miedema (2010).

3.2.2 Transporte de conchas pela ação de correntes

Grande parte do conhecimento gerado acerca do comportamento hidrodinâmico de sedimentos carregados pela ação de correntes provém de pesquisas realizadas com partículas siliciclásticas esféricas. Neste item serão apresentados alguns trabalhos que investigaram a ação deste fenômeno para conchas transportadas sobre leitos fixos de textura fina.

Futterer (1978 *apud* Futterer, 1982) em estudos experimentais em canais de laboratório, investigou a velocidade de início de movimento para diferentes espécies de conchas de moluscos bivalves. Este autor realizou seus experimentos com as valvas das conchas sempre posicionadas com a convexidade para cima, porém com o umbo sendo testado em quatro posições distintas: montante, jusante, margens direita e esquerda. O motivo deste autor ter trabalhado com a convexidade para cima vem do fato de que essa é a posição de maior estabilidade hidrodinâmica desse tipo de partícula quando carregadas por mecanismos trativos (Nagle, 1967; Brenchley & Newall, 1970; Bailey & Erickson, 1973; Futterer, 1978; e outros).

Conforme ilustra a Figura 6, Futterer (1978 *apud* Futterer, 1982) constatou que bivalves de bases circular (*Glycimeris glycimeris*) e triangular alongada (*Mytilus edulis*) requerem maiores velocidades da corrente para entrarem em movimento quando o umbo está apontado para jusante. Já para conchas de base elíptica (*Petricola pholadiformis*), os resultados deste autor mostram maior estabilidade das conchas quando o seu eixo maior está paralelo à direção do escoamento e com a terminação posterior da concha voltada para montante.

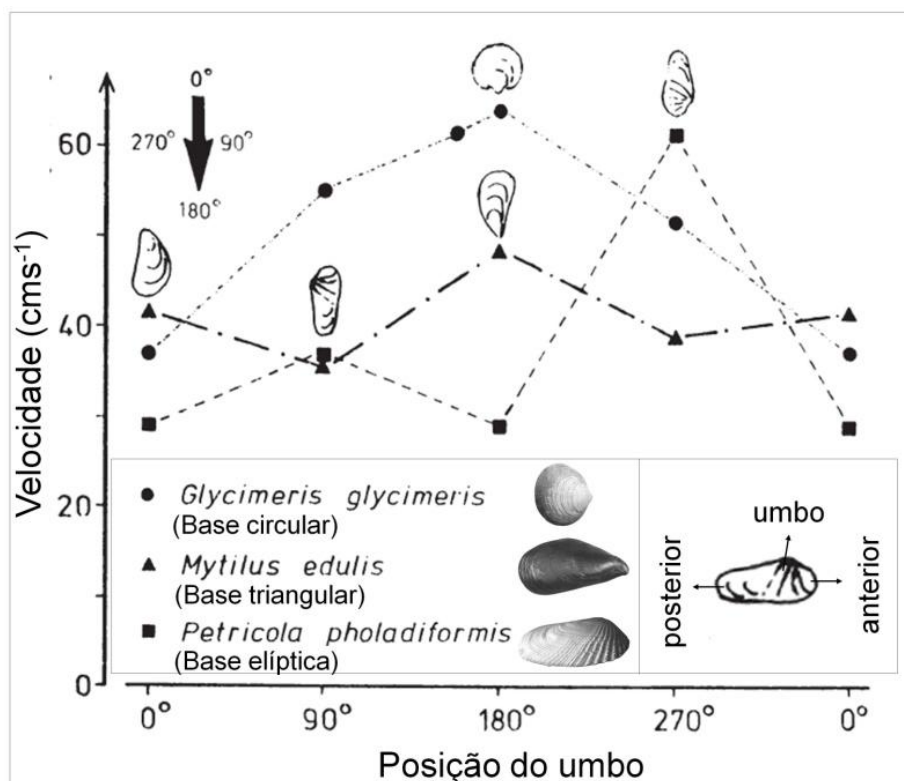


Figura 6. Velocidade de início de movimento das conchas *Glycimeris glycimeris*, *Mytilus edulis* e *Petricola pholadiformis* em função da posição inicial do umbo. A seta preta no canto superior esquerdo indica o sentido da corrente. Modificado de Futterer (1978).

Também, a partir de experimentos em canais artificiais (leito liso, construído em material acrílico), Chattopadhyay *et al.* (2013) relata que a velocidade crítica de transporte de valvas de conchas bivalves carregadas com a convexidade para cima (espécie *Donax scortum*) varia em função do tamanho e também do grau de abrasão. Os autores mostram que conchas frescas, que possuem suas linhas de crescimento bem ornamentadas são mais facilmente transportadas (Fig. 7) do que aquelas que já tiveram sua superfície lixada devido a abrasão ocorrida no processo de transporte. Uma conclusão de grande relevância que se obtém dessa pesquisa é que, quanto maior o transporte ou quanto mais uma concha "sofrer" com a ação do escoamento em seu entorno e por consequência perder sua ornamentação, maior será sua estabilidade hidrodinâmica.

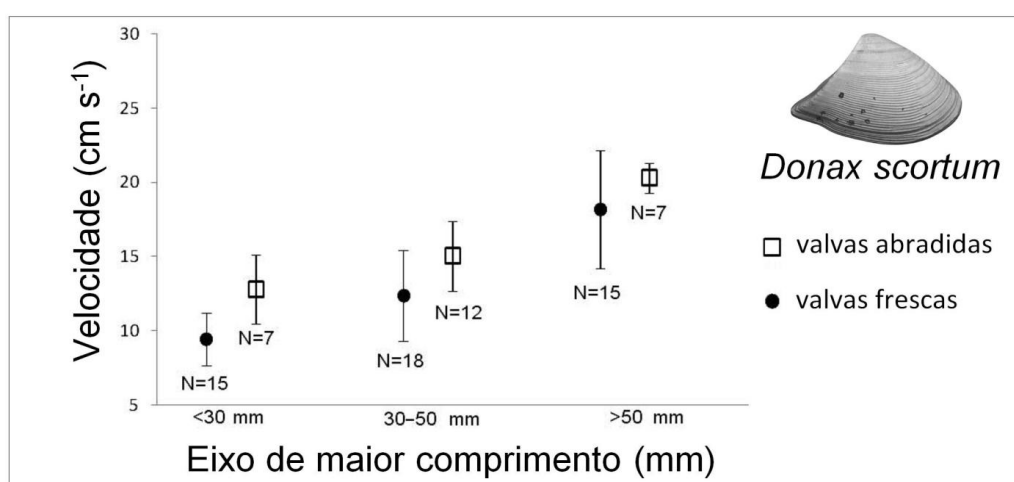


Figura 7. Velocidade de início de movimento de valvas das conchas *Donax scortum* em função do seu eixo de maior comprimento. Círculo fechado - conchas frescas. Quadrado aberto conchas abrasidas. N - Quantidade de medições. Linhas verticais representam o desvio padrão. Modificado de Chattopadhyay *et al.* (2013).

Dey (2003) e Diedericks *et al.* (2018), também avaliaram a condição crítica de início de transporte para conchas de moluscos bivalves sob ação de escoamentos unidirecionais em laboratório. Porém, diferentemente dos autores já citados neste subitem, estes expõem seus resultados em termos do parâmetro adimensional de Shields (θ_{cr}) que permite uma melhor comparação com os dados da literatura para os sedimentos siliciclásticos.

Dey (2003) realizou experimentos em canais para conchas de moluscos bivalves dos gêneros *Donax* (coquina clam), *Chione* (cross-barred) e *Noetia* (Ponderous Ark) de diversos tamanhos ($D_{sv} = 9,5$ a $23,7$ mm). Este autor testou separadamente a condição crítica de início de movimento de cada espécime em duas posições iniciais: concavidade para cima e umbo para montante; e

conca para baixo e umbo para jusante. Além disso, Dey (2003) trabalhou com duas rugosidades diferentes ($k_s = 0,3$ e $0,8$ mm) de leitos não erodíveis (areia colada), onde para cada uma repetiu seus experimentos. Os resultados desta pesquisa mostram que a tensão de cisalhamento de início de movimento é maior quando a concha está com a conca para baixo do que na posição inversa. E assim como já comentado sobre os efeitos que a relação de D/k_s causam na condição crítica de início de movimento, os resultados deste autor geraram maiores valores de $\tau_{b,cr}$ para $k_s = 0,8$ do que para $k_s = 0,3$ mm.

Os experimentos em canais artificiais de Diedericks *et al.* (2018) tiveram metodologia idêntica aos de Dey (2003), excetuando-se as espécies de conchas utilizadas. Diedericks *et al.* (2018) mensurou θ_{cr} para gastrópodes além de moluscos bivalves. A figura 8, mostra os resultados de Dey (2003) e de Diedericks *et al.* (2018) (gastrópode: *Patella vulgata* e bivalve *Mytilus edulis*). Os resultados destes autores, abaixo da curva de Shields (1936), devem-se as suas altas razões de D/k_s (15 a 40). No gráfico também é mostrado as curvas de Ramsdell & Miedema (2010) para D/k_s igual a 6 e 20, que ficam mais próximas dos valores de θ_{cr} medidos para as conchas acima mencionadas.

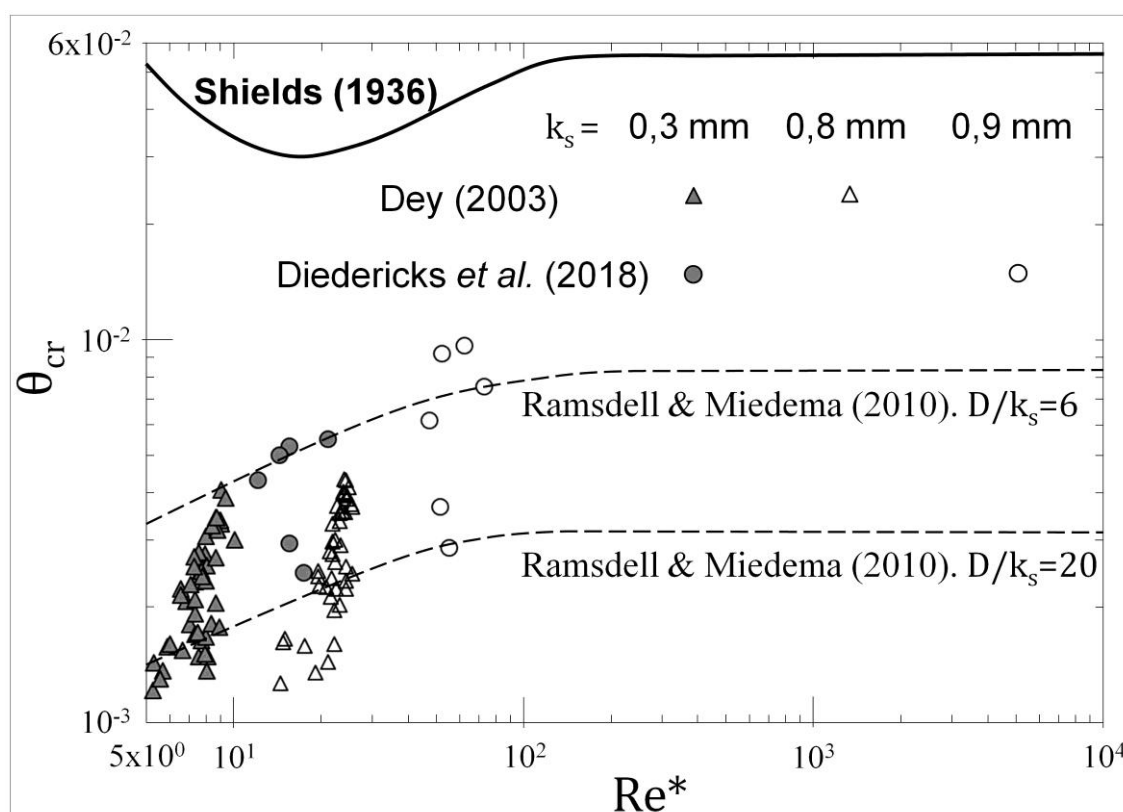


Figura 8. Compilação dos resultados de Dey (2003) e de Diedericks *et al.* (2018) no diagrama de Shields (1936). Curvas de Ramsdell & Miedema (2010) para $D/k_s = 6$ e 20 também são apresentadas.

3.2.3 Transporte de leitos de conchas e seus fragmentos

As pesquisas de Futterer (1982), Dey (2003), Chattopadhyay *et al.* (2013) e de Diedericks *et al.* (2018) cobrem as situações em que a condição crítica de início de movimento pela ação de correntes fora mensurada em conchas isoladas sobre um leito de textura inferior. Outros autores (Prager *et al.*, 1996; Paphitis *et al.*, 2002; Smith & Cheung, 2004; Weill *et al.*, 2010; Joshi *et al.*, 2017; Rieux *et al.*, 2019) mensuraram o comportamento deste fenômeno através de experimentos em canais de laboratório para leitos inteiramente compostos por fragmentos bioclásticos.

O transporte de partículas de origem bioclásticas fragmentadas dispostas em um leito diferencia-se dos siliciclásticos esféricos, sobretudo, devido a forma (em placas curvas) e a massa específica dessas partículas. Prager *et al.* (1996), ao trabalhar com areias carbonáticas de composições heterogêneas, debita às propriedades físicas acima comentadas a causa de seus resultados experimentais possuírem valores de θ_{cr} inferiores à curva de Shields. Os resultados destes autores se estendem às pesquisas experimentais de início de movimento para placas de folhelho (Magalhaes & Chau, 1983) e para micas não coesivas (Mantz, 1977) que também registraram valores de θ_{cr} inferiores àqueles conhecidos para siliciclastos esféricos. Magalhaes & Chau (1983) sugerem que a baixa massa específica (1850 Kg m^{-3}) e a forma plana das placas de folhelhos (D_{sv} entre 1,8 a 22 mm) induzem a altos valores de força de sustentação, o que acarreta em uma baixa resistência à erosão.

Objetivando melhor contemplar a forma das partículas bioclásticas e seu comportamento hidrodinâmico quando submetidas a ação de correntes, o uso do diâmetro de queda (D_q - diâmetro de uma esfera de igual densidade que possui mesma velocidade de queda que a partícula analisada) vem sendo utilizado (Paphitis *et al.*, 2002; Smith & Cheung, 2004) para calcular os valores de θ_{cr} e de Re^* a partir de experimentos em canais de laboratório. Os resultados destes autores dispostos no diagrama de Shields (1936) possuem valores mais altos de θ_{cr} quando esse parâmetro adimensional é calculado em função de D_q ao invés de D_{sv} . Os resultados de Paphitis *et al.* (2002) de θ_{cr} em função de D_{sv} são muito próximos aos de Prager *et al.* (1996), já quando expostos em função de D_q seus resultados se aproximam mais (ligeiramente acima) da curva de Shields (1936).

Paphitis *et al.* (2002) defendem o uso de D_q como diâmetro característico de partículas não esféricas apoiado nas semelhanças que essas possuem com grãos

esféricos quando se relaciona a velocidade de queda com a tensão de cisalhamento crítica. Para tanto, estes autores se valeram de um parâmetro adimensional chamado de número de Mobilidade (M_n), já bastante utilizado e conhecido para grãos esféricos (White, 1970; Everts, 1973; Komar & Clemens, 1986; Van Rijn, 1993, p. 5.5) na identificação do tipo de transporte (suspensão ou arraste). Graficamente, M_n é normalmente disposto em função de Re^* , e é expresso por (Eq. 9):

$$M_n = \frac{\sqrt{\frac{\tau_{b,cr}}{\rho}}}{W_s} \quad (9)$$

onde:

$\tau_{b,cr}$ = é a tensão de cisalhamento crítica do transporte de sedimentos pela ação de correntes (Pa);

ρ = massa específica do fluido (Kg m^{-3});

W_s = velocidade terminal da queda de um grão no meio fluido de densidade ρ (m s^{-1});

Para fragmentos de moluscos bivalves (*Cerastoderma edule* e *Mytilus edulis*) de tamanho areia ($D_{sv} = 0,33$ a $0,78$ mm), Paphitis *et al.* (2002) mostram (Fig. 9A) que M_n em função do número de Reynolds do grão ($2 < Re^* < 10$) se ajusta a tendência estabelecida para grãos siliciclásticos esféricos (Komar & Clemens, 1986).

Entretanto, sob os mesmos critérios (M_n versus Re^*), Weill *et al.* (2010) desencoraja o uso de D_q para fragmentos bioclásticos grossos ($D_{sv} = 1$ a 4 mm) transportados pela ação de correntes. Os resultados de Weill *et al.* (2010) (Fig. 9B) e

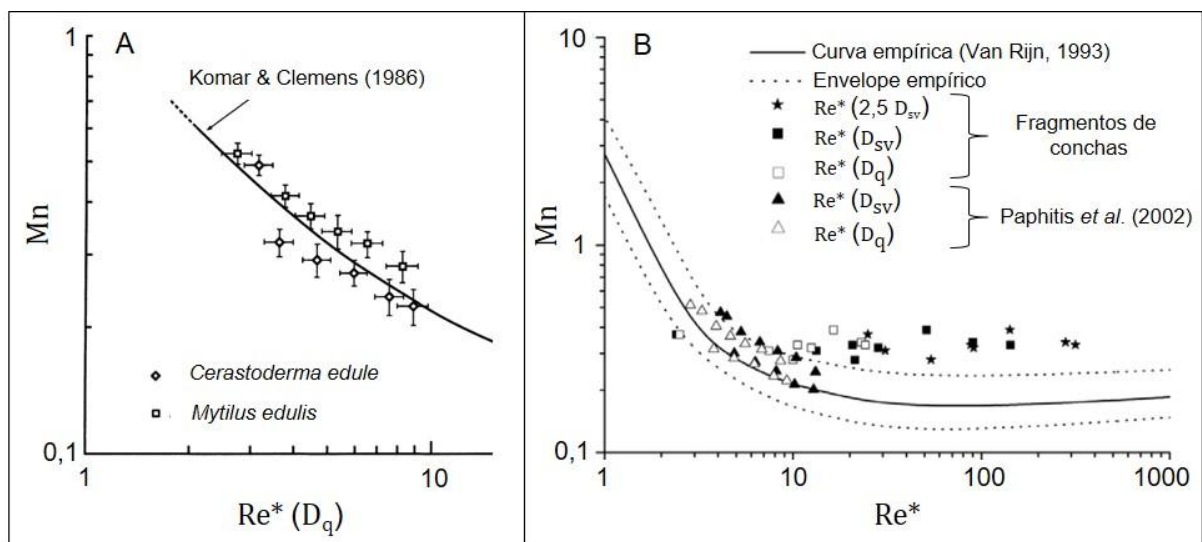


Figura 9. Número de mobilidade (M_n) em função do número de Reynolds do grão (Re^*) para fragmentos bioclásticos. A) Modificado de Paphitis *et al.* (2002). B) Modificado de Weill *et al.* (2010).

também de Rieux *et al.* (2019) mostram que, para números de Reynolds do grão altos ($10 < Re^* > 400$), M_n atinge valores superiores e fora do envelope definido para grãos siliciclásticos esféricos. Weill *et al.* (2010) e Rieux *et al.* (2019) argumentam que os altos valores do número de mobilidade se deve ao fato de que os bioclastos possuem velocidades de queda bem inferiores aos siliciclastos de mesmo tamanho, porém os valores de $\tau_{b,cr}$ desses dois tipos de partículas são, em certa medida, semelhantes.

De forma a complementar o estado da arte a respeito dos valores necessários de θ_{cr} para mobilizar valvas não fragmentadas de moluscos (bivalves e gastrópodes) de tamanhos variados ($D_{sv} = 2$ a 15,90 mm), Fick *et al.* (2020) realizaram experimentos em canal de ondas. Esses autores expõem seus resultados de θ_{cr} *versus* o parâmetro de Yalin (D^*), com este último calculado em função do diâmetro nominal (D_n - diâmetro de uma esfera de volume igual ao da partícula analisada) e de D_{sv} . O uso de D_n por Fick *et al.* (2020), assim como o uso de D_q em outras pesquisas, possui o intuito de avaliar se outros parâmetros podem melhor caracterizar os valores de θ_{cr} para partículas bioclásticas do que o diâmetro de peneiramento (D_{sv}).

Os resultados de Fick *et al.* (2020) seguem uma tendência similar aos de outros autores (Prager *et al.*, 1996; Paphitis *et al.*, 2002; Weill *et al.*, 2010; Joshi *et al.*, 2017; Rieux *et al.*, 2019), apresentando valores de θ_{cr} em função de D_{sv} abaixo da curva de Shields (1936), e também mostram que o conjunto de pontos advindos (Fig. 10) dos experimentos com gastrópodes possuem valores inferiores aos dos bivalves. Fick *et al.* (2020) relatam que seus resultados de θ_{cr} calculados em função de D_n [$\theta_{cr}(D_n)$], sobretudo para bivalves grossos ($D_n > 6,5$ mm, $D_{sv} > 7,93$ mm), possuem valores de θ_{cr} superiores a $\theta_{cr}(D_{sv})$. Já para os moluscos mais finos ($D_n < 6,5$ mm, $D_{sv} < 7,93$ mm), $\theta_{cr}(D_n)$ se aproxima mais de $\theta_{cr}(D_{sv})$, inclusive com alguns gastrópodes registrando $\theta_{cr}(D_n) < \theta_{cr}(D_{sv})$.

Fick *et al.* (2020) apresenta uma compilação (Fig. 10) de θ_{cr} *versus* D^* em função de D_{sv} . Esses autores vinculam seus resultados de início de movimento para moluscos não fragmentados sob a ação de ondas com dados da literatura (já comentados) para fragmentos bioclásticos transportados sob a ação de correntes. Em resumo, a figura 10 apresenta um envelope de θ_{cr} em função de D^* para o transporte de bioclastos sob a ação de mecanismos trativos, em que os valores de

θ_{cr} chegam a resultados até 5 vezes inferior a curva de Shields (1936) quando $D^* \approx 75$.

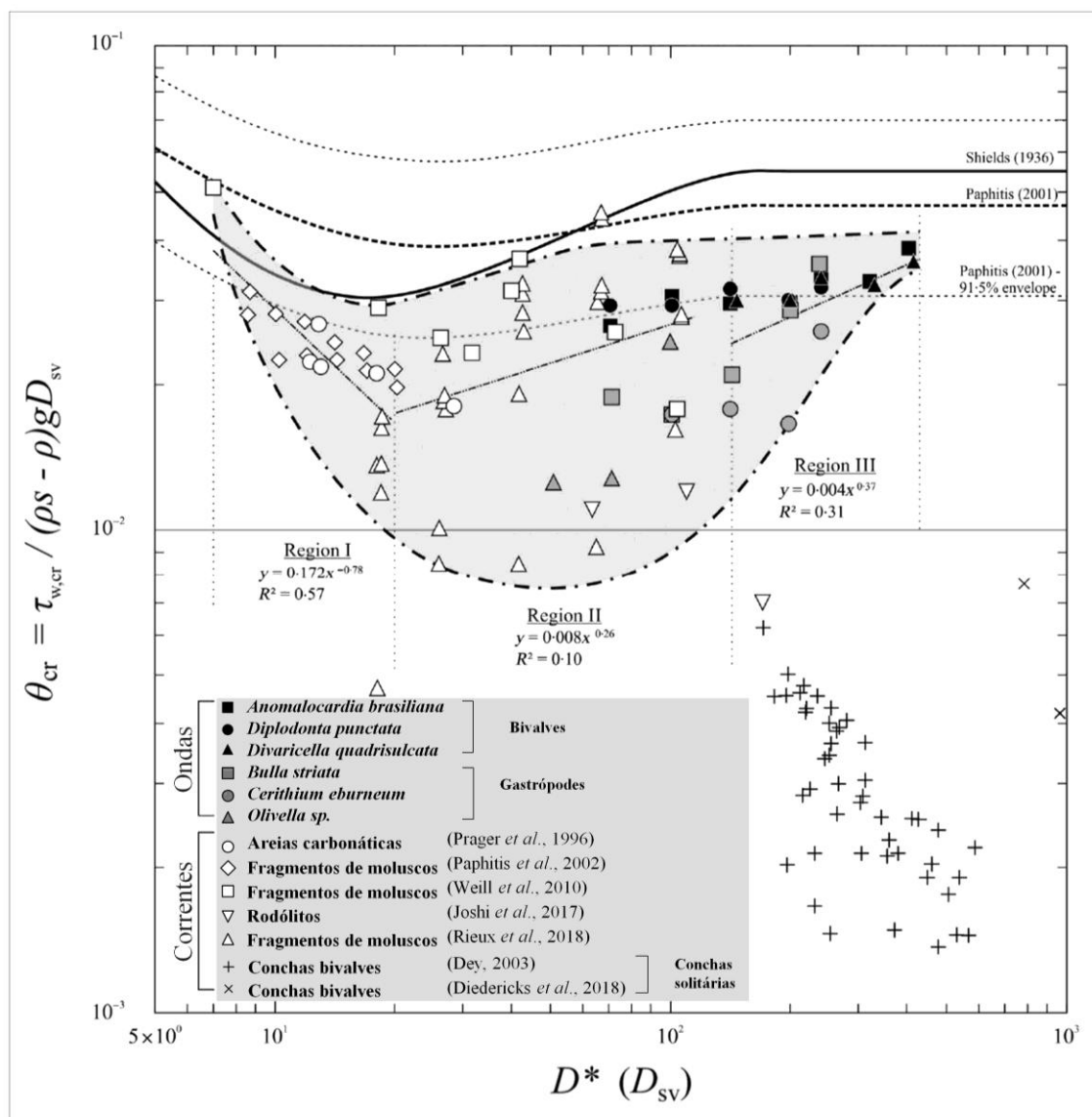


Figura 10. Compilação de dados experimentais de θ_{cr} versus D^* (D_{sv}) para bioclastos transportados sob a ação de ondas e de correntes. O diagrama apresenta também as curvas de Shields (1936) e de Paphitis (2001) bem como o envelope de Paphitis (2001) para siliciclastos esféricos. Modificado de Fick *et al.* (2020).

3.2.4 Orientação preferencial de conchas transportadas como carga de fundo

Em estudos tafonômicos, a biofábrica observada em acumulações fósseis, além de ser um produto dos processos de soterramento, de modificação do substrato (organismos predadores e/ou bioturbadores) e diagenético, é também o resultado do comportamento hidrodinâmico dos componentes esqueléticos dos organismos que a compõem (Kidwell *et al.* 1986). Nesse contexto, a correta descrição das orientações de bioclastos, sejam em seções de perfil ou a partir de vistas em planta (Fig. 11), é uma das chaves para interpretações de processos

paleosedimentológicos. Em vista disso, o presente item desta revisão bibliográfica traz alguns trabalhos experimentais que buscaram relacionar a natureza de mecanismos de transporte de sedimentos (correntes e ondas) com a orientação final de conchas.

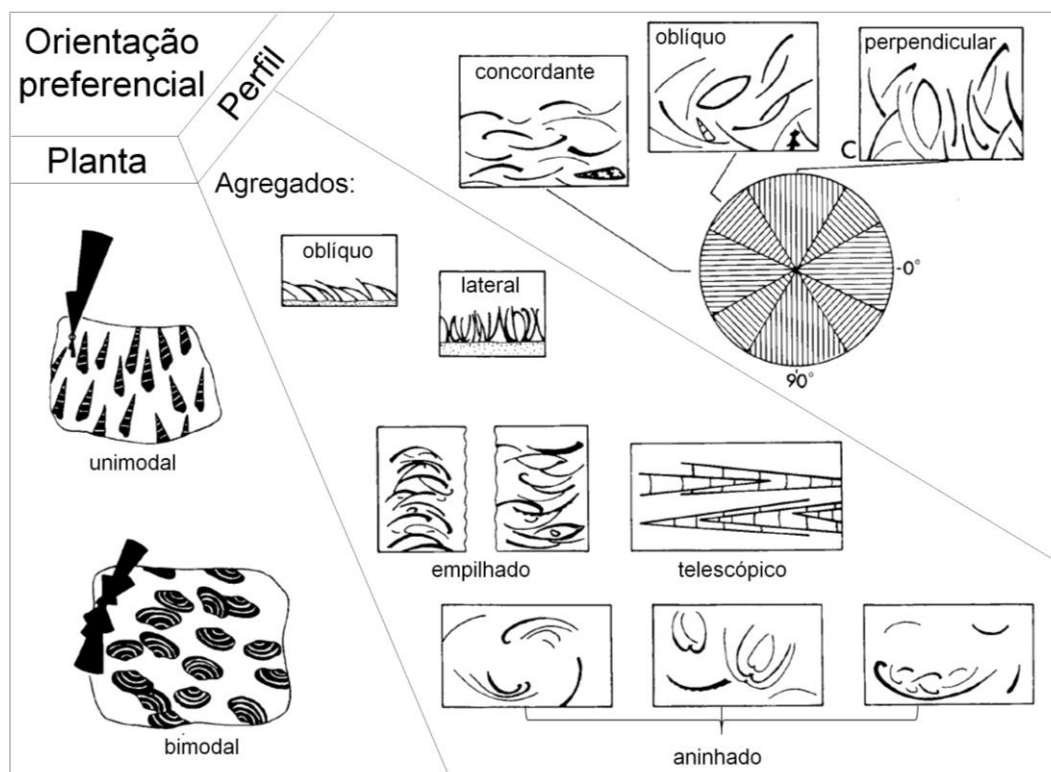


Figura 11. Terminologia para a descrição da orientação de conchas em perfil e em planta. Modificado de Kidwell *et al.* (1986).

As valvas de conchas que possuem perfil côncavo-convexo (moluscos bivalves e braquiópodes) imergem no meio fluido com a concavidade para cima (Mehta, 1980; Allen, 1984; Simões *et al.* 2005; e outros). No registro geológico, conchas com esta orientação são associadas ao transporte por suspensão, observadas em turbiditos e tempestitos (Compton, 1962; Crowell, 1966; Underwood, 1994). Por outro lado, estas biopartículas se reorientam quando transportadas como cargas de fundo. Os resultados experimentais de diversos autores (Nagle, 1967; Kelling & Williams, 1967; Behrens & Watson, 1969; Brenchley & Newall, 1970; Bailey & Erickson, 1973; Futterer, 1982; Dey, 2003; Diedericks *et al.*, 2018, Fick *et al.* 2018; Fick *et al.*, 2020) revelam que conchas submetidas a ação de correntes ou de ondas possuem maior estabilidade hidrodinâmica quando a face convexa volta-se para cima.

Nagle (1967) realizou experimentos em laboratório e em ambientes naturais com diferentes tipos de conchas, objetivando verificar a orientação final após o

transporte por correntes fluviais e também por ondas. Este autor salienta que a ocorrência de padrões diagnósticos de orientações de conchas é dependente da natureza do mecanismo carreador de sedimento e da geometria da concha. Seus experimentos revelam que as espécies de conchas que possuem um eixo mais alongado, tais como os moluscos bivalves *Mytilus edulis* (geometria piramidal) e gastrópodes *Turritella mortoni* e *Turritella plebia* (cônicos), possuem padrões de orientação bem definidos. Já conchas de eixos equidistantes possuem maior aleatoriedade de orientações preferenciais a partir da direção/sentido modal.

A figura 12 mostra uma compilação dos resultados de Nagle (1967), onde observa-se que os bioclastos alongados tendem a se orientar com o eixo maior paralelo à direção da corrente e perpendicular a direção de propagação de ondas. Além disso, para o bivalve de geometria piramidal (Fig. 12A, 1) e para os gastrópodes cônicos (Fig. 12A, 2 e 3), nota-se que a extremidade de menor diâmetro aponta para a montante quando transportados por correntes. Este padrão fora também relatado por Kelling & Williams (1967). Por outro lado, o braquiópode *Spirifer cyclopterus* (fóssil), que também possui um eixo mais alongado, tende a alinhar este eixo perpendicularmente a direção da corrente (Fig. 12A, 4).

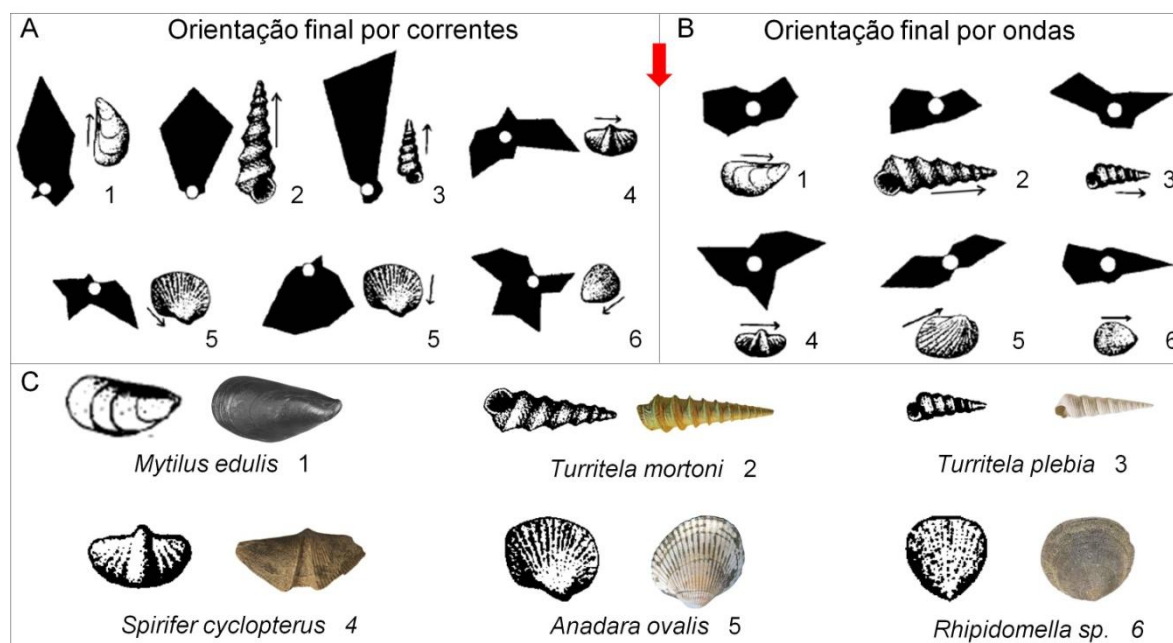


Figura 12. A) Orientação final de conchas transportadas pela ação de correntes. B) Orientação final de conchas transportadas pela ação ondas. As setas pretas indicam o sentido das leituras de orientação. A seta vermelha indica o sentido da corrente e de propagação de ondas. C) Imagem das espécies experimentadas por Nagle (1967): 1 - Bivalve *Mytilus edulis*; 2 - Gastrópode *Turritella mortoni*; 3 - Gastrópode *Turritella plebia*; 4 Braquiópode *Spirifer cyclopterus* (fóssil); 5 - Bivalve *Anadara ovalis*; 6 - Braquiópode *Rhipidomella sp.* (fóssil). Modificado de Nagle (1967).

A figura 12A (5 e 6) mostra que os resultados de Nagle (1967) para orientação final por correntes das conchas que possuem eixos equidistantes (*Anadara ovalis* e *Rhipidomella sp.*) tendem a apresentar um valor modal no qual o umbo da concha aponta para jusante. No entanto, o autor pondera que os resultados para essas conchas apresentaram uma variação, em média, de até 120°. Este padrão (umbo voltado para jusante) fora também descrito a partir dos experimentos de Behrens & Watson (1969) para as espécies *Anadara ovalis* e *Chione cancellata*, e de Futterer (1978) para a espécie *Glycimeris glycimeris*.

Behrens & Watson (1969) e Futterer (1978) mostram que as valvas (de geometria elíptica) das conchas dos moluscos bivalves *Donax variabilis* e *Petricola pholadiformis*, transportadas com o lado convexo para cima, tendem a alinhar o eixo de maior comprimento paralelo ao sentido da corrente. Esses autores também enfatizam que a extremidade posterior das valvas se volta contra o sentido do escoamento (Fig. 13). Em contrapartida, os registros de Newell *et al.* (2007), em mais de 500 leituras de orientação de valvas (convexidade para cima) da espécie *Unio sp.* em barras de pontal do recente (Rio Sakmara, montes Urais, Rússia), revelam que as valvas dessa espécie tendem a apontar a extremidade posterior apontada para a jusante.

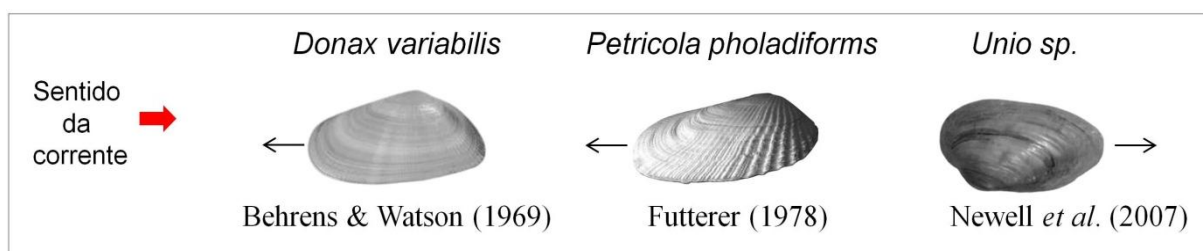


Figura 13. Conchas de geometria elíptica e suas orientações após serem transportadas por correntes. Conclusões de Behrens & Watson (1969), Futterer (1978) e Newell *et al.* (2007). As setas pretas indicam a orientação final da extremidade posterior das valvas.

Como já relatado, as conchas de perfil côncavo-convexo são mais estáveis quando a convexidade aponta para cima. Sobre dois tipos de substratos (lamoso e arenoso), Brenchley & Newall (1970) verificaram esta tendência ao realizar experimentos em canais de laboratório com conchas sendo transportadas com a concavidade inicialmente voltada para cima. Esses autores relatam que a velocidade necessária da corrente para transportar as conchas sobre um substrato lamoso é maior do que quando o leito é composto por areia.

Brenchley and Newall (1970) mostram que as conchas transportadas com a concavidade para cima possuem uma tendência a tombar, e uma vez que isso

acontece, o transporte é imediatamente cessado. Entretanto, no substrato arenoso e a baixas velocidades de escoamento, as conchas podem interromper seu movimento permanecendo com a concavidade para cima (Fig. 14B e 14C). O mesmo não ocorre no substrato lamoso (Fig. 14D), porque as velocidades necessárias para erodir as conchas nessa configuração são mais altas, o que aumenta a instabilidade dos bioclastos em movimento e, assim, favorecendo o tombamento para a posição de maior estabilidade.

Os resultados de orientação final destes autores (Fig. 14 A), para conchas que possuem um eixo mais alongado, diferem daqueles obtidos com conchas sendo transportadas com a convexidade para cima. Nestas condições, Brenchley & Newall (1970) verificaram que as conchas dos moluscos bivalves *Venerupis rhomboides*, *Mytilus edulis* e *Nucula turgida* transportam-se com o eixo de maior comprimento estando perpendicular à direção da corrente.

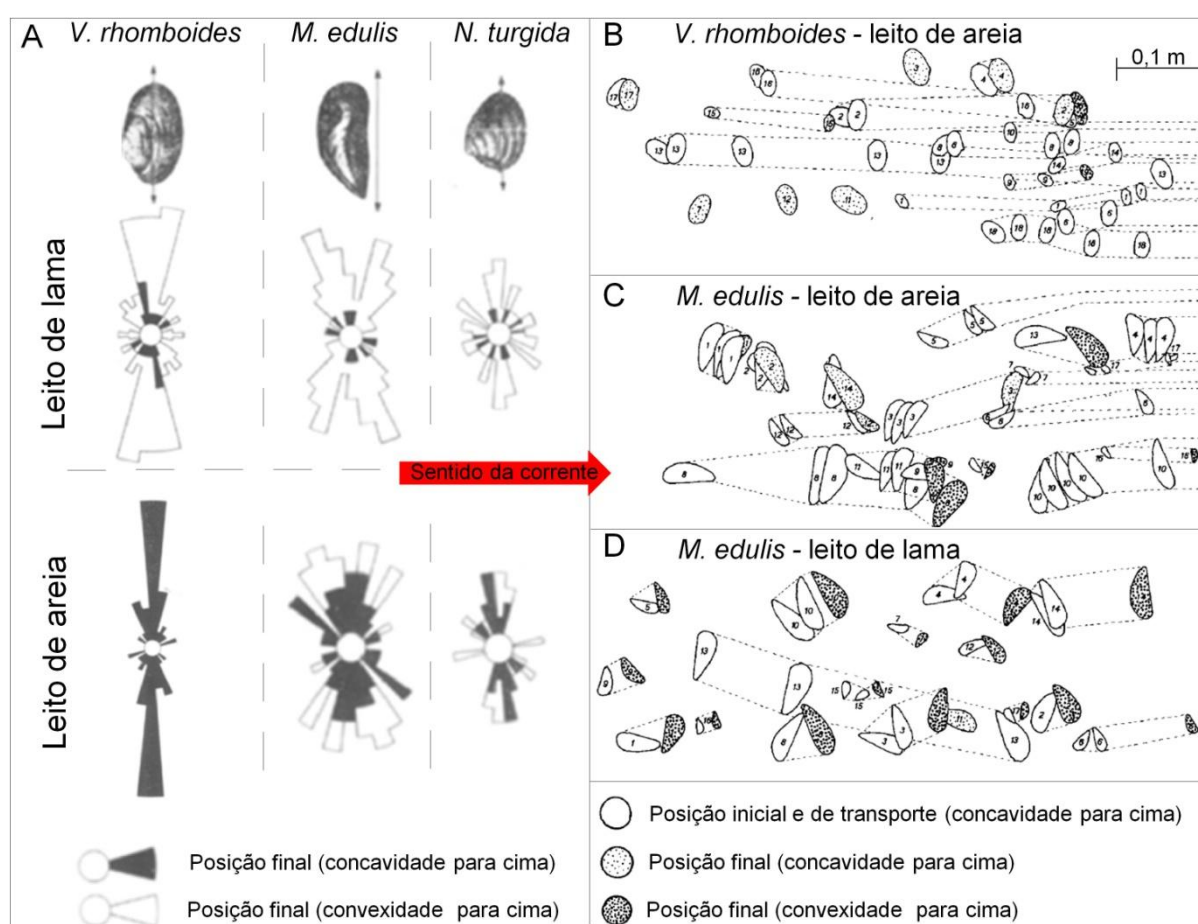


Figura 14. A) Orientação final das conchas *Venerupis rhomboides*, *Mytilus edulis* e *Nucula turgida*, transportadas sobre leito arenoso e lamoso. As setas pretas indicam a direção das leituras de orientação. B) Trajetória de *V. rhomboides* sobre leito arenoso. C) Trajetória de *M. edulis* sobre leito arenoso. D) Trajetória de *M. edulis* sobre leito lamoso. A seta vermelha indica o sentido da corrente para os itens A, B, C e D. Modificado de Brenchley & Newall (1970).

4 METODOLOGIA

A concretização dos objetivos expostos anteriormente fora alcançada a partir da experimentação física em canais de laboratório. Aqui serão detalhados os equipamentos, canais, material sedimentar e procedimentos realizados. Este capítulo é dividido em duas séries experimentais:

- Experimentos com conchas solitárias sobre leito de textura inferior (objetivos 1, 2, 3 e 5);
- Experimentos com leitos de conchas (objetivos 4 e 5).

4.1 Experimentos com conchas solitárias

4.1.1 As conchas

As conchas utilizadas nesta série de experimentos tratam-se de valvas não fragmentadas das espécies de moluscos bivalves (Fig. 15) *Anomalocardia brasiliana* (sete valvas esquerdas e sete direitas), *Codakia orbicularis* (quatro valvas) e *Divaricella quadrisulcata* (sete valvas). Sendo a primeira típica de ambientes lagunar e estuarino e as outras duas de ambiente marinho raso. Os espécimes são provenientes de horizontes conchilíferos que integram os depósitos Holocênicos (datados entre 8070 a 1850 cal A.P.) de retro-barreira presentes nas cidades de Jaguaruna e Laguna (SC) (Fornari, 2012). O material foi adquirido através de uma doação feita por uma mineradora de calcário (CYSY Mineração) que atua naquela área. A imagem em escala de cada um dos 25 espécimes utilizados está na figura 1 do artigo.

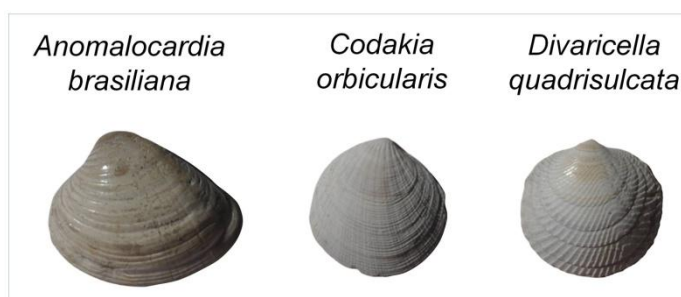


Figura 15. Fotografia das espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia orbicularis* e *Divaricella quadrisulcata*.

A massa, volume e massa específica de cada espécime foram mensuradas utilizando uma balança de precisão 0,01g e um picnômetro do tipo Hubbard de

25 ml. Os tamanhos das conchas foram medidos com o auxílio de um paquímetro de precisão igual a 0,02 mm. As medidas foram tomadas nos eixos inferior (c), intermediário (b) e superior das conchas (a). De posse das dimensões dos eixos, o diâmetro corresponde a abertura da peneira (D_{sv}) para cada concha foi calculado com a equação (Eq.10) de Church *et al.* (1987):

$$\frac{D_{sv}}{b} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[1 + \left(\frac{c}{b} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (10)$$

onde:

c = eixo inferior

b = eixo intermediário

O diâmetro nominal (D_n), correspondente ao de uma esfera que possui mesmo volume que as conchas, foi calculado a partir da relação (Eq. 11):

$$D_n = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} \quad (11)$$

onde:

V = o volume da concha (m^3)

A espessura das conchas foi tomada em um único ponto (Fig. 16) com o auxílio de um micrômetro (0,001 mm de precisão). Além disso, uma valva adicional de cada espécie foi fatiada (com uma serra circular) em 5 seções perpendiculares ao eixo de maior comprimento. Este procedimento fora realizado para observar a variação da espessura e do perfil côncavo/convexo de cada espécie.

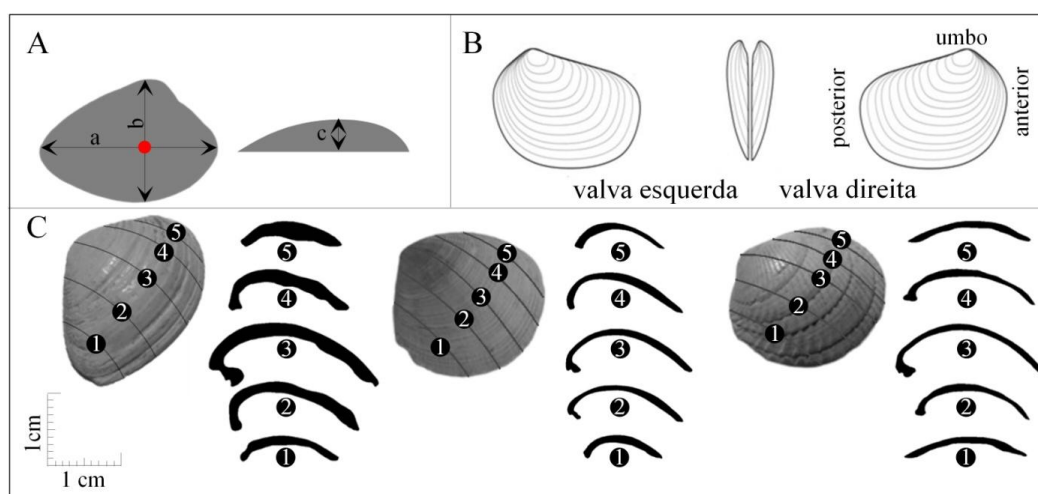


Figura 16. A) Eixos das conchas. Ponto vermelho indica a posição de medição de espessura. B) Esquema indicando o lado da valva. C) Da esquerda para direita, seções perpendiculares ao eixo a de *Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia orbicularis* e *Divaricella quadrisulcata*.

A área projetada pelo plano composto pelos eixos inferior e superior (S_{ac}) de cada espécime foi mensurada a partir de fotografias frontais deste mesmo plano. No software AUTOCAD[®], após ajustar a escala de cada fotografia ao tamanho real com base nos valores medidos dos eixos das conchas, foi traçado o contorno de cada espécime possibilitando a aquisição dessa área no mesmo software. A figura 17 mostra a relação entre S_{ac} e a massa de cada espécime, os altos valores do coeficiente de correlação (R^2) denotam que o método de aquisição da S_{ac} foi eficiente. Todos os parâmetros medidos estão inclusos na tabela 1.

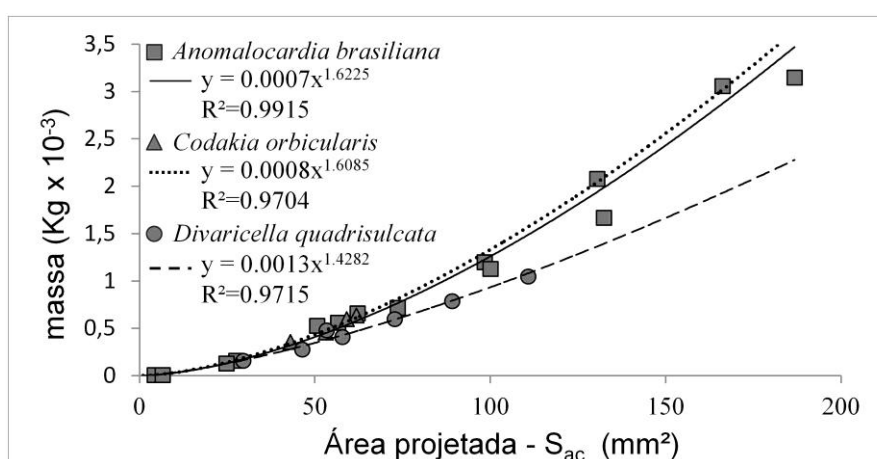


Figura 17. Relação entre a massa e a área projetada no plano composto pelos eixos inferior e superior (S_{ac}).

Tabela 1. Massa; massa específica (ρ) eixos a, b e c; espessura; diâmetro de peneiramento (D_{sv}) e nominal (D_n); área projetada (S_{ac}) no plano composto pelos eixos (a) e (c).

espécie	Nº	lado	massa	ρ	eixos (mm)			Espess.	D_{sv}	D_n	S_{ac}
			(Kg x 10 ⁻³)	(Kg m ⁻³ x 10 ³)	a	b	c	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)
<i>Anomalocardia brasiliiana</i>	1	esquerdo	3,06	2,62	28,5	23,2	9,0	2,35	18,9	13,2	166,2
	2		2,08		26,1	21,1	8,0	2,06	17,1	11,5	130,5
	3		1,2		21,5	17,2	6,7	1,68	14,0	9,6	98,4
	4		0,66		18,3	15,0	5,3	1,55	11,9	7,8	62,1
	5		0,53		16,0	13,0	4,8	1,35	10,4	7,3	50,6
	6		0,16		12,2	8,9	3,2	0,83	7,1	4,9	27,6
	7		0,01		7,7	6,0	2,5	0,37	5,0	1,8	4,4
	8	direito	3,15		29,0	24,0	9,0	2,06	19,4	13,3	186,7
	9		1,67		26,4	21,8	7,8	1,26	17,4	10,7	132,4
	10		1,13		21,5	17,2	6,8	1,37	14,1	9,4	100,1
	11		0,72		18,7	14,5	5,5	1,37	11,7	8,0	73,6
	12		0,56		15,8	12,7	5,0	1,33	10,4	7,4	56,6
	13		0,13		12,0	8,7	3,0	0,70	6,9	4,6	24,8
	14		0,01		7,8	6,3	2,5	0,37	5,2	2,0	6,6
<i>Codakia orbicularis</i>	15	x	0,64	2,66	17,2	17,3	5,5	0,90	13,5	7,7	61,8
	16		0,6		16,3	16,0	5,1	0,70	12,5	7,6	59,0
	17		0,46		15,3	14,7	4,5	0,62	11,4	6,3	53,0
	18		0,36		12,8	12,3	4,1	0,79	9,7	6,9	43,0
<i>Divaricella quadrisulcata</i>	19	x	1,05	2,61	22,3	21,5	7,1	0,64	16,9	9,0	110,8
	20		0,79		20,0	19,7	6,1	0,58	15,3	8,2	89,1
	21		0,6		19,1	18,5	5,7	0,37	14,3	7,5	72,7
	22		0,48		17,2	16,5	4,6	0,97	12,6	6,9	53,3
	23		0,41		17,7	16,6	4,9	1,08	12,8	6,6	57,8
	24		0,28		15,8	14,9	4,3	0,87	11,4	5,8	46,4
	25		0,16		14,6	12,5	3,7	1,10	9,6	4,9	29,5

4.1.2 Canal e equipamentos

O canal (Fig. 18) utilizado trata-se de um canal construído em alvenaria, localizado no Laboratório de Ensino de Hidráulica do IPH. Ele possui 18 metros de comprimento total e 11 metros de comprimento do leito (comprimento útil), 0,4 metros de largura e 0,3 m de altura (em relação ao nível do leito). O leito fixo (não erodível) do canal tem uma declividade de 4 ‰ possuindo rugosidade composta por grãos de tamanho areia grossa ($D = 0,8 \text{ mm}$).

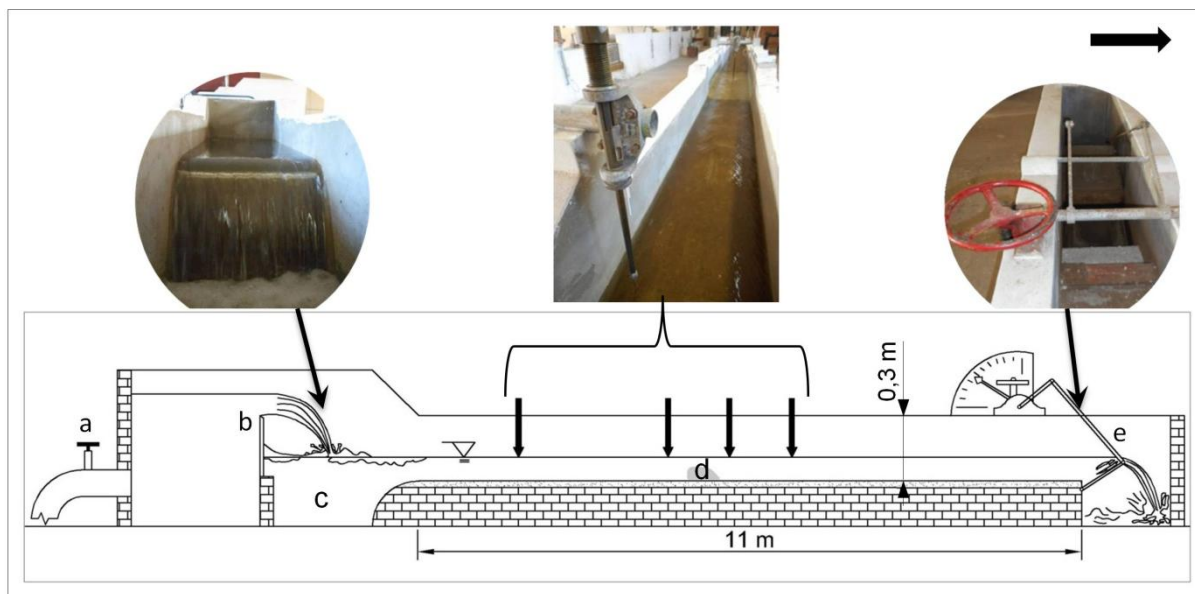


Figura 18. Canal de alvenaria. a) Registro gaveta (200 mm de diâmetro). b) vertedor. c) bacia de dissipação, d) posição onde as conchas são colocadas nos experimentos. e) comporta de jusante. As setas verticais pretas indicam as posições em que as pontas limimétricas de medição de profundidade foram instaladas. A seta horizontal preta indica o sentido da corrente.

Com desnível de 6 metros em relação à entrada do canal, um reservatório abastecido por bombeamento permite a chegada de água até o canal por gravidade. O controle do abastecimento de água dentro do canal é realizado pelo manuseio de um registro do tipo gaveta (diâmetro = 200 mm) posicionado junto a parede de montante do canal (Fig. 18a). No lado interno dessa mesma parede, o canal possui um vertedor metálico do tipo retangular que permite a obtenção da vazão de água escoada no canal. O vertedor possui uma lei de calibração que relaciona a vazão (Q) com a altura da lâmina de água que verte sobre sua soleira (Eq. 12):

$$Q = \frac{\left[0.8919 + 0.137752 \left[\left(\frac{wh}{100} \right) + 0.011 \right] \right]}{(wh + 0.01)^{-1.5}} \quad (12)$$

onde:

$Q = \text{vazão } (10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1})$

$wh = \text{altura da lâmina de água vertida } (10^{-2} \text{ m})$

A altura da lâmina de água vertida sobre o vertedor é adquirida com o auxílio de uma ponta linimétrica (Fig. 19). Este instrumento de medição de profundidade possui funcionamento similar à um paquímetro, com escala do tipo nônio (precisão de 0,0001 metros).

Após a queda de água pela soleira do vertedor, há uma bacia de dissipação (comprimento 1,5 m, profundidade 0,5 m) que antecede o início da extremidade montante do leito do canal. Esta bacia tem a função de quebrar a agitação da água que irá escoar por sobre o leito do canal. A altura da coluna de água que passa pelo canal também é medida com pontas linimétricas. O Canal possui 4 desses instrumentos de medição instalados a 1,5 m, 4 m, 4,8 m e 6 m do início do leito (Fig. 18, setas pretas). Por fim, na extremidade jusante, o canal possui uma comporta de inclinação regulável que permite modificar o nível da coluna de água de jusante para montante.

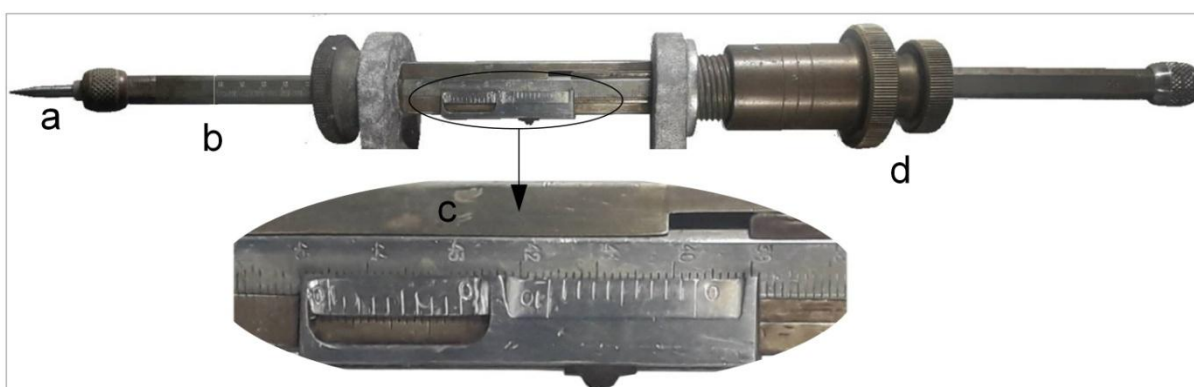


Figura 19. Ponta linimétrica. a) Ponta de aço. b) Haste graduada em cm - 1,5 m de comprimento (cortada para ajustar a foto na página). c) Escala de medição em nônio. d) Porcas de ajustes.

4.1.3 Procedimentos

Foram realizados experimentos para testar a condição crítica de início de movimento de todas as 25 conchas. A condição de início de movimento para cada espécime fora mensurada para duas posições iniciais das conchas:

- lado convexo para cima e umbo apontado para montante,
- lado convexo para cima e umbo apontado para jusante.

O procedimento experimental seguiu o seguinte protocolo:

- 1º - Com a comporta de jusante totalmente aberta, enchia-se o canal e deixava-se a água escoar a uma vazão e velocidade inferior (mas muito próxima) ao necessário para o espécime ser mobilizado. Para isso, testes preliminares foram realizados;
- 2º - Posicionava-se o espécime a ser testado no leito do canal a 4,4 m de seu início (Fig. 18 d);
- 3º - Abria-se o registro gaveta de entrada em pequenos incrementos até a concha começar a se mover;
- 4º - Media-se a altura da lâmina de água do vertedor e a profundidade do escoamento nas quatro posições já descritas.

Para cada espécime, o procedimento experimental descrito foi executado três vezes nas duas posições iniciais das conchas. O critério adotado para considerar que a concha tinha se movido e/ou entrado em transporte foi de que os espécimes percorressem ao menos 0,1 m.

Em testes preliminares observou-se que quando as conchas são mobilizadas com o umbo inicialmente para jusante, elas resistem mais à ação do escoamento. Porém uma vez que elas entravam em movimento, as conchas conseguiam chegar até o final do canal ininterruptamente. Por outro lado, nos experimentos onde as conchas foram postas com o umbo inicialmente para montante, observou-se que elas são mais suscetíveis a entrarem movimento. Contudo, nessa situação as conchas se movem por pequenas distâncias ao mesmo tempo em que elas giram em torno de seu eixo vertical (eixo c) até adquirir uma posição de maior estabilidade e, assim, freando seu movimento. Nestas situações, a orientação final do umbo foi coletada com o auxílio de um transferidor com a medida sendo tomada ao longo do eixo intermediário (eixo b).

Com os dados coletados de altura da lâmina de água do vertedor e profundidades do escoamento, foram calculados a vazão (Eq. 12) e a profundidade média do escoamento para cada ensaio respectivamente. A tensão de cisalhamento junto ao leito das medições feitas na condição crítica de início de movimento ($\tau_{b,cr}$) para cada experimento, anteriormente retratada (Eq. 6), foi calculada através da seguinte equação (Eq. 13):

$$\tau_{b,cr} = \gamma \frac{A}{P} S \quad (13)$$

onde:

γ = Peso específico da água

A = Produto da largura do canal pela profundidade do escoamento - Área molhada (m^2);

P = Perímetro da seção do escoamento - Perímetro molhado (m);

S = Declividade do leito

4.2 Experimentos com leito de conchas

4.2.1 As conchas

Nesta série de experimentos foi utilizado uma amostra de 1 Kg de valvas não fragmentadas da espécie *Anomalocardia brasiliiana*. Através de peneiramento foi gerado a distribuição granulométrica das valvas que compõem essa amostra. O diâmetro de peneiramento médio varia entre 3,8 mm a 22,25 mm (Fig. 20).

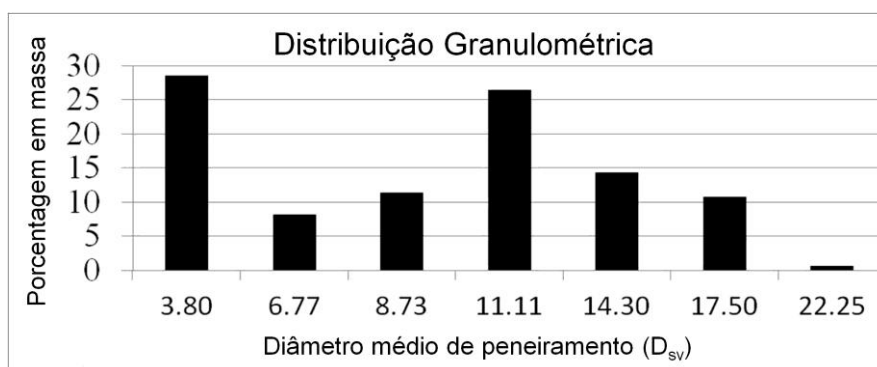


Figura 20. Distribuição granulométrica das valvas da espécie *Anomalocardia brasiliiana* que compõem a amostra de 1Kg.

4.2.2 Canal e equipamentos

Nesta série experimental utilizou-se um canal (Fig. 21) de vidro com dimensões inferiores ao canal da 1ª série (comprimento = 4 m, largura = 0,12 m, altura = 0,5 m) e que possui uma declividade de 5 %. No centro do canal há um rebaixo de 0,02 m de profundidade e 0,6 m de comprimento, criando um compartimento que permite acomodar o sedimento que se deseja testar.

Este canal conta com um sistema de recirculação por bombeamento, no qual duas bombas conectadas em ligação paralela (Fig. 21a) ascendem a água contida em um reservatório de 1000 litros (Fig. 21b) até a extremidade montante do canal através de uma tubulação de 25 mm de diâmetro. A água escoada no canal chega até uma cuba de jusante, onde duas tubulações (diâmetros de 32 mm e 50 mm) permitem o retorno da água ao reservatório.

O controle da vazão de água que circula no sistema é controlado através de um registro gaveta (Fig. 21c) que possui abertura calibrada (Fig. 22). A altura média do escoamento é medida por duas escalas graduadas (Fig.21e) em milímetros que foram coladas na parede do canal próxima as extremidades montante e jusante da área rebaixada.

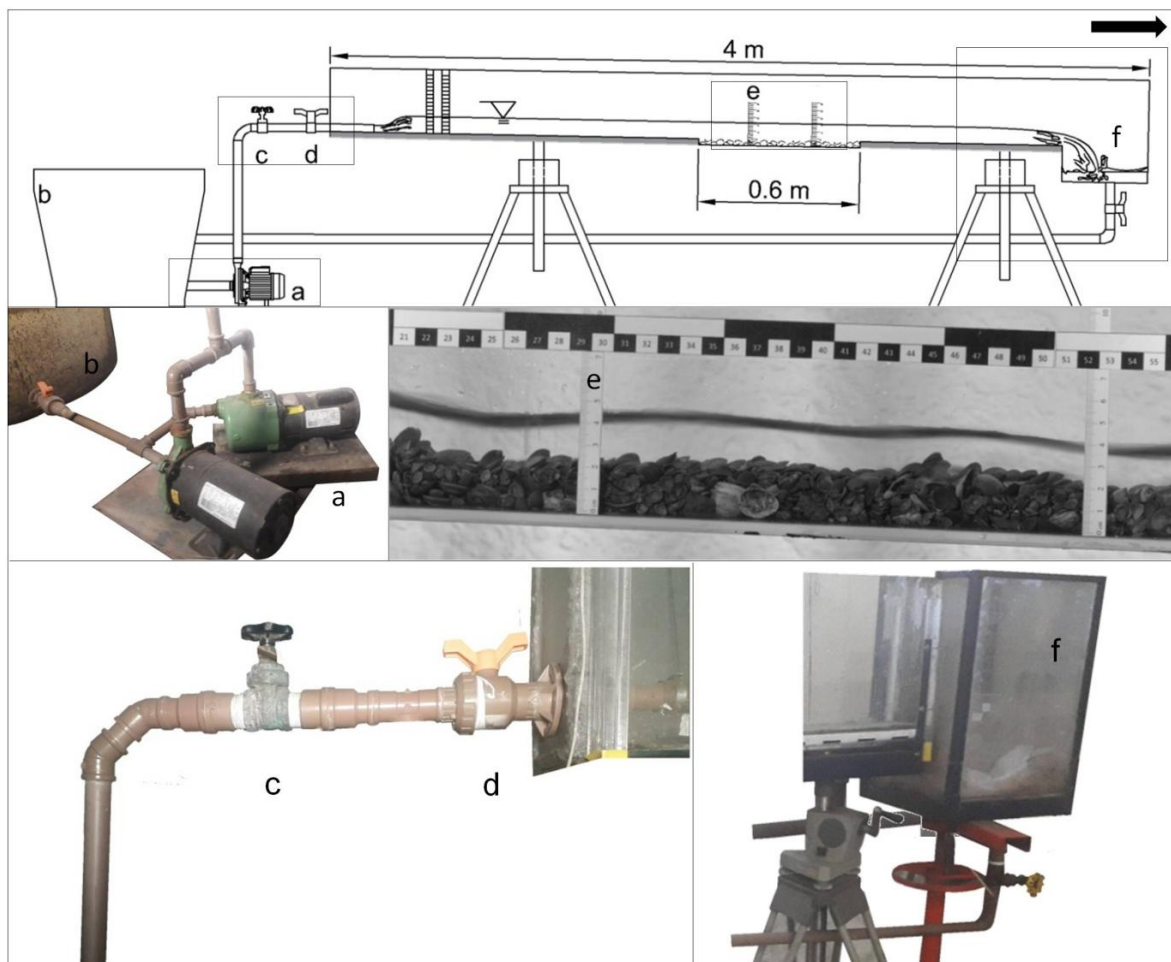


Figura 21. Desenho esquemático e fotografias do canal de vidro. a) bombas; b) reservatório de 1000 litros; c) registro gaveta - 3/4"; d) registro esfera - 3/4"; e) escala de medição de profundidade; f) cuba de jusante. A seta horizontal preta indica o sentido da corrente.

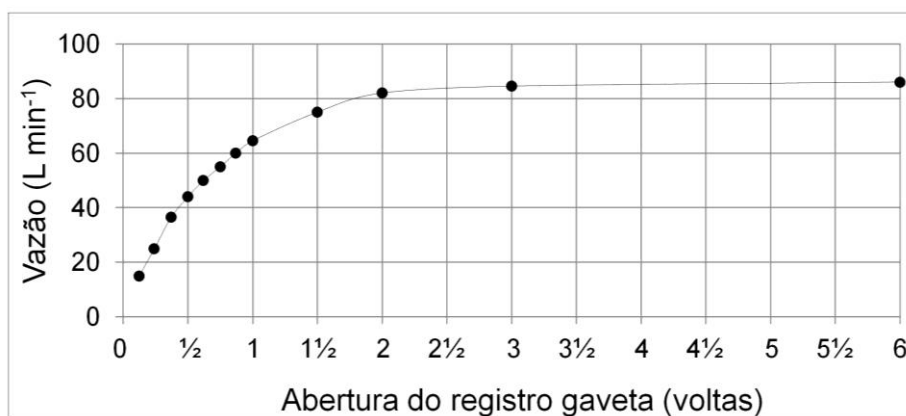


Figura 22. Relação da vazão e a abertura do registro gaveta.

4.2.3 Procedimentos

Para todos os experimentos, enchia-se o canal com água até seu limite superior e esperava-se a água parar de se agitar dentro do canal por 5 minutos. Após esse tempo, as conchas eram lançadas na área rebaixada do leito. Devido a esse procedimento, as conchas repousavam no leito com sua concavidade para cima, visto que esse é o lado preferencial que as conchas imergem no meio fluido (Middleton, 1967; Allen, 1984; Li *et al.*, 2020). Para as conchas ficarem uniformemente espalhadas por toda extensão da área rebaixada, fazia-se sutis movimentações esfregando um pincel (100 mm de largura) por sobre as conchas.

Após o preparo do leito, baixava-se a altura da coluna até um nível preliminarmente definido em função da vazão que seria aplicada. Este rebaixamento do nível era feito lentamente através da abertura de um registro gaveta instalado na tubulação de retorno. Desse modo, eliminava-se a possibilidade de haver transporte das conchas antes do início dos experimentos. Após essa etapa, ajustava-se a abertura do registro gaveta de montante (Fig. 7c) conforme a vazão desejada. Por fim, abri-se gradual e totalmente o registro esfera de montante (Fig. 7d), dando início ao experimento.

Foram realizados 8 experimentos, cada um com 20 minutos de duração. As vazões e velocidades do escoamento aplicadas são apresentadas na tabela 2. No final de cada experimento, antes de preparar o leito para a próxima corrida, tirava-se uma fotografia de topo do leito. Estas fotos foram realizadas utilizando uma câmera Nikon D5000 equipada com uma lente planar (Carl Zeiss T*1,4/85mm).

Tabela 2. Vazão e velocidade dos experimentos.

Experimento (nº)	Abertura do registro gaveta (nº de voltas)	Vazão (Lmin ⁻¹)	Velocidade (m s ⁻¹)	Duração (minutos)
1	6	85,8	0,57	20
2				
3	1 ³ / ₄	58,8	0,48	
4				
5	2	81,6	0,54	
6				
7	1 ¹ / ₂	75	0,52	
8				

Com o objetivo de mensurar a orientação das valvas de *Anomalocardia brasiliiana* presente no leito, as fotografias de topo (pós experimento) foram

analisadas no software CorelDRAW[®]. Neste procedimento, fora extraído 0,1 m das extremidades de montante e de jusante devido a transição entre os leitos fixo e erodível (as conchas). A área analisada (0,4 m por 0,12 m) ainda foi dividida ao meio em um padrão em xadrez (Fig. 9). Por fim, a orientação do umbo ao longo do eixo intermediário foi medida para todas as conchas que estavam com a concavidade para baixo (reorientadas pela ação da corrente) e que se encontravam parcial ou totalmente dentro dos quadrados marrons (Fig. 23).

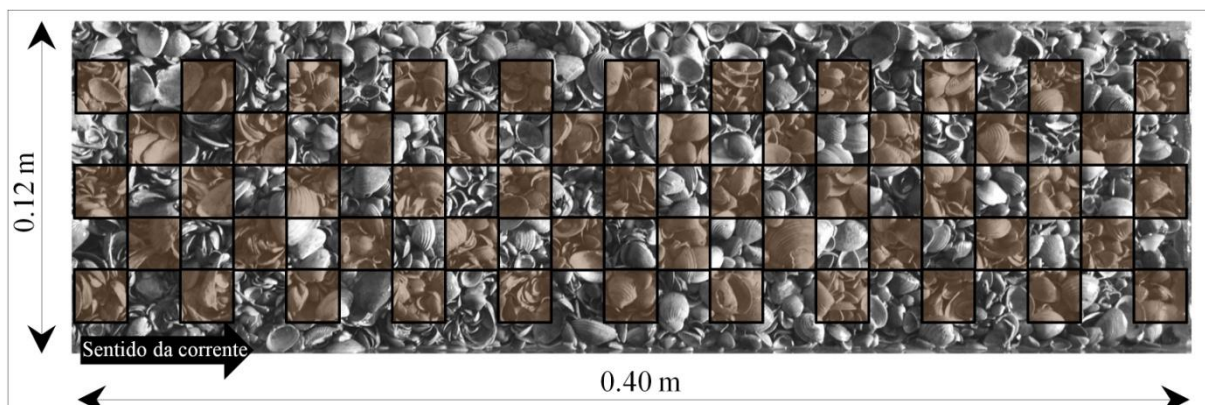


Figura 23. Fotografia do leito. Os quadrados marrons representam a área onde foi medida a orientação das conchas.

5 CARTA DE SUBMISSÃO

O artigo foi submetido à revista sedimentology, extrato A1 da Qualis CAPES, de modo a preencher o requisito da Norma 103.

23/12/2020

ScholarOne Manuscripts

[Home](#)[Author](#)[Review](#)

Submission Confirmation

[Print](#)

Thank you for your submission

Submitted to
Sedimentology

Manuscript ID
SED-2020-OM-338

Title
Threshold of motion and orientation of bivalve mollusc shells under current flow.

Authors
Secco da Silva, Felipe
de Oliveira Borges, Ana
Toldo Jr., Elírio
Fick, Cristiano
Puhl, Eduardo

Date Submitted
23-Dec-2020

[Author Dashboard](#)

6 ARTIGO

Threshold of motion and orientation of bivalve mollusc shells under current flow.

Felipe Rafael Secco da Silva¹, Ana Luiza de Oliveira Borges¹, Elírio Ernestino Toldo Jr.², Cristiano Fick¹, Eduardo Puhl¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade. Postal Code 91501-970, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre (RS), Brazil.

E-mails: felipersecco@hotmail.com, ana.borges@ufrgs.br, cristiano.fick@ufrgs.br, puhl.eduardo@gmail.com

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Geociências, Centro Estudos de Geologia Costeira e Oceânica. Postal Code 91501-970, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre (RS), Brazil.

E-mail: toldo@ufrgs.br

Abstract

Three bivalve mollusc shell species *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia orbicularis*, and *Divaricella quadrisulcata* were experimentally tested in laboratory flumes in order to determine the threshold of motion condition and the final orientation of the shells. A total of 150 current flow experiments were conducted for single shells resting in a fixed sand bed. This study demonstrates that shells in the convex-up position are more resistant to the flow action when umbo is pointing to downstream rather than upstream. With regard to the shell shape, this research shows that species which have higher frontal areas tend to be entrained at lower flow magnitudes. The critical shear stress results were normalized in terms of the nondimensional Shields parameter, exhibiting values far below the Shields curve in good agreement with previous data in the literature under similar flow and bed conditions. Concerning the shell orientation, it was seen that circular shells in a convex-up position have a tendency to be orientated with the umbo pointing downstream. Elliptical-shaped shells transported in the convex-up position tend to be oriented with the long axis parallel to the flow direction, thus, presenting a bimodal pattern in which the umbo of the right valve is positioned opposite to that of the left valve. This behavior was also tested and confirmed in another scenario, in which current flow experiments were performed over a shell bed formed by Elliptical-shaped shells. Most of the valve orientation measurements (average = 69%, standard deviation = 12%) show that the right valve umbo tend to point to the right flow margin and the left valves point that to the left flume side. These results have direct application in the shells' incipient motion predictions and in palaeocurrent field analysis.

Keywords: mollusc bivalve shells, threshold of motion, orientation.

INTRODUCTION

Shelly deposit accumulations (coquinas) have been studied in recent decades by many researchers due to their frequent occurrence in ancient depositional records (Carvalho *et al.*, 2000; Tavares *et al.*, 2015; Muniz and Bosence, 2018; Oliveira *et al.*, 2019) and in modern coastal settings (Klein and Calliari, 1993; Jahnert *et al.*, 2012; Weill *et al.*, 2013; Charó *et al.*, 2014). The geneses of the bioclastic deposits are frequently associated with coastal sedimentary environments, in which the waves and water currents are the main processes of sediment reworking and transport (Fick *et al.*, 2020). The threshold of motion and the shell orientation provide important information about how these bioclastic sediments are transported and sorted by the flow. In palaeoenvironmental analysis, the shell position and its degree of fragmentation are used to infer the direction (Nagle, 1967; Wendt 1995; Radley, 2011) and the energy (Trewin & Welsh, 1972; Schwartz & Graham, 2015) of the paleoflow.

The shells' physical parameters, such as mass, shape, size, and surface roughness control their movement behavior (Vogel, 1994). Chattopadhyay *et al.* (2013) reveal that fresh shells which are rougher are more easily transported than reworked ones. The asymmetry of the shells is another distinguishable property. Shape asymmetries contribute to ease of transport because it generates unstable pressure fields around the shell (Olivera and Wood, 1994). The convexity orientation of the shell in a flow dictates its stability. The shells are more stable in a convex-up position than convex-down (Nagle, 1967; Brenchley & Newal, 1970; Allen 1984; Dey, 2003; Diedericks *et al.*, 2018; Fick *et al.*, 2020). The initial umbo position also affects the entrainment of shells (Dey, 2003; Chattopadhyay *et al.*, 2013; Diedericks *et al.*, 2018). Futterer (1982) reported that circular-shaped shells transported in a convex-up position by currents need a greater range of velocities to move in an umbo downstream orientation than when the umbo is facing toward the flow direction.

The study of the threshold of motion is associated with the critical condition in which a grain is likely to begin moving. This condition is reached when the sum of the flow drag (F_D) and lift (F_L) forces are equal (or on the threshold) to the particle's submerged weight (W). Also, the bed slope angle (ψ) and the repose angle of the bed particles (ψ_r) must be considered. The shear stress near the bed (τ_b) can be related to the F_D through Equation 1:

$$F_D = C_1 \tau_b D^2 \quad (1)$$

Where C_1 = is a coefficient that considers drag and lift effects, τ_b = is the shear stress near the bed (Pa), and D = is the particle diameter (m). The submerged weight (W) is given by the following relationship (Eq. 2):

$$W = C_2(\gamma_s - \gamma)D^3 \quad (2)$$

Where C_2 = is a geometric coefficient, γ_s = is the specific weight of the grain (N m^{-3}), and γ = is the specific weight of the water (N m^{-3}). Changing W and F_D for their respective expression, the balance of these forces for the threshold of motion condition is given by (Eq. 3):

$$C_2(\gamma_s - \gamma)D^3 \cos\psi \operatorname{tg}\psi_r = C_1\tau_b D^2 + C_2(\gamma_s - \gamma)D^3 \operatorname{sen}\psi \quad (3)$$

For a horizontal bed the above equation can be rewritten as follows (Eq. 4):

$$\frac{\tau_{b,cr}}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg}\psi_r \quad (4)$$

The left term of the expression (Eq. 4) is the non-dimensional Shields parameter (θ_{cr}) which expresses a ratio between the hydrodynamic forces and the submerged weight.

Shields (1936), on current experiments with spherical inorganic (barite and granite sand) and organic (amber and coal fragments) grains, defined an experimental curve of the θ_{cr} parameter *versus* the grain Reynolds number (Re^*). The Re^* is a dimensionless parameter that express the effects of particles on the flow boundary layer, given by (Eq.5):

$$Re^* = \frac{u^* D}{\nu} \quad (5)$$

Where, u^* = is the shear velocity ($\sqrt{\tau_b/\rho}$), and ν = is the kinematic viscosity ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Ever since, the Shields (1936) curve has been used for siliciclastic grains (Miller *et al.*, 1977; Buffington and Montgomery, 1997), calcareous fragments (Smith & Cheung, 2004; Pathitis, *et al.*, 2002) and non-fragmented shells (Diedericks *et al.*, 2018; Fick *et al.* 2020) in initiation of movement studies.

In order to better understand the hydrodynamic behavior of the shells, the present study aims to investigate the incipient motion condition and the orientation patterns of mollusc bivalve shells under currents through physical modelling experiments. From the observed results, insights on taphofacies features, bioclastic

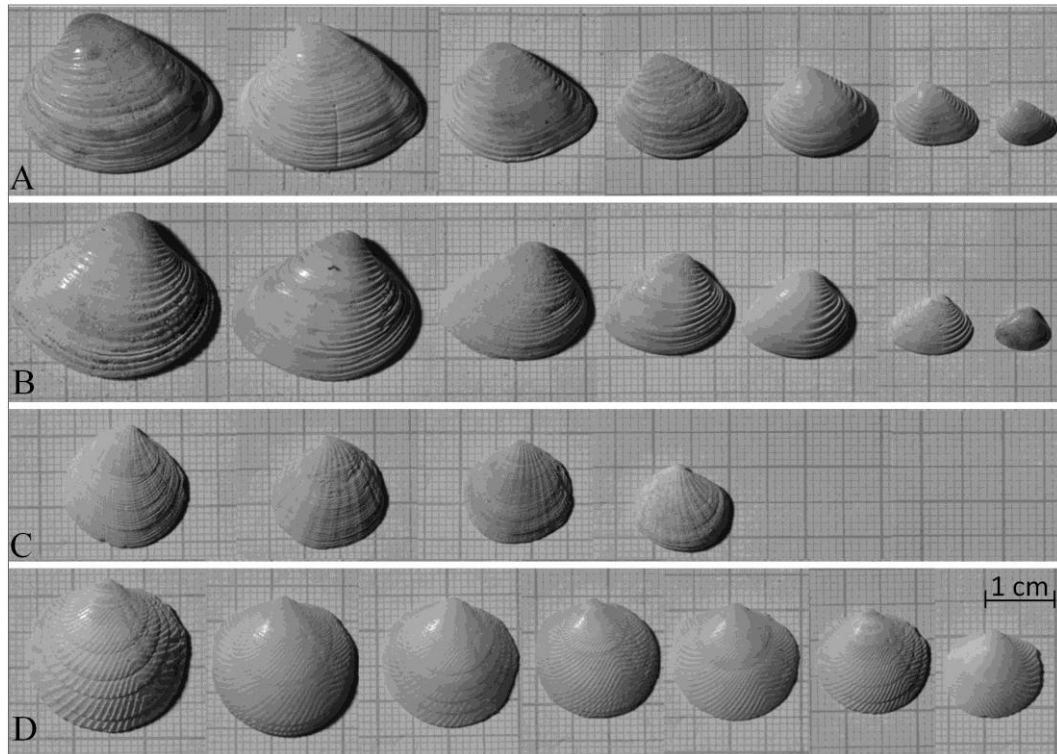


Figure 1. Shells used in single shell experiments. A) *Anomalocardia brasiliana*, left valves; B) *Anomalocardia brasiliana*, right valves; C) *Codakia orbicularis*; D) *Divaricella quadrisulcata*.

Some physical shell properties were accurately determined and presented in Table 2. Shell mass (m), volume (V), and density (ρ) were measured with a scale (0.01 g precision) and a pycnometer (Hubbard-type, 25 ml). The shells' longest, intermediate, and minor axes (a , b and c respectively) were measured with a caliper (0.02 mm precision). The sieve diameter (D_{sv}) was calculated from the Church *et al.* (1987) formula (Eq. 5):

$$\frac{D_{sv}}{b} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[1 + \left(\frac{c}{b} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

The nominal diameter (D_n), is the diameter of a sphere with the same volume of the shell, was calculated from (Eq. 6):

$$D_n = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

The shell's projected area (S_{ac}) on the plane formed by the axes (a) and (c) was measured by photograph analysis using the AUTOCAD[®] software.

In order to illustrate the shell's convex aspect and the thickness distribution, one valve of each species was cut into five sections (Fig. 2C). A valve from *Anomalocardia brasiliana* ($D_{sv} = 17,31\text{mm}$) has an average thickness of 1.8 mm and

the anterior side of the shell is on average 2.4 mm thick. The *Codakia orbicularis* ($D_{sv} = 12.75$ mm) and *Divaricella quadrisulcata* ($D_{sv} = 15.99$ mm) specimens have average thicknesses of 1.06 mm and 0.94, mm respectively; both species have slight thickness variation between posterior and anterior sides (less than 0.3 mm).

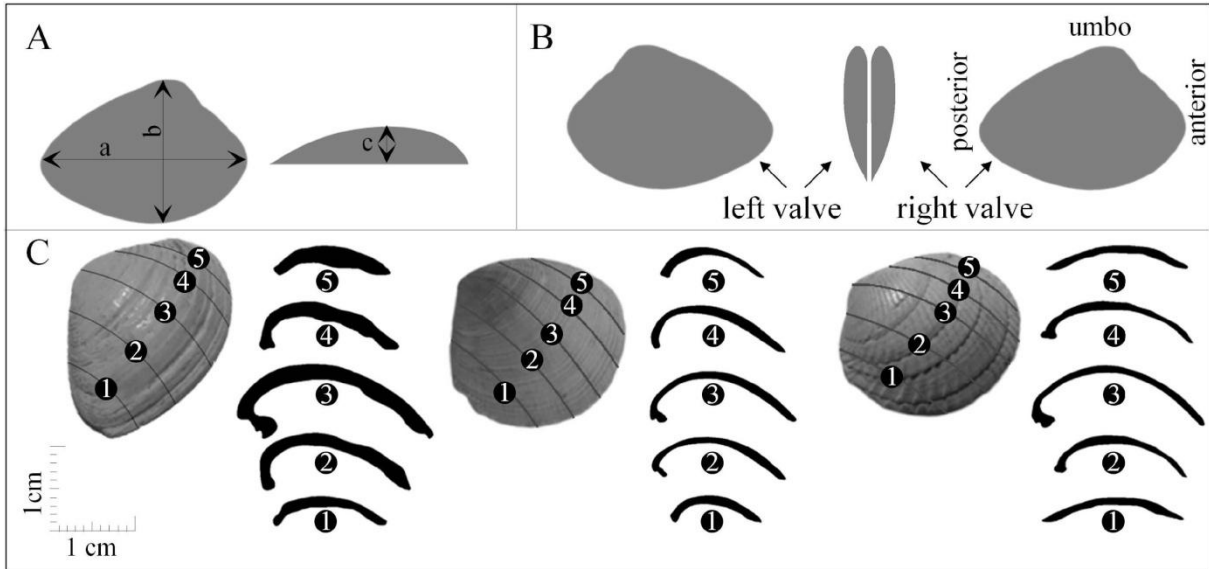


Figure 2. Shape of bivalve shells. A) Scheme of shell axis orientation. (a) and (b) are the base axes, (c) is the shell height. B) Scheme of the adopted convention for asymmetrical valve sides. C) Cross sections on the plane formed by the axes (b) and (c). From left to right: *Anomalocardia brasiliiana* specimen ($D_{sv} = 17.31$ mm), *Codakia orbicularis* specimen ($D_{sv} = 12.75$ mm), *Divaricella quadrisulcata* specimen ($D_{sv} = 15.99$ mm). Scale in the inferior left corner is only for the cross sections.

Single shell experiments: the procedures

Experiments were carried out on a masonry flume (Fig. 3), measuring 11 m long, 0.4 m wide, and 0.5 m in height. The bed flume has a gentle slope (4/1000) and its surface is a compound of well-sorted fixed sand (mean $D_{sv} = 0.8$ mm). At the upstream end, the flume is equipped with a rectangular weir (Fig.3b) in order to know the discharge (Q). A depth gauge (0.0001 m precision) is coupled on the weir to know the height of water (wh) flowing over it. The discharge (Q) value is given by (Eq.7):

$$Q = \frac{\left[0.8919 + 0.137752 \left[\left(\frac{wh}{100} \right) + 0.011 \right] \right]}{(wh + 0.01)^{-1.5}} \quad (7)$$

Four depth gauges (0.001 m precision) were fixed at 1.5, 4, 4.8, and 6 m (black arrows on Fig. 3) from the beginning of the bed in order to measure the flow height (H).

Table 2. Mass, density, shell's axes sizes, sieve (D_{sv}) and nominal (D_n) diameters, and projected area (S_{ac}) on a plane composed by the axes (a) and (c).

species	sample number	valve side	mass (Kg x 10 ⁻³)	density (Kg m ⁻³ x 10 ³)	axis (mm)			D_{sv} (mm)	D_n (mm)	S_{ac} (mm ²)
					a	b	c			
<i>Anomalocardia brasiliiana</i>	1		3.06	2.62	28.5	23.2	9.0	18.9	13.2	166.2
	2		2.08		26.1	21.1	8.0	17.1	11.5	130.5
	3		1.2		21.5	17.2	6.7	14.0	9.6	98.4
	4	left	0.66		18.3	15.0	5.3	11.9	7.8	62.1
	5		0.53		16.0	13.0	4.8	10.4	7.3	50.6
	6		0.16		12.2	8.9	3.2	7.1	4.9	27.6
	7		0.01		7.7	6.0	2.5	5.0	1.8	4.4
	8		3.15		29.0	24.0	9.0	19.4	13.3	186.7
	9		1.67		26.4	21.8	7.8	17.4	10.7	132.4
	10		1.13		21.5	17.2	6.8	14.1	9.4	100.1
	11	right	0.72		18.7	14.5	5.5	11.7	8.0	73.6
	12		0.56		15.8	12.7	5.0	10.4	7.4	56.6
	13		0.13		12.0	8.7	3.0	6.9	4.6	24.8
	14		0.01		7.8	6.3	2.5	5.2	2.0	6.6
<i>Codakia orbicularis</i>	15		0.64	2.66	17.2	17.3	5.5	13.5	7.7	61.8
	16		0.6		16.3	16.0	5.1	12.5	7.6	59.0
	17	x	0.46		15.3	14.7	4.5	11.4	6.3	53.0
	18		0.36		12.8	12.3	4.1	9.7	6.9	43.0
<i>Divaricella quadrisulcata</i>	19		1.05	2.61	22.3	21.5	7.1	16.9	9.0	110.8
	20		0.79		20.0	19.7	6.1	15.3	8.2	89.1
	21		0.6		19.1	18.5	5.7	14.3	7.5	72.7
	22	x	0.48		17.2	16.5	4.6	12.6	6.9	53.3
	23		0.41		17.7	16.6	4.9	12.8	6.6	57.8
	24		0.28		15.8	14.9	4.3	11.4	5.8	46.4
	25		0.16		14.6	12.5	3.7	9.6	4.9	29.5

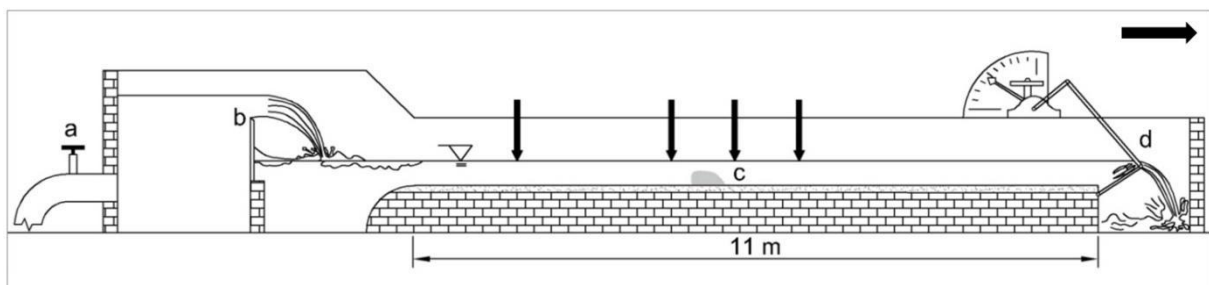


Figure 3. Cross section of the flume used on single shell experiments (not to scale): a - water feeding valve, b - rectangular weir, c - initial shell position, d - downstream floodgate. Vertical black arrows show the sections of depth gauge position. Horizontal black arrow points to the flow direction.

The shell's incipient motion condition was tested in two initial positions: convex-up with the umbo to upstream, and convex-up with the umbo pointing downstream. For each experiment, the flume was filled with water with a low current velocity, and a single shell was positioned on a specific point (Fig.3c). By opening an upstream valve (Fig.3a), the flow was increased until the shell had started its movement. Then flow depth and discharge were measured. This procedure was repeated three times for each shell for both two initial positions. The adopted criterion for incipient motion was considered to be when the shell moved at least 0.1 m.

In preliminary experiments, it was observed that shells, when entrained with the umbo initially facing upstream, turn on their horizontal plane to reach a more stable position, stopping their movement. In these cases, the valves' final orientations were collected using a protractor. These measurements were taken along the shell's intermediate axis, in which the recorded data showed the direction of the umbo. In experiments where the umbo was facing downstream, it was not possible to measure the shell's final orientation because the shells did not stop their movement until reaching the downstream end of the flume.

All experiments were conducted in a uniform permanent flow regime. The mean flow velocity (U) for the threshold of motion conditions were calculated by continuity (Eq. 8):

$$U = QA^{-1} \quad (8)$$

Where: A = is the wet area (m^2) and Q = is the discharge ($m^3 s^{-1}$). Also, the mean bed shear stress for the incipient motion condition ($\tau_{b,cr}$) was determined by the following equation (9):

$$\tau_{b,cr} = \gamma \frac{A}{P} S \quad (9)$$

Where: γ = is the specific weight of the water (Nm^{-3}); P = is the wet perimeter (m); and S = is the flume slope.

Shell bed experiments: the shells

In the shell bed experiments, a 1Kg sample of non-fragmented valves from *Anomalocardia brasiliiana* species was used. The sample D_{sv} value ranged from 3.8 to 22.25 mm (see Fig. 4).

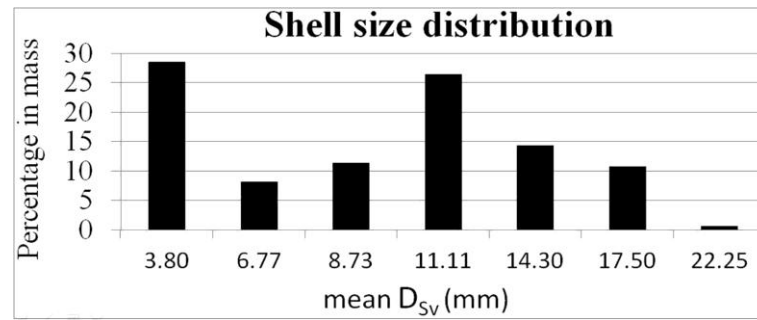


Figure 4. Sieve grain size distribution of sample from *Anomalocardia brasiliiana* valves.

Shell bed experiments: the procedures

Experiments were conducted in a 4 m long, 0.12 m wide and 0.5 m tall recirculating glass flume (Fig. 5). The recirculating system works by connecting a pump to a lower reservoir. Also, the flume has a trough in its center (0.02m deep and 0.6 m long). Unconsolidated material does not return to the pipe due to the presence of a net in the downstream box. A calibrated valve and two staff gauges (0.001 m precision) measure the discharge (Q) and flow depth (h) respectively.

Before each experiment, the flume was completely filled with water, and then, all 1Kg of the *Anomalocardia brasiliiana* valves sample was sunk in the trough area, filling all available space. Due this procedure, the valves were lying on the bed in a concave-up position (Middleton, 1967; Allen, 1984; Li *et al.*, 2020). Subsequently, the water level was slowly dropped to the predetermined height of the flow to be carried out. The experiment started when the upstream valve (Fig. 5d) was opened with the calibrated valve (Fig. 5c) already adjusted. The experiments lasted 20 min. This time was established in preliminary tests, in which it was verified that after this period there is no significant transport.

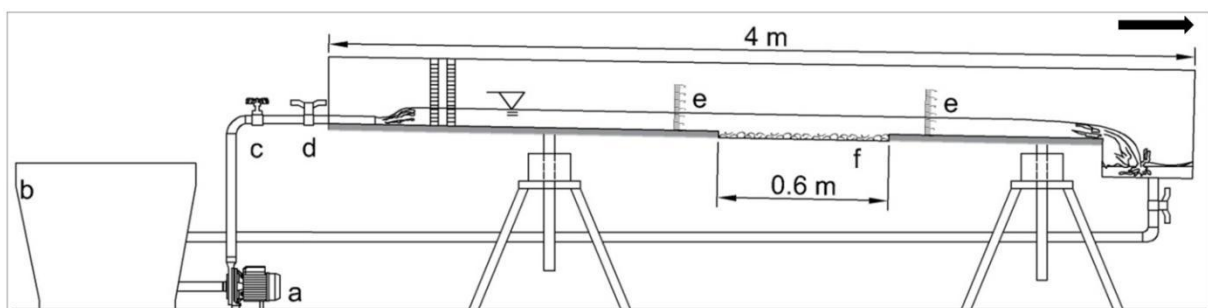


Figure 5. Cross section of the shell bed experiments flume (not to scale): a - pump, b - lower reservoir, c - calibrated valve, d - upstream valve, e - staff gauges, f - trough. Black arrow indicates the flow direction.

When the experiments were over, the flume was emptied, and a top shell-bed photograph was taken. These photographs were obtained with a NIKON D5000 digital camera equipped with a CARL ZEISS T*1,4/85mm planar lens. After that, all shells were collected to be used in the next experiment.

In order to investigate an orientation pattern for the *Anomalocardia brasiliiana* right and left valves, a total of eight experiments were conducted. The mean flow velocities used were 0.48, 0.52, 0.54, and 0.57 ms^{-1} with each one having one repetition.

All shell bed photographs taken after experiments were analyzed to measure the shell orientation. In this analysis, 0.1 m from both ends was discarded due to the transition between fixed and mobile beds. The bed area was split in two in a checkered pattern (Fig. 6). The measurements were computed for all shells in a convex-up position that were partially or fully inside the brown squares. The orientation data were taken along the shells' intermediate axis with the recorded data exhibiting the direction of the umbo.

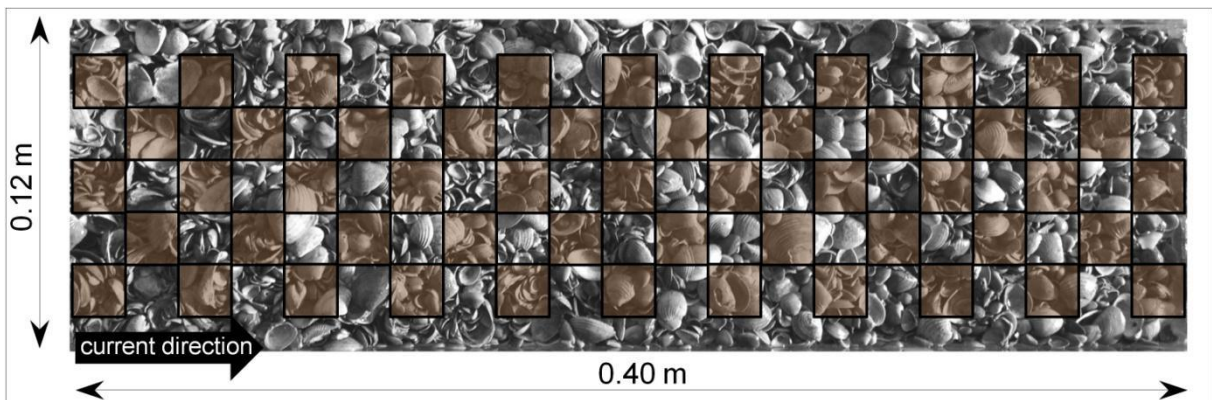


Figure 6. Shell bed photograph of the trough central area. The brown squares represent the analysis area.

Results

Threshold of motion

The critical bed shear stress for all single shell experiments was calculated through Equation 3. A relationship between size (D_n and D_{sv}) and this parameter is shown in Figure 7. The mean flow height and velocity values are in Table 3. There are significant disparities in the critical shear stress values for the experiments, where shells with the umbo facing upstream have lower values than those facing downstream, demonstrating that the second situation exhibited major resistance to

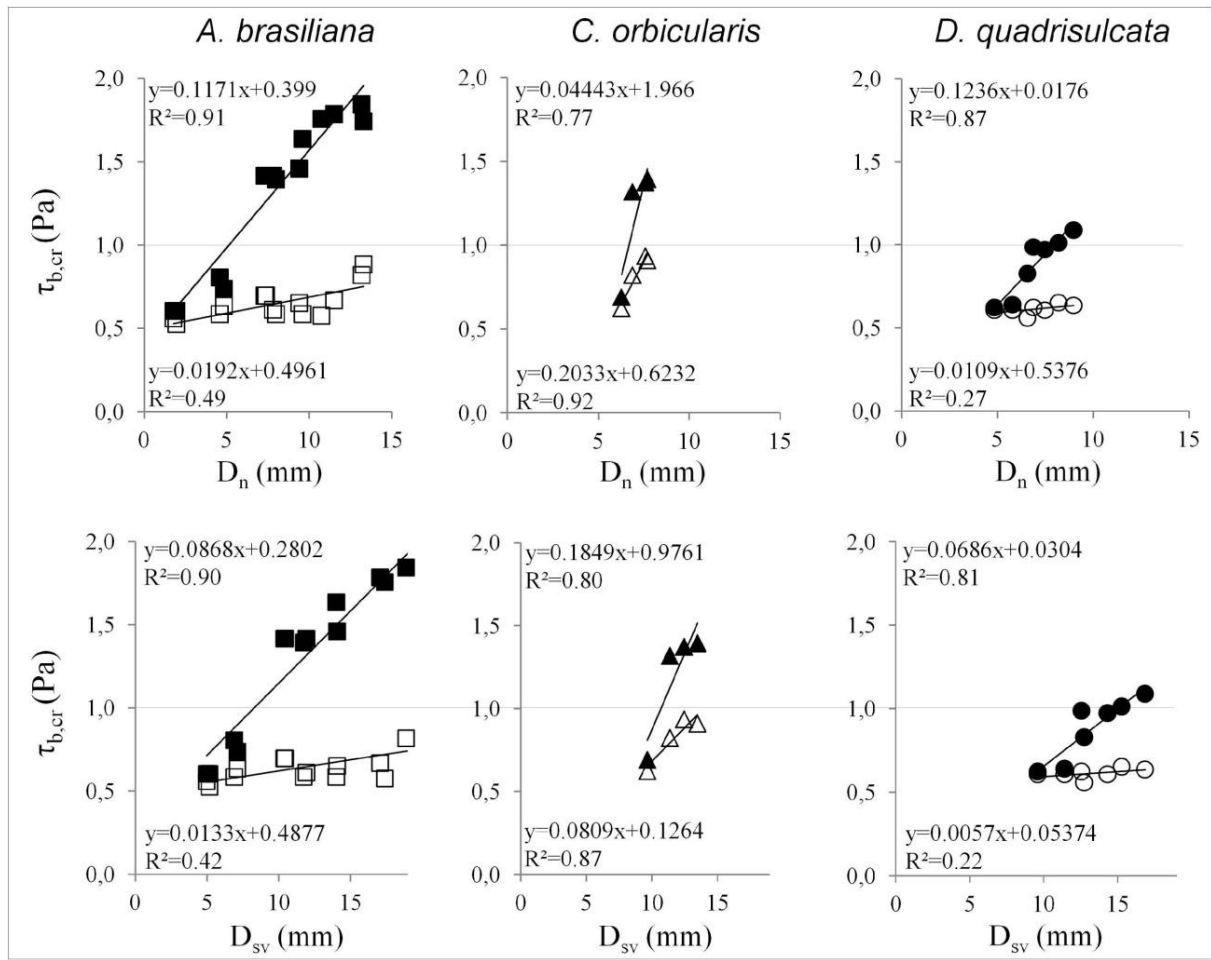


Figure 7. Critical shear stress as a function of the shell's diameter. From the left to right the graphs are for the species *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia orbicularis*, and *Divaricella quadrisulcata*, respectively. Above, the shell size is described by the nominal diameter (D_n). Below, it is described by the sieve diameter (D_{sv}). Solid symbols represent the umbo initially pointing downstream, and open symbols for the umbo pointing upstream.

transportation. Positive correlation exists between size and critical shear stress ($\tau_{b,cr}$) when the umbo is facing downstream. In this condition, *Anomalocardia brasiliana* and *Divaricella quadrisulcata* have a satisfactorily correlated linear regression, presenting R^2 values of 0.91 and 0.87, respectively. However, the species *Codakia orbicularis* does not show good agreement ($R^2 = 0.77$).

For the umbo upstream situation, the graphs show which sizes are less important in the entrainment condition. This can be better observed for the results from the *Anomalocardia brasiliana* and *Divaricella quadrisulcata* species which have a greater size variation in the total sample.

For small shells (D_{sv} 4 to 8 mm), the evaluated $\tau_{b,cr}$ values are very similar for both of the initial umbo orientations tested in this work. However, shells with larger sizes present considerable ratios between umbo pointing downstream and umbo pointing upstream ($\tau_{b,cr}$): 2.67 for *Anomalocardia brasiliana* ($D_n = 11.5$ mm /

$D_{sv} = 17.06$ mm); 1.53 for *Codakia orbicularis* ($D_n = 7.7$ mm / $D_{sv} = 13.47$ mm); and 1.71 for *Divaricella quadrisulcata* species ($D_n = 9$ mm / $D_{sv} = 16.86$ mm).

The range of sizes that covered all these species (D_{sv} from 9.61 to 16.86 mm) allows comparison of the differences between species for the threshold of motion. For $D_{sv} = 13.47$ mm, the *Codakia* species registered mean $\tau_{b,cr}$ values of 1.39 and 0.91 Pa for umbo downstream and umbo upstream conditions, respectively. For similar sized *Anomalocardia brasiliana* shells, mean $\tau_{b,cr}$ values equal to 1.64 and 0.59 Pa were recorded. To some extent, these two species have similar threshold of motion values. However, the *Divaricella quadrisulcata* species presents a significantly lower $\tau_{b,cr}$ value (0.97 Pa) for the umbo downstream orientation, but for the opposite umbo orientation, this species shows a slight difference from the others ($\tau_{b,cr}$ 0.61 Pa).

Table 3. Mean values of velocity (U), flow height (h), and critical shear stress ($\tau_{b,cr}$).

sample number	umbo upstream			umbo downstream		
	H (m)	U (ms ⁻¹)	$\tau_{b,cr}$ (Pa)	H (m)	U (ms ⁻¹)	$\tau_{b,cr}$ (Pa)
<i>Anomalocardia brasiliana</i>						
1	0.024	0.43	0.82	0.064	0.71	1.84
2	0.019	0.35	0.67	0.061	0.70	1.79
3	0.017	0.29	0.59	0.055	0.66	1.64
4	0.017	0.31	0.61	0.046	0.61	1.42
5	0.020	0.36	0.70	0.046	0.61	1.42
6	0.018	0.34	0.64	0.021	0.37	0.74
7	0.016	0.28	0.56	0.017	0.27	0.61
8	0.026	0.45	0.88	0.059	0.69	1.74
9	0.016	0.29	0.58	0.060	0.70	1.76
10	0.019	0.34	0.65	0.047	0.62	1.46
11	0.017	0.29	0.59	0.045	0.60	1.39
12	0.020	0.36	0.70	0.046	0.61	1.42
13	0.017	0.29	0.59	0.024	0.40	0.81
14	0.015	0.25	0.53	0.017	0.27	0.61
<i>Codakia orbicularis</i>						
15	0.027	0.44	0.91	0.045	0.60	1.39
16	0.028	0.44	0.94	0.044	0.60	1.37
17	0.024	0.40	0.82	0.044	0.58	1.32
18	0.018	0.34	0.62	0.020	0.35	0.69
<i>Divaricella quadrisulcata</i>						
19	0.018	0.34	0.64	0.033	0.52	1.09
20	0.019	0.34	0.65	0.031	0.48	1.01
21	0.017	0.33	0.61	0.029	0.46	0.97
22	0.018	0.34	0.62	0.030	0.48	0.99
23	0.016	0.28	0.56	0.024	0.42	0.83
24	0.017	0.33	0.61	0.018	0.34	0.64
25	0.017	0.33	0.61	0.018	0.33	0.62

Shields parameter

The critical Shields parameter for the incipient motion condition (θ_{cr}) was calculated from the left term of Eq. 4, using the shell D_{sv} as the characteristic dimension of the grain and plotted (Fig. 8) as a function of the grain Reynolds number (Re^*). Considering that Re^* is related to the viscous effects of the flow developed on uniform bed roughness, Wiberg & Smith (1987) and Ramsdell & Miedema (2010) recommend that the mean diameter of the bed is used to calculate the grain Reynolds number in Eq. 5. For all experiments performed in this work, the mean sieve diameter ($D_{sv} = 0,8 \text{ mm}$) of the glued sand bed was used in Re^* evaluation, as done so by Diedericks *et al.* (2018).

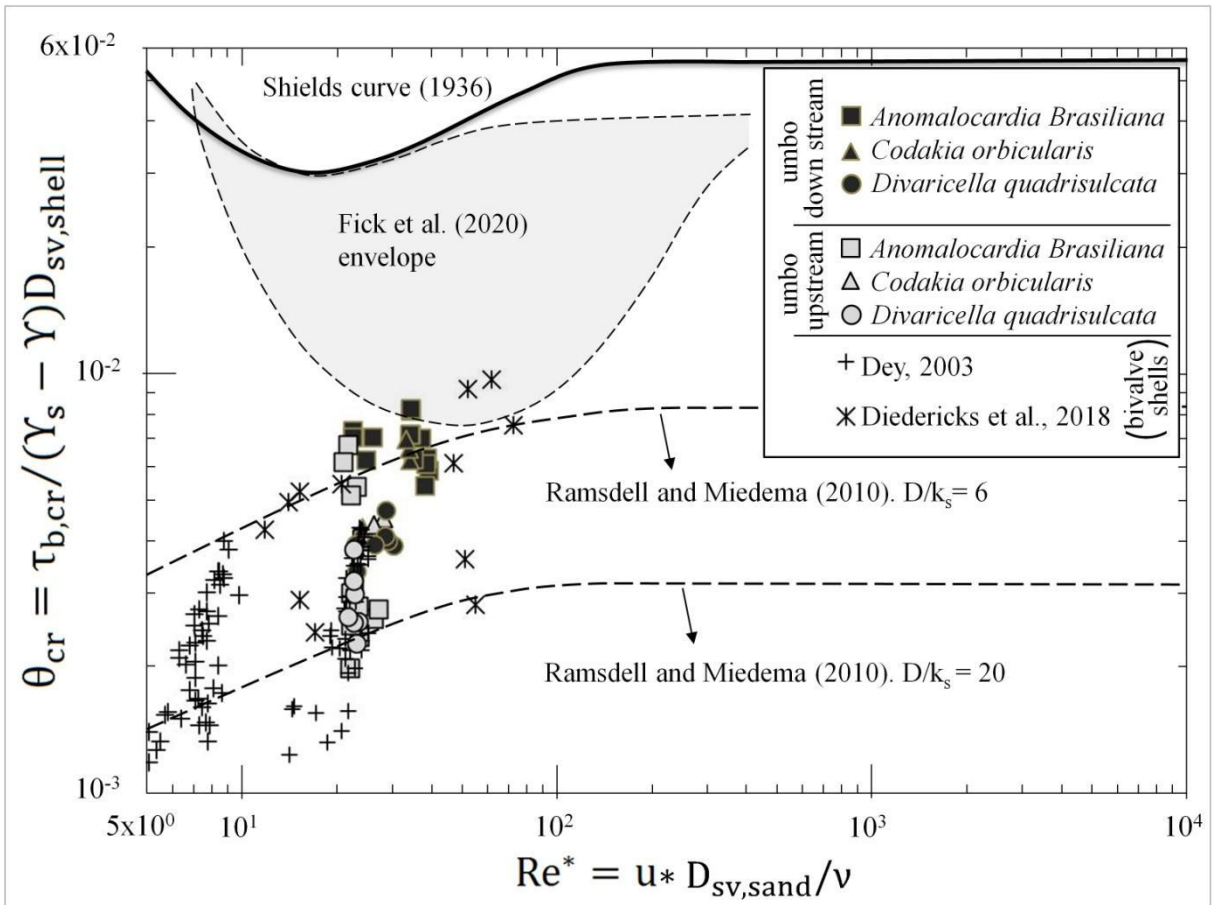


Figure 8. Shields diagram (θ_{cr} versus Re^*) of the threshold of motion datasets from the bivalve shells *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia orbicularis*, and *Divaricella quadrisulcata*. Data from experimental results for non-fragmented bivalve shells under currents from Dey (2003) and Diedericks *et al.* (2018) are plotted. The Fick *et al.* (2020) and Ramsdell & Miedema (2010) curves ($D/k_s = 6$ and 20) are plotted together with Shields (1936) curve.

As observed in the previous results for the critical shear stress, the θ_{cr} values are also larger for the umbo downstream condition with a range varying from 3.37×10^{-3} to 8.19×10^{-3} , the opposite umbo direction shows a variation between

1.98×10^{-3} and 6.73×10^{-3} . All data points are below the Shields (1936) curve and Fick *et al.* (2020) envelope. The latter was proposed for shell bed entrainment under currents and waves.

Looking at the highest critical Shields parameter values by species, it can be seen that *Divaricella quadrisulcata* is less resistant to the flow action, registering a θ_{cr} value equal to 4.71×10^{-3} . *Anomalocardia brasiliiana* and *Codakia* are more hydrodynamic species, exhibiting a slightly higher threshold of motion values ($\theta_{cr} = 8.19 \times 10^{-3}$ and 6.96×10^{-3} , respectively).

The results of θ_{cr} are also compared with the Ramsdell & Miedema (2010) curves for the incipient motion prediction of non-uniform spherical siliciclastic particles laying in a uniform sand bed with differing roughness. These curves are developed for a ratio of the non-uniform particle diameter (D) over the mean bed roughness (k_s) equal to 6 and 20. As done by Fisher *et al.* (1983) and Diedericks *et al.* (2018), in the present work, D was chosen to be equal to some characteristic shell diameter (shell $D_{sv} = D$), and k_s to be equal to the diameter of the sand bed particles (bed particles $k_s = 0,8$ mm). The D/ k_s ratio between all shell sizes studied in this research and the fixed sand bed stayed between 6.23 and 24.20. Almost all shell data points are above the Ramsdell & Miedema (2010) inferior curve (D/ $k_s = 20$), and only the species *Divaricella quadrisulcata* presented no value for θ_{cr} higher than the superior curve (D/ $k_s = 6$).

Also, figure 8 presents the θ_{cr} values calculated from the critical shear stress reported by Dey (2003) and Diedericks (2018) for threshold of motion of single shells under currents on a fixed sand bed (convex-up position/umbo downstream). All data from these authors have the ratio (D/ k_s) higher than 15 and have θ_{cr} values far below the Shields (1936) curve.

Orientation - single shell experiments

The valve orientations in single shell experiments in which the umbo was initially pointing upstream were computed for all investigated species. In these experiments, the control of the umbo orientation is given by the flow and shell morphology, since the sand bed roughness is insignificant when compared to the shell size.

The rose diagrams (Fig. 9) show the final umbo orientation for all specimens. The circular shaped shell species (*Codakia orbicularis* and *Divaricella quadrisulcata*)

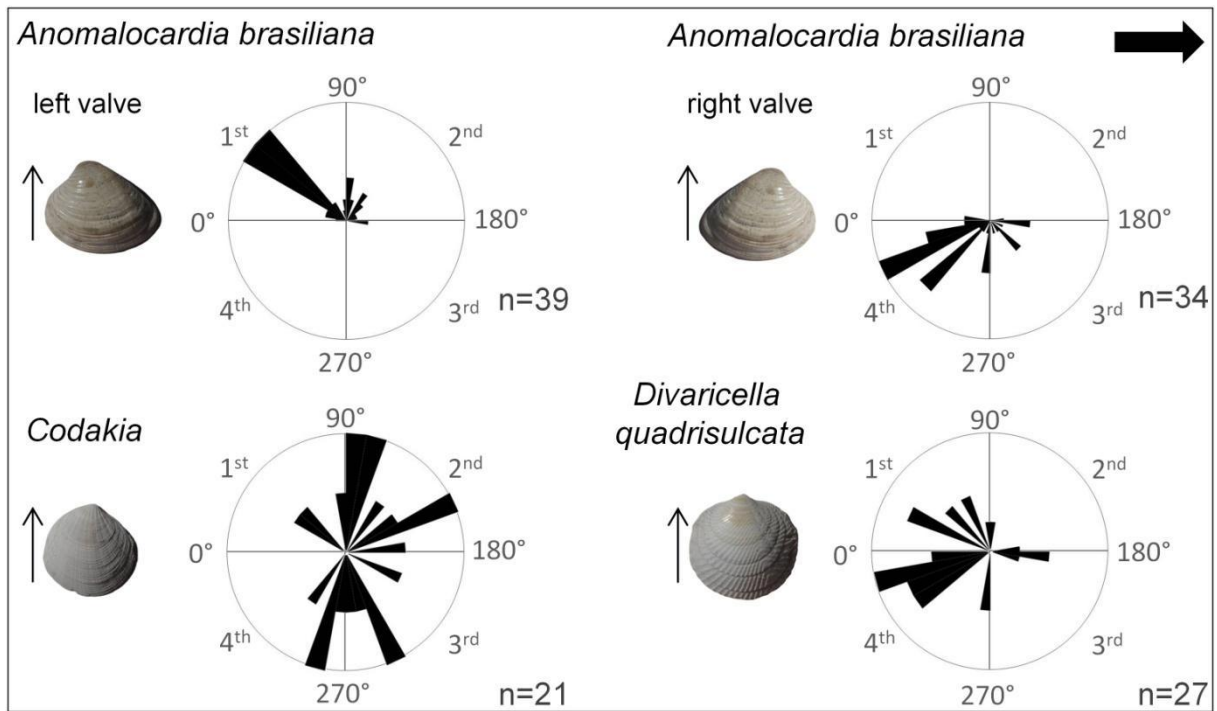


Figure 9. Umbo orientation of single shells resting in a fixed sand bed. Above, the asymmetrical elongate species *Anomalocardia brasiliana* discriminated between right and left valves. Below, the diagrams from the asymmetrical equant species *Codakia orbicularis* and the symmetrical equant species *Divaricella quadrisulcata*. n - number of measures. 0° - Initial umbo position (upstream). The thin black arrows next to the shells depict the orientation convention. The large black arrow in the upper right corner indicates the flow direction.

present a random orientation pattern. Contrarily, the elliptical asymmetrical species, *Anomalocardia brasiliana*, exhibited a bimodal pattern when right valve orientation is observed in an integrated way with the left ones.

Anomalocardia brasiliana shows a trend in which the right valve spins counterclockwise, with umbo orientation tending to point to the right margin of the flow (270°). The left valve showed the opposite. As can be seen in Figure 9, all measures fit in this pattern. Although the spinning motion occurs chaotically for the circular shells, it can be seen that *Codakia orbicularis* have most of their measurements between the 2nd and 3rd quadrants, which means the umbo tends to point in a downstream orientation. Differently, *Divaricella quadrisulcata* has measurement deviation near the starting position (umbo pointing to 0°), probably due to the shells of this species stopping their motion before a larger rotation.

Orientation - shell bed experiments

The final orientation of the *Anomalocardia brasiliana* valves in the shell bed experiments present a more developed random behavior than for the single shell

experiments. This probably occurs as in this scenario the shell's hydrodynamically stable position is impaired by the neighboring shells that compound the bed.

The rose diagrams (Fig. 10) show the umbo shell orientations that were in a convex-up position on the shell bed. Although these data have a large range for the umbo direction, they agree with the tendency observed for the single shell experiments. Right valves presented an average of 62% (Table 4) for the umbo direction pointing to the right flume margin (3rd and 4th quadrants). Only in experiments 5 and 7, this tendency was lower than 50%. Experiment 2 had the larger percentage of the right valves following this behavior (77%). Also, as seen in the single shell experiments, the left valve results have a higher percentage for the umbo direction to the opposite flume side (1st and 2nd quadrants), with average values of 76% and a standard deviation equal to 12%.

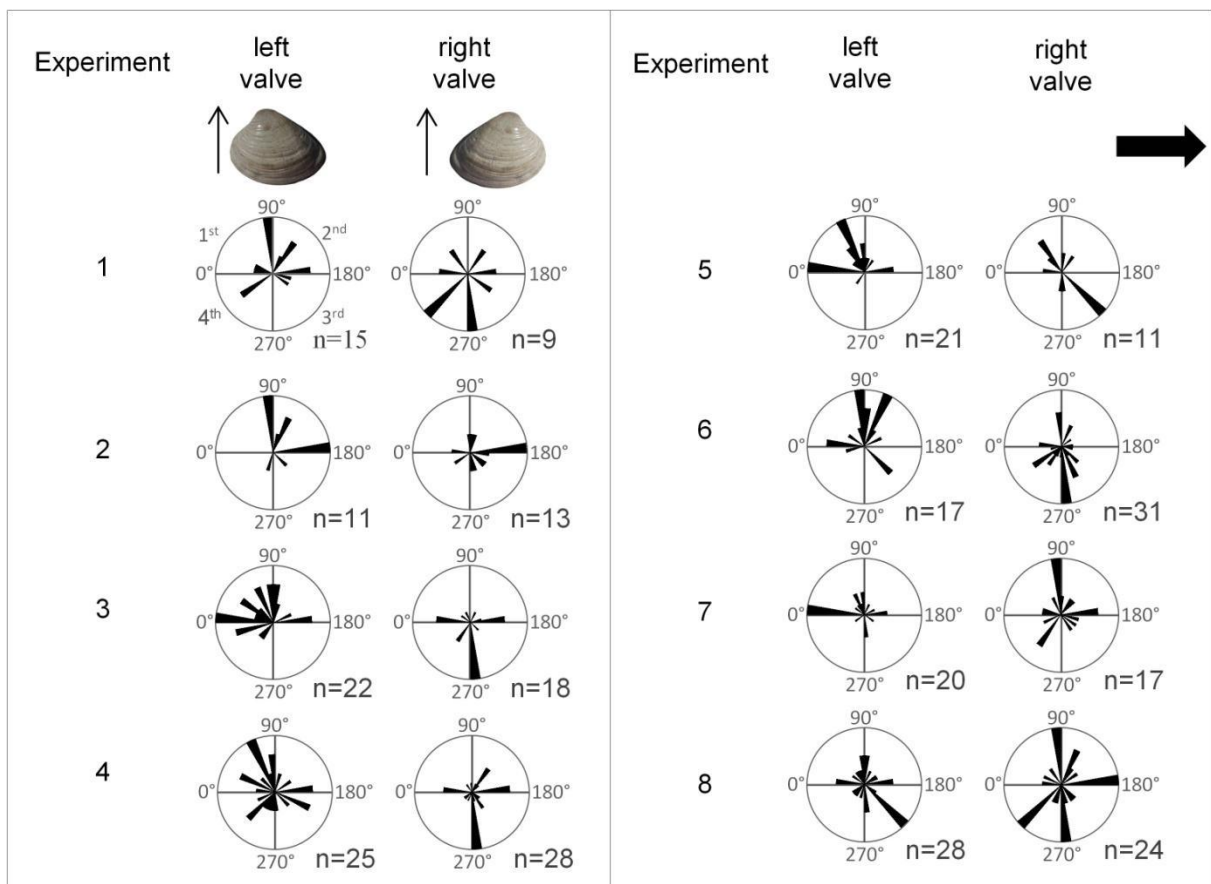


Figure 10. Umbo orientation of the shells in a bed compound of *Anomalocardia brasiliensis* right and left valves for the eight experiments. n - number of measurements. 0° - upstream flume side. The thin black arrows next to the shells depict the orientation convention. The large black arrow in the upper right corner indicates the flow direction.

Table 4. Umbo orientation results for the *Anomalocardia brasiliiana*, left and right valves.

Experiment	Flow velocity (ms ⁻¹)	Left valves		Right valves	
		n	Quadrants 1 st and 2 nd (%)	n	Quadrants 3 rd and 4 th (%)
1	0,57	15	73,33	9	66,67
2		11	81,82	13	76,92
3	0,48	22	81,82	18	61,11
4		25	56,00	28	64,29
5	0,54	21	95,24	11	45,45
6		17	82,35	31	74,19
7	0,52	20	80,00	17	47,06
8		28	60,71	24	58,33
Average		76,41		61,75	
Standard deviation		12,73		11,40	

Discussion

Threshold of motion

As reported by Futterer (1978) for some bivalve mollusc shells (*G. glycymeris* and *M. edulis*), the results of this work demonstrated that shells in a convex-up position are less hydrodynamic when the umbo is pointing upstream. In this scenario, the shells started their movement toward the flow direction at same time as spinning on their vertical axes to be in a more stable umbo-downstream position, hindering their movement. Dey (2003) links this spinning movement to the fact that an inertia moment is induced due to the existence of an unbalanced hydrodynamic force, considering that the umbo is an eccentric shell feature.

Concerning the threshold of motion difference between species, *Divaricella quadrisulcata* has minor values of $\tau_{b,cr}$ and θ_{cr} in comparison to the other shells. One of the causes that can explain this behavior is the relationship between the shell mass (m) and its projected area facing the flow direction (S_{ac}). Since the drag forces are a function of this area (Eq. 1), a heavier grain particle with the same projected area will be more stable when facing the flow. This relationship (Fig. 11) is an upward trend of the *Divaricella quadrisulcata* species which is not as steep as the curve of the other species ($R^2 = 0.97$; $m = 0.0013 S_{ac}^{1.42}$). *Anomalocardia brasiliiana* ($R^2 = 0.99$; $m = 0.0007 S_{ac}^{1.62}$) and *Codakia orbicularis* ($R^2 = 0.97$; $m = 0.0008 S_{ac}^{1.60}$) have similar trends and are steeper than *Divaricella quadrisulcata*.

These thresholds of motion differences between species may be related to some results of Fornari (2010). This author shows a concentration by species of disarticulated shells in a convex-up position in lagoon facies of a Holocene back-

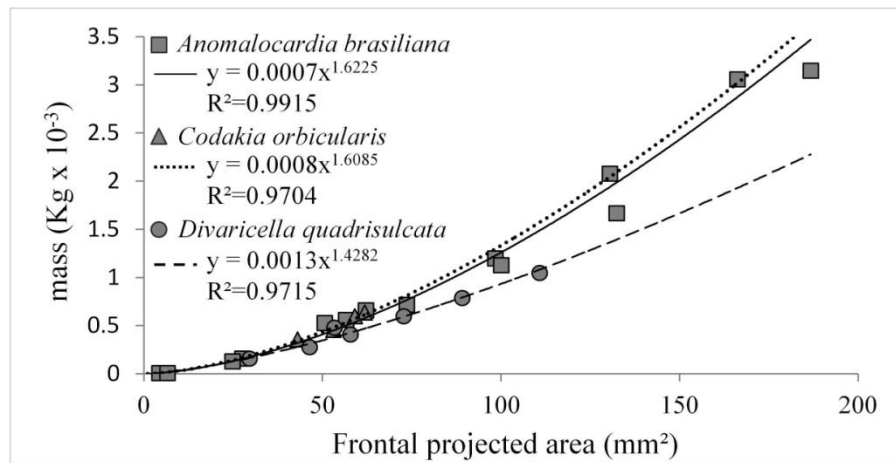


Figure 11. Shell mass as a function of the shells' projected area on flow direction (S_{ac}).

barrier system located in the Southern Brazilian coastal plain, in the State of Santa Catarina. The highest shell concentration is composed of *Anomalocardia brasiliana* valves, since this is an autochthon species in that habitat. In a smaller quantity, the species *Divaricella quadrisulcata* and *Codakia orbicularis* (both native to shallow marine environments) are present, with the former in larger quantities. The fact that *Divaricella quadrisulcata* has lower values of critical shear stress may be one of the factors that explains its larger concentration than that of the allochthon species, since the referred author attributes this incoming of shallow marine species to the tidal flood currents.

Regarding the Shields parameter, all threshold of motion data acquired in the present work were done so in a transitional flow regime ($5 \leq Re^* \leq 70$) and presented θ_{cr} values far below those of the critical Shields (1936) curve. Incipient movement results for experiments conducted on beds composed of heterogeneous calcareous sand (Prager *et al.*, 1996) and shell fragments (Paphitis *et al.*, 2002; Weill *et al.*, 2010; Rieux *et al.*, 2019) reported an interval of critical Shields parameter (θ_{cr}) between 8×10^{-3} and 4×10^{-2} for transitional flow regimes. These θ_{cr} values, which were also below the Shields curve, could be a consequence of the platy shape and density of some carbonate grains (Prager *et al.*, 1996). It should be noted that even siliclastic material with a platelike shape aspect has lower incipient motion stress compared with spherical grains, as observed by Mantz (1977) and Magalhaes & Chau (1983), in cohesionless mica flakes and shale particles, respectively.

Fick *et al.* (2020) integrated some of these unidirectional flow data, and commented on them with their threshold of movement results for disarticulated bivalve and gastropod shells under oscillatory flow, generating an incipient shell bed motion envelope. The results from the present work, as well as those of Dey (2003)

and Diedericks *et al.* (2018), show that single shells resting in a bed which have smaller particle diameters (or roughness) have a lower incipient transport shear stress under currents, with θ_{cr} values (Fig. 8) standing below the Fick *et al.* (2020) envelope.

It is known from theoretical models and experimental data (Egiazaroff, 1965; Andrews, 1983; Fisher *et al.*, 1983; Wiberg & Smith, 1987; Ramsdell & Miedema, 2010) that for spherical siliciclastic grains, if the D/k_s ratio is lower than 1, an increase in the critical Shields parameter is yielded. When this ratio is larger than 1, the θ_{cr} values are shifted below the Shields (1936) curve. The present θ_{cr} values, which are below the Fick *et al.* (2020) envelope can be explained by this relationship. For Ramsdell & Miedema (2010) this is caused by the fact that the Shields parameter is inversely related to the particle diameter, while the boundary shear stress is only influenced by the changed velocity distribution. Also, for natural sand, crushed quartzite, and glass spheres, Miller & Byrne (1966) experimentally verified that the repose angle (ψ_r) decreases with growth of the D/k_s ratio. According to Eq. 4, this relationship suggests that the Critical Shields parameter will be lower for larger D/k_s ratios.

The θ_{cr} scatter points for all three bivalve mollusc shells (Fig. 12) tested in this work, where the ratio (D/k_s) has values between 15 and 25, presented good correlation in an upward trend ($R^2 = 0.86$; $\theta_{cr} = 9 \cdot 10^{-6} Re^{*1.82}$); very similar to the Dey (2003) data ($R^2 = 0.80$; $\theta_{cr} = 9 \cdot 10^{-6} Re^{*1.88}$) for the same condition. These trends are steeper than the curve ($D/k_s = 15$) by Ramsdell & Miedema (2010), crossing it at $Re^* \sim 25$.

The data from this work having the ratio (D/k_s) values between 6 and 15 shows a greater distribution and also has an upward trend ($R^2 = 0.33$; $\theta_{cr} = 10^{-4} Re^{*1.88}$). Almost half of these data are between the Ramsdell & Miedema (2010) curves ($D/k_s = 6$ and 15), but there are θ_{cr} values above the upper limit ($D/k_s = 6$).

Data from the literature, as already discussed, show that beds made by carbonate particles have lower values of the critical Shields parameter than spherical siliciclastic grains when using the shell D_{sv} for the grain characteristic diameter. However, the results of this work, as well as data from Dey (2003) and Diedericks *et al.* (2018), reveal that the same does not occur for non-uniform particle cases, when comparing these findings with the Ramsdell & Miedema (2010) curves.

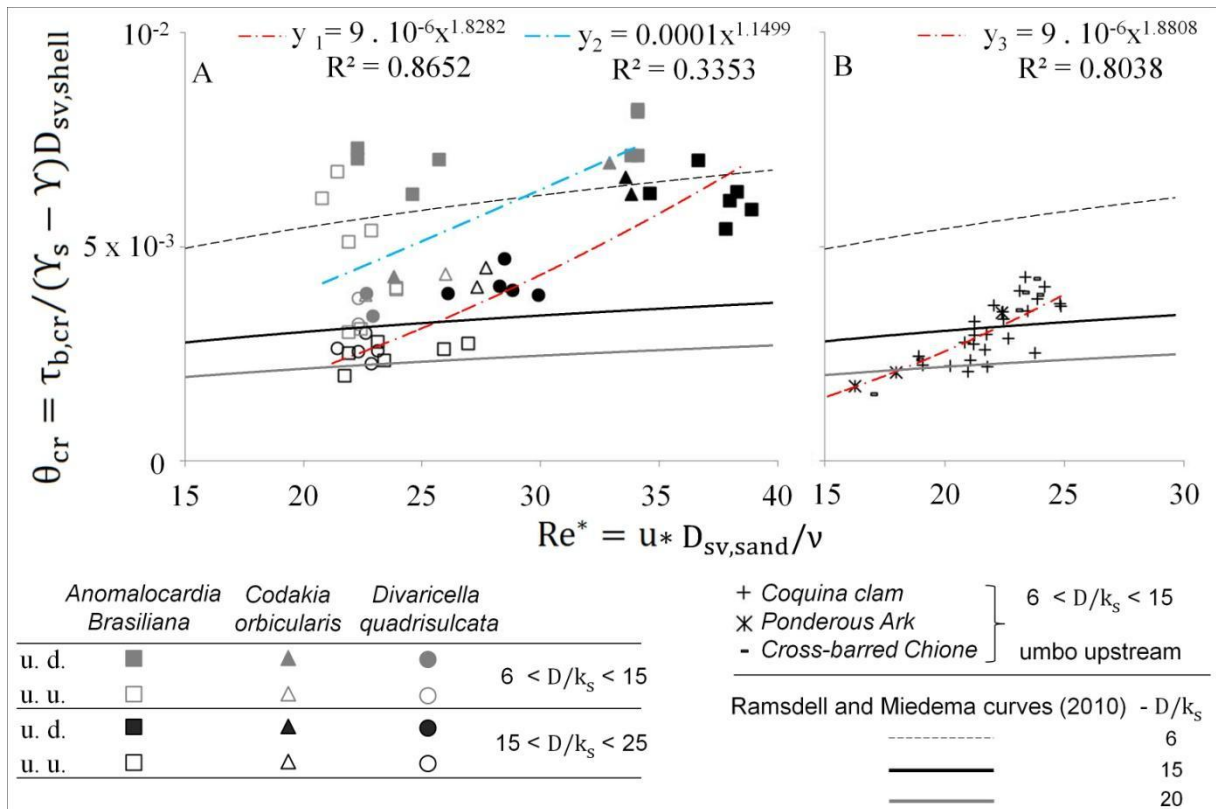


Figure 12. Critical Shields parameter (θ_{cr}) as a function of the grain Reynolds number (Re^*). A) The results of this work discriminated between the shell species (*Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia orbicularis* and *Divaricella quadrisulcata*), initial umbo position (u.d. - umbo downstream, u.u. - umbo upstream) and D/k_s ranges (6 to 15, 15 to 25). Blue dashed line is the data regression curve for D/k_s between 6 and 15, red dashed line is the data regression curve for D/k_s between 15 and 25. B) Results from Dey (2003) for the *Coquina clam* shells, *Ponderous Ark*, and *Cross-barred Chione* transported in a convex-up / umbo upstream position with D/k_s ratio between 6 and 15. Red dashed line is the data regression curve. Ramsdell and Miedema (2010) curves for D/k_s equal to 6, 15, and 20 are plotted on both graphs.

Shell orientation

The shell orientation results showed that elliptical and asymmetrical valves (*Anomalocardia brasiliiana*) that moved in a convex-up position tend to point the right valve umbo to the right side of the flume and the left valve to the opposite side, configuring a bimodal umbo orientation pattern. This behavior, already described by Kidwell *et al.* (1986), does not occur in circular shells. From another point of view, *Anomalocardia brasiliiana* specimens have the longer axis parallel to the flow with the posterior end pointing downstream.

Newell *et al.* (2007) also previously reported that the posterior side of bivalve shells tends to be positioned downstream (Fig. 13). The authors observed more than 500 orientation measurements of the bivalve shell *Unio* sp. (elliptical asymmetric shape) in convex-up positions, laid in recent point bar deposits. Although other data

(Behrens & Watson, 1969; Futterer, 1982) from elliptical bivalve shells in convex-up positions show that the long axis is parallel to the flow direction, the species *Donax variabilis* and *Petricola pholadiformis* have more stable positions with the posterior shell end pointing upstream. The elongated triangular shells (*Mytilus edulis*) also produce a long axis orientation pattern parallel to the flow (convex-up transported) as seen by Nagle (1967) and Kelling & Williams (1967). All these data demonstrate that the major axis is the main controller in the orientation of the elongated shells, but also the bimodal pattern of umbo orientations in elliptical shell species reveals that the umbo produces some secondary effect in shell orientation.

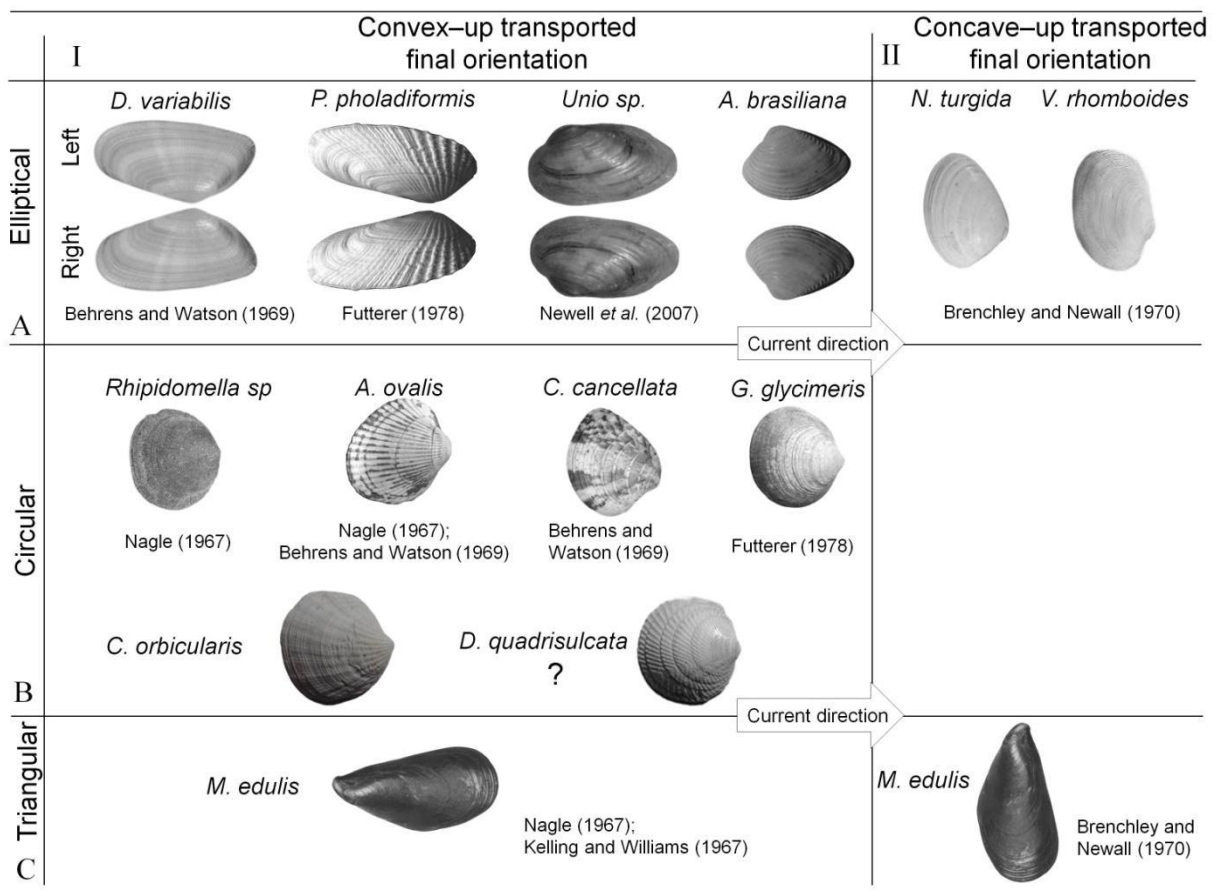


Figure 13. Shell orientation under current. I) Unidirectional orientation for shells transported in a convex-up initial position. II) Long axis orientation for shells transported in a concave-up initial position. A) Elliptical shell shapes. B) Circular shell shapes. C) Triangular shell shapes. The shell photographs of *Donax variabilis*, *Nucula turgida*, *Venerupis rhomboides*, *Andara ovalis*, *Chione cancellata*, *Glycymeris glycymeris*, and *Mytilus edulis* are modified from <http://www.marinespecies.org/> (last access 06/13/2020). *Petricola pholadiformis*, *Unio sp.* and *Rhipidomella sp.* photographs are modified from Zenetos et al. (2009), Fassatoui et al. (2019) and <https://vtcodger.blogspot.com/2007/03/t0128-rhipidomella.html> (last access 06/13/2020) respectively.

The majority of shell orientation data comes from experiments conducted with the shell in a convex-up position due to it being more hydrodynamic, as well as it being the regular position that shells are found on rocks or sediments whose genesis is linked to wave or current transported (Bailey & Erickson, 1973; Kreisa & Bambach, 1982; Posenato *et al.*, 2013; and many others). However, it is known that shells can be transported under smaller current velocities by short distances in a concave-up position until turn over and breaking the movement (Brenchley & Newall, 1970). In this condition, the elongated shells have a distinctive transport orientation behavior compared with convex-up transported shells, where the longer axis tends to stay perpendicular to the flow direction.

The orientation literature data (Nagle, 1967; Behrens & Watson, 1969; Futterer, 1978) from circular shaped shells (*Rhipidomela sp.*, *Andara ovalis*, *Chione cancellata*, *Glycymeris glycymeris*) moved in a convex-up position reveals that the umbo tends to point downstream. The *Codakia orbicularis* species' results agree with these data, since its threshold of motion data show greater values of critical shear stress for umbo downstream and umbo final orientation range measurements also pointing in the flow direction. Despite *Divaricella quadrisulcata* also having the most stable position with the umbo downstream, the final orientation measurements show that when this species started to move with the umbo pointing upstream, they can keep this orientation until stopping their movement. Due to these contradictory results, it is difficult to infer how *D. quadrisulcata* valves would be oriented in palaeocurrent analysis.

Conclusions

In laboratory flumes, this research investigated the threshold of motion and final orientation of the bivalve mollusc shells *Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia orbicularis*, and *Divaricella quadrisulcata* when transported by currents. The results achieved lead to the subsequent conclusions:

- Half-valves in a convex-up position are entrained at higher flow energy when the umbo is initially pointing downstream rather than upstream.
- Half-valves transported in a convex-up position / umbo downstream do not stop their movement. Contrarily, when the umbo is initially pointing upstream, the shells spin on a horizontal plane, acquiring a more hydrodynamic position and then stop moving.

- Threshold of motion differences between species can be related to the shell shape with regard to the relationship between shell mass and frontal shell area struck by the current.
- Shells transported over a less rough bed present critical Shields parameter values far below the Shields curve.
- Circular shaped shells transported in a convex-up position tend to be oriented with the umbo pointing downstream.
- Elliptical shaped shells transported in a convex-up position tend to be oriented with the long axis parallel to the flow and umbo from different valve sides pointing to the opposite flow margins (bimodal pattern).
- The bimodal umbo orientation pattern for elliptical shaped shells also occurs in a shell bed scenario.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the IPH (UFRGS' Instituto de Pesquisas Hidráulicas) and NECOD (Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade) for the use of their infrastructure to develop of this research.

NOTATIONS

A = wet area (m^2)

a = shell's longest axis (m)

b = shell's intermediated axis (m)

c = shell's inferior axis

D_n = nominal diameter (m)

D_{sv} = sieve diameter (m)

D/k_s = ratio between shell D_{sv} and mean bed D_{sv}

F_D = drag force (N)

F_L = lift force (N)

H = flow depth (m)

P = wet perimeter (m)

Q = discharge ($m^3 s^{-1}$)

Re^* = grain's Reynolds number

S = flume slope

S_{ac} = projected area on plan formed by the axes a and c (m^2)

u^* = shear velocity ($m\ s^{-1}$)

V = shell volume (m^3)

W = submerged weight (N)

γ_s = specific weight of the shell ($N\ m^{-3}$)

γ = specific weight of the water ($N\ m^{-3}$)

θ_{cr} = critical Shields parameter

ρ = specific mass of the water ($Kg\ m^{-3}$)

ρ_s = specific mass of the shell ($Kg\ m^{-3}$)

$\tau_{b,cr}$ = critical shear stress (Pa)

ψ = bed slope angle

ψ_r = repose angle

REFERENCES

- Allen, J.R.L. 1984. Experiments on the terminal fall of the valves of bivalve molluscs loaded with sand trapped from a dispersion. *Sedimentary Geology*, 39 (3) 197-209.
- Andrews E.D. 1983. Entrainment of gravel from naturally sorted riverbed material. *Geological Society of America Bulletin*, 94 (10), 1225-1231.
- Bailey, L.T. & Erickson, M.J. 1973. Preferred orientation of bivalve shells in the Upper Timber Lake Member, Fox Hills Formation in North Dakota - Preliminary interpretations. *The Compass of Sigma Gamma Epsilon*, 50 (2), 23–37.
- Behrens, E. W. & Watson, R. L., 1969. Differential sorting of pelecypod valves in the swash zone. *Journal of sedimentary Petrology*, 39 (1) 159-165.
- Brenchley P.J. & Newall G. 1970. Flume experiments on the orientation and transport of models and shells valves. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 4 (3) 185-220.
- Buffington, J.M. & Montgomery D.R. 1997. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources Research*, 33 (8), 1993-2029.

- Calliari, L.J. & Klein, A.H.F. 1993. Características Morfodinâmicas e Sedimentológicas das Praias Oceânicas Entre Rio Grande e Chuí. RS. Pesquisas, 20, 48–56.
- Carvalho, M.D., Praça, U.M., Silva-Telles, A.C., Jahnert, R.J. & Dias, J.L. 2000. Bioclastic carbonate lacustrine fácies models in the Campos Basin (Lower Cretaceous), Brazil. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology 46, 245–256.
- Charó, M.P., Gordillo S., Fucks E.E. & Giaconi, L.M. 2014. Late Quaternary molluscs from the northern San Matías Gulf (Northern Patagonia, Argentina), southwestern Atlantic: Faunistic changes and paleoenvironmental interpretation. Quaternary International, 352, 26-47.
- Chattopadhyay D., Rathie A. & Das A. 2013. The effect of morphology on postmortem transportation of bivalves and its taphonomic implications. Palaios, 28 (4), 203-209.
- Church, M.A., McLean, D.G. & Wolcott, J.F. 1987. River bed gravels: Sampling and analysis. *In*: Thorne, C.R., Bathurst, J.C. & Hey R.D. (Eds.). Sediment transport in gravel-bed rivers. Chichester, Wiley, p. 43-88.
- Dey, S. 2003. Incipient motion of bivalve shells on sand beds under flowing water. Journal of Engineering Mechanics., 129 (2), 232–240.
- Diedericks G.P.J., Troch C.C.A. & Smit, G.J.F. 2018. Incipient Motion of Shells and Shell Gravel. Journal of Hydraulic Engineering, 144 (3), 1-9.
- Egiazarof, I. (1965). Calculation of non-uniform sediment concentrations. Journal of the Hydraulic Division, 91(4) , 225-247.
- Fick, C., Puhl, E. & Toldo, E.E. 2020. Threshold of motion of bivalve and gastropod shells under oscillatory flow in flume experiments. Sedimentology, 67 (1), 627-648.
- Fisher, J., Sill, B., & Clark, D. 1983. Organic Detritus Particles: Initiation of Motion Criteria on Sand and Gravel Beds. Water Resources Research, 19 (6), 1627-1631.

- Fornari, M., 2010. Evolução sedimentar holocênica da retrobarreira na região de Jaguaruna-Laguna, Santa Catarina. Ph.D.thesis. Universidade de São Paulo, São Paulo, 290 pp.
- Futterer E. 1982. Experiments on the Distinction of Wave and Current Influenced Shell Accumulations. *In: Einsele G. & Seilacher A. (Eds.). Cyclic and Event Stratification. Berlin-Heidelberg, Springer, p. 175-179.*
- Jahnert, R., Paula, O., Collins, L., Strobach, E. & Pevzner, R. 2012. Evolution of a coquina barrier in Shark Bay, Australia by GPR imaging: Architecture of a Holocene reservoir analog. *Sedimentary Geology*, 281, 59–74.
- Kelling, G. & Williams, P.F. 1967. Flume studies of the reorientation of pebbles and shells. *The Journal of Geology*, 75 (3), 243-267.
- Kidwell, S.M., Fürsich & F.T., Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios*, 1 (3), 228-238.
- Li, Y., Yu, Q., Gao, S. & Flemming B.W. 2020. Settling velocity and drag coefficient of platy shell fragments. *Sedimentology*, 67, 2095–2110
- Magalhaes, L., & Chau, T. S. 1983. Initiation of motion conditions for shale sediments. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 10 (3), 549–554.
- Mantz, P.A. 1977. Incipient transport of fine grains and flakes by fluids extended Shields diagram. *Journal of the Hydraulics Division*, 103 (6), 601–615.
- Middleton, G.V. 1967. The orientation of concavo-convex particles deposited from experimental turbidity currents. *Journal of sedimentary Petrology*, 37, 229-239.
- Miller, R., & Byrne, R. (1966). The angle of repose for a single grain on a fixed rough bed. *Sedimentology*, 6 (4), 303-314.
- Miller, M.C., McCave, I.N. & Komar, P.D. 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, 24, 507–527.

- Muniz, M.C. & Bosence, D.W.J. 2018. Lacustrine carbonate platforms: Facies, cycles, and tectonosedimentary models for the presalt Lagoa Feia Group (Lower Cretaceous), Campos Basin, Brazil. *AAPG Bulletin*, 102, 2569 - 597.
- Nagle, J.S. 1967. Wave and current orientation of shells. *Journal of sedimentary petrology*, 37 (4), 1124-1138.
- Newell A.J., Gower, D.J. Benton, M.J. & Tverdokhlebov, V.P. 2007. Bedload abrasion and the in situ fragmentation of bivalve shells. *Sedimentology*, 54(4), 835 - 845.
- Oliveira, V.C.B., Silva, C.M.A., Borghi, L.F. & Carvalho, I.S. 2019. Lacustrine coquinas and hybrid deposits from rift phase: Pre-Salt, lower Cretaceous, Campos Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 95, 102254.
- Olivera, A.M. & Wood, W.L. 1997. Hydrodynamics of bivalve shell entrainment and transport. *Journal of Sedimentary Research*, 67 (3), 514–526.
- Paphitis, D., Collins, M.B., Nash, L.A. & Wallbridge, S. 2002. Settling velocities and entrainment thresholds of biogenic sands shell fragments under unidirectional flow. *Sedimentology*, 49 (1), 211–225.
- Posenato, R., Bassi, D. & Avanzini, M. 2013. Bivalve pavements from shallow-water blackshales in the Early Jurassic of northern Italy: a record of salinity and oxygen depleted environmental dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 369, 262–271.
- Prager, E.J., Southard, J.B. & Vivoni-Gallart, E.R. 1996. Experiments on the entrainment threshold of well-sorted and poorly sorted carbonate sands. *Sedimentology*, 43 (1), 33–40.
- Radley, J.D. 2011. Biostratigraphic signature of penarth group (upper triassic) shell concentrations (Severn Estuary, South-West England): A preliminary account. *Geoscience in South-West England* 12(4), 351-355.
- Ramsdell, R.C. & Miedema, S.A. 2010. Hydraulic transport of sand/shell mixtures. *Proc., WODCON XIX.*, Beijing.

- Rieux, A., Weill, P., Mouaz, D., Poirier, P., Nechenache, F., Perez, L. & Tessier, B. 2019. Threshold of motion and settling velocities of mollusc shell debris: Influence of faunal composition. *Sedimentology*, 66 (3), 895-916.
- Schwartz, T.M. & Graham, S.A. 2015. Stratigraphic architecture of a tide-influenced shelf-edge delta, Upper Cretaceous Dorotea Formation, Magallanes-Austral Basin, Patagonia. *Sedimentology*, 62, 1039-1077.
- Shields, A. 1936. Anwendung Der Aenlichkeitsmechanik und Der Turbulenzforschung Auf Die Geschiebebewegung. *In: Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, Berlin, bull. 26.* (English translation: W.P. Ott & J.C. van Uchelen. California Institute of Technology, Pasadena, Publication 167).
- Smith, D.A. & Cheung, K.F. 2004. Initiation of Motion of Calcareous Sand. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (5), 467–472.
- Tavares, A.C., Borghi, L.F., Corbett, P., Nobre-Lopes, J. & Câmara, R., 2015. Facies and depositional environments for the coquinas of the Morro do Chaves Formation, Sergipe-Alagoas Basin, defined by taphonomic and compositional criteria. *Brazilian Journal of Geology* 45 (3), 415–429.
- Trewin, N.H. & Welsh, W. 1972. Transport, breakage and sorting of the bivalve *Mactra corallina* on Aberdeen beach, Scotland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Plaeoecology*, 12, 193-204.
- Vogel, S. 1994. *Life in Moving Fluids*. Princeton University Press, New Jersey, 467 p.
- Weill, P., Mouazé D., Tessier, B. & Brun-Cottan, J.C. 2010. Hydrodynamic behavior of coarse bioclastic sand from shelly cheniers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (14), 1642-1654.
- Weill, P., Mouazé, D. & Tessier, B., 2013 Internal architecture and evolution of bioclastic beach ridges in a megatidal chenier plain: Field data and wave flume experiment. *Sedimentology*, 60 (5), 1213–1230.
- Wendt, J. 1995. Shell directions as a tool in palaeocurrent analysis. *Sedimentary Geology*, 95, 161-186.

Wiberg, P.L. & Smith, J.D. 1987. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*, 23 (8), 1471–1480.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão bibliográfica (capítulo 3.2) e dos resultados e discussões expostos no capítulo 6 desta dissertação, extrai-se as seguintes conclusões e considerações sobre o transporte de conchas pela ação de correntes:

- As valvas (desarticuladas e não fragmentadas) de moluscos bivalves posicionadas com a convexidade para cima são mais hidrodinâmicas quando o umbo está inicialmente voltado para jusante. Além disso, a tensão de cisalhamento crítica possui uma correlação positiva forte com a distribuição de tamanho das valvas. Para esta orientação inicial, constatou-se que as valvas não cessam seu movimento após estarem em transporte.
- As valvas com o umbo inicialmente para montante necessitam de menores magnitudes de escoamento para serem postas em movimento e também revelam que há pouca diferença na condição crítica de início de movimento entre conchas de tamanhos distintos. Valvas mobilizadas com o umbo inicialmente para montante, enquanto se deslocam no sentido da corrente, tendem a girar em torno de seu eixo vertical até adquirirem uma orientação de maior estabilidade hidrodinâmica. Este fenômeno faz com que as conchas interrompam seu deslocamento.
- Quanto a forma das conchas, observou-se que valvas de espécies diferentes, que possuem tamanho e massa semelhantes, podem gerar valores distintos de tensão crítica de cisalhamento ($\tau_{b,cr}$). Espécies que possuem uma maior área frontal (área atacada pelo sentido preferencial da corrente) tendem a ser mobilizadas com menores valores de $\tau_{b,cr}$.
- Conchas, quando transportadas sobre leitos de textura inferior ($D/k_s > 1$), possuem comportamento similar a grãos esféricos, registrando valores do coeficiente de força trativa de Shields (θ_{cr}) inferiores aos dados da literatura para condições de $D/k_s \approx 1$.
- Conchas de geometria elíptica, transportadas com a convexidade para cima, tendem a se orientar com o eixo de maior comprimento paralelo ao sentido da corrente. Além disso, as valvas espelhadas (esquerda e direita) apontam o umbo para margens opostas do escoamento, configurando um padrão bimodal. Este padrão diagnóstico ocorre tanto para conchas solitárias sendo transportadas em um leito de textura inferior quanto em um leito totalmente compostos por conchas.

- Conchas de geometria circular, transportadas com a convexidade para cima, tendem a apontar o umbo no sentido do escoamento.

Os dados adimensionalizados de início de movimento para o transporte de conchas de moluscos bivalves sob leitos de textura inferior adquiridos até o presente momento (capítulo 6; Dey 2003; Diedericks *et al.*, 2018) não abordam todas as possíveis orientações iniciais de valvas desarticuladas e não fragmentadas. Recomenda-se, em trabalhos futuros, o levantamento de dados dessa natureza para conchas posicionadas com a concavidade para cima e com diferentes orientações do umbo.

8 REFERÊNCIAS

- Allen, J.R.L. 1984. Experiments on the terminal fall of the valves of bivalve molluscs loaded with sand trapped from a dispersion. *Sedimentary Geology*, 39 (3) 197-209.
- Bailey, L.T. & Erickson, M.J. 1973. Preferred orientation of bivalve shells in the Upper Timber Lake Member, Fox Hills Formation in North Dakota - Preliminary interpretations. *The Compass of Sigma Gamma Epsilon*, 50 (2), 23–37.
- Behrens, E. W. & Watson, R. L., 1969. Differential sorting of pelecypod valves in the swash zone. *Journal of sedimentary Petrology*, 39 (1) 159-165.
- Brenchley P.J. & Newall G. 1970. Flume experiments on the orientation and transport of models and shells valves. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 4 (3) 185-220.
- Buffington, J.M. & Montgomery, D.R. 1997. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources. Research*, 33 (8), 1993–2029.
- Cao, Z., Pender, G. & Meng, J. (2006) Explicit formulation of the Shields diagram for incipient motion of sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132 (10), 1097–1099.
- Cardoso, A. H., 1998. *Hidráulica Fluvial*. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, p. 314.
- Casey, H.J. 1935. *Über Geschiebebewegung*. *In: Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, Berlin, boletim 19.
- Chattopadhyay D., Rathie A. & Das A. 2013. The effect of morphology on postmortem transportation of bivalves and its taphonomic implications. *Palaios*, 28 (4), 203-209.
- Church, M.A., McLean, D.G. & Wolcott, J.F. 1987. River bed gravels: Sampling and analysis. *In: Thorne, C.R., Bathurst, J.C. & Hey R.D. (Eds.). Sediment transport in gravel-bed rivers*. Chichester, Wiley, p. 43-88.
- Compton, R.R. 1962. *Manual of field geology*. Nova Iorque, Wiley, p. 378.

- Crowell, J.C., Hope, R.A., Kahle, J.E., Ovenshine, A.T. & Sams, R.H., 1966. Deep-water sedimentary structures, Pliocene Pico Formation, Santa Paula Creek, Ventura Basin, California. California Division of Mines and Geology, Relatório 89, 1-44.
- Dey, S. 2003. Incipient motion of bivalve shells on sand beds under flowing water. *Journal of Engineering Mechanics*, 129 (2), 232–240.
- Dey, S. 2014. *Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena*. Springer, Berlin, p. 706.
- Dey, S. 2019. Bed sediment entrainment by streamflow: State of the science. *Sedimentology*, 66 (5), 1449–1485.
- Diedericks G.P.J., Troch C.C.A. & Smit, G.J.F. 2018. Incipient Motion of Shells and Shell Gravel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144 (3), 1-9.
- Everts, C.H. 1973. Particle overpassing on flat granular boundaries. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 99 (4), 425-438.
- Fick, C., Toldo, E.E. & Puhl, E. 2018. Shell concentration dynamics driven by wave motion in flume experiments: Insights for coquina facies from lake-margin settings. *Sedimentary Geology*, 374, 98-114.
- Fick, C., Puhl, E. & Toldo, E.E. 2020. Threshold of motion of bivalve and gastropod shells under oscillatory flow in flume experiments. *Sedimentology*, 67 (1), 627-648.
- Fisher, J., Sill, B., & Clark, D. 1983. Organic Detritus Particles: Initiation of Motion Criteria on Sand and Gravel Beds. *Water Resources Research*, 19 (6), 1627-1631.
- Fornari, M., Giannini, P.C.F. & Nascimento, D.R. 2012. Facies associations and controls on the evolution from a coastal bay to a lagoon system, Santa Catarina Coast, Brazil. *Marine Geology*, 323-325, 56-68.
- Futterer, E. 1978. Untersuchungen tiber die Sink- und Transportgeschwindigkeit biogener Hartteile. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 155, 318-359.

- Futterer E. 1982. Experiments on the Distinction of Wave and Current Influenced Shell Accumulations. *In: Einsele G. & Seilacher A. (Eds.). Cyclic and Event Stratification. Berlin-Heidelberg, Springer, p. 175-179.*
- Gessler, J. 1971. Beginning and ceasing of sediment motion. *In: H. W. Shen (Ed.). River Mechanics, Water Resources Publication, Fort Collins, Cap. 7.*
- Gilbert, G. K. 1914. Transportation of debris by running water. Relatório 86, U.S.G.S., Washington, D.C.
- Grass, A.J. 1970. Initial instability of fine bed sand. *Journal of the Hydraulics Division, 96 (3), 619–632.*
- Hjulström, F. 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bulletin of the Geological Institute of Uppsala, 25, 221-527.*
- Joshi, S., Duffy, G.P. & Brown, C. 2017. Critical bed shear stress and threshold of motion of maerl biogenic gravel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 194, 128–142.*
- Kelling, G. & Williams, P.F. 1967. Flume studies of the reorientation of pebbles and shells. *The Journal of Geology, 75 (3), 243-267.*
- Kennedy, J.F. 1995. The Albert Shields Story. *Journal of Hydraulic Engineering, 121 (11), 766-772.*
- Kidwell, S.M., Fürsich & F.T., Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios, 1 (3), 228-238.*
- Komar, P.D. & Clemens, K.E. 1986. The relationship between a grain's settling velocity and threshold of motion under unidirectional currents. *Journal of Sedimentary Petrology, 56 (2), 258-266.*
- Kramer, H. 1932. Modellgeschiebe und Schleppkraft. *In: Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, boletim 9.*
- Li, Y., Yu, Q., Gao, S. & Flemming B.W. 2020. Settling velocity and drag coefficient of platy shell fragments. *Sedimentology, 67, 2095–2110*

- Magalhaes, L., & Chau, T. S. 1983. Initiation of motion conditions for shale sediments. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 10 (3), 549–554.
- Mantz, P.A. 1977. Incipient transport of fine grains and flakes by fluids extended Shields diagram. *Journal of the Hydraulics Division*, 103 (6), 601–615.
- Mehta, A.J., Lee, J. & Christensen, B.A. 1980. Fall velocity of shells as coastal sediment. *Journal of the Hydraulics Division*, 106 (11), 1727-1744.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. *In: Meeting of International Association for Hydraulic Research, 1948, Estocolmo. Anais... IAHR, v. 3, p. 39-64.*
- Miller, R., & Byrne, R. 1966. The angle of repose for a single grain on a fixed rough bed. *Sedimentology*, 6 (4), 303-314.
- Nagle, J.S. 1967. Wave and current orientation of shells. *Journal of sedimentary petrology*, 37 (4), 1124-1138.
- Neill, C.R. 1967. Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed material. *In: Congresso internacional da associação de pesquisa hidráulica, 12, 1967, Fort Collins. Anais... IAHR, v. 3, p. 46–54. Fort Collins.*
- Newell A.J., Gower, D.J. Benton, M.J. & Tverdokhlebov, V.P. 2007. Bedload abrasion and the in situ fragmentation of bivalve shells. *Sedimentology*, 54(4), 835-845.
- Owens, J. 1908. Experiments on the transporting power of sea currents. *The Geographical Journal*, 31 (4), 415–425.
- Paphitis, D., Collins, M.B., Nash, L.A. & Wallbridge, S. 2002. Settling velocities and entrainment thresholds of biogenic sands shell fragments under unidirectional flow. *Sedimentology*, 49 (1), 211–225.
- Prager, E.J., Southard, J.B. & Vivoni-Gallart, E.R. 1996. Experiments on the entrainment threshold of well-sorted and poorly sorted carbonate sands. *Sedimentology*, 43 (1), 33–40.

- Ramsdell, R. C., & Miedema, S. A. 2010. Hydraulic transport of sand/ shell mixtures. *In: WODCON, 19, 2010, Pequim. Anais... Port Klang, EADA, v. 2, p. 1039-1059.*
- Rieux, A., Weill, P., Mouaz, D., Poirier, P., Nechenache, F., Perez, L. & Tessier, B. 2019. Threshold of motion and settling velocities of mollusc shell debris: Influence of faunal composition. *Sedimentology, 66 (3), 895-916.*
- Robert, A. 2003. *River Processes: An Introduction to Fluvial Dynamics.* Oxford University Press, Nova Iorque, p. 224.
- Rouse, H. 1939. An analysis of sediment transportation in the light of fluid turbulence. Soil Conservation Services, Relatório SCS-TP-25, USDA, Washington D.C.
- Schlichting H & Gersten K. 2000. *Boundary-layer theory. Vol. 8.* Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, p. 802.
- Sherman, D.J., Davis, L. & Namikas, S.L. 2013. Sediments and sediment transport. *In: Shroder, J., Orme, A.R., Sack, D. (Eds.). Treatise on Geomorphology, The Foundations of Geomorphology.* San Diego, Academic Press, p. 233-256.
- Shields, A. 1936. Anwendung Der Aenlichkeitsmechanik und Der Turbulenzforschung Auf Die Geschiebebewegung. *In: Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, Berlin, boletim 26. (Tradução para o inglês: W. P. Ott, J. C. van Uchelen. California Institute of Technology, Pasadena, Publicação 167).*
- Simões, M.G., Rodrigues, S.C., Leme, J.M. & Bissaro, M. C. Jr. 2005. The settling pattern of brachiopod shells: stratigraphic and taphonomic implications to shell bed formation and paleocology. *Revista brasileira de Geociências, 35 (3), 383-391.*
- Smith, D.A. & Cheung, K.F. 2004. Initiation of Motion of Calcareous Sand. *Journal of Hydraulic Engineering, 130 (5), 467–472.*
- Underwood, C.J. 1994. Faunal transport within event horizons in the British Upper Silurian. *Geological Magazine, 131(4), 485-498.*

- Van Rijn LC. 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publication, Amsterdam, p. 690.
- Weill, P., Mouazé D., Tessier, B. & Brun-Cottan, J.C. 2010. Hydrodynamic behavior of coarse bioclastic sand from shelly cheniers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (14), 1642-1654.
- Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30 (5), 377–392.
- White, C.M. 1940. The equilibrium of grains on the bed of a stream. *Proceedings of the Royal Society A Math. Phy. and Engr sci.*, 174 (958), 322-338.
- White, S.J. 1970. Plane bed thresholds of fine-grained sediments. *Nature*, 228 (5267), 152-153.
- Wiberg, P.L. & Smith, J.D. 1987. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*, 23 (8), 1471–1480.
- Yalin, M. S. 1972. *Mechanics of Sediment Transport*. Nova Iorque, Pergamon Press, p. 290.
- Yalin, M.S. & Karahan, E. 1979. Inception of sediment transport. *Journal of the Hydraulics Division*, 105 (11), 1433–1443.