



**MOBILIZAÇÃO E TRANSPORTE DE CONCHAS BIVALVES SOB A AÇÃO DE  
CORRENTES.**

**Porto Alegre**

**2016**

**Felipe Rafael Secco da Silva**

**MOBILIZAÇÃO E TRANSPORTE DE CONCHAS BIVALVES SOB A AÇÃO DE  
CORRENTES.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia II, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientador:** Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

**Supervisora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Luiza de Oliveira Borges

**Porto Alegre**

**2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL****Reitor: Rui Vicente Oppermann****Vice Reitora: Jane Tutikian****INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS****Diretor: André Sampaio Mexias****Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber**

Silva, Felipe Rafael Secco da

Mobilização e transporte de conchas bivalves sob a ação de correntes./ Felipe Rafael Secco da Silva. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016.

[79 f.] il.

Monografia (trabalho de Conclusão do Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador: Elírio Ernestino Toldo Jr.

Coorientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

1. Conchas bivalves 2. Ação de correntes 3. Início de movimento  
4. Orientação de conchas I. Título.

CDU.55

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sibila F. T. Binotto

CRB 10/1743

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE GEOCÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso "**MOBILIZAÇÃO E TRANSPORTE DE CONCHAS BIVALVES SOB A AÇÃO DE CORRENTES**", elaborado por Felipe Rafael Secco da Silva, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Me. Michel Doeppre Ivanof

---

Prof. Dr. Ricardo Baitelli

---

Prof. Dr. Sérgio Rebello Dillenburg

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, meu irmão e a Laís, que sempre me deram apoio de seguir em frente nas minhas decisões. Mãe, te agradeço por tudo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que me deu a oportunidade de cursar um curso de graduação em Geologia de alta qualidade.

À sociedade brasileira, que, através da arrecadação de impostos, financia o ensino público superior.

Aos meus amigos de Gravataí, Alice, Kamila, Matheus e Ronei, pessoas com quem compartilhem bons momentos no decorrer do curso.

A todos colegas do NECOD, que me deram assistência sempre que lhes pedi apoio. Em especial, a Carolina, o Cristian e a Débora, que me ajudaram como se fosse o trabalho deles.

Ao meu orientador, professor Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr., que aceitou me orientar sem hesito algum.

À minha supervisora, professora Dr.<sup>a</sup> Ana Luiza de Oliveira Borges, minha queridíssima chefe, a(o) melhor que já tive (acho que não vou ter outra(o) assim), que me entusiasmou a estudar o transporte de conchas.

## Resumo

No registro geológico, depósitos bioclásticos constituídos por conchas de diversas espécies ocorrem, por vezes, através do transporte posterior à morte desses organismos. Em muitos casos é atribuído à ação de correntes como o mecanismo trativo que carreou este sedimento. Com intuito de aprimorar o estado da arte de como conchas bivalves se comportam frente à ação de correntes, foram executados experimentos físicos em canais de laboratório que objetivaram determinar como as conchas orientam-se quando transportadas por este fenômeno e, também, relacionar a magnitude do escoamento necessária para carrear conchas de diferentes formas e tamanhos. Foi executada uma série de experimentos, na qual diferentes indivíduos representantes das espécies bivalves *Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* e *Divaricella quadrisulcata* foram submetidos à ação do escoamento. E uma segunda série de experimentos, onde um leito de conchas, composto, apenas, pela espécie *Anomalocardia brasiliiana*, foi submetido à ação de igual fenômeno. Este estudo demonstrou que as conchas, quando posicionadas com a convexidade para cima e com o umbo voltado contra o sentido da corrente, são mobilizadas a menores magnitudes do que quando o umbo está direcionado a favor do escoamento. Constatou-se, também, que espécies assimétricas, com um eixo mais alongado, quando transportadas por correntes, frequentemente, apontam o umbo da valva direita para a margem direita do escoamento e o umbo da valva esquerda para a margem esquerda (observador olhando para jusante). Os resultados deste estudo buscaram colaborar com o entendimento necessário para se estimar e determinar magnitudes e sentido cinemático de paleocorrentes em ambientes deposicionais com presenças de conchas bivalves.

**Palavras- chave:** conchas bivalves, ação de correntes, início de movimento e orientação das conchas.

## Abstract

On geologic record, bioclastic deposits made up by shells of several species occur by postmortem transportation of these organisms. In so many cases a transport mechanism appointed to be responsible for these deposits are water currents. In order to enhance the state of the art of how bivalve shells behave when they undergo the action of currents, physical experiments were performed in laboratory flumes that aimed to determine how the shells are guided when transported by this phenomenon and also to relate the magnitude of the flow required to entrain shells of different shapes and sizes. A series of experiments was carried out in which different individuals representing the bivalve species *Anomalocardia brasiliensis*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* and *Divaricella quadrisulcata* underwent the flow action. And a second series of experiments, in which a bed of shells, composed only by the species *Anomalocardia brasiliensis*, was tested to the same phenomenon. This study demonstrated that the shells, when are in a convex-up position and umbo facing to upstream, are entrained at lower magnitudes than with umbo pointing to downstream. It was also observed that asymmetric species, with a more elongated axis, when moved by currents, frequently point the right valve umbo to the right margin of the flow and the left valve umbo to the left margin (observer looking to downstream). The results of this study collaborated with the necessary understanding to estimate and determine magnitudes and kinematic direction of paleocurrent in depositional environments with bivalve shells presence.

**Key-words:** bivalve shells, current action, threshold transport and shell orientation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema das forças que atuam no volume de controle (Chang, 1987). .....	23
Figura 2. Esquema das forças atuantes numa partícula. FD= Força de Arraste, que atua no sentido da corrente; FL= Força de Sustentação, que é normal a FD; W= Força do peso submerso; e $\theta$ = ângulo do leito com a horizontal. (Cardoso, 1998). .....	24
Figura 3. Diagrama de Hjulström (Modificado de Nichols, 2009). .....	26
Figura 4. Diagrama de Shields (1936). .....	27
Figura 5. Padrão de orientação bimodal para conchas bivalves e unimodal para gastrópodes cônicos. (Modificado de Kidwell <i>et al.</i> , 1986). .....	31
Figura 6. Diagramas de roseta indicando padrões de orientação das conchas. A: <i>Spirifer</i> , B: <i>Turritella</i> , C: <i>Anadara</i> . As setas próximos aos espécimes mostram a convenção usada para retratar a orientação. (Modificado de Nagle, 1967). .....	32
Figura 7. Espécimes de conchas separadas para ensaio em modelo físico. A: <i>Anomalocardia brasiliana</i> (Gmelin,1791); B: <i>Codakia</i> (Gmelin,1791); C: <i>Divaricella quadrisulcata</i> (Orbigny,1846) D: <i>Diplodonta punctata</i> (Gmelin,1791). (Modificado de Fornari, 2010). ....	34
Figura 8. Distribuição granulométrica das conchas inteiras separadas. ....	35
Figura 9. Curva granulométrica das conchas inteiras separadas. ....	36
Figura 10. A - Orientação dos eixos a, b e c da concha. B - Discriminação das valvas esquerda e direita de uma concha. (Modificado de <a href="http://paleo.cortland.edu/tutorial/Bivalves/bivalvia.htm">http://paleo.cortland.edu/tutorial/Bivalves/bivalvia.htm</a> ). .....	37
Figura 11. Canal de alvenaria / Modelo físico. 1- Registro gaveta, 2- Posição do vertedor, 3- Trecho com parede de vidro 4- Trecho com fundo móvel, 5- Sistema de comporta jusante. ....	38
Figura 12. Vertedor à esquerda e comporta de jusante à direita. ....	38
Figura 13. Trecho com janela de vidro. 1- fossa preenchida com areia; 2- chapa de acrílico; 3- Areia colada sobre a chapa de acrílico. ....	38
Figura 14. a: Ponta Linimétrica, detalhe para parte graduada, onde é feita a leitura da medida. b: Ponta Linimétrica usada para levantamento da linha de água. ....	39



- Figura 15. Canal unidirecional de pequeno porte. 1: Reservatório de alimentação; 2: registro esfera do reservatório; 3: bombas centrífugas; 4: registro gaveta do controle da vazão; 5: registro esfera; 6: difusor de injeção do fluido; 7: colmeias de tranquilização; 8: fossa, 2 cm de profundidade e 63 cm de comprimento; 9: Registro esfera de saída com retorno para o reservatório; 10: Peneira para retenção de sedimento. M: Montante; J: Jusante; me: Margem esquerda; md: Margem direita. ....42
- Figura 16. Distribuição granulométrica dos espécimes peneirados referentes a espécie *Anomalocardia brasiliana*. ....43
- Figura 17. Fotografia das classes de conchas separadas por peneiramento. Espécie *Anomalocardia brasiliana*. ....44
- Figura 18. Curva de calibração da vazão pela abertura do registro gaveta. Os pontos azuis representam os pontos conhecidos, adquiridos no processo de calibração. ....44
- Figura 19. Câmera fotográfica Nikon D5000, e lente planar Carl Zeiss 1,4/85 mm ZF..... 44
- Figura 20. Fotografia tirada durante um determinado experimento para o levantamento da linha de água. M: Montante; J: Jusante. ....45
- Figura 21. Acima, fotografia do leito após ensaio. Abaixo, exemplo de como foi feita a leitura da orientação do umbo. M: Montante; J: Jusante. ....47
- Figura 22. Gráficos de início de movimento das espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata*, *Divaricella quadrisulcata*. No eixo vertical, a tensão de cisalhamento (esquerda) e a velocidade do escoamento (direita). No eixo horizontal a distribuição granulométrica de cada espécie. A linha vermelha representa o limite entre as fronteiras de repouso e transporte. ....49
- Figura 23. Razão tamanho/massa da espécie *Codakia*. O ponto vermelho mostra o espécime fora da tendência geral. ....50
- Figura 24. Fotografia das conchas das espécies *Anomalocardia brasiliana* (esquerda) e *Divaricella quadrisulcata* (direita). Conchas posicionadas com convexidade para cima e eixo b paralelo ao plano da fotografia. ....50
- Figura 25. Valores de início de movimento das espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* e *Divaricella quadrisulcata* plotados no diagrama de Hjulström. dn: diâmetro nominal. ....51

- Figura 26. Diagramas de Shields. Valores de início de movimento das espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* e *Divaricella quadrisulcata*. O diâmetro representativo utilizado tanto na tensão de cisalhamento adimensionalizada quanto no N° de Reynolds do Grão foi o diâmetro nominal dos espécimes. ....52
- Figura 27. Diagramas de Shields. Valores de início de movimento das espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* e *Divaricella quadrisulcata*. O diâmetro representativo utilizado tanto na tensão de cisalhamento adimensionalizada quanto no N° de Reynolds do Grão foi o diâmetro nominal dos espécimes. Os pontos representam o início do movimento nas situações em que o umbo está voltado para a jusante. A simbologia dos eixos é a mesma da figura 26. ....53
- Figura 28. Diagramas de Roseta apontam o sentido final do Umbo em função da distância para as espécies: A- *Anomalocardia brasiliana* (valva direita); B- *Anomalocardia brasiliana* (valva esquerda); C- *Divaricella quadrisulcata*; D- *Codakia*. Em todas as medidas, a posição inicial de cada espécime foi com umbo apontando para montante. N: quantidade de medições. ....54
- Figura 29. Esquema mostrando o campo de orientação do umbo para valva esquerda (campo preto) e para valva direita (campo branco). Escoamento da esquerda para direita. ME: Margem esquerda. MD: Margem direita. ....55
- Figura 30. Esquema ilustrando a distribuição da força que empurra a concha ao longo do eixo *a*. Espécie *Anomalocardia brasiliana*. 1: valva esquerda; 2: valva direita. Seta vermelha representa a força aplicada próximo ao centro de massa da concha, as setas pretas representam a força aplicada ao longo dos semi-eixos *a'* e *a''*. As setas azuis indicam a direção dos eixos da concha.....55
- Figura 31. Gráfico mostrando o fator de assimetria  $a'/a''$  para as espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* e *Divaricella quadrisulcata*. ....56
- Figura 32. Gráfico mostrando a relação de velocidade do escoamento e massa transportada para os 8 ensaios realizados. A curva representa uma linha de tendência da distribuição dos pontos e, ao lado, sua equação. ....57
- Figura 33. Gráfico relacionando a massa transportada para cada fração granulométrica. No eixo das abscissas, o tamanho está representado pelo valor médio de seu intervalo granulométrico. ....58

- Figura 34. Gráfico relacionando o percentual transportado/disponível no leito para as frações granulométricas de 2 a 12,70 mm. No eixo das abscissas, o tamanho está representado pelo valor médio de seu intervalo granulométrico. ....59
- Figura 35. Fotografias de topo dos ensaios E2, E2R, E4 e E4R antes do início do ensaio. ....61
- Figura 36. Gráficos dos ensaios: E1R, E2R, E3, E3R, E4 e E4R. Os gráficos mostram a massa transportada em cada coleta ao longo do tempo. Os rótulos acima das barras representam o tamanho médio (em mm) do material coletado em cada intervalo de coleta. A linha vermelha mostra a média das massas coletadas (mcm). Na legenda, Q: vazão; V: velocidade média da corrente; mcm: média das massas coletadas. O eixo vertical dos gráficos estão em escala logarítmica de base 5 com exceção do E1R que é de base 10. ....63
- Figura 37. *Hiding-sheltering effect*. Partículas maiores protegem as menores do escoamento. (Modificado de Southard, 2006). ....64
- Figura 38. Gráfico relacionando o diâmetro máximo em função da vazão. Os losangos sólidos apresentam os valores encontrados em cada ensaio. A linha preta representa a linha de tendência da distribuição dos pontos e no canto superior esquerdo, sua respectiva equação. ....65
- Figura 39. Diagramas de roseta indicando a orientação do umbo para as conchas posicionadas com o lado convexo para cima ao fim dos experimentos.....66

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Orientação inicial das conchas antes dos experimentos. ....	19
Tabela 2. Relação das peneiras utilizadas. ....	34
Tabela 3: Classificação e caracterização de 27 espécimes. ....	36
Tabela 4: Parâmetros do ensaios e material coletado. ....	56
Tabela 5: Valores de T/C e C para todos ensaios. ....	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A: área da seção do escoamento ( $m^2$ )
- a: eixo maior da concha (mm)
- a': semi-eixo maior do eixo a (mm)
- a'': semi-eixo menor do eixo a (mm)
- $A_g$ : Área do grão atacada pela corrente.
- b: eixo intermediário da concha (mm)
- c: eixo menor da concha (mm)
- $d$ : diâmetro do grão (m)
- $d_n$ : diâmetro nominal (mm)
- $d_{50}$ : diâmetro que representa a mediana da distribuição granulométrica (mm)
- $d_{90}$ : diâmetro maior que 90% dos tamanhos presentes na distribuição granulométrica (mm)
- $F_D$ : força de arraste (N)
- $F_L$ : força de sustentação (N)
- Fr: Número de Froude (-)
- g: aceleração da gravidade ( $m\ s^{-2}$ )
- H: profundidade do escoamento (m)
- $m_{c_{1,2,3e4}}$ : massa coletada de cada umas dessas frações (g)
- MD: Margem direita
- ME: margem esquerda
- $Mf_{1,2,3e4}$ : médias das frações de 2-5,6 mm, 5,6-7,92 mm, 7,92-9,52 mm e 9,52-12,7 mm
- $Mf$ : média da fração (mm)
- $Mp$ : média aritmética ponderada (mm)
- N: Número de medidas (diagramas de roseta)
- P: perímetro do canal em contato com o fluido (m)
- Q: vazão ( $l\ s^{-1}$ )
- Re: Número de Reynolds (-)
- $R_*$ : número de Reynolds do grão (-)
- S: declividade do canal (%)
- SF: fator de forma de Corey (-)
- $T_{máx}$ : tamanho máximo transportado (mm)
- $U_*$ : velocidade de cisalhamento ( $m\ s^{-1}$ )
- V: velocidade média do escoamento ( $m\ s^{-1}$ )

W: peso do fluido

Ws: peso submerso da partícula

$X_1$  e  $X_2$ : limites inferior e superior de cada fração (mm)

$\gamma$ : peso específico do fluido ( $\text{N m}^{-3}$ )

$\gamma_s$ : peso específico do sólido ( $\text{N m}^{-3}$ )

$\nu$ : viscosidade cinemática ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

$\rho$ : massa específica do fluido ( $\text{Kg m}^{-3}$ )

$\tau$ : Tensão de cisalhamento (Pa)

$\tau_0$ : Tensão de cisalhamento junto ao leito (Pa)

$\tau_*$ : tensão de cisalhamento adimensionalizada (-)

$\nabla$ : volume da concha ( $\text{cm}^3$ )

## Sumário

<b>1. Introdução</b> .....	17
1.1. Problema e hipótese .....	18
<b>2. Objetivos e Metas</b> .....	20
<b>3. Revisão conceitual</b> .....	21
3.1. Tipos de escoamento .....	21
3.1.1. Escoamento laminar x escoamento turbulento .....	21
3.1.2. Escoamento lento e rápido .....	21
3.1.3. Escoamentos permanentes e variáveis .....	22
3.1.4. Escoamentos uniformes .....	22
3.2. Tensão de cisalhamento em escoamento uniforme .....	22
3.3. Início do movimento de grãos .....	24
<b>4. Contextualização teórica</b> .....	26
4.1. Início de transporte sólido .....	26
4.1.1. Diagrama de Hjulström (1935) .....	26
4.1.2. Diagrama de Shields (1936) .....	26
4.2. Mobilização de conchas .....	28
4.2.1. Olivera & Wood (1997) .....	29
4.2.2. Dey (2003) .....	29
4.2.3. Chattopadhyay et al. (2013) .....	30
4.3. Orientação das conchas .....	30
<b>5. Metodologia</b> .....	33
5.1. Escolha do material a ser ensaiado .....	33
5.2. Distribuição e curva granulométrica .....	34
5.3. Propriedades físicas do sedimento .....	35
5.4. Ensaio em modelo físico – espécimes individuais .....	37
5.4.1. Canal de alvenaria .....	37
5.4.2. Material ensaiado .....	39
5.4.3. Dados do escoamento .....	39
5.4.4. Descrição do experimento .....	40
5.4.5. Ensaio realizado .....	41
5.5. Ensaio em modelo físico – leito de conchas .....	41

5.5.1. Canal unidirecional de pequeno porte .....	42
5.5.2. Material ensaiado – Espécie <i>Anomalocardia brasiliana</i> .....	42
5.5.3. Dados do escoamento .....	44
5.5.4. Descrição do experimento .....	45
5.5.5. Pós-experimento .....	46
5.5.5.1. Material transportado .....	46
5.5.5.2. Fotografias de topo .....	46
<b>6. Resultados e discussões</b> .....	<b>48</b>
6.1. Ensaio com espécimes individuais .....	48
6.1.1. Início do movimento .....	48
6.1.2. Início do movimento : Hjulström (1935) .....	51
6.1.3. Início do movimento : Shields (1936) .....	52
6.1.4. Orientação do Umbo .....	53
6.2. Ensaio sobre leito de conchas – Espécie <i>Anomalocardia brasiliana</i> .....	56
6.2.1. Capacidade de transporte – massa total transportada .....	57
6.2.2. Competência de transporte – massa total transportada .....	57
6.2.3. Relação – textura inicial / massa transportada .....	59
6.2.4. Capacidade de transporte – massa coletada no tempo .....	62
6.2.5. Competência de transporte – massa coletada .....	64
6.2.6. Orientação do Umbo .....	65
<b>7. Conclusões</b> .....	<b>68</b>
<b>8. Considerações e recomendações</b> .....	<b>69</b>
8.1. Quanto à continuidade do estudo .....	69
8.2. Quanto ao processo de colorir as conchas .....	69
8.3. Quanto à coleta de sedimento ao longo do ensaio .....	69
<b>9. Referências Bibliográficas</b> .....	<b>70</b>
<b>10. Anexos</b> .....	<b>73</b>



## 1. Introdução

A erosão, o transporte e a deposição de sedimentos são processos fundamentais na geologia física, pois sem a atuação desses mecanismos o intemperismo cessaria, o relevo não se modificaria e a deposição nas margens continentais se interromperia (Suguio, 2003). Devido a isso, a compreensão destes fenômenos é alvo de constantes questionamentos, e buscar detalhar relações minuciosas entre o sedimento e seu agente geológico transportador parece ser um trabalho inesgotável.

A ação de correntes, seja dominada pela gravidade como as aluviais e fluviais, seja pela força dos ventos como as correntes de retorno e de deriva litorânea (correntes costeiras), entre outras, é o mais significativo mecanismo de transporte de sedimentos (Nichols, 2009). Sendo assim, o sedimento torna-se uma ferramenta indispensável para inferir este mecanismo quanto a sua magnitude, direção e sentido.

No que tange ao universo dos sedimentos bioclásticos, este mecanismo de transporte também se faz presente. Um exemplo a ser citado são as correntes de *spillover*, que são inferidas como as responsáveis pela arquitetura de fácies de cristas convexas nos depósitos de coquinas em *Shark Bay* oeste da Austrália (Jahnert *et al.*, 2012). Segundo estes autores, essas correntes de *spillover*, ao extravasarem sobre cordões litorâneos ricos em conchas, em eventos de ressaca do mar, carregam este sedimento (em direção ao mar) gerando depósitos de camadas centimétricas de conchas, bem organizadas e, normalmente, orientadas com seu lado côncavo para baixo.

Deste modo, este sedimento, conchas, possui importância no registro geológico como caracterizador da ação de correntes, fazendo-se necessário o conhecimento prévio de seu comportamento perante a esse agente transportador de sedimento. Esta previsão pode ser feita através de três formas: pela analogia com ambientes de sedimentação atuais, por modelos matemáticos ou através de modelos físicos em laboratório. Este último possui muitas facilidades, pois em laboratório permite-se conhecer e controlar os parâmetros hidrodinâmicos envolvidos no mecanismo de transporte dos sedimentos, tais como sua vazão, velocidade direção e sentido, correlacionando-os ao efeito gerado no sedimento.

Na literatura, listam-se diversos trabalhos experimentais que relatam o comportamento da mobilização e transporte de conchas sob a ação de correntes. Estas pesquisas abordam, via de regra, a interação deste mecanismo com conchas isoladas. Tal empenho é de extrema valia, pois permite criar modelos preditivos que relacionam aspectos físicos das conchas, como sua forma e tamanho, com os parâmetros da corrente que as transportou. Porém, é pouco, ou nada

relatado acerca da interação deste agente de transporte atuando sobre um leito formado por conchas, onde surge outra variável: a interação entre os grãos.

Além disso, no tocante à energia de que um escoamento sob a ação de correntes necessita para mobilizar conchas, não há modelos preditivos de início do movimento, tais como os consagrados e úteis diagramas de Hjulström (1935) e de Shields (1936) criados para sedimentos siliciclásticos.

### **1.1. Problema e hipótese**

Quando se busca caracterizar a magnitude da corrente pretérita que transportou determinado sedimento, o tamanho de grão e a carga de material sedimentar são os parâmetros mais utilizados. Estes estão ligados aos conceitos de competência e capacidade de transporte, respectivamente. Já para indicar a direção e sentido dessa corrente, a orientação dos grãos pode dar as informações para a solução de tal problema. Porém, antes, é necessário conhecer o comportamento do sedimento existente em determinado mecanismo transportador.

Por conseguinte, o problema exibido por este projeto é a correlação respectiva entre o tamanho e a forma de conchas bivalves com a magnitude e o sentido de escoamentos formados pela ação de correntes geradas em modelo físico.

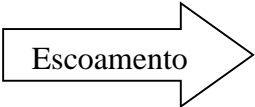
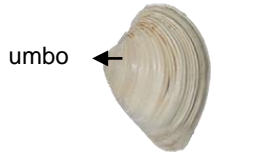
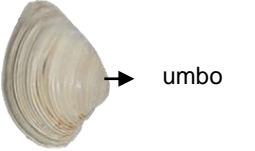

Conchas possuem uma complexidade geométrica maior do que sedimentos siliciclásticos, com algumas espécies não possuindo, sequer, um eixo de simetria. Além disso, um mesmo tamanho possui diversas formas (espécies). Disso decorre a hipótese que conchas com geometrias diferentes deverão exigir diferentes magnitudes de escoamento para serem transportadas, e mais, essa exigência também poderá depender da orientação de seus eixos anteriormente ao transporte. Essa mesma condicionante geométrica também poderá variar a orientação da concha após cessado seu transporte.

Para testar essa hipótese, foram realizados experimentos em modelo físico, onde o fenômeno de transporte empregado é um escoamento à superfície livre. O sedimento testado trata-se de conchas bivalves de diversos tamanhos e formas. Os procedimentos experimentais foram dois:

- conchas isoladas submetidas à ação do escoamento para duas situações de orientação inicial de seus eixos;
- leito de conchas submetidos à ação do escoamento.

A orientação dos eixos da concha pode ser, primeiramente, observada quanto à disposição de suas faces côncava e convexa. Outro critério que pode ser usado é a orientação do umbo, região mais espessa junto ao ápice da concha. As orientações iniciais das conchas nos dois procedimentos experimentais realizados estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Orientação inicial das conchas antes dos experimentos.

Procedimento experimental	Vista de topo 	Vertical	Horizontal
conchas isoladas	 umbo ←	lado convexo para cima	umbo contra o sentido do escoamento
	 → umbo	lado convexo para cima	umbo a favor do sentido do escoamento
leito de conchas		lado côncavo para cima	umbo disposto aleatoriamente

## 2. Objetivos e metas

O objetivo geral desse trabalho é, a partir de ensaios realizados em modelo físico, avaliar a intensidade de transporte que um escoamento deve possuir para transportar conchas bivalves em função de sua granulometria e geometria e, também, precisar a orientação das conchas em função do sentido da corrente que as transportou.

Os objetivos específicos incluem:

- Identificar a velocidade e tensão de cisalhamento do escoamento para que haja a mobilização de conchas com diferentes tamanhos e geometrias;
- Determinar como se dá a orientação das conchas após o repouso em função da corrente que as transportou e de sua geometria;
- Avaliar a capacidade de transporte para diferentes velocidades de escoamento que possam transportar um leito formado por conchas;
- Estabelecer a competência de transporte para essas mesmas velocidades atuando sobre um leito de conchas;
- Determinar como se dá a orientação das conchas em função da corrente que as transportou, considerando a geometria dos grãos e a interação entre eles.

### 3. Revisão conceitual

O presente capítulo trata, principalmente, de uma revisão de conceitos de hidráulica, que procuraram explicar e auxiliar na modelagem da interação entre o escoamento e o substrato.

#### 3.1. Tipos de escoamento

Algumas classificações de escoamento denotam a importância da variação dos parâmetros hidrodinâmicos ao longo do tempo. Outras classificações levam em conta o balanço de algumas das forças que agem sobre ele. Ambas serão elencadas neste capítulo.

##### 3.1.1. Escoamento laminar x escoamento turbulento

A razão entre as forças de inércia e as forças viscosas que agem no escoamento é conhecida como número de Reynolds ( $Re$ ):

$$Re = \frac{VH}{\nu} \quad (1)$$

onde:

V: velocidade média do escoamento ( $m\ s^{-1}$ )

H: profundidade do escoamento (m)

$\nu$ : viscosidade cinemática do fluido ( $m\ s^{-2}$ )

Baixos valores de  $Re$  ( $\leq 2000$ ) indicam trajetórias das partículas de fluido bem definidas. Acima desses valores, essas trajetórias seguem um comportamento aleatório, gerando as classificações de escoamentos laminares e turbulentos, respectivamente. Os escoamentos laminares ocorrem para velocidades e alturas de escoamento pouco suscetíveis de se verificar em canais. Devido a isso, considera-se os escoamentos fluviais como turbulentos (Cardoso, 1998).

##### 3.1.2. Escoamento lento e rápido

Os escoamentos podem ser classificados em lentos e rápidos através da razão entre as forças inerciais e as forças de gravidade que agem no escoamento. Esta razão é conhecida como número de Froude ( $Fr$ ):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (2)$$

onde:

V: velocidade média do escoamento ( $\text{m s}^{-1}$ )

g: aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ )

H: profundidade do escoamento (m)

No sentido cinemático, o Fr pode ser visto como a razão entre a velocidade do escoamento e a velocidade de propagação de uma onda gerada por uma perturbação na superfície do escoamento. Nos escoamentos lentos ( $Fr < 1$ ), esta propagação ocorrerá para a montante e para a jusante, e nos escoamentos rápidos ( $Fr > 1$ ), a onda de perturbação irá se propagar, apenas, para a jusante. Na maioria dos rios e canais aluvionares o escoamento é lento (Cardoso, 1998).

### 3.1.3. Escoamentos permanentes e não permanente

O escoamento é permanente quando a sua profundidade, vazão e velocidade média não variam ao longo do tempo em uma dada seção transversal. Caso contrário, é chamado de não permanente.

### 3.1.4. Escoamentos uniformes

Escoamento uniforme é um escoamento permanente em que a profundidade, a vazão e a velocidade média mantêm-se constantes ao longo do percurso do canal. A relação entre a vazão e velocidade do escoamento é dada pela seguinte expressão:

$$Q = VA = \text{constante no tempo e na distância} \quad (3)$$

onde:

Q: vazão ( $\text{l s}^{-1}$ )

V: Velocidade média ( $\text{m s}^{-2}$ )

A: área da seção do escoamento ( $\text{m}^2$ )

## 3.2. Tensão de cisalhamento em escoamento uniforme

A tensão de cisalhamento- $\tau$  (Pa) é uma força por unidade de área que atua na direção do escoamento. Assim como a velocidade, ela é usada para quantificar o escoamento. Observando a fig. 1, o cisalhamento entre as camadas de fluido, na profundidade z, pode ser definido a partir do volume de controle ABCD.

As forças que agem no comprimento dx incluem as que seguem:

1. Pressões hidrostáticas em AB e DC.
2. Tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) agindo em BC.
3. A componente na direção do escoamento do peso do fluido ( $W_x$ ).

Sob escoamento uniforme, as pressões hidrostáticas estão em balanço, o que torna a seguinte expressão válida:

$$WS - \tau dx = 0 \quad (4)$$

onde:

W: peso do fluido (N)

S: declividade do canal (%)

Substituindo a o peso W por  $\gamma(H-z) dx$  na eq. 4 leva na seguinte expressão:

$$\tau = \gamma(H - z) \quad (5)$$

onde:

$\gamma$ : peso específico do fluido ( $N\ m^{-3}$ )

H: profundidade do escoamento (m)

Observa-se que a tensão de cisalhamento cresce com a profundidade do escoamento, atingindo seu valor máximo ao fundo do canal.

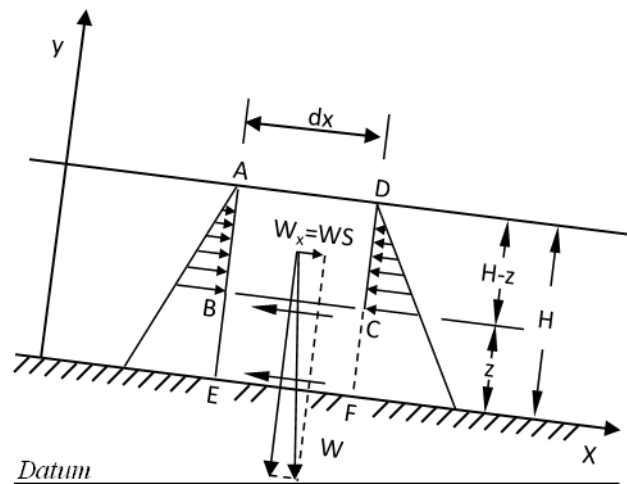


Fig. 1: Esquema das forças que atuam no volume de controle (Chang, 1987).

Considerando o volume de controle AEFD, a tensão de cisalhamento junto ao leito  $\tau_0$  é definida pela seguinte equação:

$$\tau_0 = \gamma \frac{A}{P} S \quad (6)$$

onde:

A: área da seção transversal do escoamento ( $m^2$ )

P: perímetro do canal em contato com o fluido (m)

### 3.3. Início do movimento de grãos

Ao aumentar a velocidade e a tensão de cisalhamento de um escoamento sobre um leito, estes valores podem chegar a um ponto crítico onde começará ocorrer o movimento aleatório de partículas isoladas que são arrancadas e arrastadas pelo escoamento. Estas condições do escoamento são conhecidas como condições críticas de início de transporte sólido ou de movimento incipiente.

Este problema pode ser visto, também, como o valor da tensão de cisalhamento mínima necessária para mover uma dada partícula, ou o maior tamanho de grão que pode ser movido por dada velocidade ou tensão de cisalhamento do escoamento. A importância de se conhecer este ponto crítico está ligada ao termo que, em geologia, é chamado de velocidade de competência do escoamento (Southard, 2006). Além disso, essa condição crítica de início de movimento pode ser usada para se calcular a vazão sólida que pode ser carregada por determinada corrente (Cardoso, 1998). Este último está ligado ao conceito de capacidade de transporte.

As condições de movimento incipiente estão associadas ao equilíbrio das forças que atuam sobre as partículas (fig. 2). Estas forças são chamadas de forças resistivas e forças ativas (hidrodinâmicas do escoamento). As forças hidrodinâmicas são a força de sustentação ( $F_L$ ) e a força de arraste ( $F_D$ ), já a força resistiva é o peso submerso da partícula ( $W_s$ ).

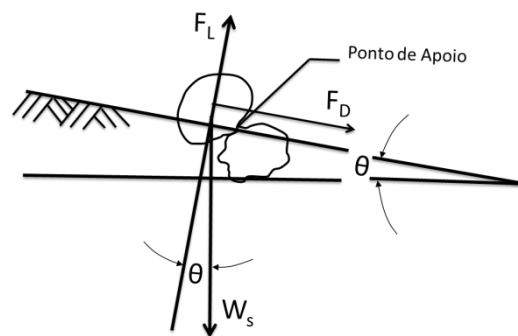


Fig. 2 – Esquema das forças atuantes numa partícula.  $F_D$ = Força de Arraste, que atua no sentido da corrente;  $F_L$ = Força de Sustentação, que é normal a  $F_D$ ;  $W_s$ = Força do peso submerso; e  $\theta$ = ângulo do leito com a horizontal. (Cardoso, 1998).

A força de arraste pode ser expressa pela seguinte equação:

$$F_D = C_1 \left( \frac{1}{2} \rho V^2 A_g \right) \quad (7)$$

onde:

$C_1$ : é um coeficiente relacionado à forma e à rugosidade do grão

$\rho$ : massa específica do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ )



$V$ : velocidade média da corrente ( $\text{m s}^{-1}$ )

$A_g$ : Área do grão atacada pela corrente ( $\text{m}^2$ )

A força de sustentação pode ser expressa por uma equação similar a da força de arraste. A diferença está por outro coeficiente ( $C_2$ ) que também está relacionado à forma e à rugosidade do grão:

$$F_L = C_2 \left( \frac{1}{2} \rho V^2 A_g \right) \quad (8)$$

Quando a força de peso submerso da partícula supera a soma das forças de arraste e de sustentação, a partícula está em repouso. No momento em que a força do peso iguala à soma das outras duas é que se dá a condição de movimento incipiente das partículas.

A discussão acima exposta é demasiada simplista e genérica, existindo um grande número de fatores complicadores para se calcular a velocidade e tensão de cisalhamento para as condições críticas de transporte sólido. Estes fatores incluem, entre outros, variações de tamanho, forma e seleção dos grãos que estão intrinsecamente vinculados à rugosidade do leito (Boggs, 2006). Por causa destes fatores, as condições de movimento incipiente não podem ser facilmente calculadas, sendo, então, determinadas experimentalmente. Dois trabalhos pioneiros nessa área, ainda hoje utilizados, são os trabalhos de Hjulström (1935) e Shields (1936).

## 4. Contextualização teórica

No presente capítulo será abordada uma contextualização teórica, que buscam balizar o entendimento de como as variações de parâmetros geométricos das conchas influenciam nas suas condições críticas de transporte e na sua orientação frente ao escoamento.

### 4.1. Início de transporte sólido

#### 4.1.1. Diagrama de Hjulström (1935)

O diagrama de Hjulström (fig. 3), determinado experimentalmente, mostra a velocidade na qual diferentes tamanhos de grão entram em movimento. O diagrama mostra a velocidade crítica para o movimento de grãos de quartzo num leito plano a uma profundidade de 1 m.

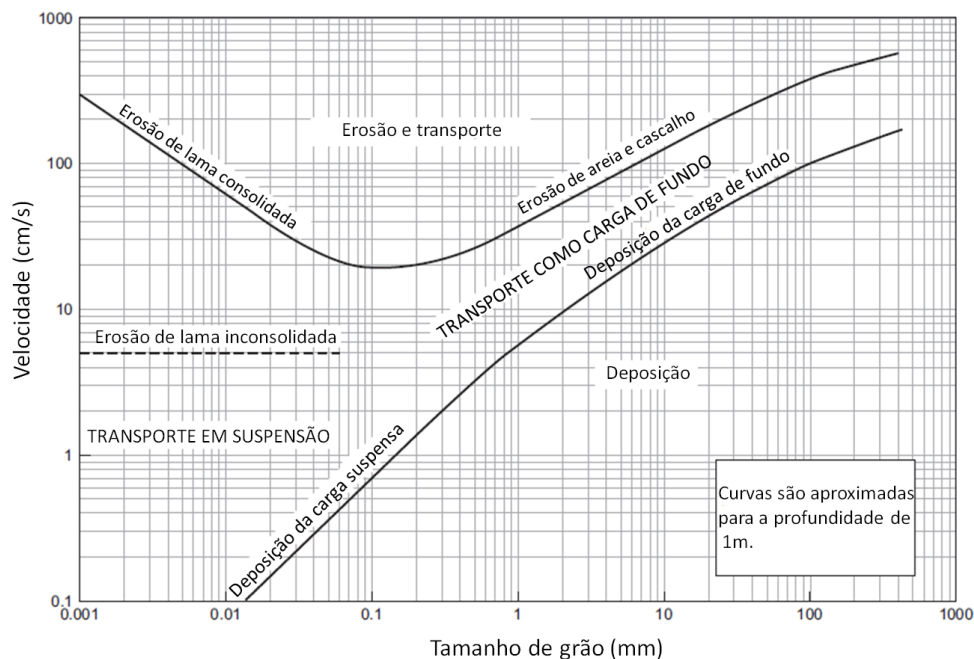


Fig. 3: Diagrama de Hjulström (Modificado de Nichols, 2009).

A curva inferior no diagrama mostra a relação das partículas que já estão em movimento e no limiar de serem depositadas. A curva superior define a velocidade do escoamento necessária para pôr uma partícula em movimento.

Apesar de o diagrama de Hjulström ser, em muito, superado pelo de Shields (Miller et al. 1977), este é um diagrama ainda hoje utilizado na previsão do estado de transporte de sedimentos siliciclásticos.

#### 4.1.2. Diagrama de Shields (1936)

O diagrama de Shields, assim como o de Hjulström, foi elaborado a partir de dados obtidos experimentalmente. O diagrama (fig. 4) também mostra um limite entre o repouso e o

transporte de grãos. Entretanto, a sua compreensão é um pouco mais complexa. Em vez da velocidade média do escoamento no eixo vertical, é utilizado um valor de tensão de cisalhamento adimensionalizada. No eixo horizontal, o diâmetro do grão é substituído por um parâmetro dito número de Reynolds do grão.

A tensão de cisalhamento adimensionalizada ( $\tau_*$ ) é dada por:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad (7)$$

onde:

$\tau_0$ : Tensão de cisalhamento junto ao leito (-)

$\gamma_s$ : peso específico do sólido ( $\text{N m}^{-3}$ )

$\gamma$ : peso específico do fluido ( $\text{N m}^{-3}$ )

$d$ : diâmetro do grão (m)

Este valor de tensão de cisalhamento adimensionalizada incorpora, em um só parâmetro, os efeitos da tensão de cisalhamento junto ao fundo (velocidade), do tamanho de grão e da diferença de densidade entre sólido e fluido. Um aumento em seu valor indica um aumento na velocidade do escoamento ou uma diminuição no tamanho ou densidade do grão.

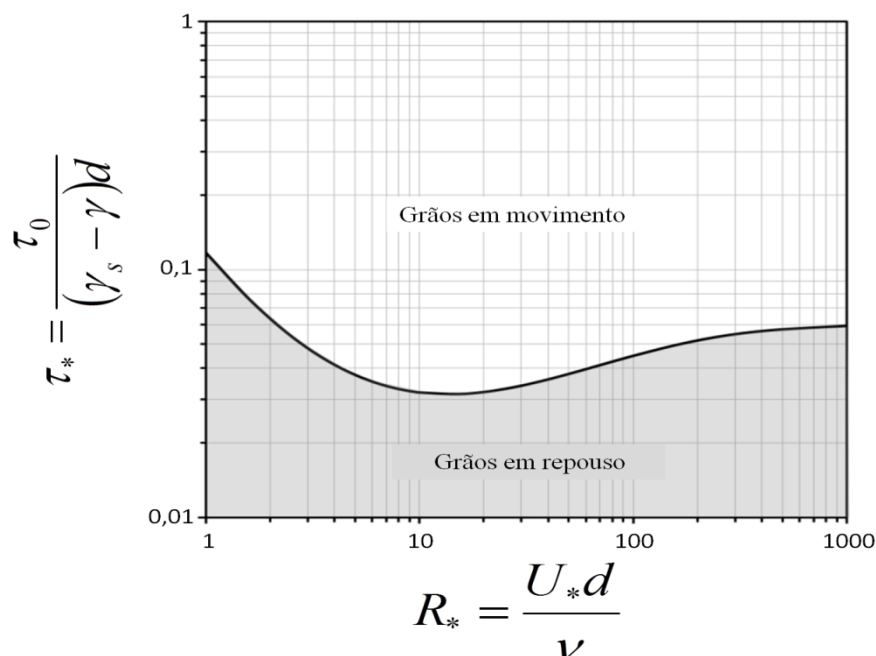


Fig. 4: Diagrama de Shields (1936). (Modificado de Nichols, 2009)

O número de Reynolds do grão ( $R_*$ ) também é um parâmetro adimensional, que quantifica a turbulência do escoamento junto ao leito, e é dado por:

$$R_* = \frac{U_* d}{\nu} \quad (8)$$

onde:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} : \text{velocidade de cisalhamento (m s}^{-1}\text{)}$$

$d$ : diâmetro do grão (m)

$\nu$ : viscosidade cinemática (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)

$\rho$ : massa específica do fluido (Kg m<sup>-3</sup>)

Assumindo a viscosidade de dado fluido como constante, um aumento no número de Reynolds do grão expressa um aumento na tensão de cisalhamento junto ao leito ou no tamanho de grão. Embora menos intuitivo, o diagrama de Shields leva em conta fatores pertinentes ao sedimento, ao fluido e à turbulência do escoamento para definir o limite entre os campos de repouso e de transporte.

#### 4.2. Mobilização de conchas

Existem alguns estudos que buscaram determinar as condições críticas de transporte de diferentes espécies de conchas pela ação de correntes (Dey, 2003; Messina & LaBarbera, 2004; Chattopadhyay et al., 2013) e, também, entender como as forças de arraste e sustentação do escoamento atuam sobre as conchas (Olivera & Wood, 1997). Ao passo que os autores citados neste parágrafo estudaram o comportamento de conchas que foram analisadas de forma isolada em experimentos de laboratório, Anta et al. (2013) avaliaram a erosão de um leito formado por conchas.

Para Miller & Cummins (1990), conchas, ao contrário de outras partículas, possuem um comportamento frente ao escoamento mais difícil de prever, visto as suas complexidades de formas e suas rugosidades que variam muito de uma espécie para outra. Todavia, a massa da concha, uma variável fácil de quantificar, é um parâmetro importante (Spencer, 1963). Porém, Messina & LaBarbera (2004) observaram, para a espécie braquiópode *Terebratalia transversa*, que a variação da massa da concha não é um definidor de sua resistência ao escoamento. Estes autores mostraram que para um escoamento colocar esta espécie em movimento, a orientação inicial da concha tem uma importância maior do que sua massa.

A textura do leito sobre o qual uma concha é carregada também irá influenciar na competência do escoamento. Brenchley & Newall (1969) observaram, em experimentos físicos, que conchas carregadas sobre um leito arenoso conseguem ser postas em movimento a

velocidades até 4 vezes menor do que a necessária para a mesma concha entrar em movimento sobre um leito lamoso.

#### **4.2.1. Olivera & Wood (1997)**

Estes autores afirmam que, para determinar como se dá o início do movimento de espécies de conchas, antes é necessário entender como as forças hidrodinâmicas do escoamento agem em valvas isoladas. Para isso, eles utilizaram-se dessa abordagem para determinar a importância relativa de parâmetros de formas das conchas que influenciam em suas condições críticas de transporte.

Neste trabalho experimental, medidas de pressão no em torno de conchas foram realizadas para determinar suas velocidades de competência através do efeito das forças de arraste e de sustentação sobre conchas com distintas rugosidades e formas. Foi observado que conchas com áreas frontais maiores geram maiores forças e, assim, podem ser mais facilmente postas em movimento. Os autores também mostram que conchas mais alongadas (que possuem um eixo maior) e de maior tamanho possuem menos resistência para entrar em movimento se comparadas com conchas mais esféricas (dois eixos semi-iguais) de menor tamanho. Embora seja uma observação pouco intuitiva, a explicação é que a força de sustentação acaba sendo maior em conchas alongadas, o que facilita seu transporte.

#### **4.2.2. Dey (2003)**

Neste trabalho, a partir de experimentos físicos, foram levantados valores de tensão de cisalhamento crítica para diferentes espécies de conchas bivalves. Estes dados foram utilizados para a construção de um modelo matemático semi-empírico com a proposta de prever a tensão de cisalhamento crítica para as espécies analisadas na pesquisa. O autor submeteu diversas conchas, isoladamente, à ação do escoamento de duas maneiras: com convexidade para cima e para baixo e com o umbo sempre apontando para jusante.

A pesquisa mostra, em seus resultados, que as conchas que foram inicialmente postas com sua convexidade para baixo entraram em movimento a magnitudes muito inferiores do que na situação oposta.

O autor relata, a partir de observações feitas preliminarmente, que as conchas, quando estão com o umbo posicionado, inicialmente, para montante, possuem maior resistência a ser postas em movimento do que quando o umbo está inicialmente voltado para jusante. Chattopadhyay et al. (2013) também alega tal comportamento.

#### **4.2.3. Chattopadhyay et al. (2013)**

Nessa pesquisa, os autores buscaram comparar, para espécie bivalve *Donax Scortum*, diferenças entre a velocidade de competência do escoamento para espécimes intactos, bem ornamentados, e para espécimes já retrabalhados, mais abradidos. Neste trabalho experimental em modelo físico, os espécimes foram sempre testados com a convexidade para cima e com o umbo voltado inicialmente para montante. Os autores alegam que essa é a posição mais estável frente ao escoamento.

O trabalho mostrou que as conchas "frescas", com saliências e reentrâncias, foram mais facilmente postas em movimento quando comparadas com as conchas retrabalhadas que possuem superfície mais lisa. Os autores argumentam que tal resultado está vinculado à força de sustentação, que acaba sendo menor em conchas mais lisas.

#### **4.3. Orientação das conchas**

Conchas, quando imergem no meio fluido, tendem a cair com seu lado convexo voltado para baixo. Porém, uma vez alcançado o leito deste meio, são facilmente viradas se carregadas por mecanismos trativos, ficando com seu lado convexo para cima (Allen, 1984). Kidwell & Bosence (1991) argumentam de igual forma, que mecanismos trativos são inferidos através de um padrão de convexidade da concha para cima, ao passo que a concavidade para cima é comum em turbiditos e outros fluxos de massa que transportam sedimento em suspensão.

A orientação da concha pode ser usada como indicativo do processo deposicional, sendo que as conchas grandes são mais facilmente preservadas com sua orientação original, enquanto as menores são, frequentemente, bioturbadas e desorientadas (Nagle, 1967).

Conforme a fig. 5, a biofábrica observada no plano do acamamento de litofácies bioclásticas pode gerar um padrão de distribuição de orientação bimodal para conchas bivalves que sofreram a ação de mecanismos trativos. Já para alguns gastrópodes com geometria cônica, ocorre um padrão unimodal (Kidwell et al., 1986). Este autor observa que, no registro geológico, esses dados não podem ser diretamente relacionados a indicativos de paleocorrentes sem antes serem levados em conta os processos pós-deposicionais. Exemplos desses processos são a rotação e a desarticulação dos elementos constituintes da biofábrica durante a compactação.



Fig. 5: Padrão de orientação bimodal para conchas bivalves e unimodal para gastrópodes cônicos. (Modificado de Kidwell *et al.*, 1986)

Nagle (1967) realizou experimentos em canais artificiais, em tanques de laboratório e em ambientes naturais para verificar a ocorrência de padrões de orientação de diversas espécies e geometrias de conchas que foram transportadas por correntes e por ondas. Em seus resultados, é retratado que há um padrão diagnóstico para os gastrópodes cônicos carregados por correntes, assim como apresentado na fig. 5. Já para bivalves pouco alongados, a pesquisa argumenta que não há uma tendência diagnóstica, tendo uma variação muito grande em torno de sua moda. A fig. 6 mostra os padrões de orientação encontrados pelo autor para as espécies braquiópoda *Spirifer*, gastrópoda *Turritella* e bivalve *Anadara*.

Nagle (1967) aplicou seus resultados experimentais em rochas sedimentares de ambiente marinho do Devoniano superior, localizadas no nordeste da Pensilvânia. A pesquisa obteve êxito ao conseguir distinguir ambientes dominados por ondas de outros dominados por correntes.

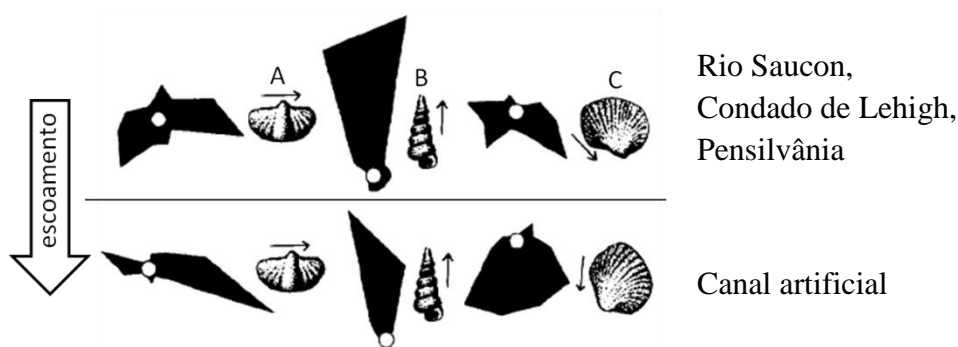


Fig. 6: Diagramas de roseta indicando padrões de orientação das conchas. A: *Spirifer*, B: *Turritella*, C: *Anadara*. As setas próximas aos espécimes mostram a convenção usada para retratar a orientação. (Modificado de Nagle, 1967).

Brenchley & Newall (1970), a partir de experimentos de laboratório, observaram, para as espécies bivalves *Mytilus*, *Nucula* e *Venerupis*, que o eixo maior tende a ficar orientado ortogonalmente à direção da corrente. Estes autores realizaram alguns de seus testes com as conchas inicialmente voltadas com a concavidade para cima. Eles relatam que as conchas, ao

se moverem, tendem, com uma grande frequência, inverter essa posição, ficando com a convexidade para cima. Tal padrão já tinha sido observado por outros autores (Menard & Boucot, 1951).

No registro geológico, existem alguns trabalhos que correlacionam a natureza do mecanismo trativo que carrou assembleias de conchas a partir da distribuição e orientação dos espécimes (Dixon, 1970; Wendt, 1995; Crawford et al., 2008; Radley 2011; Schwartz & Graham, 2015).



## 5. Metodologia

A investigação em modelo físico do transporte de conchas por ação de correntes se deu em duas etapas:

**1ª - Ensaios com espécimes individuais:** espécimes bivalves foram testados individualmente sob ação de uma variedade de magnitudes de escoamento;

**2ª - Ensaios sobre leito de conchas:** espécimes de conchas formando o leito do canal sofreram transporte por igual fenômeno.

Anteriormente aos ensaios em modelo físico, foram realizados a escolha do material a ser ensaiado, o levantamento de sua distribuição granulométrica e a caracterização de suas propriedades físicas.

### 5.1. Escolha do material a ser ensaiado

A escolha do material se deu em função da busca de um sedimento que fosse formado por conchas e que pudesse ser adquirido em quantidade apreciável para os ensaios em modelo físico, visando, também, a possibilidade de extensão dessa pesquisa posteriormente.

Foi realizada uma investigação das localidades e empresas que comercializam o bem mineral conhecido como calcário de conchas através do Anuário Mineral Brasileiro publicado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral. Cinquenta quilogramas de sedimento foi obtido através de uma doação da Mineradora CYSY<sup>®</sup>, que prospecta concha para produção de calcário no município de Jaguaruna (SC). A área de prospecção fica nas proximidades da laguna Garopaba do Sul.

Uma vez adquirido o sedimento, foi realizada uma etapa de separação manual de espécimes inteiros, porém com valvas desarticuladas. Nesta etapa foi separada uma massa de 1,152 Kg de conchas bivalves inteiras, sendo que 90% desta massa é composta por uma espécie (*Anomalocardia brasiliiana*) e o restante por outras. As espécies de conchas separadas (fig. 7) foram classificadas com base no trabalho de Fornari (2010), sendo elas as espécies:

- *Anomalocardia brasiliiana* (Gmelin,1791);
- *Codakia* (Gmelin,1791);
- *Divaricella quadrisulcata*, (Orbigny,1846); e
- *Diplodonta punctata*, (Gmelin,1791).

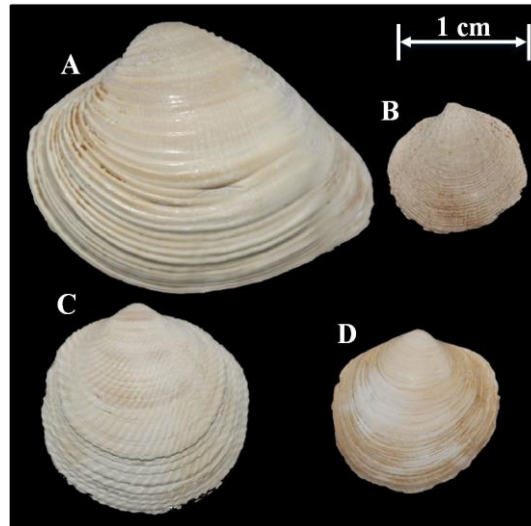


Fig. 7: Espécimes de conchas separadas para ensaio em modelo físico. A: *Anomalocardia brasiliana* (Gmelin,1791); B: *Codakia* (Gmelin,1791); C: *Divaricella quadrisulcata* (Orbigny,1846) D: *Diplodonta punctata* (Gmelin,1791). (Modificado de Fornari, 2010)

## 5.2. Distribuição e curva granulométrica

Foi realizado o levantamento da distribuição e curva granulométrica da amostra de 1,152 Kg de conchas inteiras. O método utilizado foi o de peneiramento, sendo este trabalho executado no laboratório de sedimentologia do IPH. A relação das classes de aberturas das peneiras utilizadas são as que constam na tabela 2.

Tabela 2. Relação das peneiras utilizadas.

ASTM	Tyler-Mesh	Abertura (mm)
1"	-	25,4
3/4"	-	19,1
5/8"	-	15,9
1/2"	-	12,72
3/8"	-	9,52
3/16"	-	7,93
3,5	3,5	5,6
10	10	2

O histograma da distribuição granulométrica e a curva de frequência acumulada estão representado nas fig. 8 e 9, respectivamente. O que se observa é que trata-se de uma amostra polimodal, com a mediana (d 50) estando na faixa de 9,52 a 12,7 mm e d 90 na faixa de 15,9 a 19,1 mm.

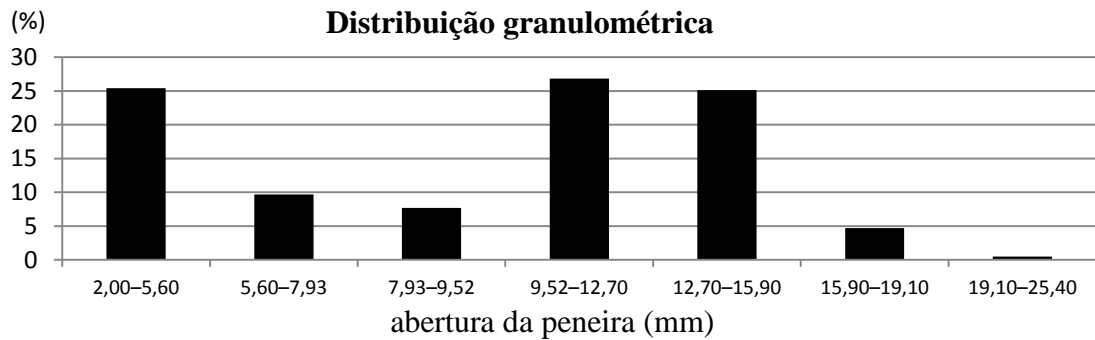


Fig. 8: Distribuição granulométrica das conchas inteiras separadas.

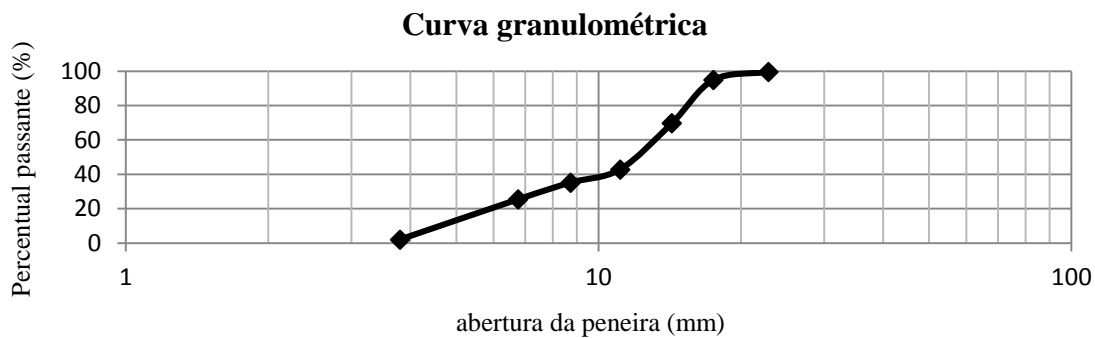


Fig. 9 Curva granulométrica das conchas inteiras separadas.

### 5.3. Propriedades físicas do sedimento

Da amostra de sedimento, separada e caracterizada granulometricamente, foram coletados, manualmente, espécimes representantes das variações de tamanho nela encontradas, contemplando as quatro espécies já comentadas. Foram reunidas um total de 27 espécimes, que foram caracterizadas com o auxílio de um paquímetro (precisão de 0,05 mm), de uma balança (precisão de 0,01 g) e de um picnômetro, quanto a suas dimensões (fig.10A), massa e volume, respectivamente, conforme a tabela 3. A tabela apresenta os valores dos semi-eixos  $a'$  e  $a''$  (fig.10A) que foram medidos através de fotografias tiradas da face côncava da concha (ver Anexo I). Outra propriedade também mostrada é o diâmetro nominal ( $d_n$ ), que é o diâmetro de uma esfera que possui volume igual ao da concha, dado pela expressão

$$d_n = \left( \frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} \quad (9)$$

onde,

$V$ : volume da concha ( $\text{cm}^3$ )

Ainda consta, na mesma tabela, dois fatores de assimetria das conchas. O primeiro é a razão entre os semi-eixos  $a'$  e  $a''$  (fig. 10A), o qual mostra, para espécie *Anomalocardia brasiliiana*, valores maiores que 1. Visto isso, cada indivíduo dessa espécie está discriminado

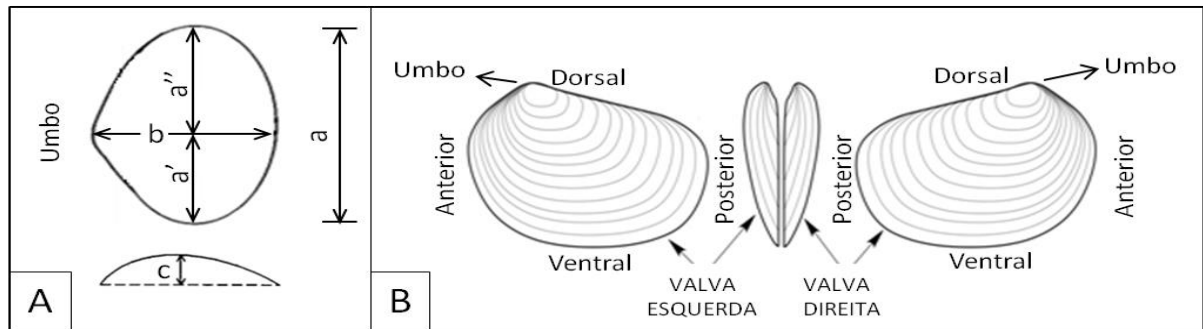


Fig. 10: A - Orientação dos eixos a, b e c da concha. B - Discriminação das valvas esquerda e direita de uma concha. (modificado de <http://paleo.cortland.edu/tutorial/Bivalves/bivalvia.htm>)

Tabela 3: Classificação e caracterização de 27 espécimes.

Nº do Espécime	Espécie	Massa (g)	Lado da valva	Volume (cm³)	Dimensões (mm)						Razão semi-eixos a/a''	SF
					a	b	c	a'	a''	dn		
1	<i>Anomalocardia Brasiliana</i>	3,06	esquerdo	1,2	28,5	23,2	9	17,5	11	13,2	1,59	0,35
2		3,15	direito	1,23	29	24	9	16,5	12,5	13,3	1,32	0,34
3		2,08	esquerdo	0,8	26,1	21,1	8	16	10	11,5	1,6	0,34
4		1,67	direito	0,65	26,4	21,8	7,8	16,5	10	10,7	1,65	0,33
5		1,2	esquerdo	0,46	21,5	17,2	6,7	12,5	9	9,6	1,39	0,35
6		1,13	direito	0,43	21,5	17,2	6,8	12,5	9	9,4	1,39	0,35
7		0,66	esquerdo	0,25	18,3	15	5,3	10,5	7,5	7,8	1,4	0,32
8		0,72	direito	0,27	18,7	14,5	5,5	10	8,5	8,0	1,18	0,33
9		0,53	esquerdo	0,2	16	13	4,8	9	7	7,3	1,29	0,33
10		0,56	direito	0,21	15,8	12,7	5	9,5	6,5	7,4	1,46	0,35
11		0,16	esquerdo	0,06	12,2	8,9	3,2	8	4,5	4,9	1,78	0,31
12		0,13	direito	0,05	12	8,75	3	7	5	4,6	1,4	0,29
13		0,01	esquerdo	0,003	7,65	6	2,5	4,5	3,5	1,8	1,29	0,36
14		0,01	direito	0,004	7,8	6,3	2,5	4,5	3	2,0	1,5	0,35
15	<i>Diplodonta Punctata</i>	0,36		0,13	14,9	14,6	4,2	8	7	6,3	1,14	0,29
16		0,15		0,05	13,4	12,1	3,4	7	6,5	4,6	1,08	0,27
17	<i>Divaricella Quadrisulcata</i>	1,05		0,38	22,3	21,5	7,1	11	11	9,0	1	0,32
18		0,79		0,29	20	19,7	6,1	10	10	8,2	1	0,31
19		0,6		0,22	19,1	18,5	5,7	9,5	9,5	7,5	1	0,3
20		0,48		0,17	17,2	16,5	4,6	9	8,5	6,9	1,06	0,27
21		0,41		0,15	17,7	16,6	4,9	9	8,5	6,6	1,06	0,29
22		0,28		0,1	15,8	14,9	4,3	8	7,5	5,8	1,07	0,28
23		0,16		0,06	14,6	12,5	3,7	7	7	4,9	1	0,27
24	Codakia	0,64		0,24	17,2	17,3	5,5	9	8	7,7	1,13	0,32
25		0,6		0,23	16,3	16	5,1	9	7	7,6	1,29	0,32
26		0,36		0,13	15,3	14,7	4,5	9	6,5	6,3	1,38	0,3
27		0,45		0,17	12,8	12,3	4,1	6,5	6	6,9	1,08	0,32

entre valvas direita e esquerda (fig. 10B). O segundo fator de assimetria é o fator de forma de Corey (1949). Este fator quantifica a esfericidade do grão, sendo que valores próximos de 1 refletem grãos com alta esfericidade. O fator de forma de Corey (SF) é dado por

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (10)$$

onde,

c, a e b: eixos da concha (mm), conforme fig. 10A.

#### 5.4. Ensaio em modelo físico – espécimes individuais

Nesta etapa, o objetivo da pesquisa foi avaliar a magnitude do escoamento necessária para mobilizar uma determinada concha e, ainda, precisar o modo como ela se orienta frente ao escoamento. Para isso, buscou-se submeter cada um dos 27 espécimes já comentados, separadamente, a diversas magnitudes de escoamento. O modelo físico, materiais utilizados e a descrição experimental serão relatados neste capítulo.

##### 5.4.1. Canal de alvenaria

O modelo constitui-se num canal de alvenaria (fig.11) que foi construído para realização de ensaios com sedimentos, situado no Laboratório de Ensino de Hidráulica do IPH/UFRGS. As dimensões internas do canal são: comprimento de 17,30 m, largura de 40 cm, altura média de 30 cm e declividade de 4/1000.

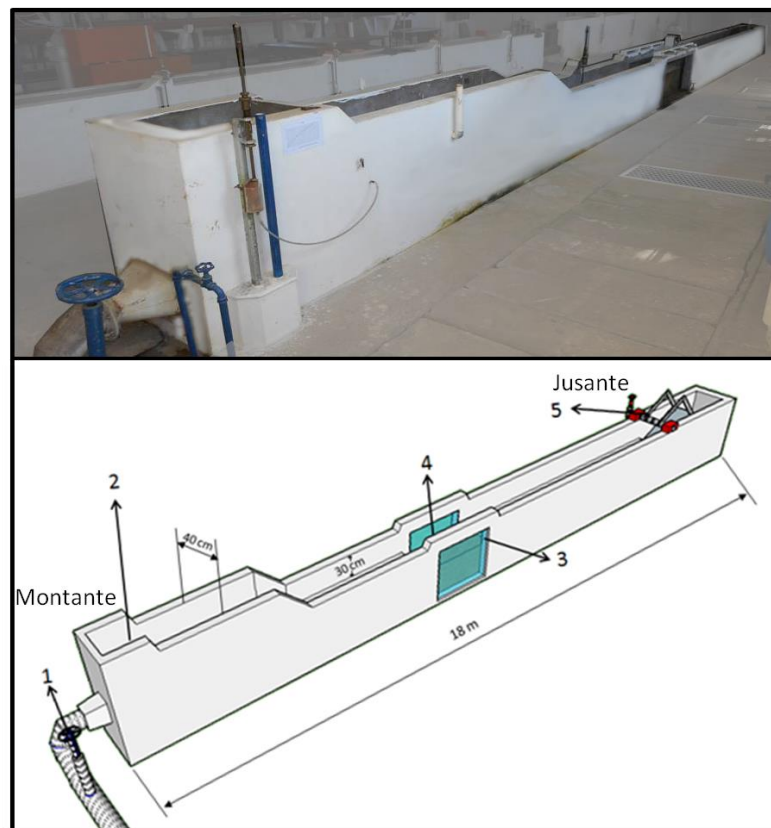


Fig. 11- Canal de alvenaria / Modelo físico. 1- Registro gaveta, 2- Posição do vertedor, 3- Trecho com parede de vidro 4- Trecho com fundo móvel, 5- Sistema de comporta jusante.

Na porção de montante, o canal tem um vertedor (fig.12), através do qual pode-se, com auxílio de um registro de tipo gaveta (fig.11 item 1), controlar a vazão e, na porção de jusante, tem uma comporta (fig. 12) que permite o ajuste do nível de água.



Fig. 12: Vertedor à esquerda e comporta de jusante à direita.

Há 8,0 m da extremidade montante do canal tem um trecho de 1,56 m de comprimento, onde seu fundo possui um rebaixo (fossa) de 50 cm de altura e, ainda, suas paredes laterais são feitas de vidro (fig. 13). O rebaixo do fundo permite modificar o leito, configurando-o conforme o interesse, e a janela lateral de vidro possibilita uma melhor visualização do fenômeno a ser observado.

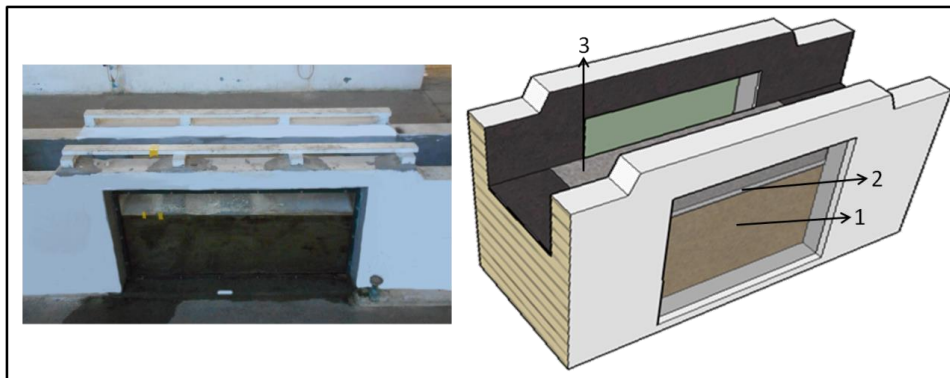


Fig. 13: Trecho com janela de vidro. 1- fossa preenchida com areia; 2- chapa de acrílico; 3- Areia colada sobre a chapa de acrílico.

Neste trecho do canal, foi feita uma adaptação para realizar os ensaios descritos no item 3.4.4. A fossa de 50 cm foi preenchida com areia, a fim de elevar o seu nível até próximo à base regular do canal. Este leito de areia foi cuidadosamente nivelado até possuir a mesma inclinação do canal. Acima dele, foi instalada uma chapa de material acrílico de 3 mm de espessura. Nesta chapa, foi colada uma camada de areia grossa, bem selecionada, possuindo diâmetro médio (Mz) de 0,807 mm. Acima desta camada de areia, foi adicionada uma película de tinta "spray" para evitar a desagregação dos grãos, permanecendo, assim, um leito arenoso artificial.

### 5.4.2. Material ensaiado

O sedimento utilizado foi os 27 espécimes de conchas relatados no item 5.3, representantes de toda a variedade de tamanho para as quatro espécies documentadas neste trabalho. Além disso, os espécimes de *Anomalocardia brasiliiana* foram selecionados de forma a possuir, para cada tamanho, uma valva direita e outra esquerda. O material a ser ensaiado é então formado por:

- 14 indivíduos da espécie *Anomalocardia brasiliiana*;
- 4 indivíduos da espécie *Codakia*;
- 2 indivíduos da espécie *Diplodonta punctata*;
- 7 indivíduos da espécie *Divaricella quadrisulcata*;

### 5.4.3. Dados do escoamento

Os dados do escoamento consistiam em vazão e a profundidade da linha de água.

- Para a medição da vazão, utilizou-se um vertedor (fig.14), cuja lei de calibração (eq. 10) foi estabelecida em cuba de aferição volumétrica. A lâmina – d'água é uma função pré-estabelecida da (eq. 10) vazão que por ele verte, e esta, por sua vez, é a mesma que passa por toda extensão do canal.

$$Q = \left\{ 0,8919 + 0,137752 \left[ \left( \frac{h}{100} \right) + 0011 \right] \right\} (h + 0,001)^{1,5} \quad (11)$$

onde,

Q = vazão (l/s) e

h= lâmina de água vertente (cm)

Para medir a lâmina de água vertente, foi utilizado um equipamento conhecido como Ponta Linimétrica (fig. 12 a). Este equipamento efetua medidas da altura de coluna de água posicionando sua ponta inferior na superfície da água. A Ponta Linimétrica possui uma região graduada em centímetros onde se faz a leitura de seu deslocamento vertical. O equipamento possui precisão de 0,01cm.

- A altura da linha de água foi medida em 4 pontos, também com Pontas Linimétricas (fig. 14 b), instaladas a 5,8; 8,27; 9,13 e 10,34 m da extremidade montante do canal, chamadas de pontas 1,2,3 e 4, respectivamente.

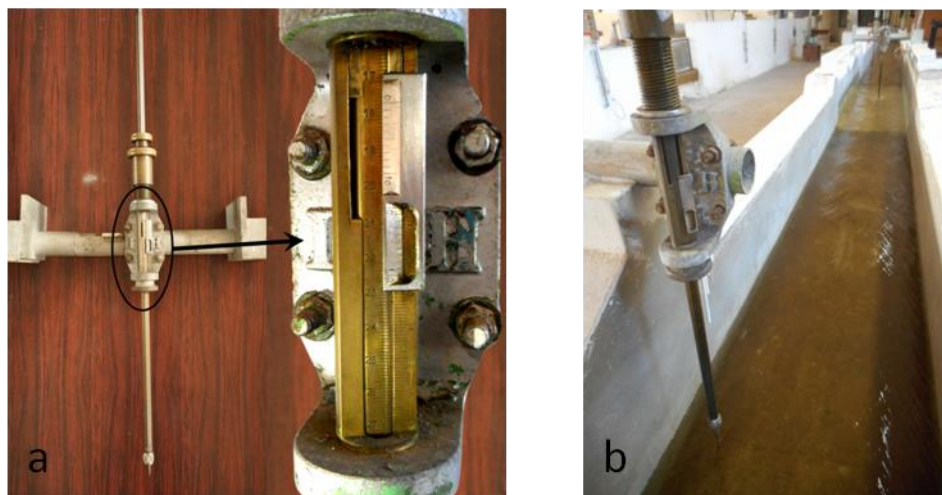


Fig. 14 - a: Ponta Linimétrica, detalhe para parte graduada, onde é feita a leitura da medida. b: Ponta Linimétrica usada para levantamento da linha de água.

#### 5.4.4. Descrição do experimento

O procedimento experimental obedeceu sempre as seguintes etapas:

1ª - Abertura inicial do registro de montante: abertura que possibilita o início do escoamento.

2ª - Medição da temperatura da água com o auxílio de um termômetro.

3ª - Regulagem da comporta de jusante: tal procedimento foi realizado apenas uma vez, pois utilizou-se uma regulagem padrão para todos ensaios. A comporta foi ajustada para acompanhar a declividade do canal.

4ª - Posicionamento do espécime dentro do canal: Esta posição inicial foi sempre a mesma para todos espécimes que foram experimentados, correspondendo a 8,78 m da extremidade montante (centro longitudinal do leito arenoso artificial) e no centro transversal do canal. Todos os espécimes foram colocados com seu lado convexo voltado para cima.

Também era observada a orientação inicial do umbo. Nos ensaios preliminares, verificou-se que a concha requer diferentes magnitudes de escoamento para entrar em movimento, nas situações em que o umbo está voltado para montante ou se ele está voltado para jusante. Portanto, decidiu-se experimentar todos os espécimes nessas duas situações.

5ª - Nova abertura do registro de montante: abertura que possibilita pequenos incrementos de vazão. Simultaneamente à abertura do registro, era observada, visualmente, a ausência ou presença de movimento do espécime testado. Esperava-se até 2 minutos nos casos em que a concha continuava imóvel e, posteriormente, adicionava-se um novo incremento de vazão através de registro de montante. Repetia-se o processo até o espécime começar a se mover.

Quando a concha entrava em movimento, procedia-se na coleta e registro:



- a altura da lâmina de água vertida no vertedor para posterior cálculo da vazão, conforme eq. 1;  
e

- a altura da linha de água ao longo do canal, nas Pontas Linimétricas 1,2,3 e 4.

O início do transporte da concha, nesse experimento, ocorria através de duas possibilidades:

1<sup>a</sup> - A concha entra em movimento intermitente,

2<sup>a</sup> - A concha entra em movimento e não repousa mais, alcançando a extremidade jusante do canal.

Para a 1<sup>a</sup> possibilidade, o seguinte procedimento era adotado:

- Observava-se, visualmente, o modo como a concha era transportada até o repouso; após isso

- Media-se a distância percorrida pela concha com auxílio de uma régua metálica. Esta medida era realizada quando a concha movia-se até 60 cm do ponto inicial.

- Media-se, com um transferidor de grau, a orientação do umbo após o repouso da concha. Esta medida foi realizada apenas nas situações em que o umbo estava, inicialmente, apontado para montante, pois, nesta situação, a concha, quando entra em movimento, gira no plano horizontal, o que não ocorre na situação oposta.

Para a 2<sup>a</sup> possibilidade, realizava-se a observação visual da forma como a concha era transportada.

Sempre que um espécime se movia com uma determinada vazão, após a realização dos procedimentos acima descritos, o processo era repetido mais duas vezes para mesma vazão.

#### **5.4.5. Ensaios realizados**

Para atingir a meta de testar cada espécime em separado, quanto à capacidade do escoamento necessária para pô-los em movimento em duas situações distintas, umbo voltado para montante e para jusante, foi necessária a realização de 298 experimentos, dentre os quais estão inclusas, também, as repetições.

#### **5.5. Ensaios em modelo físico – leito de conchas**

Nesta etapa, o alvo da pesquisa foi avaliar a capacidade e competência de transporte de diferentes magnitudes de escoamento atuantes sobre um leito composto por conchas e, também, determinar a orientação predominante do umbo da concha. Para tanto, realizaram-se ensaios preliminares, a fim de ajustar parâmetros, como a vazão e a inclinação do modelo. Após essa configuração inicial, foram realizados 8 experimentos, propriamente ditos, com duração de 20 minutos cada, que contemplaram 4 vazões diferentes, sendo que, para cada uma, houve repetição. O modelo físico, equipamentos e métodos operacionais serão, aqui, descritos.

### 5.5.1. Canal unidirecional de pequeno porte

O modelo físico de pequeno porte (fig. 15) constitui-se num canal de paredes e base de vidro, situado no prédio do Núcleo de Estudo de Correntes de Densidade do IPH. Este canal tem 4 m de comprimento, 12 cm de largura, 50 cm de altura e sua declividade é ajustável. Entre 2,2 e 2,83 m da sua entrada de montante existe uma fossa (fig. 15, item 8) de 2 cm de altura, que pode ser preenchida com o material erodível que se pretende testar.

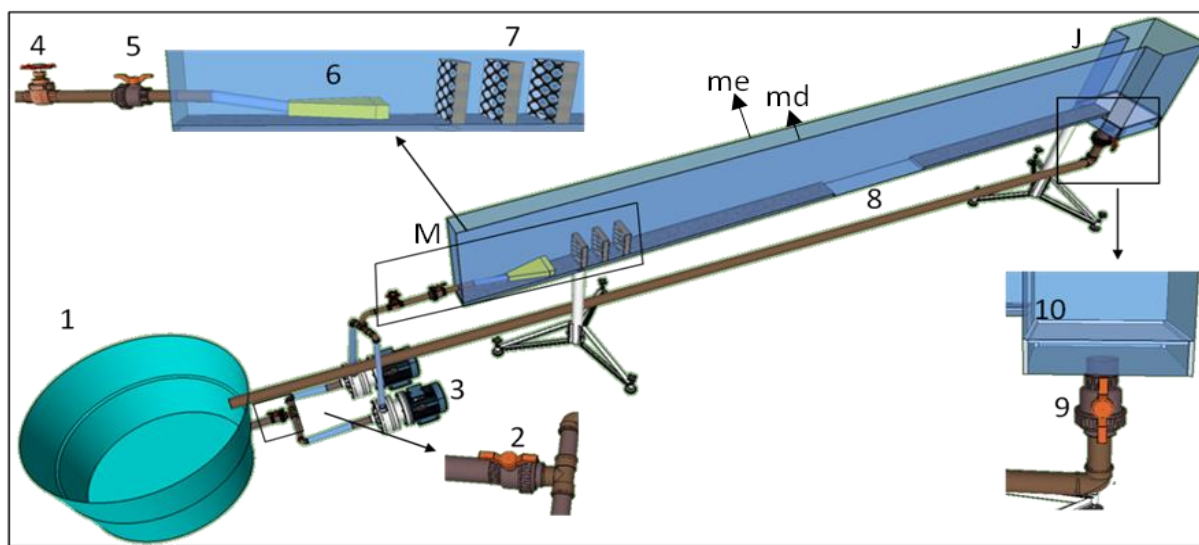


Fig.15: Canal unidirecional de pequeno porte. 1: Reservatório de alimentação; 2: registro esfera do reservatório; 3: bombas centrífugas; 4: registro gaveta do controle da vazão; 5: registro esfera; 6: difusor de injeção do fluido; 7: colmeias de tranquilização; 8: fossa, 2 cm de profundidade e 63 cm de comprimento; 9: Registro esfera de saída com retorno para o reservatório; 10: Peneira para retenção de sedimento. M: Montante; J: Jusante; me: Margem esquerda; md: Margem direita.

A injeção de fluido no canal, neste caso, água, se dá pelo bombeamento (fig. 15, item 3) de um reservatório de 1000 L (fig. 15, item 1). A vazão é controlada por um registro gaveta (fig. 15, item 4) posicionado acima do nível de bombeamento. À jusante, o canal possui um registro esfera (fig. 15, item 9) que, ligado a uma tubulação de retorno, permite escoar o fluido para dentro do reservatório, formando, assim, um circuito fechado.

### 5.5.2. Material ensaiado – Espécie *Anomalocardia brasiliana*

Para fins de observar a interação entre o leito formado por conchas sob um escoamento unidirecional, foram selecionados, manualmente, os espécimes de *Anomalocardia brasiliana*, que compunha os 1,152 Kg de conchas inteiras previamente selecionadas conforme o item 3.1 deste trabalho. Selecionou-se apenas essa espécie por ser a única em quantidade apreciável para o experimento.

O material selecionado resultou em uma massa de 995,47 g, que foi peneirada segundo as classes da tabela 2, gerando uma nova distribuição granulométrica (fig. 16). Posteriormente, cada classe de tamanho foi discriminada pintando-as. Criou-se uma intercalação de três cores: azul, vermelho e cor natural da concha (fig. 17). O tingimento foi realizado com os corantes orgânicos Azul de Metileno para a cor azul e Safranina para a vermelha. O intuito de distinguir as classes pela cor foi pela facilidade de se reconhecer, durante o experimento, o tamanho de determinada concha.

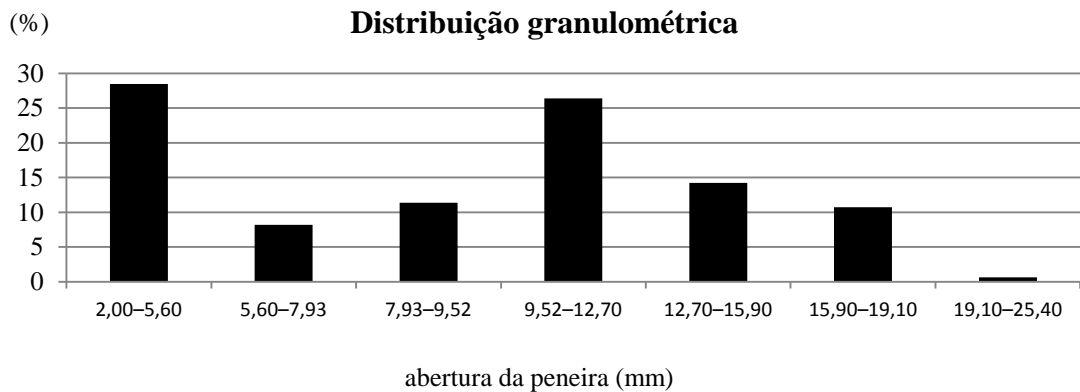


Fig. 16: Distribuição granulométrica dos espécimes peneirados referentes a espécie *Anomalocardia brasiliana*.

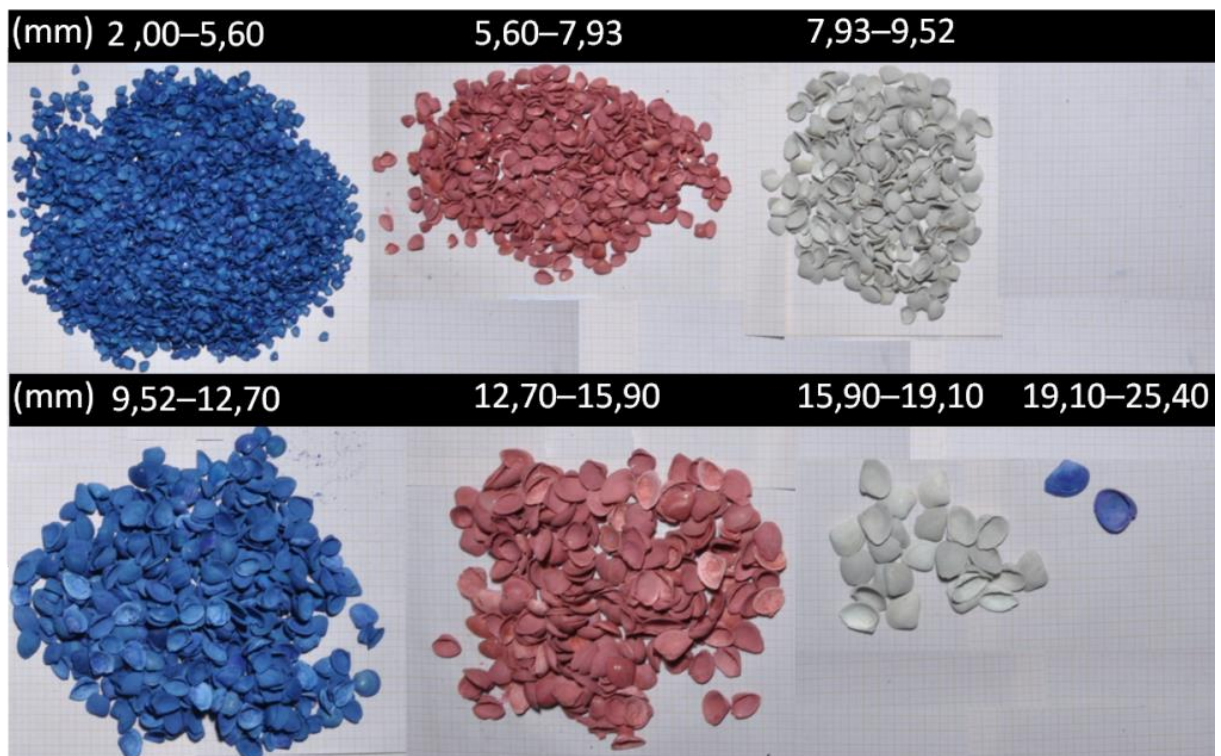


Fig. 17: Fotografia das classes de conchas separadas por peneiramento. Espécie *Anomalocardia brasiliana*.

### 5.5.3. Dados do escoamento

Os dados do escoamento coletados para cada ensaio eram a vazão e a profundidade da linha de água.

A vazão foi mensurada a partir de uma curva de calibração da abertura do registro gaveta (fig. 15, item 4), conforme mostra a fig. 18. Esta curva de calibração foi aferida cronometrando o tempo de enchimento de um reservatório de 100 L para distintas aberturas do registro gaveta.

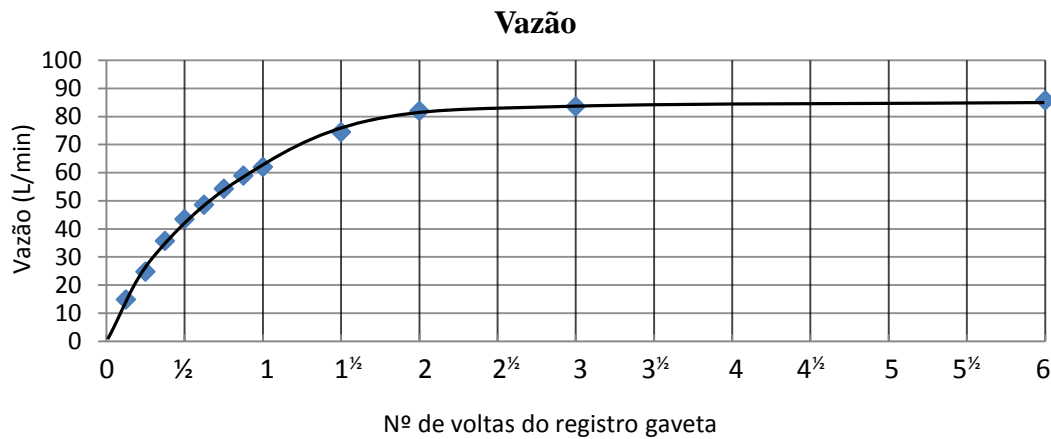


Fig. 18: Curva de calibração da vazão pela abertura do registro gaveta. Os pontos azuis representam os pontos conhecidos, adquiridos no processo de calibração.

A profundidade da linha de água foi medida através de fotografias que eram obtidas durante o experimento. A câmera era posicionada ortogonalmente à frente da margem direita do canal, entre 2,2 e 2,83 m de se início, região onde se localiza a fossa de 2 cm de rebaixo (fig. 15, item 8). Para tanto, utilizou-se um modelo Nikon D5000 acoplada a uma lente planar Carl Zeiss, 1,4/85 mm ZF (fig. 19). O motivo para o uso desta lente foi para evitar distorções nas fotografias. Na parede do canal foi colada uma régua de papel com resolução milimétrica que, deste modo, através da fotografia, permite a determinação da altura da linha de água (fig. 20).



Fig. 19: Câmera fotográfica Nikon D5000, e lente planar Carl Zeiss 1,4/85 mm ZF.

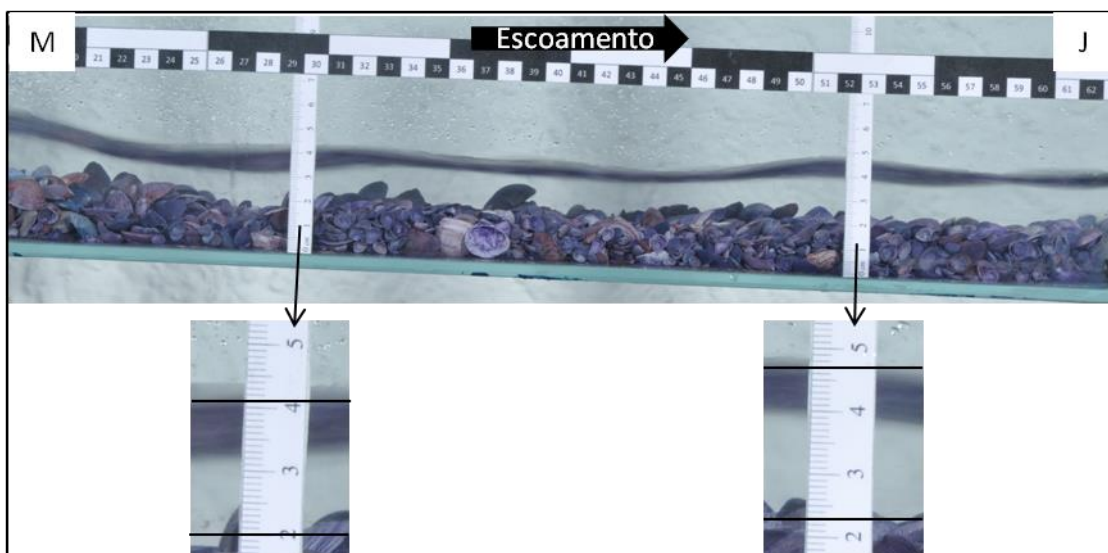


Fig. 20: Fotografia tirada durante um determinado experimento para o levantamento da linha de água. M: Montante; J: Jusante.

#### 5.5.4. Descrição do experimento

As etapas que serão elencadas neste item do presente capítulo, procuraram ser as mesmas para todos os experimentos realizados.

Antes do início do experimento, enchia-se o reservatório de 1000 L, após isso abria-se seu registro esfera (fig. 15, item 2) e ligava-se na energia as duas bombas (fig. 15, item 3). Com o registro esfera de saída (fig. 15, item 9) fechado, enchia-se o canal abrindo os registros de montante (fig. 15, itens 4 e 5), esperava-se o nível de água chegar a uma altura de em torno 15 cm. Por fim, desligava-se a bomba.

Com o leito canal submerso, era colocado o material a ser experimentado na fossa de 2 cm de profundidade até este ficar nivelado ao leito regular do canal. A maneira que se procedia para esta operação é a que segue:

- 1° – enchia-se o canal com água;
- 2° – jogava-se, dentro do canal, as faixas granulométricas de 12,6 à 26, 67 mm (grossos), que antes estavam acondicionadas aleatoriamente num pote;
- 3° – alisava-se o leito com um pincel;
- 4° – jogava-se, dentro do canal, as demais faixas granulométricas, que estavam em outro pote;
- 5° – alisava-se, cuidadosamente, o leito outra vez.

Após o nivelamento do leito erodível, abria-se, o registro de jusante, para esvaziar o canal de maneira lenta. Deste modo, o leito erodível continuava intacto. Esvaziado o canal, tirava-se uma foto de topo do leito, a câmera fotográfica utilizada: Nikon, modelo D5000 18-55 mm (fig. 19). Posteriormente, posicionava-se essa câmera na frente da região do trecho erodível, já

com a lente planar instalada e regulada para tirar fotos automaticamente num período de 5 segundos.

Em seguida, enchia-se, lentamente, o canal até todo o leito erodível ficar submerso, de modo a não perturbá-lo. Nos registros de montante, fechava-se o esfera e regulava-se o gaveta conforme a vazão pretendida. Após isso, abria-se totalmente o registro esfera de montante e simultaneamente ia-se abrindo o registro esfera de saída, esse último era aberto vagarosamente até o escoamento atingir sua altura normal (natural), dava-se o início do experimento.

Ao decorrer do experimento, o material transportado era capturado em uma peneira fixada à jusante do canal (fig. 15, item 10). Além disso, um operador (ajudante), de tempos em tempos, posicionava outra peneira, acima daquela fixa, para coletar o material transportado. Esta coleta, discriminada no tempo era iniciada no 2º minuto do ensaio e durava 1 min, sendo refeita em intervalos de 3 min. Dentro dos 20 minutos de duração do ensaio eram, então, feitas 7 coletas de sedimento acondicionadas em recipientes diferentes. Ao fim do experimento, o canal era esvaziado lentamente, retirava-se e guardava-se o material da peneira fixa e, por fim, tirava-se nova foto de topo do leito erodível.

#### **5.5.5. Pós-experimento**

##### **5.5.5.1. Material transportado**

Todo material transportado era acondicionado em beckers devidamente identificados. Secava-se o sedimento em uma estufa. Posteriormente, era feito a discretização granulométrica do material de acordo com as classes pré-estabelecidas (fig. 17). Este processo era manual, devido à facilidade de separar as classes com as conchas pintadas. Por fim, pesava-se o sedimento.

##### **5.5.5.2. Fotografias de topo**

As fotografias de topo do trecho erodível tiradas após o término dos ensaios foram manipuladas graficamente para se identificar a existência ou não de um sentido predominante do umbo em função do sentido da corrente. A área de cobertura das imagens era dividida em aproximadamente 50 %, em forma de tabuleiro (fig. 21). Cada quadrado amarelo, na mesma figura, possui 4 cm<sup>2</sup>, onde se media, com o auxílio de um transferidor de grau gráfico, a orientação de conchas que estivesse até 50 % de seu tamanho dentro do quadrado.

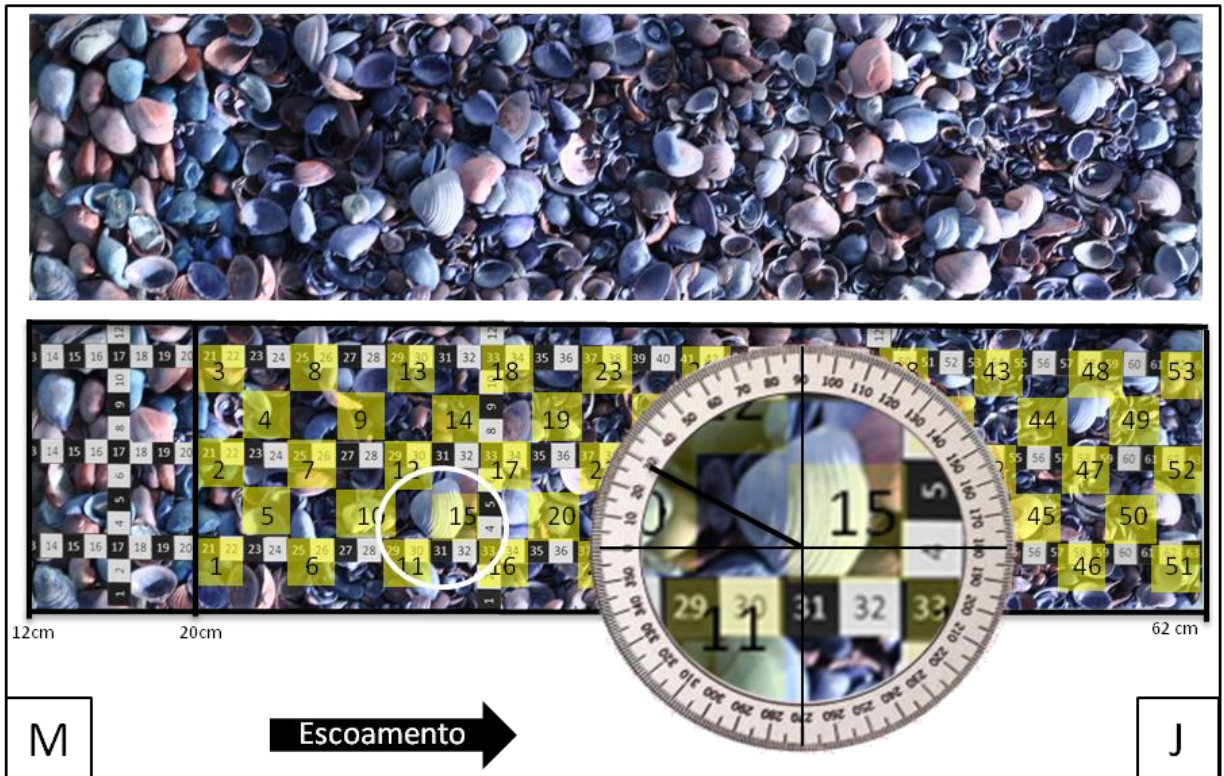


Fig. 21: Acima, fotografia do leito após ensaio. Abaixo, exemplo de como foi feita a leitura da orientação do umbo. M: Montante; J: Jusante.

## **6. Resultados e discussões**

No presente capítulo serão abordados os resultados obtidos através da aquisição dos dados experimentais e suas respectivas discussões.

### **6.1. Ensaio com espécimes individuais**

#### **6.1.1. Início do movimento**

Do levantamento de dados realizados nos experimentos em que espécimes isolados foram testados sobre diversas magnitudes de escoamento, buscou-se identificar as condições necessárias para que ocorresse a mobilização de cada indivíduo. Esta condição foi representada, através de gráficos, que a relaciona em termos de velocidade e tensão de cisalhamento em função da distribuição granulométrica de cada espécie.

Registra-se que todos ensaios realizados com espécimes isolados possuíram números de Reynolds e de Froude maior que 2000 e menor que 1 respectivamente. Classificando o escoamento destes ensaios como turbulentos de regime subcrítico. Além disso os escoamentos foram todos com movimento uniforme (ver item 3.1.4.).

A fig. 22 contempla as 4 espécies estudadas neste trabalho. Nos gráficos, os losangos indicam a velocidade e tensão de cisalhamento, eixo das ordenadas, que dado tamanho de grão, eixo das abscissas, necessitou para ser mobilizado. Deve ser observado que o tamanho da concha está representado pelo eixo intermediário (eixo b). Os losangos vazados representam as situações em que o umbo estava inicialmente apontado para montante, já os sólidos representam o oposto, umbo direcionado para jusante.

Observa-se a partir destes gráficos que nas situações de umbo, inicialmente, para montante, as conchas entram em movimento a baixas magnitudes de escoamento. Já nas situações em que o umbo está apontado para jusante as conchas conseguem resistir mais à ação do escoamento, entrando em movimento a velocidades superiores. Então, pode-se afirmar que as conchas possuem maior estabilidade, ou seja, são mais inertes quando o umbo está, anteriormente a ação do escoamento, apontado para jusante.

Nota-se, que há uma dispersão grande entre os pontos apresentados através de losangos vazados. Este comportamento, foi observado durante a realização dos ensaios. Sua explicação é a seguinte: quando a concha está com umbo apontado para montante, ela entra em movimento a baixas velocidades, porém ela gira no plano horizontal, chegando a uma posição de estabilidade e, assim, ela repousa. Sob a ação de velocidades um pouco maiores, este giro irá buscar outra posição, de maior estabilidade, que tenderá a ser com o umbo, cada vez mais, apontando para a jusante.



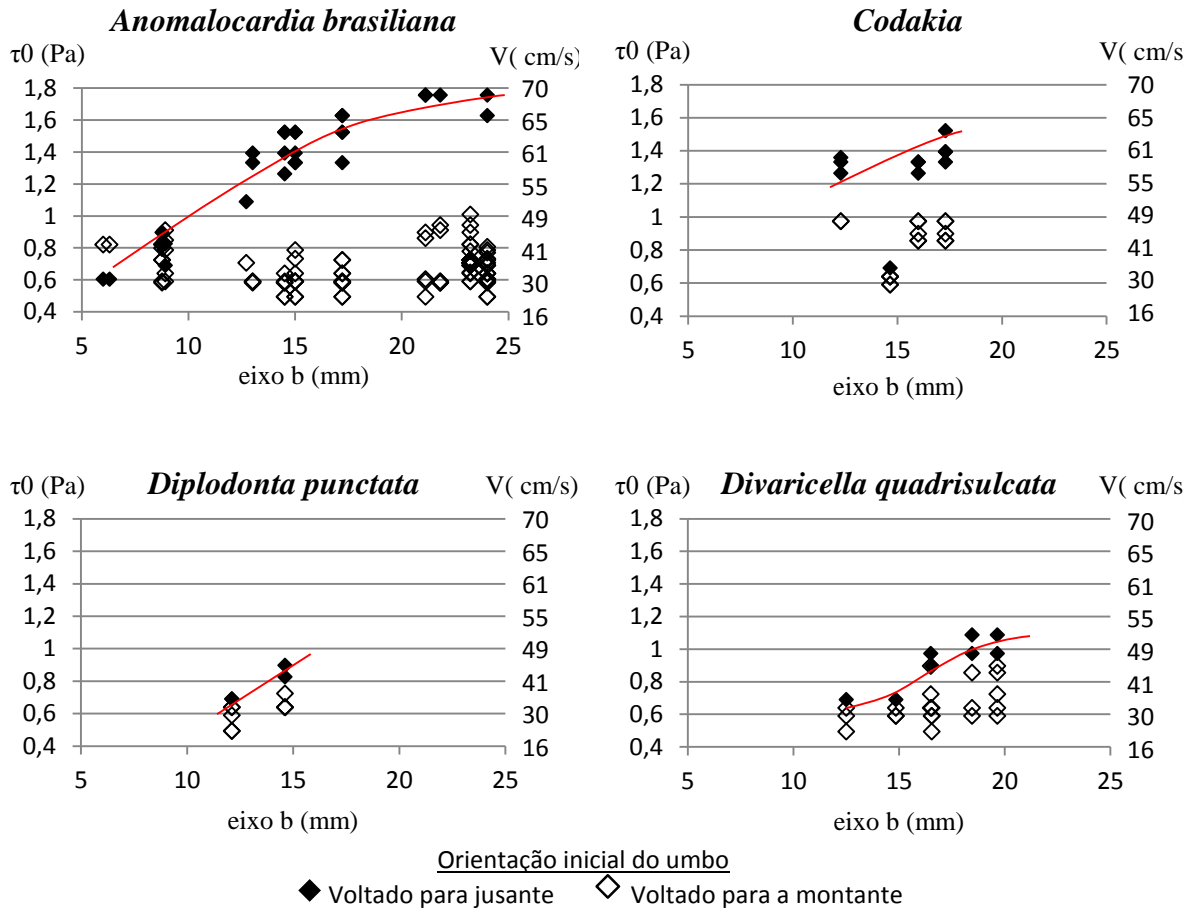


Fig. 22: Gráficos de início de movimento das espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata*, *Divaricella quadrisulcata*. No eixo vertical, a tensão de cisalhamento (esquerda) e a velocidade do escoamento (direita). No eixo horizontal a distribuição granulométrica de cada espécie. A linha vermelha representa o limite entre as fronteiras de repouso e transporte.

Ainda sobre a dispersão dos pontos pertinentes aos losangos vazados nos gráficos, documenta-se que as conchas que entraram em movimento a baixas velocidades percorreram menores distâncias do que as que entraram em movimento quando submetidas a maiores velocidades. Já nas ocasiões em que o umbo estava, inicialmente, direcionado para a jusante observou-se que a concha exigiu maior energia para entrar em movimento, porém, uma vez atingido este ponto crítico, ela não repousa mais.

Dada as observações acima realizadas, é permitido determinar que o limite entre as fronteiras de repouso e transporte destas espécies de conchas bivalves está dentro da nuvem de pontos compostas pelos losangos fechados, umbo para jusante. Pois, embora a concha seja transportada a magnitudes menores que as desse limite, elas acabam repousando. Este limite, nos gráficos da fig. 22, é inferido através da curva vermelha.

Ainda, ao examinar o gráfico (fig. 22) da espécie *Codakia*, nota-se que um espécime (eixo  $b \cong 15$  mm) ficou com seus pontos relativamente a baixo da tendência do

restante. Acredita-se que tal comportamento possa ser explicado pela sua razão tamanho/massa, que, conforme a fig. 23, é nitidamente maior do que os outros espécimes.

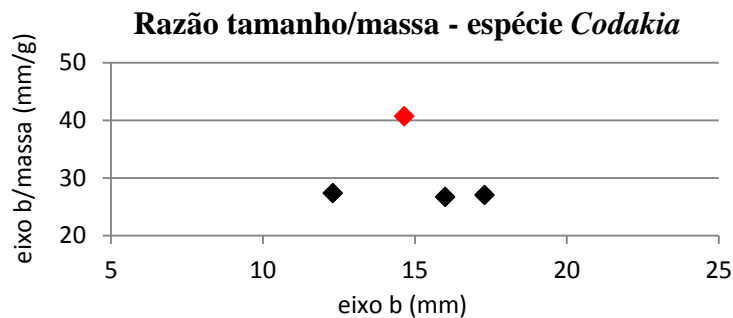


Fig. 23: Razão tamanho/massa da espécie *Codakia*. O ponto vermelho mostra o espécime fora da tendência geral.

O ponto que mais chama atenção, na fig. 22, é a diferença de magnitudes exigidas para por as conchas em movimento nas duas situações investigadas. Recordando aquilo que fora mencionado nos itens 4.1.2. e 4.1.3., alguns autores (Dey, 2003; Chattopadhyay *et al*, 2013) alegam que as conchas são mais estáveis frente ao escoamento nas situações em que estão com o umbo posicionado para montante. Porém, os resultados e observações apresentados neste trabalho mostraram o oposto ao dito por aqueles autores.

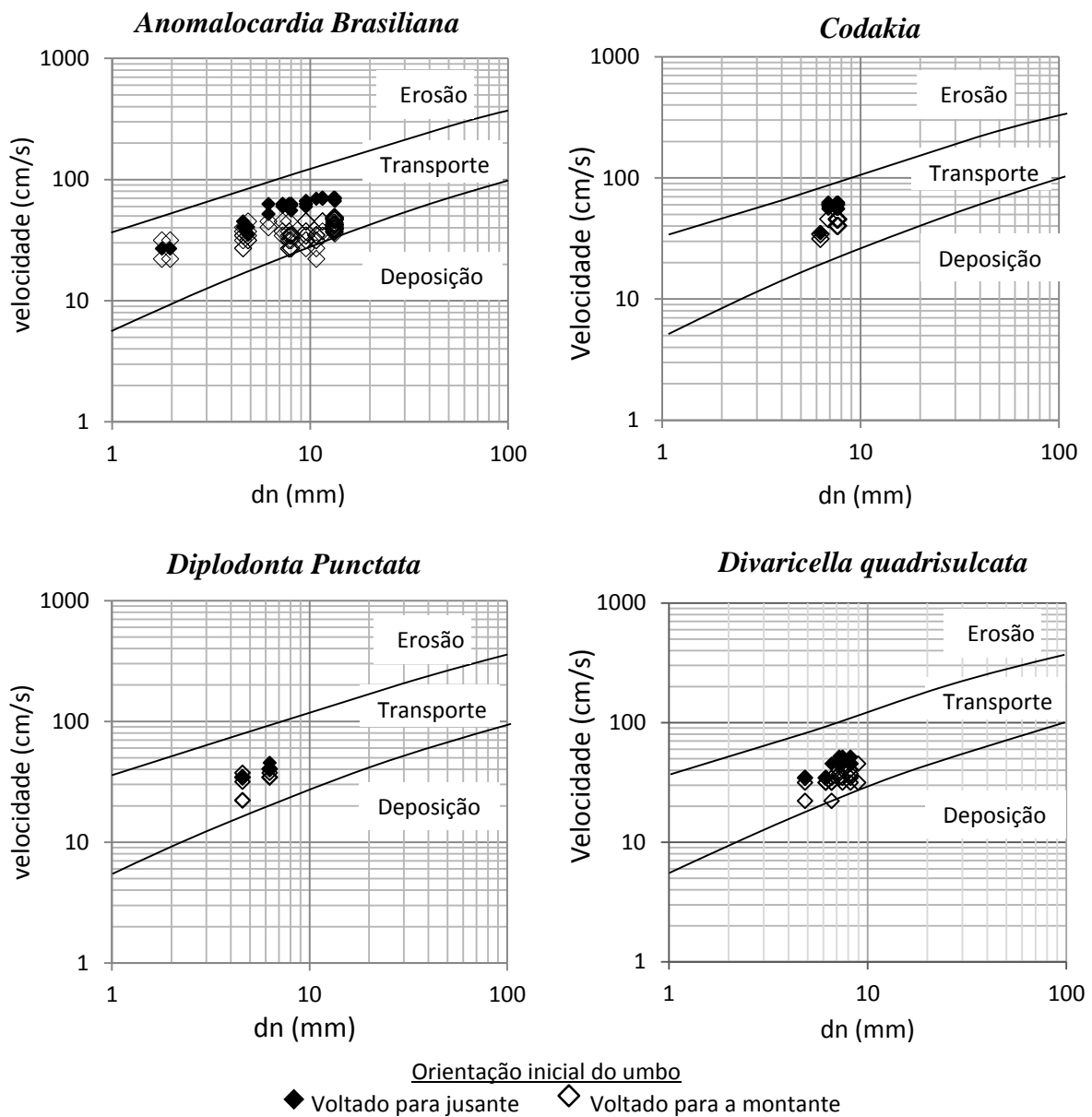
Uma dedução que justifica o resultado defendido por este trabalho é que as forças hidrodinâmicas do escoamento (força de sustentação e de arraste) são menores quando agem sobre conchas que estão com o umbo voltado para a jusante. Isto porque, como pode ser observado na fig. 24, o lado oposto ao umbo possui uma inclinação de sua morfologia mais suave. Portanto, se sobre essas conchas passasse um escoamento da esquerda para direita, este contornaria o grão de maneira mais harmônica, mais hidrodinâmica. Se o escoamento fosse da direita para esquerda, ele iria encontrar uma "parede", principalmente no caso da concha que esta à esquerda na fotografia.



Fig. 24: Fotografia das conchas das espécies *Anomalocardia brasiliana* (esquerda) e *Divaricella quadrisulcata* (direita). Conchas posicionadas com convexidade para cima e eixo b paralelo ao plano da fotografia.

### 6.1.2. Início do movimento: Hjulström (1935)

Os resultados obtidos de mobilização dos espécimes foram plotados no diagrama de Hjulström, conforme mostra a fig. 25. Cabe salientar que este diagrama busca prever, a partir da velocidade média do escoamento, se o grão de determinado tamanho está depositado, em transporte ou na iminência de ser erodido. Os pontos plotados neste diagrama são os mesmos apresentados na figura 22, porém o tamanho dos grãos está representado, no eixo horizontal, pelo diâmetro nominal, que é o diâmetro de uma esfera que possui mesmo volume que a concha. Os tamanhos estão representados por este parâmetro, pois esse possui uma relação entre massa e tamanho similar a existente para grãos siliciclásticos.

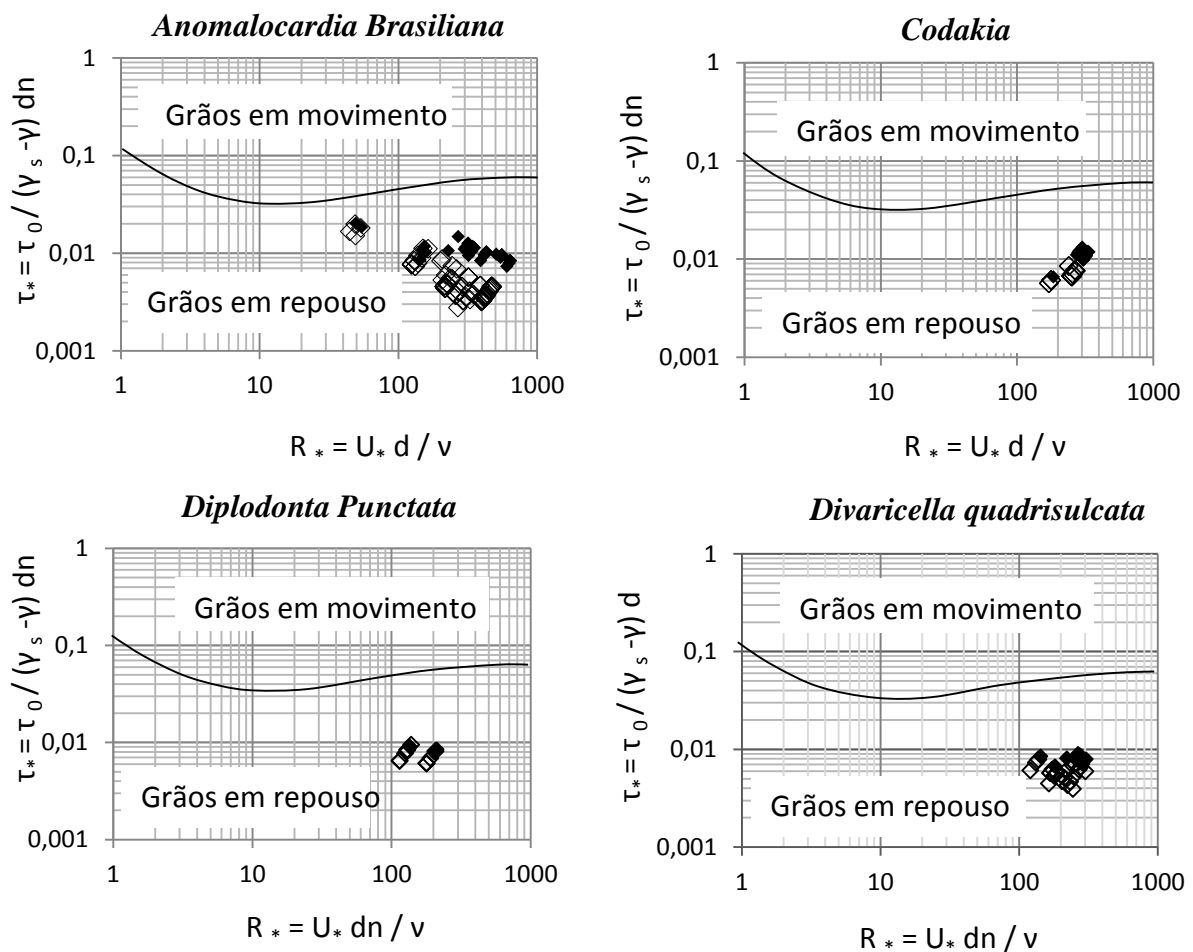


**Fig. 25:** Valores de início de movimento das espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* e *Divaricella quadrisulcata* plotados no diagrama de Hjulström. dn: diâmetro nominal.

Nota-se que, para todas as 4 espécies, os pontos ficaram entre as regiões de previsão de deposição e de transporte. Nenhum ponto ficou dentro do campo da erosão. Isto evidencia os cuidados que devem ser tomados ao se transferir para materiais de forma e natureza diferentes, os critérios estabelecidos para materiais siliciclásticos.

### 6.1.3. Início do movimento: Shields (1936)

Os mesmos pontos, pertinentes as 4 espécies, plotados no diagrama de Hjulström também foram plotados no diagrama de previsão de início de movimento de Shields. A fig. 26 mostra um zoom no referido diagrama.



#### Orientação inicial do umbo

◆ Voltado para jusante;

◇ Voltado para a montante

#### Linhas Oblíquas:

Eixo b da concha, rótulos em milímetros

$\tau^*$  → Tensão de cisalhamento adimensionalizada;

$\gamma_s$  → Peso específico da concha;

$\gamma$  → Peso específico do fluido;  $dn$  → diâmetro nominal;

$R^*$  → N° de Reynolds do Grão;  $\nu$  → viscosidade cinemática;

$U^*$  → velocidade de cisalhamento

Fig. 26: Diagramas de Shields. Valores de início de movimento das espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* e *Divaricella quadrisulcata*. O diâmetro representativo utilizado tanto na tensão de cisalhamento adimensionalizada quanto no N° de Reynolds do Grão foi o diâmetro nominal dos espécimes.

Como já dito, o diagrama de Shields, relaciona um valor tensão de cisalhamento adimensionalizada ( $\tau_*$  – parâmetro de Shields) em função do número de Reynolds do grão ( $R_*$ ), onde existe uma região crítica de início de movimento. Para esses dois parâmetros, o diâmetro característico utilizado foi o diâmetro nominal das conchas. A curva que apresenta os valores críticos de  $\tau_*$ , definida pelo citado autor, possui valores de  $\tau_*$  variando entre  $3 \times 10^{-2}$  e  $5 \times 10^{-2}$  para números de Reynolds do grão entre 100 e 1000 (fig. 23). Para as 4 espécies, assim como ocorre no diagrama de Hjulström, os pontos ficaram abaixo da curva, estando os pontos, adquiridos experimentalmente, dentro do campo de repouso dos grãos no diagrama de Shields. A morfologia única das conchas é apontada como a principal causa destes resultados não acompanharem essas curvas de previsão de início de movimento de transporte sólido.

Os pontos de início de movimento das mesmas 4 espécies, adquiridos nas situações em que o umbo está voltado para a jusante são apresentados em um só gráfico (fig.27). Este gráfico mostra que, para todas as espécies, a distribuição dos pontos obedecem a mesma relação de  $\tau_*$  e  $R_*$ . Desta forma observou-se que, para as condições experimentais trabalhadas, há um rebatimento para baixo no limite repouso/transporte do diagrama de Shields para estas espécies de conchas.

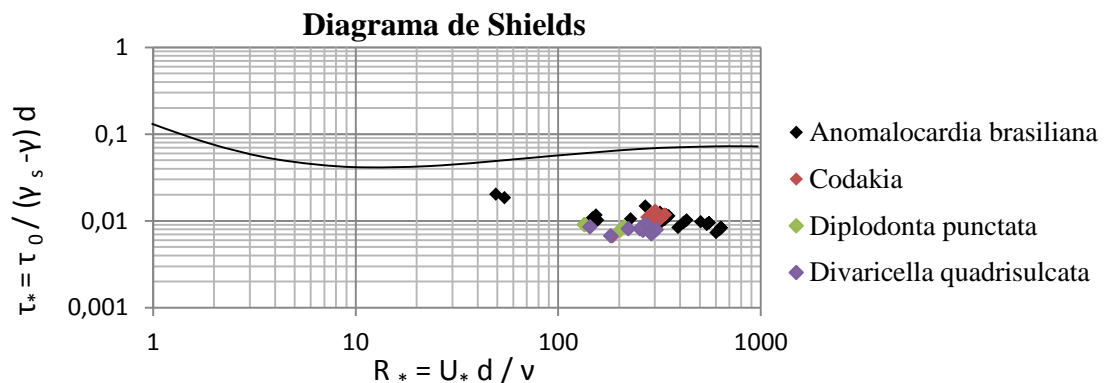


Fig. 27: Diagramas de Shields. Valores de início de movimento das espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* e *Divaricella quadrisulcata*. O diâmetro representativo utilizado tanto na tensão de cisalhamento adimensionalizada quanto no N° de Reynolds do Grão foi o diâmetro nominal dos espécimes. Os pontos representam o início do movimento nas situações em que o umbo está voltado para a jusante. A simbologia dos eixos é a mesma da figura 26.

#### 6.1.4. Orientação do umbo

Os dados coletados nos experimentos pertinente a orientação do umbo após o repouso são apresentados neste capítulo através de diagramas de roseta (fig. 28). Cabe lembrar que esta medida foi coletada, apenas, naquelas situações cuja a orientação inicial do umbo estava voltada para montante. O motivo, é que, nos ensaios em que o umbo estava apontado para jusante, a concha não repousava mais depois que era posta em movimento.

A fig. 28 mostra, para as espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia* e *Divaricella quadrisulcata*, uma relação da orientação com a distância percorrida pela concha até o repouso. Além disso, para a primeira, o resultado está discriminado entre a valva esquerda e a direita. Observando os diagramas, nota-se que existe uma tendência específica para essa espécie, onde a valva direita tende a girar no sentido anti-horário e a valva esquerda no sentido horário. Para as demais espécies, que são simétricas, não se observa essa tendência.

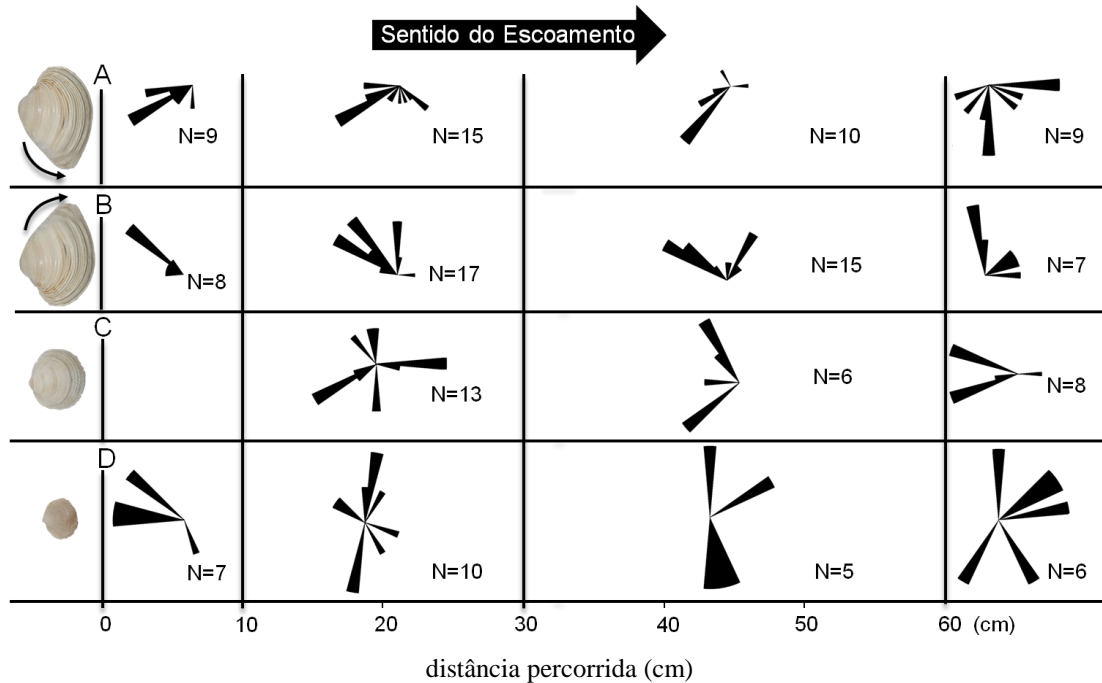


Fig. 28: Diagramas de Roseta apontam o sentido final do Umbo em função da distância para as espécies: A- *Anomalocardia brasiliana* (valva direita); B- *Anomalocardia brasiliana* (valva esquerda); C- *Divaricella quadrisulcata*; D- *Codakia*. Em todas as medidas, a posição inicial de cada espécime foi com umbo apontando para montante. N: quantidade de medições.

Outra informação extraída destes resultados, embora pouco nítida nos diagramas de roseta, é que há um número maior de medidas que tendem a apontar mais para a jusante conforme aumenta a distância percorrida. Visto que, conchas que percorreram maiores distâncias foram postas em movimento por velocidades maiores do que as que percorreram menores distâncias. Tal tendência concorda com o que já fora elucidado neste trabalho, quando dito que a concha tende a possuir maior estabilidade frente ao escoamento quando o umbo está, cada vez mais, apontando para a jusante.

Os resultados mostram que a espécie *Anomalocardia brasiliana* pode ser utilizada como uma identificadora do sentido da corrente que a transportou. A conclusão que se chega é que, a valva esquerda tende a estar com umbo apontado para margem esquerda do escoamento, e à direita no sentido oposto. Para ambas as situações, ocorre uma variação de 180° entre o umbo

estar apontado para montante e para jusante conforme esquema da figura 29. Embora ocorra uma grande variação da orientação dessa espécie bivalve, consegue-se identificar um padrão de orientação a partir do momento que se analisa separadamente valva esquerda e valva direita. Tal comportamento encaixa-se ao padrão bimodal de orientação de bivalves relatado por Kidwell *et al.*, 1986 (ver item 4.2.).

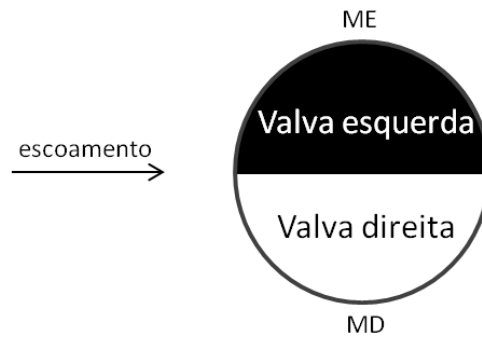


Fig. 29: Esquema mostrando o campo de orientação do umbo para valva esquerda (campo preto) e para valva direita (campo branco). Escoamento da esquerda para direita. ME: Margem esquerda. MD: Margem direita.

A explicação para esse comportamento pode ser atribuída a assimetria existente entre os lados da concha que são divididos pelo eixo  $b$  da concha, quantificada através da razão entre os semi-eixos  $a'$  (menor)/ $a''$  (maior) que foram apresentados na tabela 2. O fenômeno ocorre pois o centro de massa da concha está próximo ao umbo, dentro do plano formado pelos eixos  $b$  e  $c$ . Quando uma concha, submetida a ação de um escoamento, possui um de seus semi-eixos ( $a'$  e  $a''$ ) maior do que o outro, o primeiro recebe um torque superior ao segundo fazendo com que a concha sempre gire de maneira tendenciosa. A fig. 30 elucida essa argumentação.

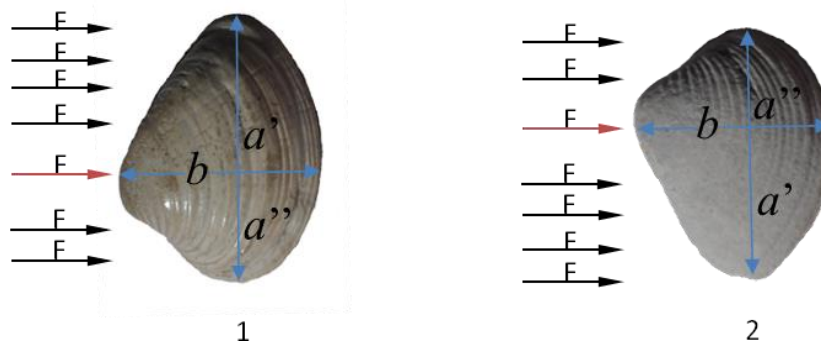


Fig. 30: Esquema ilustrando a distribuição da força que empurra a concha ao longo do eixo  $a$ . Espécie *Anomalocardia brasiliana*. 1: valva esquerda; 2: valva direita. Seta vermelha representa a força aplicada próximo ao centro de massa da concha, as setas pretas representam as forças aplicadas ao longo dos semi-eixos  $a'$  e  $a''$ . As setas azuis indicam a direção dos eixos da concha.

A fig. 31 apresenta o gráfico com os valores de razão dos semi-eixos  $a'$  e  $a''$  para as quatro espécies estudadas neste trabalho. Fica claro que tal fator de assimetria é maior na espécie *Anomalocardia brasiliana* do que nas demais, evidenciando sua propensão a girar com uma tendência predominante ao passo que as outras giram aleatoriamente.

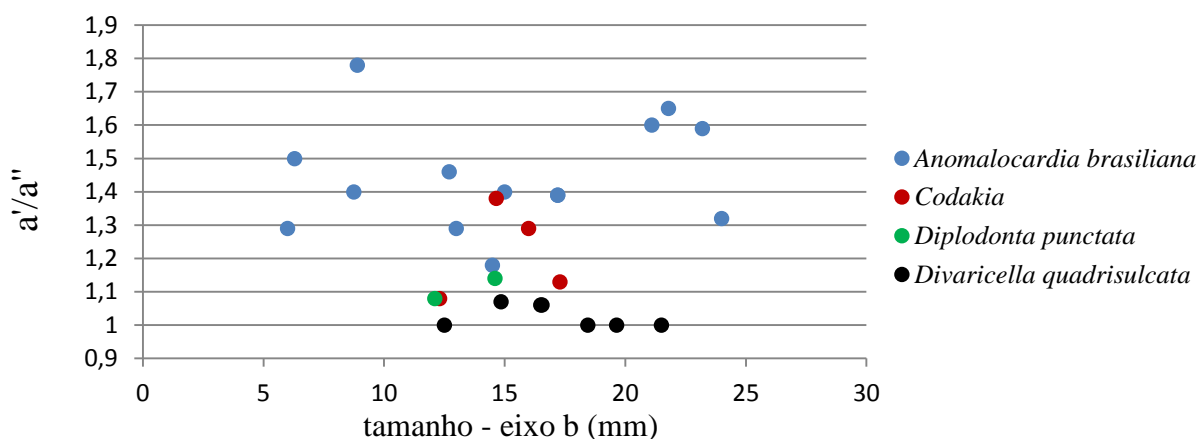


Fig. 31: Gráfico mostrando o fator de assimetria  $a'/a''$  para as espécies *Anomalocardia brasiliana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata* e *Divaricella quadrisulcata*.

## 6.2. Ensaio sobre leito de conchas – Espécie *Anomalocardia brasiliana*

A partir da coleta do sedimento transportado em cada ensaio foi possível estabelecer uma relação da capacidade e competência de magnitudes diferentes de escoamento transportarem o leito de conchas. Alguns parâmetros do escoamento e medidas do material coletado durante os ensaios são apresentados na tabela 4. Salienta-se aqui que os valores de massa transportada neste e nos itens 6.2.1. e 6.2.2. deste trabalho representam a massa total, que foi transportada pelo escoamento durante toda a duração de cada experimento.

Tabela 4: Parâmetros do ensaios e material coletado.

Ensaio	duração (min)	Vazão (l/s)	Velocidade (cm/s)	Massa total transportada (g)	Massa total transportada por frações (T)							
					Abertura das peneiras (mm)							
					2-5,6		5,6-7,93		7,93-9,52		9,52-12,7	
(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)					
E1	20	1,43	57	190,82	72,5	38	24,7	13	38,1	20	55,3	29
E1-R				229,8	94,2	41	40,8	18	48,0	21	46,8	20
E3	20	1,36	54	76,48	21,1	28	15,0	20	14,1	18	26,2	34
E3-R				122,90	37,7	31	19,7	16	29,1	24	36,4	30
E4	20	1,25	52	106,90	44,3	41	18,5	17	22,8	21	21,3	20
E4-R				76,52	20,2	26	11,5	15	17,1	22	27,7	36
E2	20	0,98	48	22,89	6,9	30	3,3	14	4,8	21	7,8	34
E2-R				43,95	18,9	43	7,3	17	12,3	28	5,4	12



### 6.2.1. Capacidade de transporte – massa total transportada

A capacidade de transporte, que diz respeito à carga sedimentar que pode ser carregada pela corrente (Suguio, 2003), é apresentada na fig. 32, através de um gráfico que relaciona a velocidade do escoamento no eixo vertical e a massa total transportada durante cada ensaio no eixo horizontal.

Os pontos do gráfico da fig. 32 representam, em termos da massa transportada, a média entre o 1º ensaio e sua repetição para cada valor de velocidade. Dentro da faixa de magnitudes de escoamento trabalhadas, o gráfico mostra que há um padrão específico para a capacidade de transporte. Conforme mostra a linha de tendência e sua equação, a capacidade é função da velocidade do escoamento.

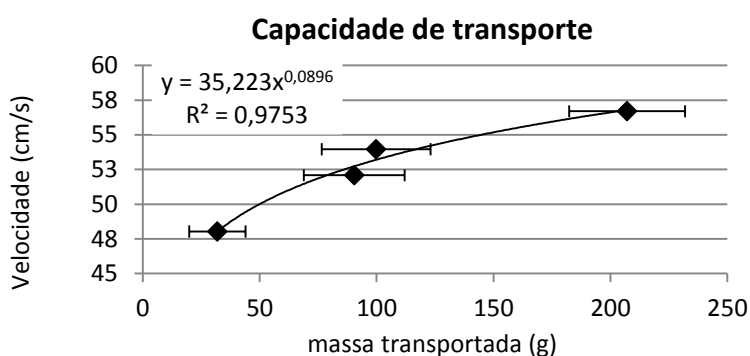


Fig. 32: Gráfico mostrando a relação de velocidade do escoamento e massa transportada para os 8 ensaios realizados. A curva representa uma linha de tendência da distribuição dos pontos e, ao lado, sua equação.

Como era de se prever, escoamentos com maiores velocidades possuíram maior capacidade de transporte. Extrapolando-se esta tendência em direção a velocidades mais baixas, chegar-se-ia a ao valor de 35,22 cm/s, velocidade a qual o escoamento não conseguiria mobilizar nenhuma partícula deste leito

### 6.2.2. Competência de transporte – massa total transportada

A competência de transporte pode ser dada pelo máximo diâmetro que uma dada vazão de um escoamento pode carregar (Suguio, 2003). A partir da discretização granulométrica do material transportado para cada ensaio, conforme consta na tabela 2, buscou-se determinar a competência do escoamento.

O gráfico da fig. 33 apresenta estes resultados em termos da massa transportada, no eixo vertical para cada fração granulométrica, eixo horizontal. Contudo, desconsiderou-se na solução e interpretação destes resultados as frações acima de 12,70 mm de abertura da peneira. Isto, porque, como está explicado no capítulo metodologia (item 5.4.4.), estas frações foram preteridas ao serem colocadas no canal, propositalmente, antes das demais.

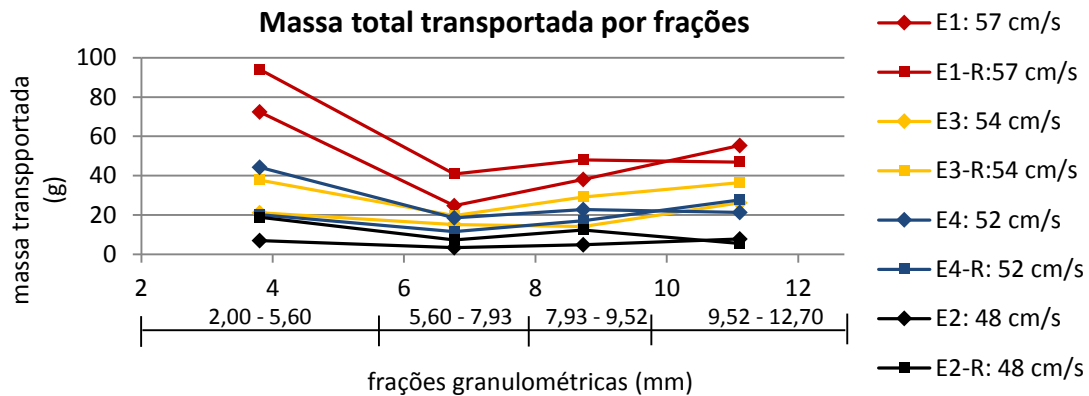


Fig. 33: Gráfico relacionando a massa transportada para cada fração granulométrica. No eixo das abscissas, o tamanho está representado pelo valor médio de seu intervalo granulométrico.

Nota-se, na mesma figura, que todas as magnitudes ensaiadas possuíram competência para transportar o maior intervalo granulométrico analisado. Percebe-se, para quase todos ensaios com exceção do ensaio E2R, que as frações granulométricas que mais transportaram foram a de 2,0 a 5,6 mm e a de 9,52 a 12,70 mm. Este comportamento deve-se ao fato de que o material colocado no leito anteriormente aos ensaios continha mais essas frações do que as frações intermediárias (5,60 a 9,52 mm), conforme foi mostrado na distribuição granulométrica da fig. 14 (item 5.5.2).

A correção dessa informação é apresentada na tabela 5 e fig. 34, onde o material transportado para cada fração é relacionado com o material que foi posto no canal anteriormente ao ensaio. A tabela 4 mostra, para cada fração granulométrica, a porcentagem em massa do material transportado (T) pelo material colocado no leito do canal (C) e, também, os valores da massa colocada no canal (C), que foram os mesmos para todos ensaios. A massa transportada (T) é a que consta na tabela 3.

Tabela 5: Valores de T/C e C para todos ensaios

Ensaio	T/C (% em massa)				C (g)			
	abertura das peneiras (mm)				abertura das peneiras (mm)			
	2,0-5,6	5,6-7,93	7,93-9,52	9,52-12,70	2,0-5,6	5,6-7,93	7,93-9,52	9,52-12,70
E1	25,59	30,43	33,70	21,05	283,54	81,35	113,28	262,7
E1-R	33,23	50,25	42,41	17,81				
E3	7,45	18,43	12,44	9,98				
E3-R	13,29	24,30	25,70	13,86				
E4	15,62	22,82	20,13	8,11				
E4-R	7,14	14,24	15,16	10,54				
E2	2,44	4,13	4,23	2,98				
E2-R	6,66	8,97	10,90	2,05				

O gráfico da figura 34 mostra, no eixo vertical, os percentuais de massa transportada pela massa colocada no canal e, no eixo horizontal, as frações granulométricas. A partir deste resultado, observa-se que, quando se normalizou o valor de massa transportada por aquela que fora posta no canal, as frações granulométricas intermediárias foram mais transportadas quando comparadas com as frações finas e com as grossas. Ainda se observa que, a fração granulométrica de 9,52 a 12,70 mm (grossa) foi a menos transportada pelo escoamento.

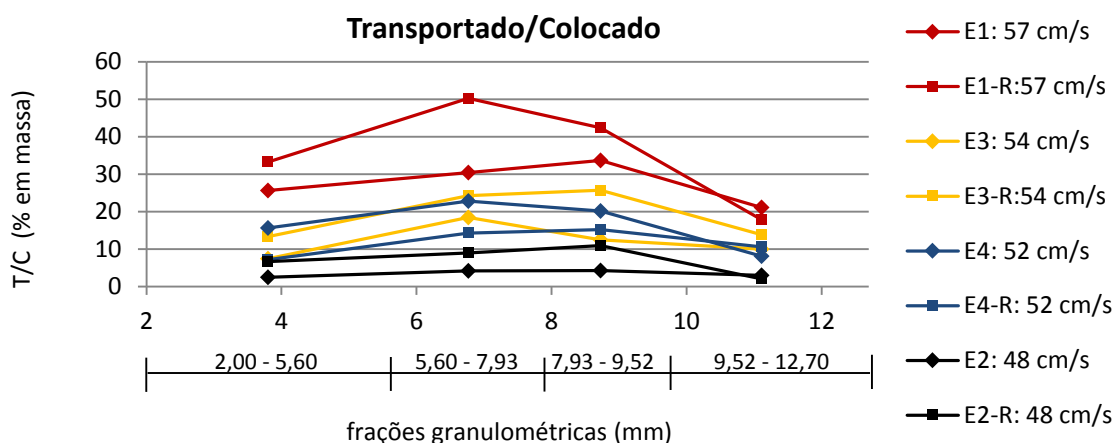


Fig. 34: Gráfico relacionando o percentual transportado/disponível no leito para as frações granulométricas de 2 a 12,70 mm. No eixo das abscissas, o tamanho está representado pelo valor médio de seu intervalo granulométrico.

Outra questão que pode ser observada tanto pelo gráfico da fig. 33 como o da fig. 34 é que ensaios com mesma vazão (ensaio e repetição) carregaram quantidades diferentes de sedimento. Cabe ressaltar que para todos ensaios foi colocado no canal a mesma quantidade de sedimento por frações granulométricas e sempre através do mesmo procedimento (item 5.5.4.). O item 6.2.1. aborda a investigação desse análise.

### 6.2.3. Relação – textura inicial / massa transportada

Ao observar, nas fig. 33 e 34, que mesmas vazões e velocidades carregaram quantias distintas de sedimento, estes resultados mostraram que há ausência de uma concordância unívoca entre a energia do escoamento e a quantidade de material transportado. Inclusive, o ensaio E4 (V: 52 cm/s) carregou mais sedimento que o E3 e quase a mesma quantidade que o E3R (V: 54 cm/s). Tal fenômeno pode ser atribuído à aleatoriedade da textura inicial do leito, visto que, esse parâmetro é de difícil controle quando se trabalha com um leito composto por um sedimento bimodal.

Desta aleatoriedade da textura inicial do leito sugere-se que ensaios cuja textura inicial fosse mais fina conseguiriam carregar mais sedimento. Esta premissa está intrinsecamente

ligada aos conceitos de capacidade e competência de transporte. Esta hipótese pode ser explicada através da análise qualitativa das fotografias tiradas antes do ensaio.

A fig. 35 apresenta as fotografias dos ensaios E2, E2R, E4 e E4R antes do início do experimento. É notável, ao comparar o ensaio E4 com o E4R, que o primeiro possuía uma textura inicial mais fina que sua repetição. Esta análise explica o motivo pelo qual o ensaio E4 carregou mais sedimento do que o E4R. Além disso, como consta na tabela 4, o ensaio E4 carregou mais a fração fina do que a fração grossa. O oposto é observado no ensaio E4R. Esta segunda observação também deve-se a textura inicial do leito.

Observando as fotografias do leito dos ensaios E2 e E2R, nota-se que no ensaio E2 a textura é um pouco mais grossa que a do ensaio E2R. Outra observação a ser feita é que no ensaio E2 continha mais conchas posicionadas com o lado convexo para cima, posição em que exige maiores magnitudes de escoamento para transportar as conchas do que quando elas estão com o lado côncavo para cima. Já no ensaio E2R há um número menor de conchas viradas com a parte convexa para cima. Então, devido à textura e à posição inicial das conchas atribui-se o motivo de o ensaio E2R ter carregado mais sedimento. E, também, ao fato de o ensaio E2R ter carregado mais a fração fina (2 a 5,6 mm) do que a fração grossa (9,52 a 12,70 mm), ocorrendo situação oposta no ensaio E2.

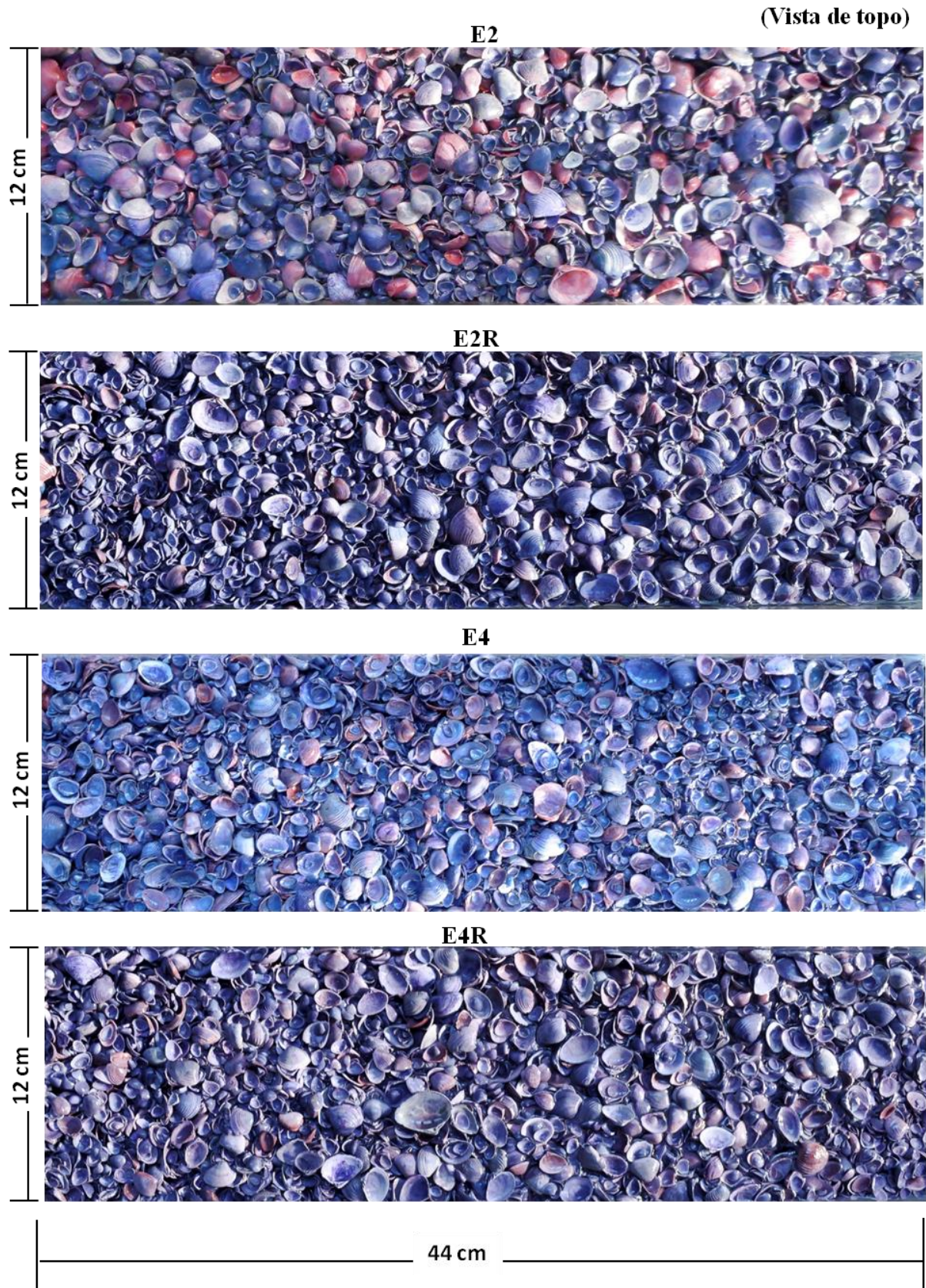


Fig. 35: Fotografias de topo dos ensaios E2, E2R, E4 e E4R antes do início do ensaio.

#### 6.2.4. Capacidade de transporte – massa coletada no tempo

Tendo como base a observação visual, o sedimento coletado em intervalos regulares de tempo durante os experimento e as fotografias de evolução destes, conforme consta no item 5.5, buscou-se documentar a evolução temporal da competência de transporte.

Ressalta-se, aqui, que a coleta de material discretizada no tempo não foi realizada nos ensaios E1 e E2, pois foi nesses dois ensaios que se observou essa necessidade.

Notou-se, a partir dos ensaios E1 e E2, que a taxa de material transportado decai durante o ensaio. Isto é, no início do ensaio é carregado uma grande quantidade de material, ao passo que o leito vai adquirindo equilíbrio para dada condição de escoamento, diminui-se esta taxa de transporte. Próximo desse equilíbrio, a mobilização e transporte das conchas se dá por meio de pulsos. Ou seja, há intervalos de tempo com ausência de transporte que são findados pelo colapso de conchas que estavam, antes, imbricadas.

A figura 36 apresenta uma relação da evolução da massa transportada no tempo para os demais ensaios. Os gráficos mostram, no eixo vertical, a massa transportada e, no eixo horizontal, o intervalo de tempo correspondente. A linha vermelha expressa a média de toda a massa coletada durante os intervalos de tempo. Os rótulos acima das barras, nos gráficos, representam, em milímetros, o tamanho médio da concha transportada, ponderado pela massa das frações transportadas em cada coleta (média aritmética ponderada). A média aritmética ponderada foi calculada, para cada fração granulométrica coletada, a partir da média dos limites de cada fração. As duas equações abaixo expressam a média das frações e a média a média aritmética ponderada:

$$Mf = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (12)$$

onde:

$Mf$ : média da fração (mm)

$X_1$  e  $X_2$ : limites inferior e superior de cada fração (mm)

$$Mp = \sum_{i=1}^{i=4} \frac{Mf_i \cdot mc_i}{mc_i} \quad (13)$$

onde:

$Mp$ : média aritmética ponderada (mm)

$Mf_{1,2,3e4}$ : médias das frações de 2-5,6 mm, 5,6-7,92 mm, 7,92-9,52 mm e 9,52-12,70 mm.

$mc_{1,2,3e4}$ : massa coletada de cada umas dessas frações (g)

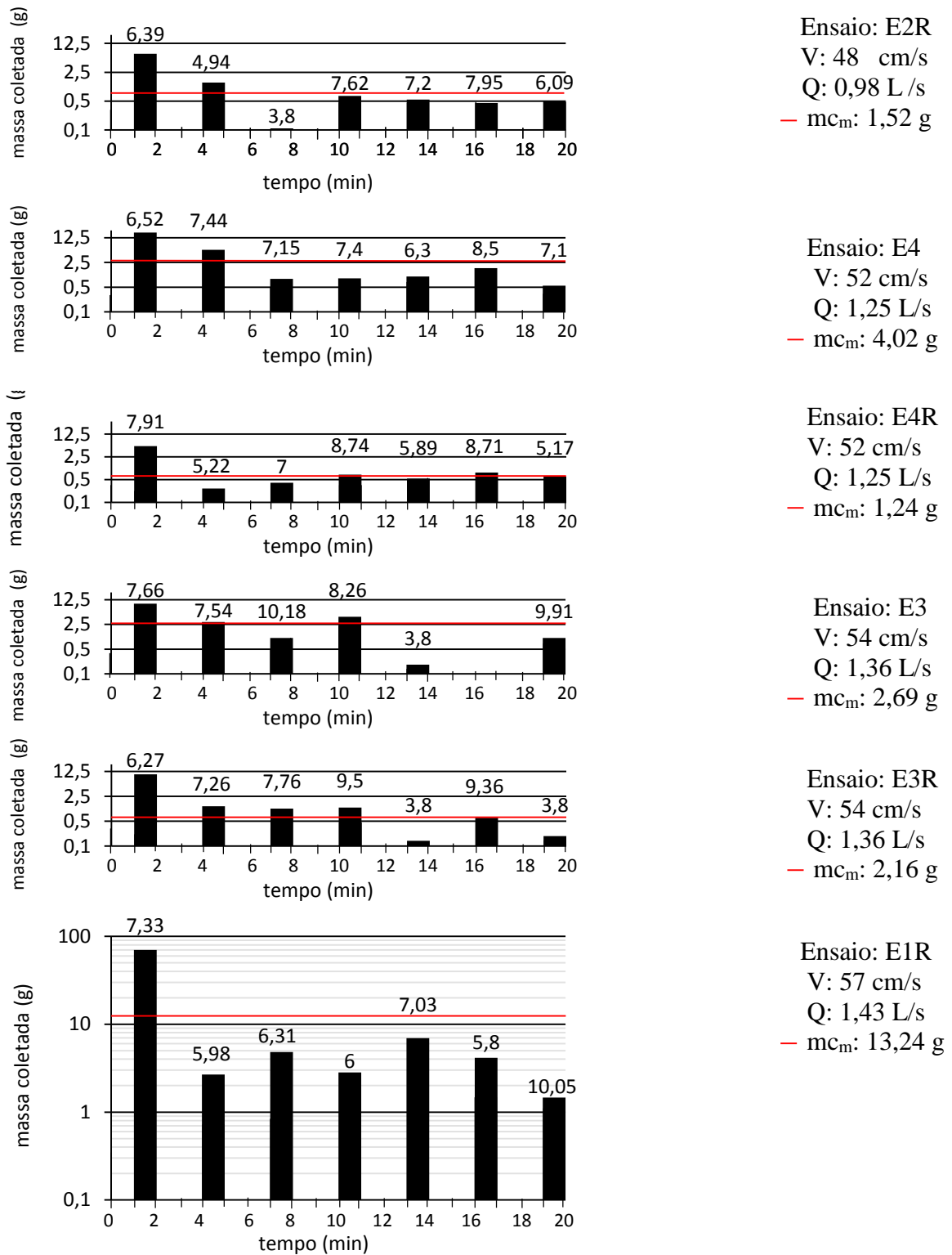


Fig. 36: Gráficos dos ensaios: E1R, E2R, E3, E3R, E4 e E4R. Os gráficos mostram a massa transportada em cada coleta ao longo do tempo. Os rótulos acima das barras representam o tamanho médio (em mm) do material coletado em cada intervalo de coleta. A linha vermelha mostra a média das massas coletadas ( $mc_m$ ). Na legenda, Q: vazão; V: velocidade média da corrente;  $mc_m$ : média das massas coletadas. O eixo vertical dos gráficos estão em escala logarítmica de base 5 com exceção do E1R que é de base 10.

Os gráficos de todos ensaios retratam um padrão semelhante: na coleta do primeiro intervalo de tempo (1 a 2 min) há um valor alto de material transportado, e a contar da segunda coleta (4 a 5 min), a massa de material transportado cai bruscamente, não havendo mais variações consideráveis. Os gráficos não mostram a massa transportada no 1º minuto do ensaio, porém indicam, por sua tendência, que é o intervalo de tempo cuja maior parte do sedimento foi transportado. Portanto, pode-se afirmar que a capacidade do escoamento vai diminuindo à medida que o leito vai se ajustando a condição de escoamento.

Ainda na fig. 36, observa-se que não existe uma tendência do tamanho de grão transportado no decorrer do ensaio. Nota-se, através dos tamanhos médios é que estes aumentam e diminuem aleatoriamente ao longo dos intervalos discretos de tempo. O que se esperaria é que esses valores fossem aumentando do início para o fim do ensaio, ou seja, as conchas menores seriam carregadas inicialmente e, à medida que a textura do leito fosse ficando cada vez mais grossa, restaria apenas os tamanhos maiores para serem transportados.

A explicação para essa questão pode ser atribuída ao fenômeno conhecido como *hiding-sheltering effect* (Southard, 2006), onde as partículas maiores protegem as menores do escoamento, conforme mostra a fig. 37. Além disso, conchas menores podem ficar dentro da valva de uma concha maior. Então, mesmo próximo ao término do ensaio, quando uma concha maior é arrancada do leito e, conseqüentemente, transportada, ela liberta as conchas menores que não estavam sendo atacadas pelo escoamento. Desta forma, tem-se que, tamanhos maiores e menores são carregados indiscriminadamente ao longo do tempo.

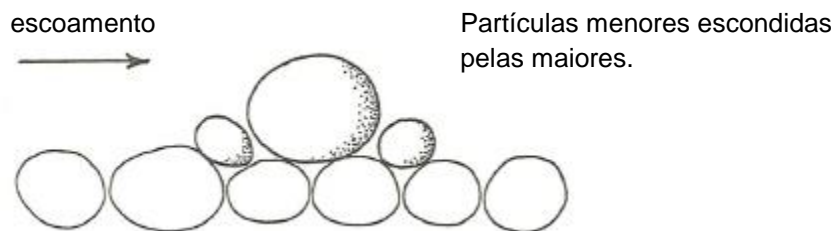


Fig.37: *Hiding-sheltering effect*. Partículas maiores protegem as menores do escoamento. (Modificado de Southard, 2006).

### 6.2.5. Competência de transporte – massa coletada no tempo

Através dos tamanhos médios das conchas apresentados para cada coleta de sedimento nos gráficos da fig. 36, pode-se extrair o valor máximo desse parâmetro para indicar a existência de uma tendência entre a magnitude do escoamento e a competência de transporte. Este tamanho máximo para cada um dos ensaios é apresentado na fig. 38 no eixo das ordenadas em função da vazão do escoamento, eixo das abscissas.



A fig. 38 evidencia a existência de uma correlação entre a magnitude do escoamento, representada pela vazão, com o máximo tamanho de grão carregado pelo escoamento. Entretanto, essas medidas experimentais apresentam um certo grau de dispersão. Uma amostragem maior refinaria a linha de tendência e equação apresentadas neste gráfico, cuja lei ajustada é:

$$T_{m\acute{a}x} = 7,8581Q^{0,6382} \quad (14)$$

onde:

$T_{m\acute{a}x}$ : tamanho máximo transportado (mm)

$Q$ : vazão (l/s)

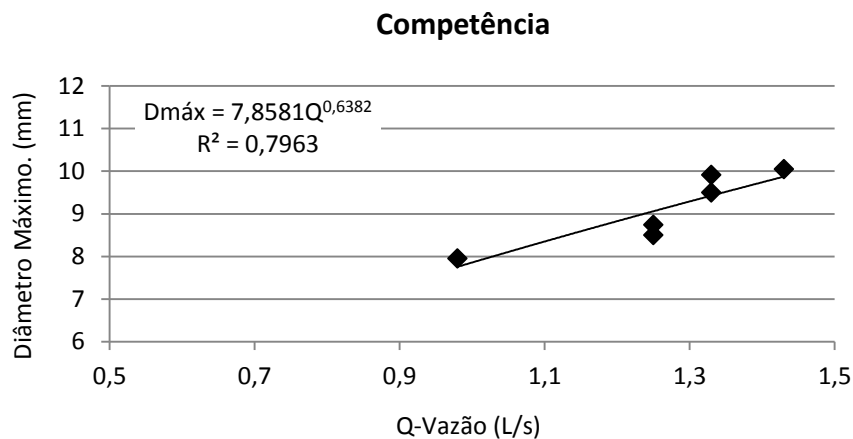


Fig. 38: Gráfico relacionando o diâmetro máximo em função da vazão. Os losangos sólidos apresentam os valores encontrados em cada ensaio. A linha preta representa a linha de tendência da distribuição dos pontos e no canto superior esquerdo, sua respectiva equação.

### 6.2.6. Orientação do Umbo

Por meio das imagens de topo do leito tiradas ao final dos ensaios, buscou-se testar, através de diagramas de rosetas (fig.39), se o padrão de orientação final do umbo observado nos experimentos com espécimes individuais ocorre também nesta situação. Ressalta-se que, foi computada, apenas, as conchas que estavam, ao fim do ensaio, posicionadas com seu lado convexo para cima.

Recordando que nos experimentos com espécimes isolados, foi estabelecido que, para a espécie *Anomalocardia brasiliana*, existe uma tendência de que a valva direita aponte o umbo para margem direita do escoamento e a esquerda aponte para o sentido oposto. Este comportamento pode explicar o padrão bimodal de orientação de conchas bivalves sob a ação de correntes descrito por Kidwell *et al.* (1986).

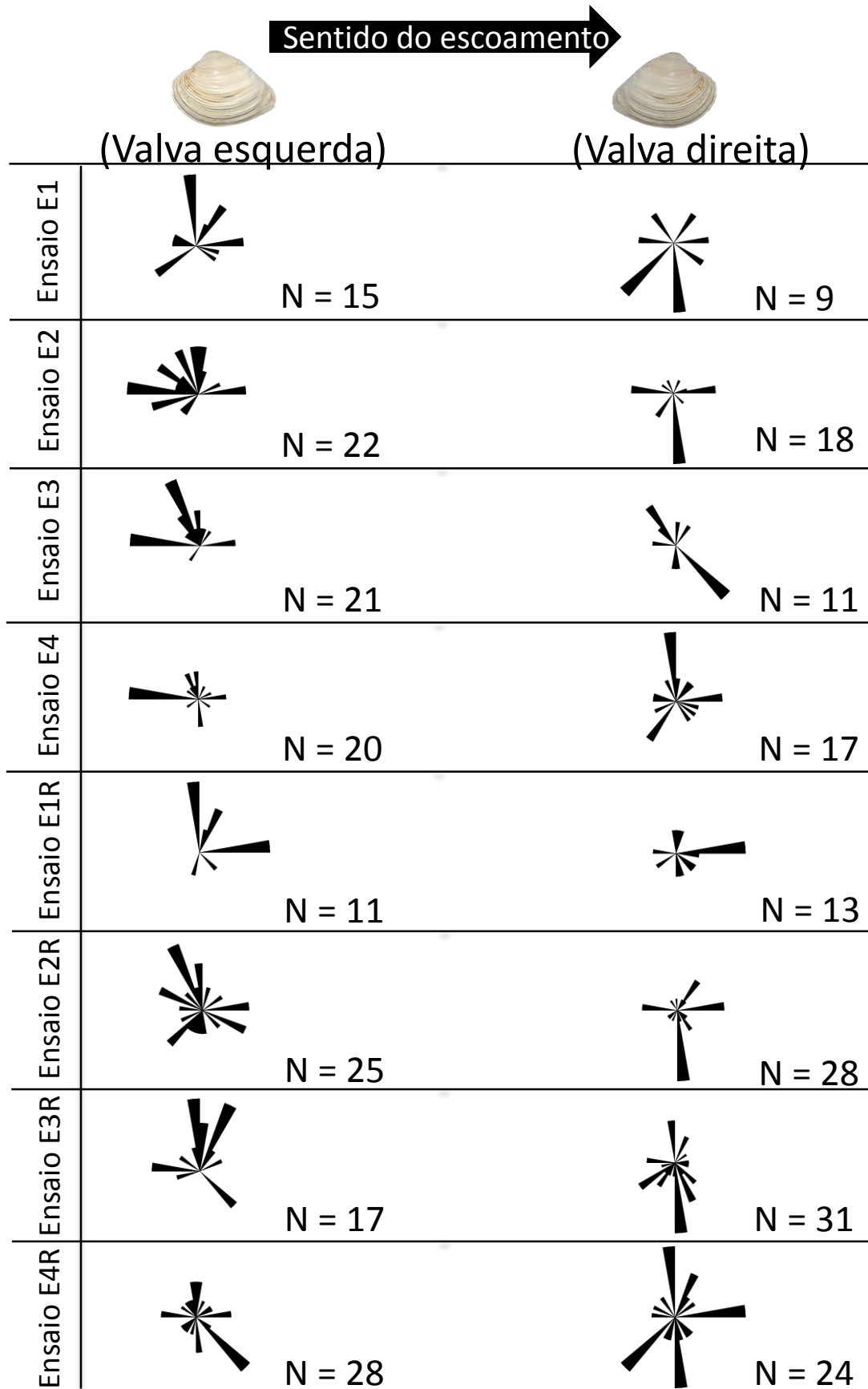


Fig. 39: Diagramas de roseta indicando a orientação do umbo para as conchas posicionadas com o lado convexo para cima ao fim dos experimentos.

A primeira informação que se extrai dos diagramas de roseta da fig. 39, é que diferente dos resultados obtidos dos ensaios com espécimes individuais, nestes, houveram uma grande quantidade de medidas que apontaram o oposto do relatado até então. Porém, de uma maneira geral, a maior quantidade de medidas manteve o mesmo padrão: valva esquerda tende a apontar para margem esquerda e à direita para a margem direita. Dos 8 ensaios realizados, apenas 2 mostraram uma quantidade maior de medidas de orientação do umbo relatando o oposto do defendido por este trabalho. São os ensaios E4 e E4R, onde no primeiro os valores da valva direita foram inesperados e no segundo ambas as valvas mostraram valores, também, opostos à tendência que, aqui, se prega. Por coincidência, estes ensaios que geraram um resultado diferente dos demais possuem a mesma magnitude de escoamento.

A explicação encontrada para o fato dos resultados mostrarem uma dispersão em torno daquilo que já se esperava para a orientação do umbo vem do fato de que em um leito, composto por um sedimento de textura bimodal, existem mais fatores que contribuem para que cada espécime permaneça em repouso. Aqui, não se leva em conta, tão somente, a posição em que a concha é mais resistente frente ao escoamento. Dois exemplos a serem citados são: o imbricamento das conchas, que pode ocorrer para posições distintas de orientação do umbo e, também, o fenômeno já comentado, *hiding-sheltering effect*.

Contudo, é possível determinar, a partir da leitura da orientação do umbo de um número grande de espécimes, o sentido da corrente pretérita que os transportou. Pois os resultados mostram, com poucas exceções que o padrão identificado para espécimes isolados ainda é o predominante.

## 7. Conclusões

As condições para o início de movimento de conchas bivalves, dada sua morfologia complexa e extremamente distinta de grãos siliciclásticos, não respeitam as mesmas leis de previsão concebidas para esses sedimentos, dito aqui, convencionas. A partir de dados experimentais pôde-se constatar que as magnitudes necessárias para por as conchas em movimento são relativamente menores do que aquelas necessárias para grãos siliciclásticos.

Como já documentado por outros autores citados neste trabalho, observou-se que conchas submetidas a ação de correntes tendem a estar posicionadas com sua face convexa para cima. Apoiado a essa condição, comprovou-se, para as conchas bivalves *Anomalocardia brasiliiana*, *Codakia*, *Diplodonta punctata*, e *Divaricella quadrisulcata*, que a magnitude necessária para por uma concha em movimento com o umbo direcionado para jusante é maior do quando o umbo está posicionado para montante.

Com relação ao uso de conchas bivalves na interpretação de paleocorrentes, constatou-se que nem todas as morfologias de conchas podem ser utilizadas como indicadores do sentido cinemático da corrente pretérita que as transportou. No plano formado pelos eixos maiores das conchas, as conchas que possuem os semi-eixos ortogonais ao eixo intermediário diferentes entre si podem ser utilizadas não só como indicador da direção de paleocorrentes, mas, também, de seu sentido.

Conchas com estas propriedades morfológicas tendem a apontar o umbo da valva esquerda para a margem esquerda do escoamento e a valva direita para a margem direita (referencial - observador olhando para a jusante). Este argumento é rigorosamente fiel quando as conchas estão dispersas no leito. Nas situações em que elas estão densamente arranjadas no leito, deve ser levantado um número maior de medidas de orientação das conchas, pois ocorrem medidas, de menor proporção, diferentes da tendência geral.

Quanto à capacidade e à competência do transporte de conchas, tais parâmetros não mostraram nenhuma diferença do que se observa no carreamento de sedimentos siliciclásticos. Constatou-se que a capacidade e a competência do escoamento possui relação direta com sua magnitude. Além disso, conclui-se que uma mesma magnitude de escoamento agindo sobre um leito de conchas de textura fina possui maior capacidade do que quando ela age sobre um leito de textura grossa.

## **8. Considerações e recomendações**

### **8.1. Quanto à continuidade do estudo:**

Referente aos motivos pelos quais as conchas são mais facilmente postas em movimento quando o umbo está posicionado para a montante do que quando ele está apontado para a jusante, deveriam ser realizados estudos, experimentais e/ou matemáticos, que esclarecessem a distribuição e magnitudes das forças que agem sobre as conchas nessas duas situações.

Relativo à orientação da concha, seria pertinente utilizar em experimentos físicos uma espécie de concha com o eixo intermediário sendo um eixo de simetria no plano composto por ele e pelo maior eixo e que este último fosse mais alongado. Visto que a única concha deste trabalho que possui um eixo mais alongado é a mesma que não tem o eixo intermediário como um eixo de simetria. A hipótese, lançada aqui, é que uma concha com essa característica, talvez, iria revelar um padrão em que não fosse possível definir o sentido da corrente, porém conseguisse precisar a direção da corrente que a transportou.

Relacionado à capacidade de transporte do escoamento que age sobre um leito de conchas, seria adequado repetir os ensaios realizados neste trabalho, porém com os leitos composto por apenas um tamanho de grão. E que tal repetição fosse realizada para todos os tamanhos que compuseram os ensaios realizados sobre o leito de conchas. Desta forma, poderia se ter uma relação mais refinada entre a capacidade de transporte, a textura do leito e a magnitude do escoamento.

### **8.2. Quanto ao processo de colorir as conchas**

Colorir as conchas com os corantes Azul de Metileno e Safranina foi satisfatório tanto na observação dos experimentos como na identificação dos tamanhos do espécimes transportado pelo escoamento. Porém, esses corantes foram liberando pigmentos ao longo dos ensaios. Devido a isso, essa técnica deve ser melhor desenvolvida.

### **8.3. Quanto a coleta de sedimento ao longo do ensaio**

Os dados obtidos, a partir do sedimento coletado em intervalos discretos de tempo nos experimentos com leito de conchas, serviram de maneira adequada para quantificar a evolução da competência e capacidade de transporte ao longo do tempo à medida que o leito fosse adquirindo maior estabilidade. Porém, entre as coletas, houveram espaços de tempo em que o sedimento ficava retido na peneira fixa no canal. Para um melhor controle dessa evolução, seria mais adequado que todo o sedimento transportado fosse discriminado no tempo, sem intervalos entre as coletas.

## Referências

- ALLEN, J.R.L., 1984. Experiments on the settling, overturning and entrainment of bivalve shells and related models: *Sedimentology*, 31, p. 227–250.
- ANTA, J., PEÑA, E., PUERTAS, J. & CEA, L., 2013. A bedload transport equation for the *Cerastoderma edule* cockle. *Journal of marine systems*, 111-112, p. 189-195.
- BOGGS-Jr, S., 2006. *Principles of sedimentology and stratigraphy*. 4<sup>a</sup> ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 662 p.
- BRENCHLEY, P.J., and NEWALL, G., 1970. Flume experiments on the orientation and transport of models and shell valves: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 7, p. 185–220.
- CARDOSO, A. H., 1998. *Hidráulica Fluvial*. Lisboa:Fundação Calouste Gulbenkian, 314 p.
- CHANG, H.H., 1988. *Fluvial processes in river engineering*. New York: John Wiley, 432 p.
- CHATTOPHADHYAY, D., RATHIE, A. & DAS, A., 2013. The effect morphology on postmortem transportation of bivalves and its taphonomic implications. *PALAIOS*, 28, p. 203-209.
- COREY, A. T., 1949. Influence of shape on the fall velocity of sand grains. Tese de Mestrado, Colorado Agricultural and Mechanical College, Fort Collins, Colorado, USA.
- CRAWFORD, R. S., CASADÍO, S., FELDMANN, R. M., GRIFFIN, M., PARRAS, A., SCHWEITZER, C. E., 2008. Mass mortality of fossil decapods within the Monte Leon Formation (Early Miocene), Southern Argentina: victims of andean volcanism. *Annals of Carnegie Museum*, 77-2, p. 259-287.
- DEY, S., 2003, Incipient motion of bivalve shells on sand beds under flowing water: *Journal of Engineering Mechanics*, v. 129, p. 232–240.
- DIXON, O. A., 1970. Nautiloids and current ripples as paleocurrent indicators in upper ordovician limestones, Anticosti Island, Canada. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40-2, p. 682-687.
- FORNARI, M., 2010. *Evolução sedimentar Holocênica da Retrobarreira na região de Jaguaruna-Laguna, Santa Catarina, Brasil*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.

- HJÜSTROM, F., 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Tese submetida à Universidade de Uppsala, Suécia, apud GRAF, W. H., 1971. *Hydraulics of Sediment Transport*. McGrawHill Series in Water Resources and Environmental Engineering. McGrawHill. 513 p.
- JAHNERT, R., DE 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.
- KIDWELL, S. M., & BOSENCE, D.W.J., 1991. Taphonomy and time-averaging of marine shelly faunas, in Allison, P.A., and Briggs, D.E.G., eds., *Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record*: Plenum Press, New York, p. 116–209.
- KIDWELL, S. M., FÜRSICH, F. T. & AIGNER, T., 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *PALAIOS*, 1, p. 228-238.
- MENARD, H. W. & BOUCOT, A. J., 1951. Experiments on the movement of shells by water. *American Journal Science*, 249, p. 131-151.
- MESSINA, C. & LABARBERA, M., 2004. Hydrodynamic behavior of brachiopod shells: Experimental estimates and field observations: *PALAIOS*, 19, p. 441–450.
- MILLER, A.I., & CUMMINS, H., 1990. A numerical model of the formation of fossil assemblages: Estimating the amount of post-mortem transport along environmental gradients: *PALAIOS*, 5, p. 303–316.
- NAGLE, J. S., 1967. Wave and current orientation of shells: *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 37, p. 1124–1138.
- NICHOLS, G., 2009. *Sedimentology and stratigraphy*, 2<sup>a</sup> ed.. Chichester, UK ; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 432 p.
- OLIVERA, A.M., & WOOD, W.L., 1997. Hydrodynamics of bivalve shell entrainment and transport: *Journal of Sedimentary Research*, 67, p. 514–526.
- RADLEY, J. D., 2011. Biostratigraphic of Penarth Group (Upper Triassic) Shell concentrations (Severn estuary, South-West England): a preliminary Account. *Proceedings of the Ussher Society*, 12, p. 351-355.

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, p. 1039-1077.

SHIELDS, A., 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbelens forschung auf die Geschiebebewegung. Berlin: Mitteilungen der Preussische Versuchanstalt für Wasserbau und Schiffbau apud CHANG, H.H. 1988. Fluvial processes in river engineering. New York: John Wiley, p. 432.

SOUTHARD, J., 2006. Special topics: An introduction to fluid motions, sediment transport, and current-generated sedimentary structures. Massachusetts Institute of Technology: open course ware. Disponível em: <https://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-planetary-sciences/12-090-special-topics-an-introduction-to-fluid-motions-sediment-transport-and-current-generated-sedimentary-structures-fall-2006/>. Acesso em: 20 nov. 2016.

SPENCER, D.W., 1963. The interpretation of grain size distribution curves of clastic sediments: *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 33, p. 180–190.

SUGUIO, K., 2003. *Geologia sedimentar*. São Paulo: Edgar Blücher, p. 400.

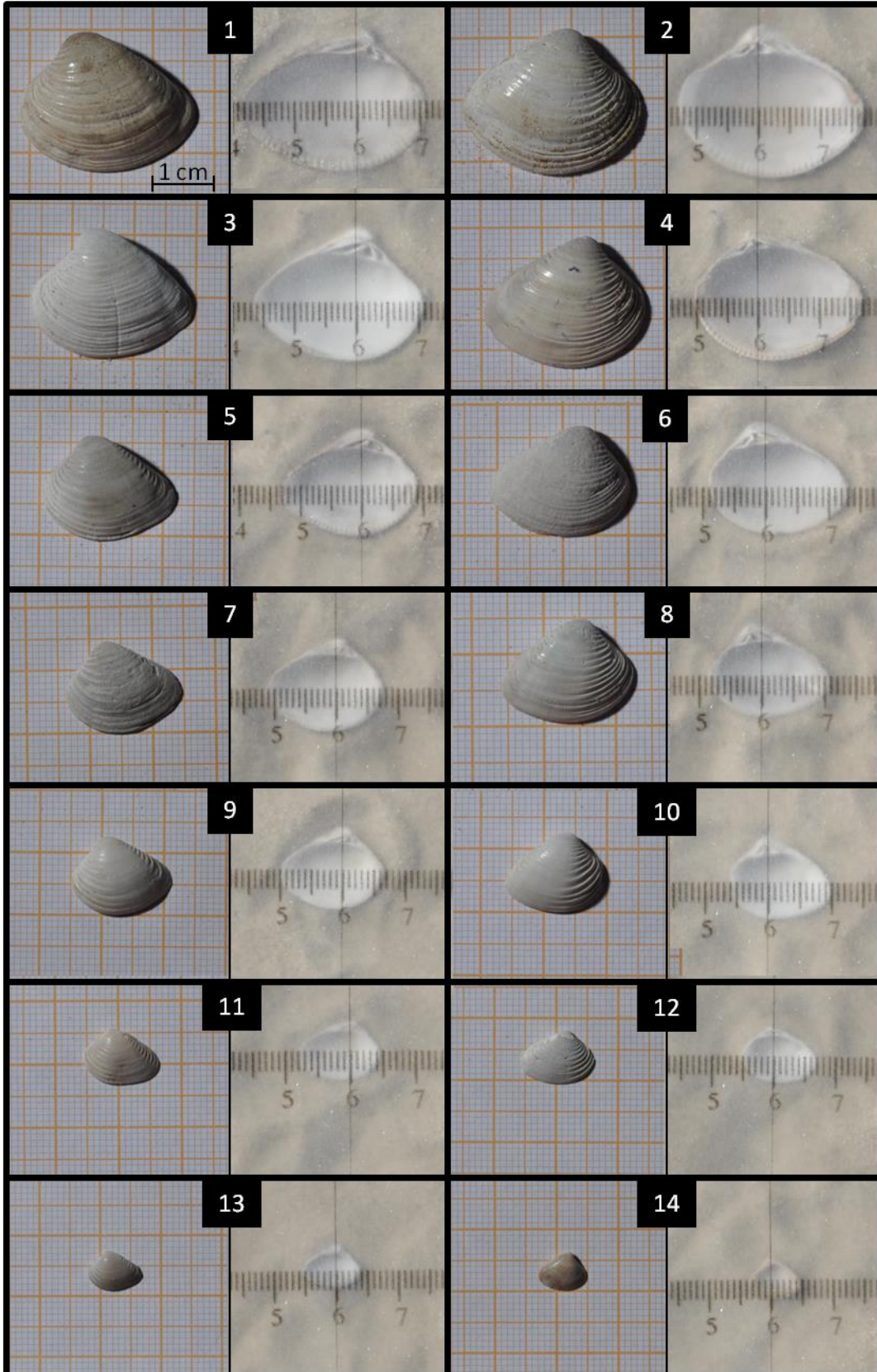
WENDT, J., 1995. Shell directions as a tool in palaeocurrent analysis. *Sedimentary Geology*, 95, p. 161-186

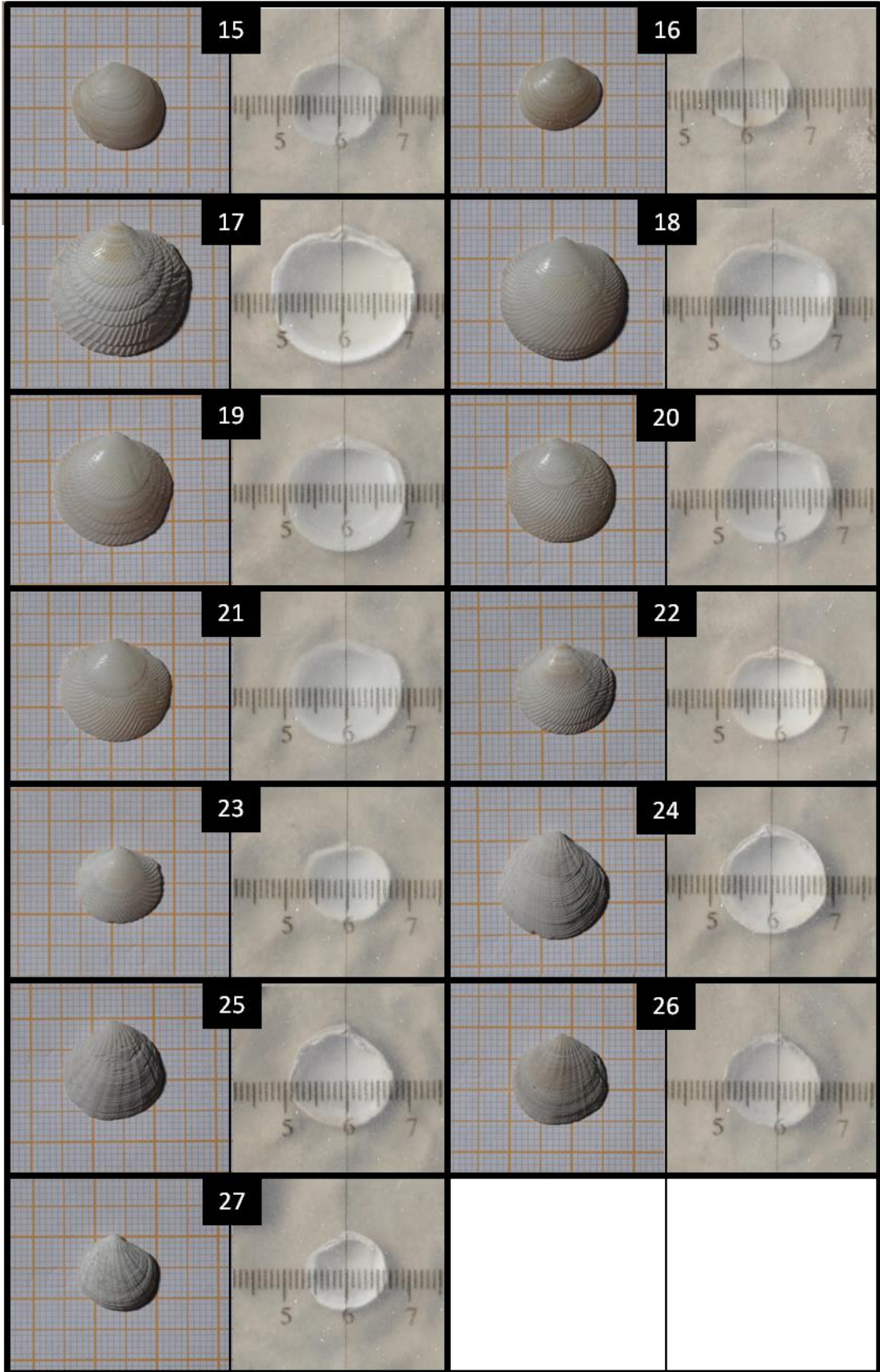


**Anexo I:**

Fotografias dos 27 espécimes numerados conforme a tabela 1, (escala 1:1).

- Espécimes 1-14: *Anomalocardia brasiliiana* (ímpares correspondem a valva esquerda e pares a direita);
- Espécimes 15 e 16: *Diplodonta Punctata*;
- Espécimes 16 a 23: *Divaricella quadrisulcata*; e
- Espécimes 23 a 27: *Codakia*.





**Anexo II:**

Fotografias de topo, antes e depois do ensaios E1, E1R, E2, E2R, E3, E3R, E4, E4R.

**ESCOAMENTO** 

(Vista de topo)

**E1- Antes do experimento**

Não possui

**E1-Depois do experimento****E1R-Antes do experimento****E1R-Depois do experimento**

44 cm

**ESCOAMENTO** 

(Vista de topo)

**E2-Antes do experimento**



**E2-Depois do experimento**



**E2R-Antes do experimento**



**E2R-Depois do experimento**



44 cm

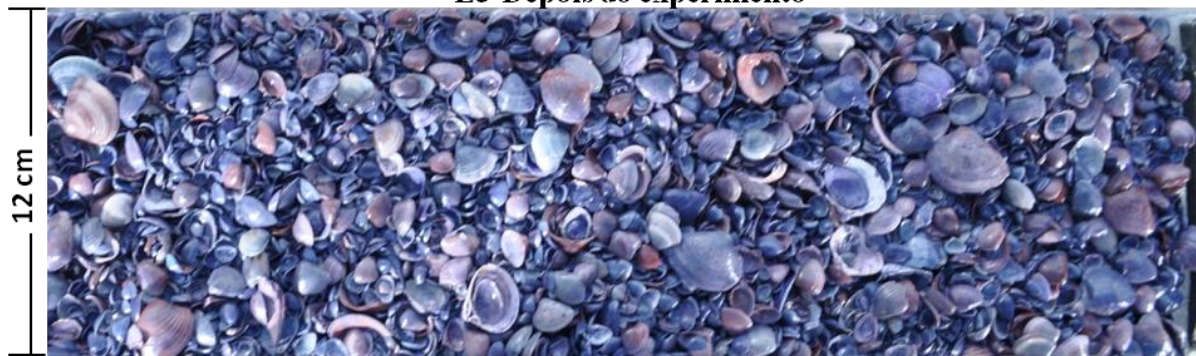
**ESCOAMENTO** 

(Vista de topo)

**E3- Antes do experimento**

Não possui

**E3-Depois do experimento**



**E3R-Antes do experimento**



**E3R-Depois do experimento**

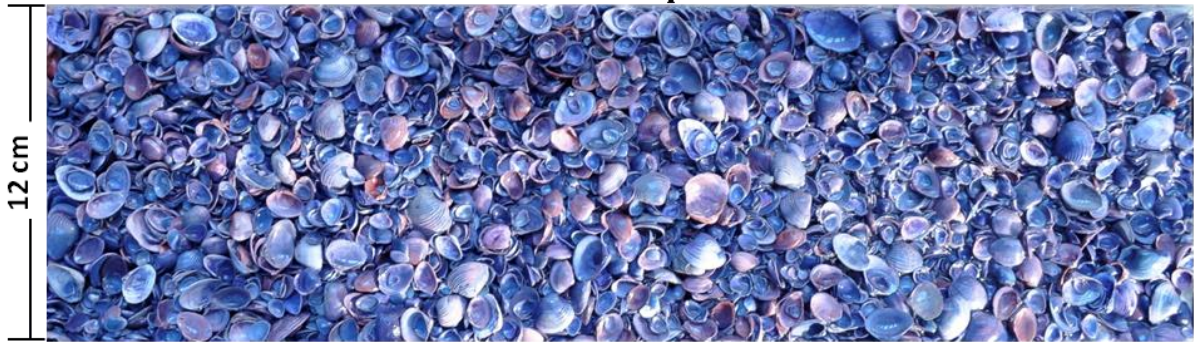


44 cm

**ESCOAMENTO** 

(Vista de topo)

**E4-Antes do experimento**



**E4-Depois do experimento**



**E4R-Antes do experimento**



**E4R-Depois do experimento**



44 cm