

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

**SEDIMENTOLOGIA DAS CONCENTRAÇÕES DE CONCHAS DE
MOLUSCOS (COQUINAS) EM AMBIENTE DE ÁGUAS RASAS
DOMINADO POR ONDAS: UM ESTUDO EXPERIMENTAL DO
BIOCLASTO À FÁCIE**

CRISTIANO FICK

ORIENTADOR – Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr (IG-UFRGS)

COORIENTADOR – Prof. Dr. Eduardo Puhl (IPH-UFRGS)

Volume I

Porto Alegre, janeiro de 2019

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

SEDIMENTOLOGIA DAS CONCENTRAÇÕES DE CONCHAS DE
MOLUSCOS (COQUINAS) EM AMBIENTE DE ÁGUAS RASAS
DOMINADO POR ONDAS: UM ESTUDO EXPERIMENTAL DO
BIOCLASTO À FÁCIE

CRISTIANO FICK

ORIENTADOR – Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr (IG-UFRGS)

COORIENTADOR – Prof. Dr. Eduardo Puhl (IPH-UFRGS)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Siegle (Instituto Oceanográfico, USP)

Prof. Dr. Fernando Erthal (Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, IG-UFRGS)

Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer (Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, IG-UFRGS)

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre, janeiro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Fick, Cristiano

Sedimentologia das concentrações de conchas de moluscos (coquinas) em ambiente de águas rasas dominado por ondas: um estudo experimental do bioclasto à fácies. / Cristiano Fick. – Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2019.

[132 f.] il.

Tese (Doutorado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2019.

Orientador: Elírio Ernestino Toldo Jr

Coorientador : Eduardo Puhl

1. Dinâmicas de concentração de conchas 2. Coquinas 3. Modelagem física. 4. Tafonomia experimental. 5. Início de movimento I. Título.

551.3

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sônia Teresinha Duarte de Oliveira

CRB 10/2310

À minha família;
e aos brasileiros sem acesso à educação.

*“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco;
à medida que vamos adquirindo conhecimentos, instala-se a dúvida.”*

Johann Wolfgang von Goethe (1749 – 1832)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Instituto de Geociências e ao Programa de Pós-graduação em Geociências por proporcionar, desde a graduação, acesso ao ensino de qualidade e plenas condições de desenvolvimento acadêmico.

Aos professores, técnicos e bolsistas do Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD-IPH), por fornecerem excelente infraestrutura e mão-de-obra para a realização dos experimentos em laboratório. Em especial, aos técnicos Cristian (geógrafo) e Felipe Secco (geólogo) pela ajuda extra nas mais diversas atividades durante a realização dos experimentos.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa e subsídios financeiros aplicados no estudo. Também, aos contribuintes brasileiros, que indiretamente financiam o desenvolvimento da pesquisa no Brasil.

Agradeço ao coorientador Prof. Dr. Eduardo Puhl, pela grande ajuda na preparação e idealização dos modelos físicos, bem como pelas discussões dos resultados, imprescindíveis para o desenvolvimento desta tese.

Por último, agradeço ao orientador Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr., pelo apoio e incentivo à pesquisa, por sempre ser prestativo na discussão dos resultados e planejamento das ações.

RESUMO

Concentrações relativamente densas de conchas de moluscos, também conhecidas como coquinas, são geradas principalmente por dinâmicas sedimentológicas de concentração. Este processo sedimentar é típico em ambientes de águas rasas dominado por ondas (praias), possuindo amplo registro deposicional em sistemas costeiros atuais e antigos. No entanto, o comportamento das diferentes dinâmicas de concentração ao longo de um perfil praiial, em função dos processos de transformação da onda em águas rasas, ainda não foi detalhadamente estudado. Por este viés, o presente estudo propôs investigar a ação dos processos de empolamento, quebra e espraiamento da onda sobre as dinâmicas sedimentológicas de concentração, sob condições de tempo-bom e de tempestades. Além disto, foi explorada a influência da forma do bioclasto no início do movimento sob fluxo oscilatório. A partir da utilização de modelagem física, simulações de um perfil praiial em escala reduzida foram conduzidas em canal de ondas de fundo móvel, composto por sedimento arenoso e bioclástico. Também, experimentos hidráulicos no mesmo canal foram realizados para a medição dos parâmetros críticos no movimento das conchas. Os resultados experimentais indicaram que as dinâmicas de concentração de bioclastos são diretamente controladas pelo processo ondulatório atuante, independente da condição de energia da onda. O retrabalhamento, caracterizado pela tração, rolamento e saltação das conchas e suspensão de areia, teve ocorrência predominante na zona de quebra e espraiamento. As dinâmicas de *winnowing*, representada pela suspensão de areia e incipiente movimentação das conchas, e *bypass* dinâmico, caracterizada pela migração de *ripples* arenosas sobre conchas estáticas, ocorreram de forma dominante na zona de empolamento, sendo a primeira na parte mais proximal e a segunda na parte distal. A condição de energia da onda atuou no sentido de ampliar a extensão longitudinal de ocorrência das dinâmicas. Durante a simulação de tempestades (maior altura e período de onda), a zona de quebra expandia-se no perfil, tanto na direção da praia (*onshore*) quanto ao mar (*offshore*), conseqüentemente aumentando a área de ação do retrabalhamento no fundo. Da mesma maneira, a zona de empolamento deslocava-se, promovendo a ação do *winnowing* e do *bypass* dinâmico em um setor mais distal e profundo do perfil. As dinâmicas sedimentológicas produziram distintas concentrações de conchas, e com aspectos tafonômicos e texturais específicos. Entre os tipos de concentrações bioclásticas geradas, destaca-se aquela produzida pela dinâmica de

winning, onde a pouca presença de matriz arenosa (grão-suportada), o denso empacotamento e as orientações predominantemente concordantes das conchas (paralelas à superfície de acomodação), caracterizou uma coquina com bom potencial de reservatório. Por sua vez, o estudo focado no início de movimento determinou que conchas mais arredondadas, como os gastrópodes, tendem a iniciar seu rolamento com velocidades e tensões de cisalhamento menores do que as necessárias para os bivalves, mais planares. Verificou-se, também, que os dados de início de movimento (Parâmetro de Shields) dos grãos bioclásticos, sob fluxo oscilatório, possuem boa correlação com os dados da literatura para fluxos unidirecionais (correntes). Finalizando, a abordagem conceitual desta tese se foca na sedimentologia das concentrações de conchas sob ação de fluxo oscilatório, desde a escala do bioclasto (partícula) até a de fácies, onde a forçante da onda, e processos associados, se configura como competente agente controlador das dinâmicas sedimentológicas de concentração de bioclastos em ambientes de águas rasas.

Palavras-chave: Dinâmicas de concentração de conchas, Coquinas, Modelagem física, Tafonomia experimental, Início de movimento, Fator de forma

ABSTRACT

Relatively dense concentrations of mollusc shells, also known as coquinas, are generated mainly by sedimentological dynamics of concentration. These concentrations are typical in wave-dominated shallow water environments (beaches), having a large depositional record in modern and ancient coastal systems. However, the behavior of the concentration dynamics along the beach profile, as a function of the wave transformation processes, has not been studied in detail yet. In this way, the present study proposed to investigate the action of the shoaling, breaking and swash processes of the wave on the sedimentological dynamics of concentration, under conditions of fair-weather and storms. In addition, it was explored the influence of the shell shape on its threshold of motion under oscillatory flow. From the use of physical modeling, simulations in small scale of a beach profile were conducted in a bed load wave flume composed of sandy and bioclastic sediment. Also, hydraulic experiments in the same flume were performed for the measurement of the critical parameters of shell movement initiation. The experimental results indicated that shell concentration dynamics are directly controlled by the acting wave process, independent of its energy condition. The reworking dynamic, characterized by the traction, rolling and saltation of the shells and sand suspension, had a predominant occurrence at the zone of breaking and swash. The winnowing dynamic, characterized by sand suspension and incipient shell movements, and the dynamic bypass, characterized by the migration of sandy ripples over static bioclasts, were dominant at the zone of shoaling, the first one at the more proximal area and the later at the distal area. The wave energy condition acted in order to extend the longitudinal occurrence of the dynamics along the simulated profile. During storm simulations (higher wave height and period), the breaking zone expanded along the profile, both in the onshore and offshore direction, consequently increasing the area of the reworking action on the bottom. In the same way, the shoaling zone moved, promoting winnowing and dynamic bypass at a more distal and deep sector of the profile. The sedimentological dynamics produced different shell concentrations, with specific taphonomic and textural aspects. Among these types of bioclastic concentrations, it can be highlighted that one produced by the winnowing dynamic, whose the poor presence of sandy matrix (grain-supported), the dense packing and predominantly concordant orientations of the shells (parallel to the accommodation surface), characterized a coquina facies with good reservoir potential. In its turn, the

study focused on the threshold of motion determined that more rounded shells, such as gastropods, tend to start their rolling with lower velocity and shear stress than planar bivalves required. It was also verified that threshold data (Shields Parameter) of the bioclastic grains under oscillatory flow have a good correlation with the literature data for unidirectional flow (current). Finally, the conceptual approach of this thesis focuses on the sedimentology of shell concentrations under the action of oscillatory flow. From the scale of the bioclast (particle) to the facies, the wave-driven forcing and its associated processes establishes as competent control agents over the sedimentological dynamics of bioclastic concentration in shallow water environments.

Keywords: Shell concentration dynamics, Coquinas, Physical modeling, Experimental taphonomy, Threshold of motion, Form factor

SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| RESUMO | I |
| ABSTRACT..... | III |
| A ESTRUTURA DA TESE..... | VI |
| CAPÍTULO 1 | 7 |
| INTRODUÇÃO | 7 |
| Objetivos..... | 9 |
| Hipóteses..... | 10 |
| Referências..... | 11 |
| CAPÍTULO 2 | 14 |
| ESTADO DA ARTE | 14 |
| Coquinas: Definições e Gênese | 14 |
| Coquinas lacustres nas bacias marginais brasileiras | 17 |
| Ambiente de águas rasas dominado por ondas (Sistema praial)..... | 20 |
| Ondas | 22 |
| Modelagem física de ambientes costeiros | 23 |
| Estudos em modelos físicos de fundo-móvel compostos por conchas..... | 27 |
| Referências..... | 30 |
| CAPÍTULO 3 | 34 |
| METODOLOGIA..... | 34 |
| Referências..... | 35 |
| CAPÍTULO 4 | 36 |
| <i>SHELL CONCENTRATION DYNAMICS DRIVEN BY WAVE MOTION IN FLUME EXPERIMENTS: INSIGHTS FOR COQUINA FACIES FROM LAKE-MARGIN SETTINGS</i> | 36 |
| CAPÍTULO 5 | 54 |
| ANÁLISE TAFONÔMICA DE CONCENTRAÇÕES BIOCLÁSTICAS GERADAS EM MODELAGEM FÍSICA DE UM SISTEMA DE ÁGUAS RASAS DOMINADO POR ONDAS..... | 54 |
| CAPÍTULO 6 | 83 |
| <i>THRESHOLD OF MOTION OF BIVALVE AND GASTROPOD SHELLS UNDER OSCILLATORY FLOW IN FLUME EXPERIMENTS</i> | 83 |
| CAPÍTULO 7 | 128 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 128 |
| Recomendações para futuros estudos | 131 |
| Referências..... | 132 |

A ESTRUTURA DA TESE

A presente tese de doutorado está estruturada em sete capítulos. O capítulo 1 corresponde a Introdução, a qual contempla o objeto de estudo, os objetivos e as hipóteses da tese. Os capítulos 2 e 3 são, respectivamente, a síntese do Estado da Arte e da Metodologia aplicada. Os capítulos 4, 5 e 6 correspondem aos três artigos científicos publicados e submetidos, onde estão apresentados todos os resultados, discussões e conclusões da tese. O capítulo 7 finaliza este manuscrito na forma de uma Síntese Integradora das discussões e conclusões apresentadas nos artigos, além de uma análise crítica sobre as hipóteses da tese e objetivos atingidos.

A estrutura desta tese visou atender a Norma 103 do Programa de Pós-graduação em Geociências (UFRGS), no que diz respeito a formatação e estrutura de Teses e Dissertações. Em relação aos artigos científicos, o presente candidato a doutoramento foi o primeiro autor nos três casos e, conforme a norma supracitada, todos os trabalhos foram publicados ou submetidos em periódicos com índice Qualis Capes mínimo B2.

INTRODUÇÃO

As concentrações de conchas carbonáticas, comumente chamadas de coquinas, são depósitos ou acumulações bioclásticas bastante recorrentes no registro sedimentar recente e antigo. Pacotes com centenas de metros de espessura de coquinas, compostas principalmente por grãos esqueléticos de moluscos, ocorrem nas bacias de margem continental do Atlântico Sul, como por exemplo nas Bacias de Campos e Santos, no Brasil, e Congo e Cabinda, no oeste da África (Thompson *et al.*, 2015). Estes espessos pacotes fazem parte da sequência Pré-sal e representam importantes reservas de hidrocarbonetos de água profundas, o que lhes confere um alto valor econômico. Outra notável ocorrência de coquinas está no registro da Bacia de Sergipe / Alagoas, onde diferentemente das demais, esta aflora na porção continental emersa. Neste caso, o pacote carbonático também é explorado economicamente, sendo minerado pela indústria do cimento. Em comum aos exemplos acima relatados, está o contexto deposicional em que estas concentrações de conchas foram geradas. Estas coquinas foram depositadas durante o processo de rifteamento do Gondwana (Fase Rifte), no Cretáceo Inferior (~ 120 Ma - Idade Aptiana / Barremiana), principalmente em ambientes de margem de lago continental do tipo rampa de alta energia e altos estruturais da bacia do lago (Bertani & Carozzi, 1985; Dias *et al.*, 1988; Abrahão & Warme, 1990; Rangel *et al.*, 1994; Carvalho *et al.*, 2000; Winter *et al.*, 2007; Muniz, 2013; Tavares *et al.*, 2015; Chinelatto *et al.*, 2018). Além disto, vigora o modelo em que ondas e correntes de tempestades tenham sido os principais agentes hidrodinâmicos de transporte e retrabalhamento deste material bioclástico, embora alguns autores atribuam os depósitos com pouco retrabalhamento das conchas a processos de fluxos gravitacionais em zonas mais profundas dos lagos (Altenhofen, 2013; Goldberg *et al.*, 2017).

No registro sedimentar moderno podemos destacar grandes depósitos bioclásticos de zonas costeiras, tanto de planície quando de praias. No litoral sul do Rio Grande do Sul (Santa Vitória do Palmar), trechos com dezenas de km de praia são cobertos sazonalmente por concentrações de conchas de moluscos e outros fósseis, atingindo até 2,0 m de espessura (Calliari & Klein, 1993). Estes depósitos são conhecidos como os Concheiros do Albardão. Também no sul do Brasil, ocorrem diversos concheiros naturais (desconsiderando os sambaquis) espalhados

na planície costeira de Santa Catarina, mais precisamente entre Jaguaruna e Imbituba, que podem atingir mais de 1,5 m de espessura (Caruso, 1992). Em alguns casos, estes depósitos são explorados economicamente pela indústria dos corretivos agrícolas. Outro bom exemplo de expressivas concentrações bioclásticas em praias são os cordões holocênicos Baía de Hamelin Pool, litoral oeste da Austrália, onde destaca-se a praia de Shark Bay, que possui vários km de extensão e até 3 m de espessura de coquina de bivalves (Jahnert *et al.*, 2012). No caso de ambientes costeiros lacustres, destacam-se os depósitos de moluscos da margem leste do Lago Tanganyika, que podem alcançar dezenas de quilômetros de extensão lateral e até 5 km de largura, abrangendo a praia emersa e a zona subaquosa adjacente (Cohen, 1990; McGlue *et al.*, 2010). Sob o ponto de vista do ambiente tectônico e sedimentar (lago-rifte dominado por ondas), o Lago Tanganyika é considerado um bom análogo moderno aos lagos continentais em que as coquinas do Pré-sal foram depositadas (Thompson *et al.*, 2015).

No que diz respeito à gênese, as concentrações de conchas (esqueletais) podem ser divididas em três tipos: (I) as sedimentológicas, (II) as biogênicas e (III) as diagenéticas (Kidwell *et al.*, 1986). As sedimentológicas resultam da ação processos hidráulicos onde conchas se comportam como partículas sedimentares e a matriz não-bioclástica é retrabalhada, removida ou ausente, sendo ocorrência típica de zonas costeiras com mais intensa e constante ação de ondas. Concentrações biogênicas são geradas pela acumulação de esqueletos em posição de vida, durante períodos de grande produtividade em zonas abrigadas da ação de ondas. Já as diagenéticas estão relacionadas aos processos físicos e químicos após o soterramento, como a compactação e a dissolução da matriz.

Em relação aos tipos de concentrações de conchas, a presente tese está focada no estudo do tipo sedimentológico. De acordo com o modelo de Kidwell (1986), quando sob a ação de um agente hidrodinâmico (onda, corrente), as dinâmicas sedimentológicas de concentração podem ser erosivas (remoção de matriz) ou omissivas (não deposição de matriz). Dentre as erosivas, tem-se as dinâmicas de retrabalhamento e *winnowing*, e nas omissivas, o *bypass* dinâmico, o *passing* total e a ausência de sedimentos. Tais dinâmicas são controladas pela intensidade de energia do agente hidrodinâmico e pelas taxas de aporte de grãos bioclásticos e não-bioclásticos (matriz) no sistema. Uma descrição mais detalhada

das dinâmicas sedimentológicas de concentração de bioclastos está apresentada no Capítulo 2.

Conforme os exemplos de registros sedimentares antigos e modernos de coquinas e o modelo genético de geração de concentrações bioclásticas, apresentados acima, o ambiente típico deste tipo de depósito é o costeiro, mais especificamente de águas rasas dominado por ondas, seja marinho ou lacustre. No ambiente de águas rasas, também designado como sistema praiial (Short, 1999), as dinâmicas sedimentares e a morfologia de fundo são controladas principalmente pelo fluxo oscilatório (ondas) e seus diferentes processos de transformação, que ocorrem à medida que as ondulações vão se aproximando da costa (Short, 1999). Estes processos são o empolamento, a quebra e o espraiamento das ondas, e neles caracterizam-se diferentes intensidades de energia e comportamentos do fluxo oscilatório.

Partindo dos pontos apresentados anteriormente, a presente tese propõe investigar detalhadamente as dinâmicas sedimentológicas de concentração bioclásticas, bem como seus produtos deposicionais, sob a luz de um ambiente de águas rasas dominado por ondas. Além disto, este estudo contempla a obtenção de parâmetros sedimentológicos para conchas de moluscos relacionados ao início de movimento sob ação de fluxo oscilatório, e estabelecer suas relações com o fator de forma das partículas esqueléticas. Para tal, foram utilizadas simulações em escala reduzida e testes experimentais de laboratório em um canal de geração de ondas.

Objetivos

O objetivo principal da tese foi determinar o comportamento das dinâmicas sedimentológicas de concentração de conchas ao longo de um perfil longitudinal de águas rasas dominado por ondas, sob condições de tempo-bom e tempestades, utilizando modelagem física em escala reduzida. Diante disto, procurou-se estabelecer zonas de domínio para a ocorrência de determinadas dinâmicas no âmbito dos processos de transformação e condições de energia de energia das ondas.

Os objetivos específicos foram:

Determinar as características sedimentológicas e tafonômicas das concentrações de conchas, geradas para cada dinâmica de concentração ocorrida no modelo físico.

1. Comparar as concentrações de conchas geradas no modelo com fácies de coquinas do registro sedimentar das bacias de margem continental brasileira, bem como seus modelos deposicionais propostos na literatura.
2. Obter dados de início de movimento para conchas não fragmentadas de moluscos (bivalves e gastrópodes) sob fluxo oscilatório, o que de acordo com a literatura publicada até o presente momento, se configura em um fato inédito.
3. Determinar a influência da forma das conchas no início de movimento sob fluxo oscilatório.
4. Verificar a eficiência da modelagem física em um canal de ondas para simular perfis praiais.

Hipóteses

Esta tese de doutorado está embasada nas seguintes hipóteses:

1. O fluxo oscilatório induzido pela propagação de ondas possui competência para promover as diversas dinâmicas sedimentológicas de concentração de conchas.
2. Os processos de transformação das ondas em águas rasas – empolamento, quebra e espraiamento – tendem a induzir diferentes dinâmicas sedimentológicas no leito. O retrabalhamento está mais propenso a ocorrer por processos que dissipam maior energia (maior agitação do meio aquoso), como a quebra e o espraiamento da onda, enquanto que o *winnowing*, o *bypass* dinâmico e o *passing* total tendem ser promovidos por processos de menor dissipação de energia, como o empolamento da onda.
3. Diferentes tipos de fluxos de energia de ondas controlam a extensão, no perfil praiial, onde ocorrem as dinâmicas sedimentológicas. Eventos de tempestade ampliam a intensidade e a faixa transversal de ação das ondas no fundo sedimentar.
4. Distintos processos hidrodinâmicos tendem a produzir distintas concentrações bioclásticas e distintos registros tafonômicos.

5. A forma das conchas influencia no início do movimento. Conchas com formato mais arredondado e esférico tendem a facilitar o movimento inicial do que aquelas mais planares, e também, serem transportadas por maiores distâncias, para uma mesma condição hidrodinâmica.

Referências

- Abrahão, D. & Warme, J.E. 1990. Lacustrine and associated deposits in a rifted continental margin – Lower Cretaceous Lagoa Feia Formation, Campos Basin, offshore Brazil. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 50: 287 – 305.
- Altenhofen, S.D. 2013. *Caracterização petrográfica de depósitos carbonáticos lacustres do Grupo Lagoa Feia, Bacia de Campos, Brasil*. Porto Alegre: 68p. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Bertani, R.T. & Carozzi, A.V. 1985. Lagoa Feia Formation (Lower Cretaceous), Campos Basin, offshore Brazil: Rift Valley Stage lacustrine carbonate reservoirs – I. *Journal of Petroleum Geology*, 8(1): 37 – 58.
- Calliari, L.J. & Klein, A.H.F. 1993. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. *Pesquisas em Geociências*, 20(1): 48 – 56.
- Caruso, F. 1992. Geologia dos depósitos de conchas calcárias no Estado de Santa Catarina. *Geosul*, 14: 101 – 136.
- Carvalho, M.D., Praça, U.M., Silva-Telles, Jahnert, R.J., A.C. & Dias, J.L. 2000. Bioclastic carbonate lacustrine facies models in the Campos Basin (Lower Cretaceous), Brazil. *American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology*, 46: 245 – 256.
- Chinelatto, G.F., Vidal, A.C., Kuroda, M.C. & Basilici, G. 2018. A taphofacies model for coquina sedimentation in lakes (Lower Cretaceous, Morro do Chaves Formation, NE Brazil). *Cretaceous Research*, 85: 1 – 19.
- Cohen, A.S. 1990. Tectono-stratigraphic model for sedimentation in Lake Tanganyika, Africa. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 50: 137 – 150.

- Dias, J.L., Oliveira, J.Q. & Vieira, J.C. 1988. Sedimentological and stratigraphic analysis of the Lagoa Feia Formation, Rift Phase of Campos Basin, offshore Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 18(3): 252 – 260.
- Goldberg, K., Kuchle, J., Scherer, C., Alvarenga, R., Ene, P.L., Armelenti, G. & De-Ros, L.F. 2017. Re-sedimented deposits in the rift section of the Campos Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 80: 412 – 431.
- Jahnert, R., Paula, O., Collins, L., Strobach, E. & Pevzner, R. 2012. Evolution of a coquina barrier in Shark Bay, Australia by GPR imaging: Architecture of a Holocene reservoir analog. *Sedimentary Geology*, 281: 59 – 74.
- Kidwell, S. M., Fursich, F.T. & Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentration. *Palaios*, 1: 228 – 238.
- Kidwell, S.M. 1986. Models for fossil concentrations: paleobiologic implications. *Paleobiology*, 12(1): 6 – 24.
- McGlue, M.M., Soreghan, M.J., Michel, E., Todd, J.A., Cohen, A.S., Mischler, J., O'Connell, C.S., Castañeda, O.S., Hartwell, R.J., Lezzar, K.E. & Nkotagu, H.H. 2010. Environmental controls on shell-rich facies in tropical lacustrine rifts: a view from Lake Tanganyika's littoral. *Palaios*, 25(7): 426 – 438.
- Muniz, M.C. 2013. *Tectono-Stratigraphic evolution of the Barremian-Aptian Continental Rift Carbonates in southern Campos Basin, Brazil*. Londres: 301 p. PhD Thesis, Royal Holloway University of London.
- Rangel, H. D., Martins, F. A. L., Esteves, F. R. & Feijó, F. J. 1994. Carta estratigráfica da Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8(1): 203 – 217.
- Short, A. 1999. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. Chichester, John Wiley, 379p.
- Tavares, A.C., Borghi, L., Corbett, P., Nobre-Lopes, J. & Câmara, R. 2015. Facies and depositional environments for the coquinas of the Morro do Chaves Formation, Sergipe-Alagoas Basin, defined by taphonomic and compositional criteria. *Brazilian Journal of Geology*, 45(3): 415 – 429.
- Thompson, D.L., Stilwell, J.D. & Hall, M. 2015. Lacustrine carbonate reservoirs from Early Cretaceous rift lakes of Western Gondwana: Pre-Salt coquinas of Brazil and West Africa. *Gondwana Research*, 28: 26 – 51.

Winter, W. R., Jahnert, R. J. & França, A. B. 2007. Carta estratigrafica da Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 511 – 529.

ESTADO DA ARTE

Neste capítulo está exposto um breve estado da arte relativo a definição conceitual dos principais tópicos abordados por esta tese de doutorado, como: as coquinas, os ambientes de águas rasas dominado por ondas e a modelagem física de ambientes costeiros. Os conceitos e definições apresentados aqui servem como subsídio para um melhor entendimento dos artigos contidos na tese e da metodologia empregada. No entanto, detalhes mais específicos sobre os tópicos citados acima estão presentes em cada um dos artigos.

Coquinas: Definições e Gênese

Do ponto de vista petrológico, o termo coquinas designa uma rocha carbonática formada por detritos de fosseis maiores do que 2 mm, retrabalhados e depositados mecanicamente, mais ou menos cimentados (Pettijohn, 1957, 1975). Desta forma, seguindo a classificação de Embry & Klovan (1971) para as rochas carbonáticas, as coquinas melhor se enquadrariam como *floatstones* e/ou *rudstones* (Fig. 1), embora esta classificação não aborde aspectos genéticos. Para Schäfer (1972), as coquinas devem abranger as acumulações compostas exclusivamente por conchas carbonáticas e seus fragmentos, as quais sofreram retrabalhamento, o que as restringe aos *rudstones* (Fig. 1). Depósitos de fósseis que se formaram e foram cimentados *in situ* durante a deposição, não submetidos a qualquer processo de retrabalhamento mecânico, devem ser chamados de bioacumulados (Pettijohn, 1975).

Especificamente para as rochas carbonáticas ricas em bivalves das bacias da margem continental brasileira, Terra *et al.* (2010) usam o termo coquina de forma genérica, para designar três tipos de fácies: *packstones/rudstones* com matriz, quando há retrabalhamento das valvas e presença de matriz; e *grainstones/rudstones* sem matriz, quando há retrabalhamento das conchas e sem presença de matriz; além dos bioacumulados, quando há preservação das duas valvas, podendo ter matriz. Deste modo, observa-se certa incompatibilidade quanto ao uso do termo coquina entre a definição de Pettijohn (1957, 1975) e Schäfer (1972) e as classificações utilizadas nas rochas carbonáticas das bacias marginais brasileiras.

| CARBONATOS ALÓCTONES Componentes originais não ligados orgânicamente durante a deposição | | | | CARBONATOS AUTÓCTONES Componentes originais ligados orgânicamente durante a deposição | | | | | | | | | |
|---|---|---------------------|---|--|-----------------|----------------------------------|------------------|--|--|--------------------------------------|--|--|--|
| MENOS QUE 10% DE COMPONENTES > 2 mm | | | MAIS QUE 10% DE COMPONENTES > 2 mm | | | | | | | | | | |
| CONTÉM LAMA CARBONÁTICA (< 0,03 mm) | | | NÃO CONTÉM LAMA CARBONÁTICA (< 0,03 mm) | | | | | | | | | | |
| SUPORTADO POR LAMA | | SUPORTADO POR GRÃOS | | SUPORTADO PELA MATRIZ | | SUPORTADO POR COMPONENTES > 2 mm | | ORGANISMOS QUE ATUARAM COMO OBSTÁCULOS | | ORGANISMOS QUE ENCRUSTARAM E LIGARAM | | ORGANISMOS QUE CONSTRUÍRAM UM ARCABOUÇO RÍGIDO | |
| MENOS QUE 10% DE GRÃOS (> 0,03 < 2,0 mm) | MAIS QUE 10% DE GRÃOS (> 0,03 < 2,0 mm) | | | | | | | | | | | | |
| MUDSTONE | WACKESTONE | PACKSTONE | GRAINSTONE | FLOATSTONE | RUDSTONE | BAFFLESTONE | BINDSTONE | FRAMESTONE | | | | | |

Figura 1 – Classificação das rochas carbonáticas. Modificado de Embry & Klovan (1971).

As coquinas também podem ser entendidas sob o ponto de vista paleontológico, conforme Kidwell *et al.* (1986) definiu: “qualquer acumulação relativamente densa de partes biológicas rígidas (fragmentos esqueletais), independente da composição taxonômica, estado de preservação, ou grau de modificações pós-morte”. No entanto, o referido autor diferencia três tipos genéticos para essas concentrações fossilíferas: (I) sedimentológico, (II) biogênico e (III) diagenético (Fig. 2). Concentrações sedimentológicas resultam da ação de processos físicos, principalmente hidráulicos, em que os componentes esqueletais se comportam como partículas sedimentares e a matriz não-bioclástica é retrabalhada ou ausente. Concentrações biogênicas são aquelas geradas por acumulação dos organismos em posição de vida (*in situ*), geralmente relacionadas com eventos de grande produtividade de organismos “oportunistas”. Concentrações diagenéticas são geradas por processos físicos e químicos após o soterramento, principalmente a compactação e a dissolução de matriz em carbonatos bioclásticos. Dentre estes tipos de concentrações, as sedimentológicas são as que melhor se encaixam nas definições de coquinas de Pettijohn (1957, 1975) e Schäfer (1972), enquanto que o tipo biogênico se enquadra mais apropriadamente com a definição de bioacumulado.

Focando nas concentrações bioclásticas do tipo sedimentológico, Kidwell (1986) apresenta um modelo heurístico concebido a partir de observações em afloramentos. Este modelo determina os controles sedimentológicos de geração das concentrações de fósseis, se baseando principalmente na variação da taxa de sedimentação não-bioclástica (*R-sediment*) e de aporte de bioclastos (*R-hardpart*). A partir de um determinado aporte de bioclastos, baixas taxas de *R-sediment* podem favorecer a formação de concentrações fossilíferas. Por sua vez, dinâmicas sedimentológicas (Fig. 3) que conduzem a uma condição de baixo *R-sediment* são os fatores controladores da gênese destes depósitos.

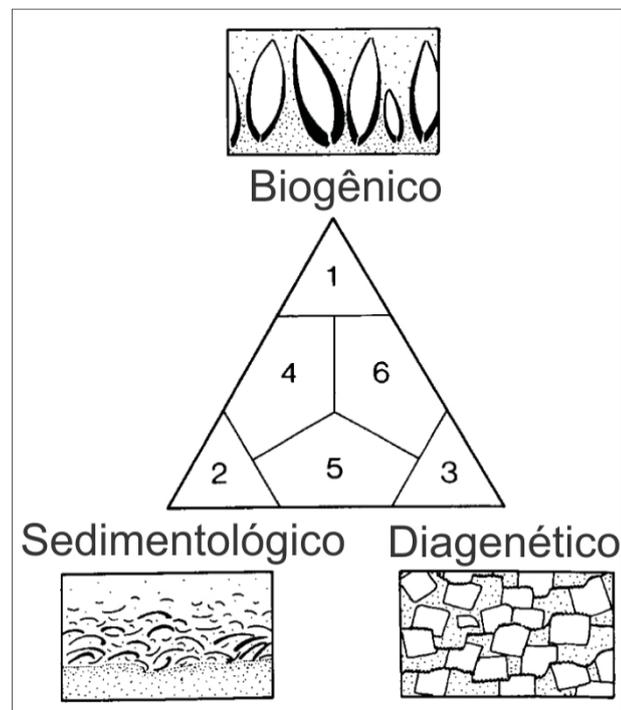


Figura 2 – Tipos genéticos de acumulações esqueletais. Área 1 indica acumulações biogênicas; área 2 indica concentrações sedimentológicas e área 3 indica acumulações diagenéticas. Áreas 4, 5 e 6 indicam origem mista. Modificado de Kidwell *et al.* (1986).

Estas dinâmicas sedimentológicas de concentração de bioclastos podem ser classificadas em: (I) erosivas, quando *R-sediment* é negativo, associadas a zonas costeiras de alta energia e barras de *offshore*; e (II) omissivas (não-deposicional), quando *R-sediment* é zero, associadas a zonas distais e de baixa energia. As dinâmicas erosivas correspondem à (i) remoção seletiva da matriz (*winning*), que deixa fósseis acumulados na interface sedimento-fluído, e (ii) ao retrabalhamento hidráulico, tanto da matriz quanto dos fósseis, sob condições de energia mais

elevada. Por sua vez, as dinâmicas omissivas correspondem à (i) ausência de deposição de sedimentos clásticos no fundo por *bypass* de sedimentos finos em suspensão (*passing* total), à (ii) ausência de deposição por intensa migração de formas de fundo (*bypass* dinâmico), ou (iii) simplesmente pela falta de aporte sedimentar clástico (ausência de sedimentos).

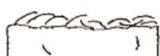
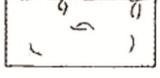
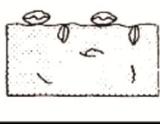
| Dinâmicas | | | Taxa de aporte sedimentar | R-sediment | |
|-----------|--|---|--|------------|---|
| Erosivas | <i>Winnowing</i> : remoção seletiva de matriz fina |  |  | variável | - |
| | Retrabalhamento: seleção ativa de grãos esqueletais e da matriz |  |  | variável | - |
| Omissivas | <i>Passing</i> total: sedimento fino permanece em suspensão |  |  | + | 0 |
| | <i>Bypass</i> dinâmico: alternância de deposição e erosão por migração de formas de fundo |  |  | + | 0 |
| | Ausência de sedimentos: falta de aporte sedimentar |  |  | 0 | 0 |

Figura 3 – Dinâmicas sedimentológicas de concentração de fósseis. Modificado de Kidwell (1986).

Coquinas lacustres nas bacias marginais brasileiras

As coquinas representam espessos pacotes de rochas sedimentares carbonáticas da sequência sedimentar pré-sal, existentes nas bacias da margem continental brasileira (Thompson *et al.*, 2015). Dentre estas bacias, a Bacia de Campos é a que possui a maior quantidade de informações e estudos publicados, seguido pelos registros da Bacia de Sergipe-Alagoas, que apresenta afloramentos emersos destas rochas. Na Bacia de Campos, as coquinas pertencem a Formação Coqueiros, Grupo Lagoa Feia, de idade Barremiana / Aptiana, caracterizadas principalmente por fácies de *rudstones* bioclásticos, compostos principalmente por moluscos bivalves e gastrópodes (Fig. 4), com espessuras de centenas de metros

(Rangel *et al.*, 1994; Winter *et al.*, 2007). Por vezes, essas coquinas ocorrem junto a sedimentos siliciclásticos e estevensíticos (Bertani & Carozzi, 1985; Carvalho *et al.*, 2000; Altenhofen, 2013; Muniz, 2013; Goldberg *et al.*, 2017). Os modelos deposicionais sugerem que estas coquinas foram depositadas em lagos tectônicos (Fig. 5) com níveis de água oscilantes, durante a fase *sin-rifte* do Supercontinente Gondwana (Bertani & Carozzi, 1985; Dias *et al.*, 1988; Abrahão & Warne, 1990; Carvalho *et al.*, 2000; Muniz, 2013; Goldberg *et al.*, 2017). Do ponto de vista de ambientes carbonáticos lacustres, as coquinas da Formação Coqueiros foram geradas em rampas ou plataformas de alta energia (*sensu* Platt & Wright, 1991), posicionadas acima do nível de base de ação das ondas de tempestade (Muniz, 2013), ou em altos estruturais da bacia do lago, formando bancos ou barras bioclásticas (Bertani & Carozzi, 1985; Dias *et al.*, 1988; Carvalho *et al.*, 2000). Na Bacia de Sergipe-Alagoas as coquinas estão contidas na Formação Morro do Chaves, também de idade Barremiana / Aptiana, sendo caracterizadas por pacotes com dezenas de metros de espessura. Os bioclastos são essencialmente representados por moluscos bivalves e gastrópodes, além de ostracodes, com variados graus de fragmentação e abrasão. Destaca-se a frequente ocorrência de camadas siliciclásticas intercaladas no pacote carbonático, além da elevada presença de matriz siliciclástica em algumas fácies de coquinas (Tavares *et al.*, 2015; Chinelatto *et al.*, 2018).

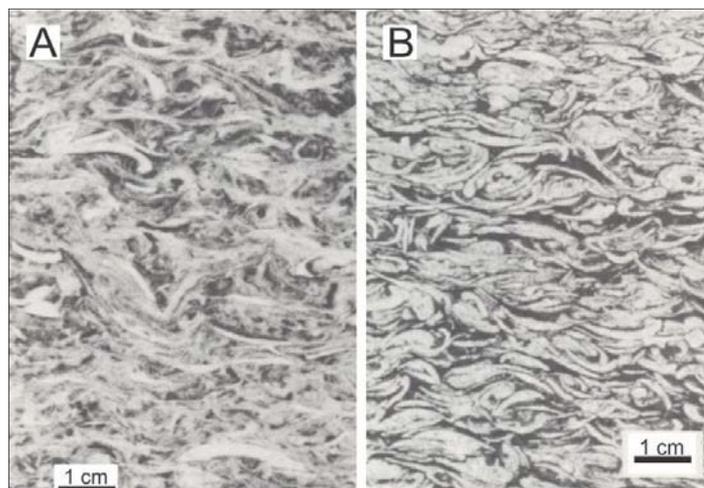


Figura 4 – Imagens de duas litofácies (testemunho) das coquinas da Formação Coqueiros. A) *Rudstone* de bivalves e gastrópodes, com intenso retrabalhamento. B) *Rudstone* de bivalves, sem retrabalhamento. Modificado de Dias *et al.* (1988).

Em ambas as bacias acima citadas, os modelos deposicionais indicam que processos relacionados a ondas e correntes geraram as coquinas em ambientes de águas rasas, principalmente quando amplificados por condições climáticas de

tempestade (Bertani & Carozzi, 1985; Abrahão & Warme, 1990; Carvalho *et al.*, 2000; Muniz, 2013; Tavares *et al.*, 2015; Chinelatto *et al.*, 2018). Sob este ponto de vista, o nível de base de ação das ondas (NBO) constitui um elemento chave para o entendimento desses processos. Durante tempestades, com ondas de mais alta energia, o NBO tende a se deslocar para zonas mais profundas, adentrando o local de habitat dos moluscos (*shoreface-offshore*). Desta maneira, a ação destas ondas, combinadas com correntes de fundo, tendem a retrabalhar e re-depositar o material bioclástico. Na contramão deste modelo, Altenhofen (2013) e Goldberg *et al.* (2017) reportaram, no caso da Bacia de Campos, que as fácies de *rudstones* (coquinas) e *grainstones* apresentam poucos indícios de retrabalhamento e elevada presença de estevensita. Somadas estas observações com outros critérios técnicos relacionados a associação de fácies e análise sísmica Goldberg *et al.* (2017), os referidos autores sugerem que estas fácies ricas em bioclastos de moluscos foram depositadas por processos de re-sedimentação por correntes de densidade, em zonas profundas da bacia do lago-rifte.

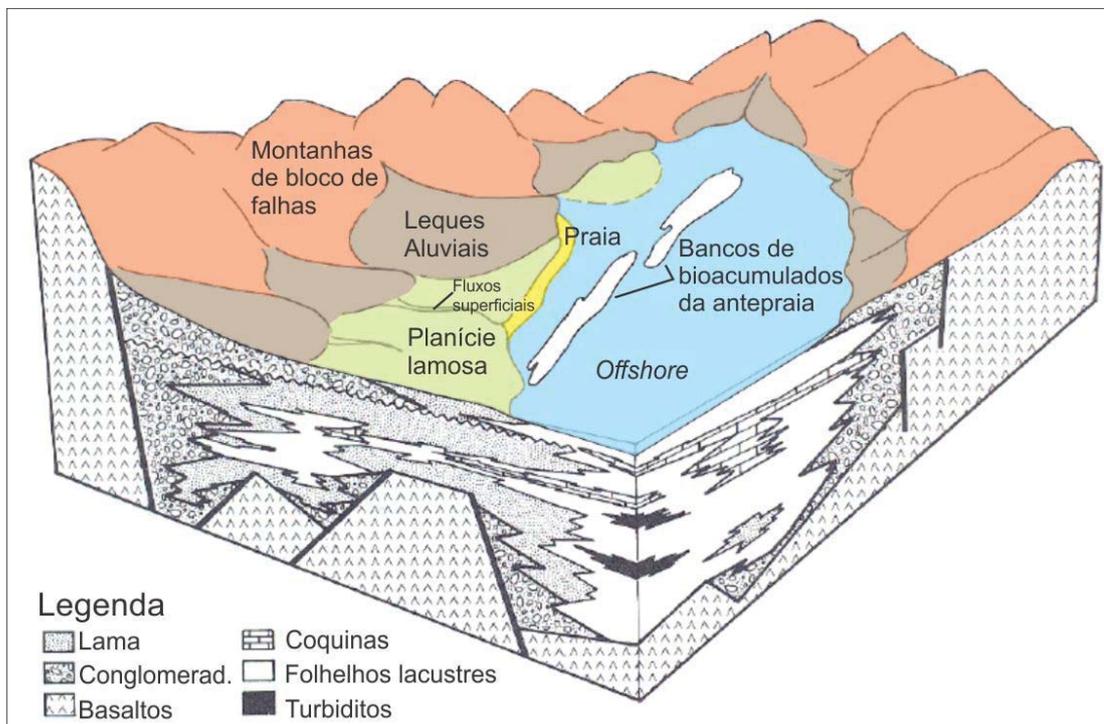


Figura 5 – Modelo deposicional do Grupo Lagoa Feia. Modificado de Abrahão & Warme (1990).

Ambiente de águas rasas dominado por ondas (Sistema praial)

O sistema praial é definido por Short (1999) como uma acumulação de sedimentos depositada pela ação das ondas, situada entre nível de base de ação das ondas de tempo-bom (NBTB) e o limite superior do swash. O NBTB corresponde à máxima profundidade em que as ondas em condições normais podem transportar sedimentos em direção à costa, enquanto que o limite do swash corresponde ao limite subaéreo da ação das ondas e transporte de sedimentos. O desenvolvimento de praias está condicionado a três principais fatores: disponibilidade de sedimentos, clima de ondas e espaço de acomodação.

O sistema praial pode ser subdividido, bidimensionalmente, em três zonas, de acordo com a morfologia do fundo e os processos ondulatórios atuantes (Short, 1999): (I) a praia subaérea (*subaerial beach*), (II) a zona de surfe (*surf zone*) e (III) a zona próxima à praia (*nearshore zone*). Nesta tese adotaremos o modelo de Short (1999) para o sistema praial, em conjunto com a nomenclatura existente para o modelo de fácies de sistemas costeiros dominado por ondas de Walker & Plint (1992), a fim de melhor correlacionar a nomenclatura usada pelos modelos deposicionais de coquinas das bacias brasileiras. É importante ressaltar, que não existe uma nomenclatura padronizada para as zonas praias, tanto em âmbito internacional quanto nacional, logo se faz necessária essa mescla de modelos. A Figura 6 apresenta o perfil longitudinal do modelo praial de Short (1999) e suas zonas praias, associadas à nomenclatura de Walker & Plint (1992). A seguir, serão apresentados os processos, morfologia e os depósitos de cada zona praial:

Praia subaérea – zona compreendida entre o nível do mar na maré baixa de sizígia até a base de uma duna frontal ou falésia. Nesta zona ocorre o processo de swash da onda (espraiamento), além de serem fortemente afetadas por ressacas marinhas. Apresenta morfologia relativamente plana, podendo possuir uma crista proeminente chamada de crista de berma. Compreende as fácies deposicionais de *backshore* e *foreshore*. Fácies de *backshore* estão relacionadas aos sedimentos depositados da crista de berma até a duna, podendo também sofrer processos eólicos. Fácies de *foreshore* são depositadas na face da praia, entre o nível d'água de maré baixa até a crista de berma.

Zona de surfe – estende-se da primeira linha de quebra das ondas até a linha da última quebra sobre a face da praia. Zona sob influência direta do processo de quebra e colapso da onda, além de estar sob ação de correntes de deriva litorânea e

de retorno. Morfologia de fundo apresenta bancos e cavas. Compreende as fácies de *shoreface* superior, que se caracterizam por apresentarem feições de fluxos trativos e oscilatórios.

Zona próxima à praia ou antepraia – estende-se do NBTB até a linha da primeira quebra das ondas. Zona de atuação do processo de empolamento das ondas, ou seja, a deformação das linhas de fluxo circulares devido ao atrito com o fundo. Geralmente, possui fundo plano e suavemente inclinado, podendo ocorrer bancos de tempestade. O NBTB é também denominado como a profundidade de fechamento costeiro (PFC), que é uma linha variável, modificando-se de acordo com a altura e período de onda e o tamanho de grão de fundo. Compreende as fácies deposicionais de *shoreface* inferior, que se caracterizam por apresentar feições de fluxos oscilatórios.

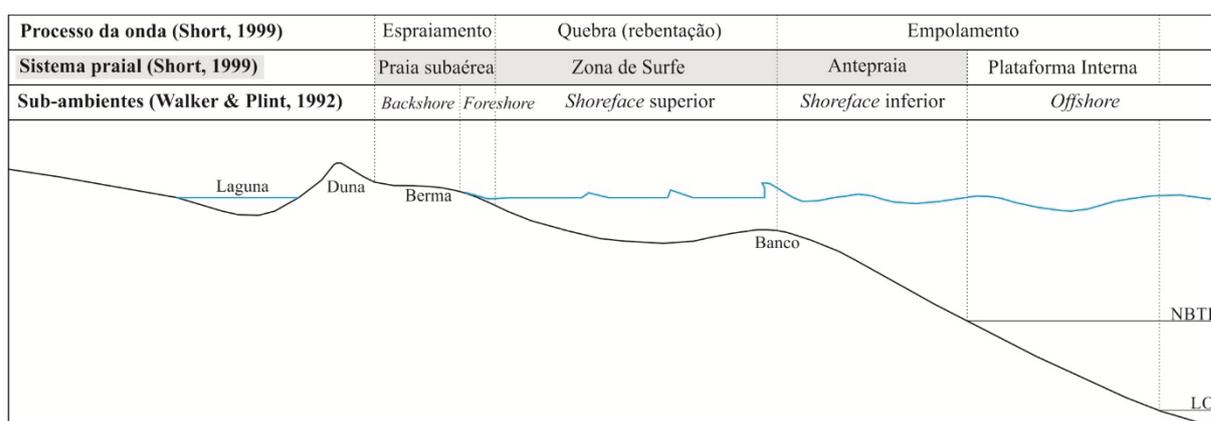


Figura 6 – Delimitação das zonas do sistema praial de acordo com Short (1999), e os respectivos subambientes de águas rasas, segundo Walker & Plint (1992).

Plataforma interna – é uma zona que a princípio não pertence estritamente ao sistema praial, mas está relacionada à ação das ondas de tempestade e é onde o fundo do mar começa a afetar as ondas produzindo ondulações suaves na superfície d'água. Estende-se desde o limite oceânico (LO), que depende do comprimento de onda ($LO = L/2$), até o NBTB. Seu limite em direção ao oceano, também pode ser estabelecido como o nível de base de ação das ondas de tempestade (NBOT). Possui fundo plano e, relativamente, menos inclinado do que a antepraia. Compreende as fácies de *offshore*, que se caracterizam por apresentar intercalações de sedimentos finos e arenosos, além de poderem apresentar feições de fluxos oscilatórios de grande energia. Alguns autores (Reading & Collinson, 1996)

denominam essa zona de *offshore*-transicional, reservando o termo *offshore* para a zona que se estende além do NBOT.

Ondas

As ondas são geradas pelos ventos, e dependem da sua velocidade, duração e extensão da pista em que atuam. Em termos bidimensionais, as ondas apresentam transformações em sua forma enquanto se aproximam da costa, pois vão sofrendo interações com o fundo à medida que diminui a profundidade de lâmina d'água. As principais modificações da forma das ondas são o empolamento (*shoaling*), a quebra (*breaking*) e o espraiamento (*swash*). O empolamento corresponde às modificações na forma das linhas de fluxo internas, passando de circular para semicircular achatada, provocando movimentações das partículas de fundo, e modificações na forma da onda em superfície, acentuando a sua esbeltez. A quebra ocorre quando a esbeltez (H/L) da onda atinge seu limite crítico de equilíbrio (Eq. 1), ocorrendo o colapso da massa de água e promovendo intensa movimentação de partículas no fundo (Komar, 1976). Por sua vez, o espraiamento corresponde ao fluxo bidirecional raso de vai-e-vem que ocorre quando as ondulações atingem a face da praia.

$$\frac{H}{L} = \frac{1,7\pi w_s}{gT} \quad (1)$$

onde:

w_s – velocidade de queda da partícula;

g – aceleração da gravidade;

T – período da onda;

H – altura da onda;

L – comprimento de onda.

Além da esbeltez, o período (T) e a altura (H) são os principais parâmetros físicos das ondas, pois controlam o fluxo de energia em uma praia, influenciando em todos os processos costeiros induzidos pela ação de ondas (Komar, 1976). As condições de energia de uma praia, do ponto de vista de transporte de sedimentos, são diretamente proporcionais a esbeltez e a altura, e inversamente proporcional ao

período das ondas. A altura e o período da onda, juntamente com a declividade da praia, também influenciam em outros aspectos, como no tipo de quebra da onda na zona de arrebentação. Segundo Galvin (1968), existem quatro tipos de quebra da onda: (I) deslizante (*spilling*), que ocorre em praias de baixa declividade onde a onda empina-se para deslizar pelo seu perfil, dissipando energia por uma larga faixa; (II) mergulhante (*plunging*), que ocorre em praias de declividade moderada a alta onde a onda empina-se abruptamente ao aproximar-se da costa e quebra violentamente formando um tubo, dissipando energia por uma pequena faixa praias; (III) ascendente (*surging*), que ocorre em praias de muito alta declividade onde a onda não quebra propriamente, mas se espraia sobre a face da praia; e (IV) frontal (*collapsing*), que ocorre em praias de pendente abrupta, sendo um tipo de quebra intermediário entre mergulhante e ascendente.

Outros dois fenômenos relacionados à dinâmica das ondas, importantes de serem mencionados são o *set-up* e o *run-up*. O *set-up* é a sobre elevação do nível médio da água na costa, causado pela incidência do trem de ondas na face da praia. O *run-up* corresponde à altura máxima que o swash da onda atinge na face da praia. Estes dois fenômenos combinados com a ação de fortes ventos, sob condições de tempestades ou não, e ação da pressão atmosférica que desloca água contra a costa, são os fatores que causam sobre-elevações do nível do mar, conhecidos como ressacas.

Modelagem física de ambientes costeiros

A definição de modelagem física pode ser dada segundo Hughes (1993): “*Um modelo físico é um sistema físico reproduzido (geralmente em tamanhos reduzidos), onde as principais forças dominantes que atuam no sistema estão representadas no modelo em corretas proporções ao sistema físico original*”

A modelagem física vem sendo utilizada em estudos de hidráulica desde o século XVI, quando Leonardo Da Vinci reproduziu diversos fenômenos hidráulicos em experimentos, caracterizando-os a partir de observações visuais (Price, 1978). A partir de então, diversos cientistas, como Issac Newton, William Froude, Osborn Reynolds, entre outros, foram aperfeiçoando técnicas e descrevendo leis que governam os princípios da modelagem física em escala reduzida. A modelagem pode ser aplicada para diversos fins, como estudo de estruturas de obras de engenharia, processos sedimentares, escoamento em tubulações, etc. As vantagens

de se utilizar modelagem física em processos costeiros são de que ela oferece, em escala reduzida de observação, um caminho alternativo de examinar fenômenos que não são possíveis de se analisar com as técnicas atuais em sistemas naturais, além de permitir a simulação de várias condições experimentais que, no protótipo natural, são difíceis de observar (Hughes, 1993). Já Dalrymple (1985), diz que o menor tamanho do modelo permite uma fácil coleta de dados e a custos mais baixos do que a coleta em campo.

Apesar das inúmeras vantagens, o uso de modelos físicos em escala reduzida também apresenta desvantagens, dentre as quais, se destacam os efeitos de escala e efeitos de laboratório (Hughes, 1993). Os efeitos de escala estão relacionados ao menor tamanho do modelo em relação ao protótipo, de modo que não se torna possível simular todas as variáveis em correta relação. Os efeitos de laboratório são aqueles que estão relacionados à estrutura física do modelo, que podem limitar ou influenciar um determinado fenômeno atuante no experimento, a ponto de prejudicar a correlação com o sistema natural. Além destas desvantagens, também se pode destacar o mais alto custo de execução de uma simulação física, em comparação com a modelagem numérica, exceto por raras exceções. Os três principais objetivos almejados ao se utilizar modelos físicos, segundo Svendsen (1985), são: (I) procurar compreender qualitativamente um fenômeno ainda não descrito ou compreendido; (II) obter medidas quantitativas para testar uma teoria; e (III) obter medidas quantitativas de um fenômeno de tão difícil obtenção de dados, a ponto de impedir uma abordagem teórica a seu respeito.

Em modelagem física, a análise dimensional constitui um importante elemento metodológico que visa definir quais das variáveis físicas de um determinado fenômeno, têm efeito dominante sobre a dinâmica de tal fenômeno estudado. Hughes (1993) define análise dimensional como um “*processo racional para combinação de variáveis físicas em produtos adimensionais, de modo a reduzir o número de variáveis que necessitam ser consideradas*”. O processo de análise dimensional envolve quatro etapas: (I) identificar as principais variáveis independentes do processo; (II) decidir qual das variáveis será a variável dependente; (III) determinar quantos produtos adimensionais independentes podem ser formados a partir das variáveis; (IV) reduzir o sistema de variáveis a um número adequado de variáveis adimensionais.

Como principais exemplos de produtos adimensionais utilizados em modelagem física de processos sedimentares e/ou hidrodinâmicos, o Número de Reynolds (Re) e o Número de Froude (Fr) expressam adequadamente a análise dimensional dos fenômenos físicos de um sistema. O Número de Reynolds (Eq. 2) representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas do escoamento de um fluido sobre uma superfície, que determina se o regime de fluxo é turbulento ($Re > 2000$) ou laminar ($Re < 500$). Já o Número de Froude (Eq. 3), representa a relação entre as forças de inércia e as forças gravitacionais de um escoamento, caracterizando o fluxo em subcrítico ($Fr < 1$), crítico ($Fr = 1$) e supercrítico ($Fr > 1$).

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (2)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

onde:

V – velocidade do fluido;

ρ – massa específica do fluido;

L – dimensão característica;

μ – viscosidade cinemática do fluido;

g – aceleração da gravidade.

O princípio de semelhança está relacionado ao grau de representação de um modelo físico em relação ao sistema natural (protótipo). De maneira geral, em modelos costeiros, as principais grandezas do escoamento envolvidas são a velocidade, a aceleração e o transporte de massa, além das forças que esse fluxo exerce nas partículas de fundo e em superfícies. O que se deseja em um modelo físico é que as principais forças e dimensões estejam em proporção com o modelo, de modo que outras forças secundárias se tornem insignificantes durante a simulação de um fenômeno (Hughes, 1993).

A semelhança completa exige três tipos de semelhança: geométrica, cinemática e dinâmica. Critérios geométricos estão relacionados com a proporção entre as dimensões físicas (comprimento, largura, altura, inclinação) do modelo e o protótipo, de modo que as escalas de redução destas dimensões sejam as mesmas.

Critérios cinemáticos estão relacionados a movimentação de partículas ou fluidos, que relaciona as dimensões e o período das ondas. Critérios hidráulicos são aqueles relacionados às forças atuantes em escoamentos de fluidos, sendo que os principais critérios usados para se atingir uma boa semelhança entre o modelo e o protótipo são os produtos adimensionais Número de Reynolds (Re) e Número de Froude (Fr). Diz-se que, um modelo físico possui boa semelhança hidráulica com o protótipo, quando o Re e Fr do escoamento simulado são iguais ou próximos ao do sistema natural. Porém, tal condição é raramente alcançada devido às relações entre os parâmetros do escoamento.

Direcionando o uso de modelagem física em escala reduzida para processos sedimentares de sistemas costeiros, Hughes (1993) apresenta dois tipos principais de modelos: modelos de fundo-fixo e modelos de fundo-móvel. Segundo Hughes (1993), modelos de fundo-fixo são aqueles que possuem superfícies sólidas que não podem ser modificadas pelo processo hidrodinâmico atuante no modelo, sendo usados, principalmente, em estudos de engenharia que envolvam ondas e correntes interagindo sobre estruturas fixas, como por exemplo, testes de resistência de quebra-mares (2D) e propagações de ondas em zonas portuárias (3D). Já os modelos de fundo-móvel são aqueles que possuem o fundo composto por materiais que reagem à aplicação de forças hidrodinâmicas, como por exemplo, estudos de erosão, transporte e deposição de sedimentos pela ação de ondas e correntes associadas, perfil de equilíbrio de praias, evolução de formas de fundo, ação de tempestades em zonas praias (2D); ou estudos de erosão em ilhas de areia de perfurações petrolíferas e deriva litorânea (3D).

Outra característica inerente à modelagem física de sistemas costeiros se dá em virtude da amplitude temporal dos fenômenos estudados (Hughes, 1993). Modelos de curto-prazo (*short-term*) são aqueles que estudam fenômenos com duração de horas a dias, como por exemplo, eventos de tempestades. Modelos de longo-prazo (*long-term*) estão relacionados à modelagem que estuda fenômenos com duração de dias a anos, como deriva litorânea. No caso de modelagem de ondas, a temporalidade se aplica também no período da onda simulada. Modelos de ondas-curtas (*short-wave*) simulam condições de *swell*, enquanto que modelos de ondas-longas (*long-wave*) simulam marés e tsunamis.

Além dos aspectos estruturais e temporais, os modelos físicos também possuem outro aspecto relevante: a geometria do canal utilizado na modelagem. Os

modelos físicos podem ser bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D). Modelos 2D (Fig. 7A e 7B) são realizados em canais alongados, representando um perfil longitudinal do sistema modelado. Modelos 3D (Fig. 7C) são realizados em condutos amplos, mais conhecidos como tanques ou bacias, representando a integralidade espacial do fenômeno estudado.

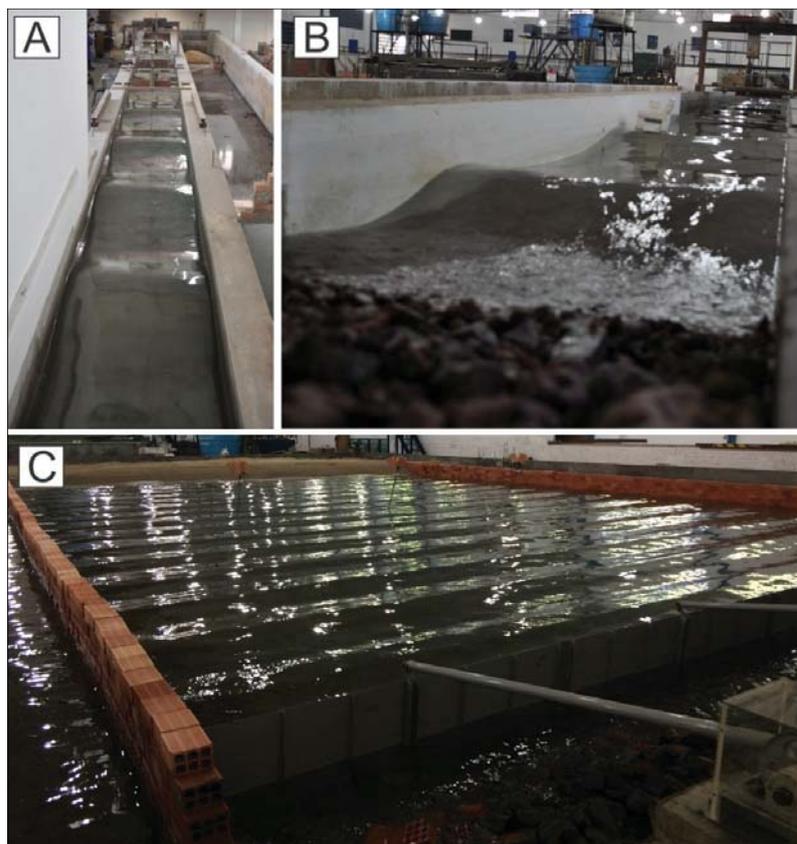


Figura 7 – Tipos de canais de geração de ondas em laboratório. A e B) Canal bidimensional (2D). C) Canal tridimensional ou bacia (3D). *Obs.: fotos dos canais do laboratório do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – UFRGS, Porto Alegre, RS.

Estudos em modelos físicos de fundo-móvel compostos por conchas

Do ponto de vista de processos sedimentares, há poucos trabalhos na literatura que utilizaram modelagem física sobre um fundo-móvel composto por conchas. Aqui, serão apresentados três estudos que investigaram a ação de fluxos unidirecionais (corrente) e oscilatórios (ondas) sobre sedimentos bioclásticos a partir de modelagem física.

Nagle (1967) investigou a orientação de conchas (bivalves e gastrópodes), de variadas geometrias, sob a ação de fluxos oscilatórios e unidirecionais a partir de

modelagem física em laboratório de correntes e ondas, além de também realizar experimentos de campo. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que há uma orientação diagnóstica para cada tipo de fluxo. Conchas submetidas a ação de correntes tendem a se orientar com seu eixo de maior comprimento paralelo a direção da corrente e com um único sentido preferencial de alinhamento (roseta unimodal), de acordo com a geometria da concha (Fig. 8A). Conchas submetidas a ação de ondas na zona de empolamento (*non-swash*) tendem a alinhar seu eixo de maior comprimento paralelo a direção da crista da onda, produzindo dois sentidos preferenciais de alinhamento (roseta bimodal), também dependendo da geometria da concha (Fig. 8B). Em zonas de *swash*, as conchas também apresentam dois sentidos preferenciais de alinhamento, porém na direção perpendicular em relação às cristas das ondas incidentes. Além destes resultados, o autor também comenta que conchas maiores e mais pesadas são mais dificilmente orientadas quando estão sobre um fundo com sedimentos finos ou semienterradas. Ainda, estas orientações diagnósticas podem ser aplicadas no registro geológico, de modo a indicar os processos deposicionais ocorridos em rochas sedimentares, mesmo em rochas em que tenham ocorrido intensa bioturbação, desde que conchas de grande porte estejam densamente presentes.

Brenchley & Newall (1970) realizaram uma série de experimentos em diferentes tipos de substratos. Substratos com oito diferentes espécies de conchas (pelecípodas/bivalves e gastrópodes) dispostas em uma base de areia média ou lama, foram utilizados para investigar a orientação das conchas e os efeitos da corrente incidente no fundo. Os experimentos demonstraram que as conchas são orientadas durante o seu transporte, possuindo direção preferencial, do seu eixo de maior comprimento, no sentido da corrente incidente, e dispostas em posição de concavidade para baixo. Além disto, foi constatado que as conchas se movem mais facilmente e percorrem maiores distâncias em um fundo arenoso, do que em fundo lamoso.

Thompson & Amos (2002) usaram um canal de geometria circular para investigar a mobilidade de conchas de bivalves desarticuladas sobre um fundo de sedimentos coesivos, a partir de correntes unidirecionais com energia crescente. Os autores constataram que as conchas se moveram como carga de fundo, primeiramente sendo arrastadas sobre o fundo e, posteriormente, rolando. A velocidade de início de movimento das conchas está diretamente relacionada com

Rieux *et al.* (2018) investigaram o início de movimento para fragmentos de oito espécies de moluscos. Como principal resultado, os autores verificaram o comportamento hidrodinâmico destas partículas em termos de início de movimento e velocidade de queda estão relacionados diretamente com a densidade, a estrutura e a forma dos grãos.

Referências

- Abrahão, D. & Warme, J.E. 1990. Lacustrine and associated deposits in a rifted continental margin – Lower Cretaceous Lagoa Feia Formation, Campos Basin, offshore Brazil. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 50: 287 – 305.
- Altenhofen, S.D. 2013. *Caracterização petrográfica de depósitos carbonáticos lacustres do Grupo Lagoa Feia, Bacia de Campos, Brasil*. Porto Alegre: 68p. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Bertani, R.T. & Carozzi, A.V. 1985. Lagoa Feia Formation (Lower Cretaceous), Campos Basin, offshore Brazil: Rift Valley Stage lacustrine carbonate reservoirs – I. *Journal of Petroleum Geology*, 8(1): 37 – 58.
- Brenchley, P.J. & Newall, G. 1970. Flume experiments on the orientation and transport of models and shell valves. *Paleogeography, Paleoclimatology and Paleoecology*, 7: 185-220.
- Carvalho, M.D., Praça, U.M., Silva-Telles, Jahnert, R.J., A.C. & Dias, J.L. 2000. Bioclastic carbonate lacustrine facies models in the Campos Basin (Lower Cretaceous), Brazil. *American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology*, 46: 245 – 256.
- Chinelatto, G.F., Vidal, A.C., Kuroda, M.C. & Basilici, G. 2018. A taphofacies model for coquina sedimentation in lakes (Lower Cretaceous, Morro do Chaves Formation, NE Brazil). *Cretaceous Research*, 85: 1 – 19.
- Dalrymple, R. A. 1985. *Introduction to physical models in coastal engineering*. In: Dalrymple, R.A. & Balkema A.A. (Ed.). *Physical modelling in coastal engineering*. Rotterdam, 3 – 9.

- Dias, J.L., Oliveira, J.Q. & Vieira, J.C. 1988. Sedimentological and stratigraphic analysis of the Lagoa Feia Formation, Rift Phase of Campos Basin, offshore Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 18(3): 252 – 260.
- Embry, A.F. & Klovan, J.E. 1971. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19: 730-781.
- Galvin, C.J. 1968. Breaker type classification on three laboratory beaches. *Journal of Geophysical Research*, 73: 3651-3659.
- Goldberg, K., Kuchle, J., Scherer, C., Alvarenga, R., Ene, P.L., Arnelenti, G. & De-Ros, L.F. 2017. Re-sedimented deposits in the rift section of the Campos Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 80: 412 – 431.
- Hughes, S.A. 1993. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. London, World Scientific Publishing, 568p.
- Kidwell, S. M., Fursich, F.T. & Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentration. *Palaios*, 1: 228 – 238.
- Kidwell, S.M. 1986. Models for fossil concentrations: paleobiologic implications. *Paleobiology*, 12(1): 6 – 24.
- Komar, P.D. 1976. *Beach process and sedimentation*. Prentice Hall, 429p.
- Muniz, M.C. 2013. *Tectono-Stratigraphic evolution of the Barremian-Aptian Continental Rift Carbonates in southern Campos Basin, Brazil*. Londres: 301 p. PhD Thesis, Royal Holloway University of London.
- Nagle, J.S. 1967. Wave and current orientation of shells. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37(4): 1124 – 1138.
- Paphitis, D., Collins, M.B., Nash, L.A. & Wallbridge, S. 2002. Settling velocities and entrainment thresholds of biogenic sands (shell fragments) under unidirectional flow. *Sedimentology*, 49, 211 – 225.
- Pettijohn, F.J. 1957. *Sedimentary Rocks* (2rd. Ed). New York, Harper & Row, 718p.
- Pettijohn, F.J. 1975. *Sedimentary Rocks* (3rd. Ed). New York, Harper & Row, 628p.
- Platt, N. H. & Wright, V. P. 1991. Lacustrine carbonates: facies models, facies distributions and hydrocarbon aspects. In: Anadón, P., Cabrera L., & Kelts, K. eds., *Lacustrine Facies Analysis*. Special Publication International Association of Sedimentologists, 13: 57-74.

- Price, W. A. 1978. *Models – can we learn from the past*. Proceedings of the 16th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, 1: 25-36.
- Rangel, H. D., Martins, F. A. L., Esteves, F. R. & Feijó, F. J. 1994. Carta estratigráfica da Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8(1): 203-217.
- Reading, H.G. & Collinson, J.D. 1996. *Clastic coasts*. In: Reading, H.G. (3rd Ed.), *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Oxford, Blackwell Publishing, pp. 154 – 231.
- Rieux, A., Weill, P., Mouazé, D., Poirier, Nechenache, F., Perez, L. and Tessier, B. (2018) Threshold of motion and settling velocities of mollusc shell debris: Influence of faunal composition. *Sedimentology*, In press.
- Schäfer, W. 1972. *Ecology and Paleoecology of Marine Environments*. Chicago, The University of Chicago Press, 568 p.
- Short, A. 1999. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. Chichester, John Wiley, 379p.
- Svendsen, I.A. 1985. *Physical modelling of water waves*. In: *Physical modelling in coastal engineering*, R A. Dalrymple, Ed., A. A. Balkema. Rotterdam, 13 – 47.
- Tavares, A.C., Borghi, L., Corbett, P., Nobre-Lopes, J. & Câmara, R. 2015. Facies and depositional environments for the coquinas of the Morro do Chaves Formation, Sergipe-Alagoas Basin, defined by taphonomic and compositional criteria. *Brazilian Journal of Geology*, 45(3): 415 – 429.
- Terra, G.J.S., Spadini, A.R., França, A.B., Sombra, C.L., Zambonato, E.E, Juschaks, L.C.S., Arienti, L.M., Erthal, M.M., Blauth, M., Franco, M.P., Matsuda, N.S., Silva, N.G.C., Moreti-Junior, P.A., D'Avila, R.S.F., Souza, R.S., Tonietto, S.N., Anjos, S.M.C., Campinho, V.S. & Winter, W.R. 2010. Classificação das rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 18(1): 9 – 29.
- Thompson, C.E.L. & Amos, C.L. 2002. The impact of mobile disarticulated shells of *Cerastoderma edulis* on the abrasion of a cohesive substrate. *Estuaries*, 25(2): 204 – 214.

- Thompson, D.L., Stilwell, J.D. & Hall, M. 2015. Lacustrine carbonate reservoirs from Early Cretaceous rift lakes of Western Gondwana: Pre-Salt coquinas of Brazil and West Africa. *Gondwana Research*, 28: 26 – 51.
- Walker, M.R. & Plint, A.G. 1992. *Wave and storm dominated shallow marine systems*. In: Walker, M.R., James, N.P. (Eds.). *Facies Models: Response to Sea Level Change*. Geological Society of Canada, Ontario, pp. 219 – 238.
- Winter, W. R., Jahnert, R. J. & França, A. B. 2007. Carta estratigrafica da Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 511 – 529.

METODOLOGIA

Os resultados apresentados nesta tese de doutorado foram obtidos através de experimentos em canal de ondas em laboratório. Pode-se dividir os experimentos realizados em dois tipos: experimentos de modelagem física e testes hidráulicos. Os experimentos de modelagem física visaram simular um ambiente costeiro lacustre baseado no Lago Tanganyika, ou seja, procurou-se construir um modelo físico de um protótipo natural, onde condições de similitude geométricas e cinemáticas (altura e período de onda) foram consideradas. No que se refere ao tipo de modelagem empregada, segundo os critérios de Hughes (1993), esses experimentos foram de fundo-móvel (partículas móveis no fundo) com temporalidade *short-term* (simulação de eventos de tempestades), em um canal do tipo 2D. Os resultados dos experimentos de modelagem física são apresentados nos artigos I e II (Capítulos 4 e 5), sendo o artigo I focado nas dinâmicas e processos sedimentares do modelo, e o artigo II alinhado com a análise dos depósitos gerados. Já os testes hidráulicos consistiram em reproduzir fluxos oscilatórios (propagação de ondas) para a medição de velocidades críticas de início de movimento de partículas. Portanto, esta etapa não se configurou na simulação e construção de um modelo físico. Nestes testes foi usado um fundo misto, com parte das partículas fixas e outra parte móvel, também em um canal 2D. O artigo III (Capítulo 6) aborda os resultados dos testes hidráulicos, onde verificou-se as diferenças na condição de início de movimento de conchas de bivalves e gastrópodes.

Ambas as etapas de laboratório foram executadas no canal 2D de geração de ondas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, entre janeiro de 2017 e abril de 2018. Equipamentos utilizados nos experimentos como: o *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) para medição de velocidade de fluxo, o distanciômetro a laser e a mesa de coordenadas para o levantamento topográfico, bem como demais utensílios e ferramentas; foram fornecidos pelo Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade, vinculado ao mesmo instituto. O material bioclástico empregado nos experimentos foi obtido junto a CYSY Calcários SA, que extrai esse material de um depósito de planície costeira (Idade Holocênica – Fornari *et al.*, 2012) no município de Jaguaruna, SC.

Os métodos e materiais utilizados, bem como as técnicas de análise e interpretação dos dados estão detalhadamente expostas ao longo dos artigos, cada qual focada nos propósitos dos respectivos manuscritos. A Tabela 1, a seguir, expõe de forma sucinta os métodos de análise e cálculos realizados em cada um dos artigos.

Tabela 1. – Métodos de análise e cálculos executados nos respectivos artigos desta tese.

| Artigo | Tipo de experimento | Foco do artigo | Métodos empregados |
|--------|---------------------|--|---|
| I | modelagem física | dinâmicas sedimentológicas de conchas ao longo de um perfil praial | - determinação das relações de similitude entre modelo e protótipo; - visualização de dinâmicas sedimentares em imagens do modelo e descrição in situ; - medição de velocidades de fluxo, análise sedimentológica de amostras do modelo |
| II | modelagem física | concentrações bioclásticas e morfologia do modelo físico | - análise de parâmetros tafonômicos das concentrações bioclásticas; - imageamento e topografia do modelo físico |
| III | teste hidráulico | influência da forma das conchas no seu início de movimento sob fluxo oscilatório | - medição de velocidades de fluxo; - cálculo de tensão de cisalhamento e parâmetro de Shields; - picnometria de conchas; - determinação do fator de forma de conchas |

Referências

- Fornari, M., Giannini, P.C.F. & Nascimento, D.R. 2012. Facies associations and controls on the evolution from a coastal bay to a lagoon system, Santa Catarina Coast, Brazil. *Marine Geology*, 323-325, 56 – 68.
- Hughes, S.A. 1993. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. London, World Scientific Publishing, 568p.

ARTIGO I

Shell concentration dynamics driven by wave motion in flume experiments: Insights for coquina facies from lake-margin settings

Periódico: *Sedimentary Geology*

Língua: Inglês

Qualis Capes (Geociências): A2

Situação: publicado (DOI: 10.1016/j.sedgeo.2018.08.002)

ARTIGO II

Análise tafonômica de concentrações bioclásticas geradas em modelagem física de um sistema de águas rasas dominado por ondas

Periódico: Pesquisas em Geociências

Língua: Português

Qualis Capes (Geociências): B2

Situação: em revisão

Assunto [Pesq Geoc] Agradecimento pela Submissão
Remetente Pesquisas em Geociências - Comissão Editorial
<pesqgeoc@ufrgs.br>
Para Sr. Cristiano Fick <cristiano.fick@ufrgs.br>
Data 2018-11-12 16:42



Sr. Cristiano Fick,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "Análise tafonômica de concentrações bioclásticas geradas em modelagem física de um sistema de águas rasas dominado por ondas" para Pesquisas em Geociências. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:

<https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/author/submission/88098>

Login: crisfick

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este e-mail. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Pesquisas em Geociências - Comissão Editorial
Pesquisas em Geociências

Pesquisas em Geociências

<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias>

1 **Análise tafonômica de concentrações bioclásticas geradas em modelagem**
 2 **física de um sistema de águas rasas dominado por ondas**
 3 **Taphonomic analysis of bioclastic accumulations generated by physical**
 4 **modeling of a wave-dominated shallow water system**

5
 6 Cristiano FICK¹, Elírio Ernestino TOLDO Jr² & Eduardo PUHL³
 7

- 8 1 Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio
 9 Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves 9500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil (E-mail:
 10 cristiano.fick@ufrgs.br).
 11 2 Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do
 12 Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil (E-mail:
 13 toldo@ufrgs.br).
 14 3 Departamento de Hidrologia e Hidráulica, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do
 15 Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91.501-970, Porto Alegre, RS, Brasil (E-mail:
 16 eduardo.puhl@ufrgs.br).
 17

18 **Resumo** - A análise tafonômica foi empregada em concentrações bioclásticas (coquinas)
 19 geradas por modelagem física de um ambiente costeiro dominado por ondas. Este estudo
 20 procurou detalhar os efeitos deposicionais das dinâmicas de concentração de conchas
 21 (retrabalhamento, *winnowing* e *bypass* dinâmico) governadas pelas ondulações. Parâmetros
 22 tafonômicos como as orientações e posicionamento das conchas, o empacotamento e o
 23 conteúdo percentual de matriz (em peso), foram analisados a partir de amostras rígidas e
 24 inconsolidadas dos depósitos modelados, bem como pelo imageamento do modelo físico. As
 25 orientações topo-base das conchas foram predominantemente concordantes em todo perfil
 26 simulado (>70%), porém com um percentual maior de bioclastos oblíquos e verticais nas
 27 amostras mais distais do modelo, associadas ao *winnowing* e ao *bypass* dinâmico. As
 28 orientações em planta mostraram tendências bimodais ou unimodais nos depósitos
 29 intermediários do perfil, associadas a dinâmica de retrabalhamento (na rebentação) e
 30 *winnowing*, e polimodais nas amostragens mais proximais e distais, associados ao
 31 retrabalhamento no espriamento e *bypass* dinâmico, respectivamente. O posicionamento da
 32 concavidade dos bivalves foi majoritariamente para baixo ao longo da seção analisada. O
 33 empacotamento e percentual de matriz foram, respectivamente, denso e mais baixo (30%) no
 34 depósito gerado pelo *winnowing*, sendo os demais com empacotamento moderado ou
 35 disperso. O emprego da análise tafonômica foi satisfatório, pois permitiu associar
 36 comportamentos tafonômicos a determinadas dinâmicas sedimentológicas de acumulação de
 37 conchas.

38
 39 **Palavras-chave:** coquinas, tafonomia experimental, dinâmicas sedimentológicas, modelo
 40 físico costeiro
 41

42 **Abstract** - The taphonomic analysis was applied to shell concentrations (coquinas)
 43 generated by physical modeling of a wave-dominated coastal environment. This analysis
 44 aims to detail the depositional effects of the shell concentration dynamics (reworking,
 45 *winnowing* and dynamic *bypass*) controlled by the waves. Taphonomic parameters such as
 46 the shell orientation and positioning, the packing and the percentage content of matrix (by
 47 weight), were analyzed from rigid and inconsolidated samples of the simulated deposits, as

well as by the image survey of the physical modeling surface. The top-base orientations of the shells were most concordant (> 70%) along the entire simulated profile, but with a higher percentage of oblique and vertical bioclasts in samples from more distal sector of the model, associated to the winnowing and dynamic bypass. The in plan orientations showed bimodal and unimodal tendencies at the intermediate deposits of the profile, associated with the dynamics of reworking (from breaking zone) and winnowing, and polymodal in the more proximal and distal deposits, associated to reworking (from swash zone) and dynamic bypass, respectively. The bivalve shells were mostly concave-down in all simulated deposits. The packing and the percentage of matrix were, respectively, dense and lower (30%) in the deposit generated by the winnowing, being the others with moderate or disperse packing. The use of the taphonomic analysis was satisfactory, since it allowed to associate characteristic taphonomic behaviors to specific sedimentological dynamics of shell accumulation.

Keywords: coquinas, experimental taphonomy, sedimentological dynamics, coastal physical model

1 Introdução

A análise tafonômica de acumulações sedimentológicas de fosseis consiste em descrever o grau de modificação *post mortem* de partes esqueléticas e o seu arcabouço deposicional com a finalidade de entender o tipo e a intensidade dos processos mecânicos que atuaram sobre os fosseis desde a morte do organismo até sua acomodação final. Em relação às acumulações bioclásticas de conchas de moluscos, parâmetros como orientação (em planta e seção), grau de empacotamento, seleção, fragmentação e abrasão das carapaças são atributos bastante empregados no seu estudo tafonômico/sedimentológico (Kidwell *et al.*, 1986; Kidwell, 1991; Kidwell & Holland, 1991). A descrição destes parâmetros permite diferenciar fácies (ou tafofácies) dentro de um pacote sedimentar de coquinas - como são genericamente chamadas as acumulações de conchas em ambientes costeiros - de modo a detalhar os agentes de transporte e retrabalhamento dos bioclastos, bem como aprimorar a interpretação paleoambiental.

Exemplos da aplicação de parâmetros tafonômicos em estudos de pacotes de coquinas antigas das bacias sedimentares brasileiras podem ser constatados em diversos estudos, nos quais se destacam Simões & Kowalewski (1998), que analisaram a Camada de Conchas Ferraz da Formação Corumbataí (Permiano Superior), Bacia do Paraná; Tavares *et al.* (2015) e Chinelatto *et al.* (2018) que estudaram um espesso pacote de coquinas (>50m) da Formação Morro do Chaves (Cretáceo Inferior), Bacia Sergipe-Alagoas; e Muniz (2013) que descreveu testemunhos da sequência de coquinas da Formação Coqueiros (Cretáceo Inferior), Bacia de Campos. Nestes trabalhos, os autores sugerem que coquinas com alto grau de fragmentação, orientação plano-paralela com concavidade para baixo e empacotamento denso das conchas foram geradas por dinâmicas de retrabalhamento e *winnowing* (*sensu* Kidwell, 1986) intensas, induzidas por ondas e correntes de tempestades em zonas próximas a linha de costa (acima do nível de base das

88 ondas). Por outro lado, acumulações de moluscos não fragmentados, orientação vertical ou
89 oblíqua e empacotamento moderado ou disperso sugerem a ação de dinâmicas com menor
90 intensidade de remobilização de bioclastos em zonas costeiras mais profundas (abaixo do nível
91 de base das ondas). Estudos recentes em acumulações bioclásticas modernas (Quaternário) em
92 zonas costeiras do Brasil, também, utilizam critérios tafonômicos para a interpretação dos
93 processos e condições ambientais de sua formação. Exemplos disso são Fornari *et al.* (2012) e
94 Porto-Barros *et al.* (2017) que analisaram depósitos holocênicos de conchas na planície costeira
95 de Santa Catarina (Jaguaruna) e Rio de Janeiro (Região dos Lagos) respectivamente.

96 Tendo em vista a importância e boa aplicabilidade da análise tafonômica no estudo de
97 acumulações de conchas de moluscos em ambientes costeiros, esta ferramenta se mostra bastante
98 promissora na interpretação de depósitos bioclásticos gerados em modelagem física, como no
99 caso de Fick *et al.* (2018). No referido trabalho, os autores simularam, em escala reduzida, um
100 perfil longitudinal de águas rasas utilizando um canal de laboratório, sob a ação de um gerador
101 de ondas em um fundo sedimentar arenoso e com aporte gradual de conchas carbonáticas. Entre
102 os resultados, as simulações demonstraram que as dinâmicas de concentração de conchas
103 sedimentológicas (*sensu* Kidwell, 1986) são controladas, em um ambiente dominado por ondas,
104 pelos processos de transformação do fluxo oscilatório ao se aproximar da costa (empolamento,
105 quebra e espraiamento), havendo, portanto, zonas de domínio de determinadas dinâmicas
106 (retrabalhamento, *winning*, *by-pass* dinâmico) ao longo do perfil costeiro. Além disto, foram
107 gerados diferentes tipos de acumulações de bioclastos, sendo cada um atribuído a uma das
108 dinâmicas observadas. No entanto, em Fick *et al.* (2018), os depósitos de coquinas simulados
109 não foram detalhados e quantitativamente quanto aos parâmetros tafonômicos, principalmente
110 quanto a orientação das conchas em seção base-topo.

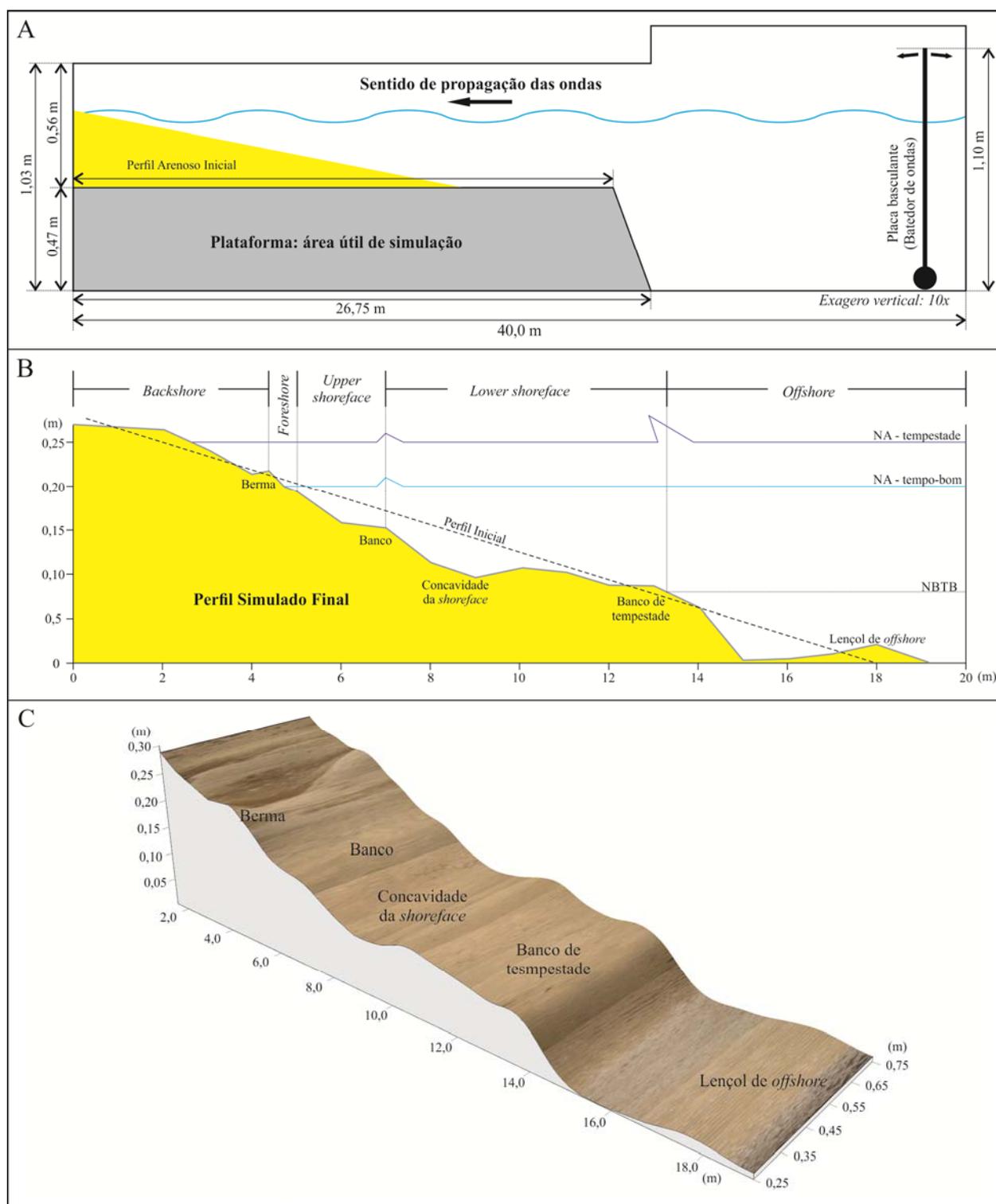
111 Com a finalidade de aprofundar a descrição do depósito simulado por (Fick *et al.* 2018),
112 este trabalho tem por objetivo analisar essas acumulações bioclásticas aplicando parâmetros
113 tafonômicos pertinentes, baseados em Kidwell *et al.* (1986) e Kidwell (1991). As análises foram
114 conduzidas a partir da amostragem dos sedimentos, tanto indeformadas (resinadas) quanto
115 inconsolidadas, imagens da superfície e em seção das amostras indeformadas. A partir desta
116 descrição mais detalhada, uma comparação mais robusta com fácies de coquinas do registro
117 sedimentar foi realizada.

118

119 **2 Materiais e Métodos**

120 *2.1 Síntese do modelo físico*

121 Nesta seção, uma síntese dos experimentos realizados e resultados obtidos em
122 Fick *et al.* (2018) é apresentada para uma melhor contextualização do problema investigado pelo
123 presente trabalho. Com o objetivo principal de observar os controles dos processos de
124 transformação da onda – empolamento, quebra e espraiamento – sobre as dinâmicas
125 sedimentológicas de concentração de conchas, experimentos de modelagem física em escala
126 reduzida foram realizados em um canal com dimensões de 40,0 m de comprimento, 1,0 m de
127 largura e 0,56 m de profundidade (**Fig. 1A**). As ondulações foram geradas por um gerador de
128 ondas do tipo placa metálica oscilante (articulada no fundo) instalado no interior de uma das
129 extremidades do canal. Os sedimentos utilizados na construção do perfil costeiro foram areia fina
130 quartzosa ($D_{50} = 0,125$ mm) e conchas de moluscos das classes dos bivalves (**Fig 2A e 2B**) e
131 gastrópodes (**Fig 2C e 2D**), fragmentadas e inteiras, variando em tamanho de 1,0 mm a 20,0 mm
132 ($D_{50} \sim 3,0$ mm). O perfil inicial teve aproximadamente 17 m de comprimento, com uma
133 inclinação de 1° .



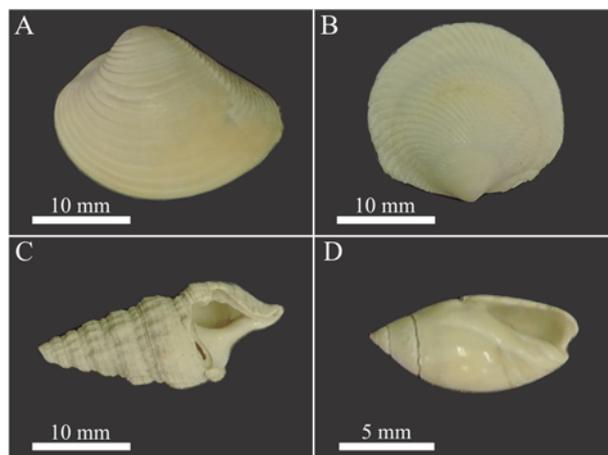
134

135 Figura 1 – Características do modelo físico. A) Geometria longitudinal do canal utilizado na
 136 modelagem física e posição do perfil arenoso inicial (modificado de Fick *et al.* 2018). B)
 137 Morfologia final do perfil costeiro simulado (modificado de Fick *et al.* 2018). C) Modelo 3D do
 138 perfil costeiro simulado mostrando, em detalhe, sua morfologia e feições características.

139 Figure 1 – Physical model characteristics. A) Longitudinal geometry of the flume used in the
 140 physical modeling and the location of the initial sandy profile (modified from Fick *et al.* 2018).

141 B) Final morphology of the simulated coastal profile (modified from Fick *et al.* 2018). C) 3D
 142 model of the simulated coastal profile showing, in detail, its morphology and characteristic
 143 features.

144



145

146 Figura 2 – Principais espécies de molusco usadas na modelagem física. A) *Anomalocardia*
 147 *brasiliiana* (Fornari *et al.*, 2012). B) *Diplodonta punctata* (Fornari *et al.*, 2012). C) *Cerithium*
 148 *eburneum* (Fornari *et al.*, 2012). D) *Olivella sp.* (Fornari *et al.*, 2012).

149 Figure 2 – Manly mollusc species used in the physical modeling. A) *Anomalocardia brasiliana*
 150 (Fornari *et al.*, 2012). B) *Diplodonta punctata* (Fornari *et al.*, 2012). C) *Cerithium eburneum*
 151 (Fornari *et al.*, 2012). D) *Olivella sp.* (Fornari *et al.*, 2012).

152

153 Os cenários de simulação visaram reproduzir um perfil costeiro lacustre baseado em um
 154 setor do Lago Tanganica, sudeste da África, devido este ser considerado um bom análogo aos
 155 antigos lagos-rifte existente durante a abertura do Gondwana (Thompson *et al.*, 2015), usando a
 156 declividade e a altura de onda média deste setor para calibrar o modelo. Nestes lagos-rifte,
 157 espessos pacotes de coquinas foram depositados, os quais representam importantes reservatórios
 158 de hidrocarbonetos nas atuais Bacias de Campos e Santos, pertencentes às sequencias do Pré-sal
 159 (Bertani e Carozzi, 1985; Dias *et al.*, 1988; Abrahão e Warme, 1990; Carvalho *et al.*, 2000; Terra
 160 *et al.*, 2010; Muniz, 2013). Além disto, os experimentos reproduziram alternadas condições de
 161 onda, ciclos de tempo-bom (menor altura e período de onda) e de tempestade (maior altura e
 162 período de onda), com um aporte de conchas constante (*R-hardpart* + - sensu Kidwell, 1986)
 163 sobre o fundo arenoso entre cada ciclo. No total, foram realizadas 54 horas de simulações
 164 divididas em 18 experimentos que variavam de 2 a 3 horas de duração. O perfil costeiro
 165 simulado ao final dos experimentos apresentou variadas formas, semelhantes às de perfis praias,
 166 como berma, banco, cava, banco de tempestade e lençol (Fig. 1B e 1C). Além disto, formas de

167 fundo do tipo *ripples* ocorreram ao longo de todo perfil sedimentar, sendo mais simétricas em
168 zonas com maior profundidade e afastadas da linha de costa, e assimétricas em zonas rasas
169 próximas à linha de costa.

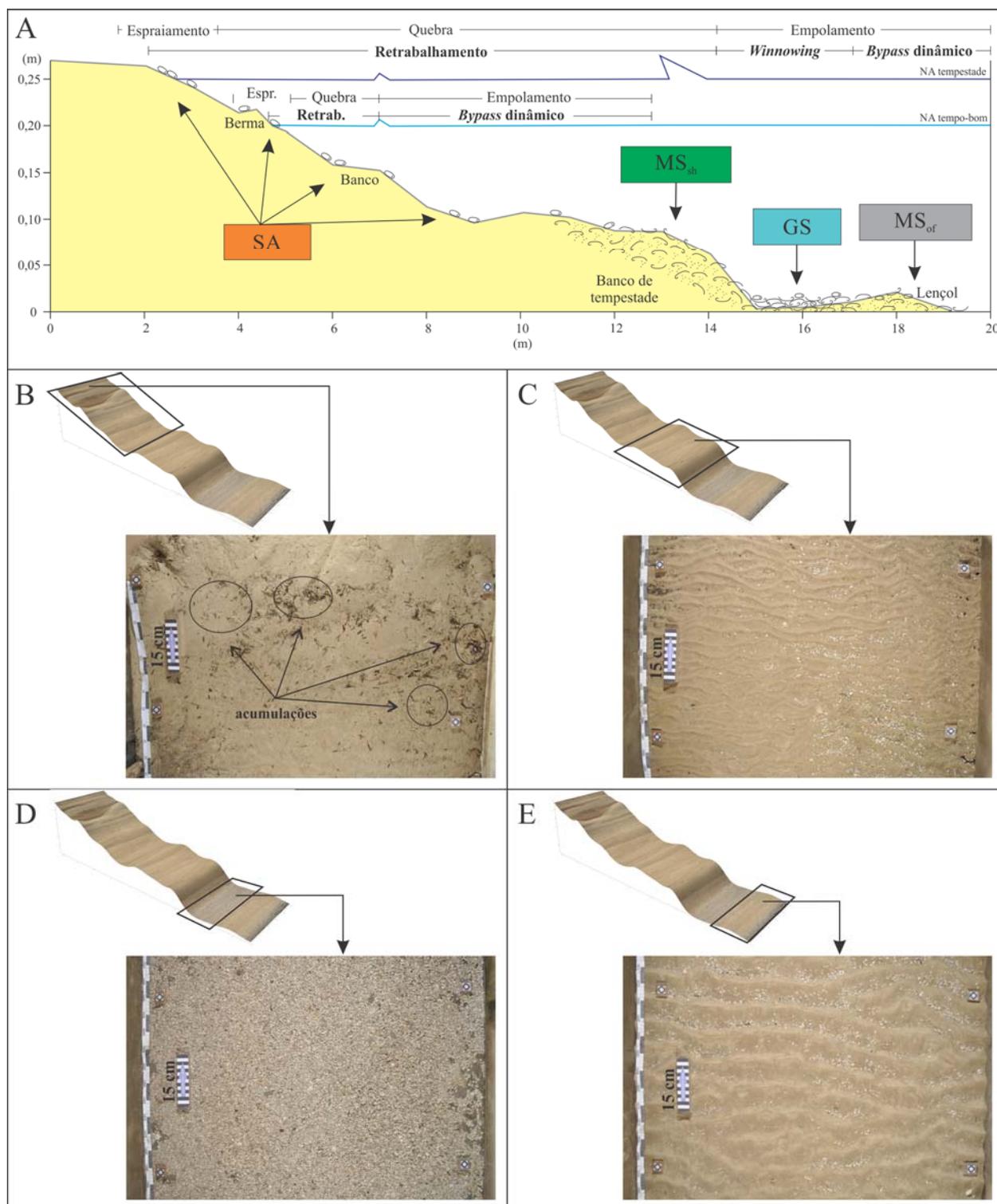
170 Quanto às dinâmicas sedimentológicas de concentração de conchas verificou-se um
171 zoneamento dos seus domínios ao longo do perfil (**Fig 3A**). A dinâmica de retrabalhamento:
172 remobilização de areia e rolamento, saltação e tração dos bioclastos, ocorreu de forma dominante
173 dentro da zona de quebra e espraiamento da onda, tanto nos experimentos de tempo-bom (curta
174 extensão do perfil), quanto nos de tempestade (ampla extensão do perfil). A dinâmica de
175 *winnowing*: remoção e suspensão da areia e movimentação incipiente dos bioclastos, prevaleceu
176 na zona de empolamento, logo atrás do primeiro ponto de quebra da onda, durante os
177 experimentos de tempestade. Outra dinâmica observada foi o by-pass dinâmico: migração da
178 areia sob a forma de *ripples* sobre os bioclastos imobilizados, ocorrendo essencialmente na zona
179 de empolamento durante simulações de tempo-bom e tempestade, sendo neste último caso em
180 porções mais distais.

181 Quatro tipos de acumulações de conchas foram gerados ao longo do perfil (**Fig. 3A**),
182 basicamente restritas às zonas de domínio das dinâmicas descritas acima:

- 183 • **SA** – concentração esparsa de conchas sobre a superfície do perfil, exclusivamente de
184 gastrópodes, não havendo empacotamento. Estas acumulações esparsas alóctones se
185 estenderam da *shoreface* até a zona de espraiamento da onda, estando sob a ação da
186 dinâmica de retrabalhamento (**Fig. 3B**).
- 187 • **MS_{sh}** – concentração matriz-suportada de conchas inteiras de bivalves e gastrópodes e
188 fragmentos, com empacotamento moderado a disperso e espessura máxima de 5,0 cm. Na
189 sua superfície era comum as conchas ficarem expostas entre as cavas das *ripples*. Este
190 tipo de depósito alóctone / parautóctone foi gerado pela ação da dinâmica de
191 retrabalhamento, estendendo-se do banco de tempestade até concavidade da *shoreface*
192 (**Fig. 3C**).
- 193 • **GS** – concentração parautóctone grão-suportada de conchas inteiras de bivalves e
194 gastrópodes (raros) e fragmentos, com empacotamento denso e espessura máxima de 2,0
195 cm, ocorrendo entre o lençol de *offshore* e o banco de tempestade na zona de
196 empolamento e, portanto, sob o domínio da dinâmica de *winnowing* (**Fig. 3D**).
- 197 • **MS_{of}** – concentração autóctone matriz-suportada de conchas inteiras de bivalves e
198 gastrópodes (raros) e fragmentos, com empacotamento moderado e espessura de até 2,5
199 cm. Assim como o depósito MS_{sh}, por vezes os bioclastos se apresentavam à superfície

200
201
202
203

entre as cavas das *ripples*. Sua ocorrência deu-se na zona mais distal do perfil, na zona de empolamento, constituindo o corpo deposicional do lençol de *offshore*. A dinâmica atuante neste depósito foi o *bypass* dinâmico (Fig. 3E).



204
205
206

Figura 3 – Dinâmicas e tipos de concentração de conchas observadas na modelagem física. A) Zoneamento das dinâmicas sedimentológicas de concentração de conchas e localização dos tipos

207 de concentração de bioclastos gerados ao longo do perfil costeiro simulado (modificado de Fick
208 *et al.*, 2018). B) Imagem aérea da concentração SA. C) Imagem aérea da concentração MS_{sh}. D)
209 Imagem aérea da concentração GS. E) Imagem aérea da concentração MS_{of}.

210 Figure 3 – Dynamics and types of shell concentration observed in the physical modeling. A)
211 Zoning of the sedimentological dynamics of shell concentration and the location of the shell
212 concentration types generated along the simulated coastal profile (modified from Fick *et al.*
213 2018). B) Top view of the SA concentration. C) Top view of the MS_{sh} concentration. D) Top
214 view of the GS concentration. E) Top view of the MS_{of} concentration.

215

216 Cada um dos tipos de concentração descritos acima foi devidamente amostrado e
217 fotografado, o que permitiu analisar parâmetros tafonômicos e sedimentológicos, como: o
218 empacotamento, a orientação em planta e em seção das conchas e o percentual de matriz. A
219 partir deste material, o presente trabalho buscou aprimorar algumas análises já apresentadas em
220 Fick *et al.* (2018) e acrescentar outras inéditas, o que proporcionou reforçar as comparações dos
221 depósitos gerados nas simulações com os do registro sedimentar.

222

223 2.2 Imageamento da superfície do perfil simulado

224 Após o fim das simulações, o perfil costeiro modelado foi inteiramente fotografado em
225 detalhe. Com uma câmera digital Nikon D5000 (18-55 mm) acoplada a uma plataforma móvel
226 sobre as paredes do canal, foram obtidas 36 fotografias com boa resolução da superfície do
227 depósito, de modo a cobrir toda a extensão do perfil. Estas fotografias permitiram visualizar
228 detalhadamente os bioclastos e as formas de fundo sobre a superfície do perfil. A partir destas
229 imagens foi realizada a medição da orientação em planta das conchas e quanto ao
230 posicionamento da concavidade dos bivalves: para cima ou para baixo.

231

232 2.3 Levantamento topográfico do perfil simulado

233 O levantamento da topografia do depósito foi realizado com um distânciômetro a laser
234 MD250 ADV (precisão 0,1 mm) acoplado a uma mesa mecanizada que realizava a
235 movimentação controlada do laser sobre a superfície. Esta mesa era posicionada sobre o canal,
236 de modo a cobrir uma área de 1,0 m de comprimento (longitudinal) e 0,50 m de largura
237 (transversal), com os respectivos espaçamentos de aquisição de 1,5 cm e 0,1 cm. No total foram
238 realizados 20 levantamentos (*grids*) ao longo do perfil (~20 m comprimento) de maneira que
239 toda sua superfície fosse levantada. Com o uso do aplicativo Surfer 8.0, todos os *grids* foram

240 unidos e processados gerando um modelo 3D do perfil simulado. Este levantamento permitiu
 241 melhor visualização da morfologia do modelo físico e sua correlação com os tipos de
 242 concentrações gerados.

243

244 2.4 Amostras de material inconsolidado

245 Amostras de material inconsolidado das acumulações de conchas geradas ao longo do
 246 perfil foram coletadas para análise da quantidade relativa de matriz (areia) e bioclastos em peso.
 247 No total, oito amostras com massa variando de 0,15 a 0,35 kg de material foram obtidas,
 248 nomeadas de AI-1 a AI-8 da mais proximal para a mais distal. Após a coleta, o material foi
 249 secado em estufa para remover a umidade e peneirado para separar a areia dos bioclastos. Com o
 250 uso de uma balança Marte AS5500C (0,01 gr de precisão) cada componente da amostra foi
 251 pesado para posterior cálculo da proporção de bioclastos na amostra. Na Tabela 1 constam a
 252 localização longitudinal da amostra, o respectivo tipo de concentração a que pertence e os pesos
 253 de cada componente.

254

255 Tabela 1 – Características das amostras inconsolidadas.

256 Table 1 – Unconsolidated sample characteristics.

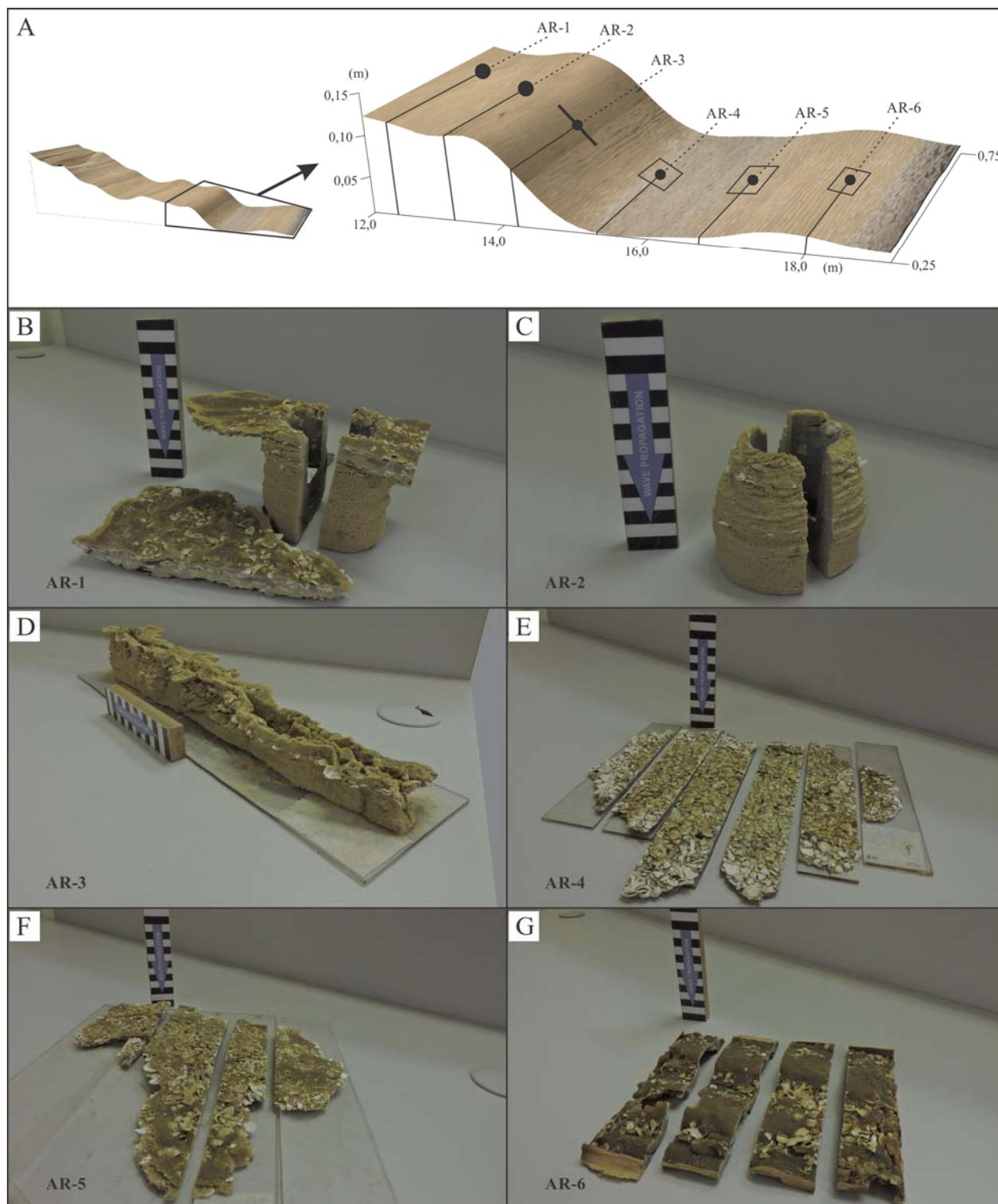
| Amostra | Tipo de acumulação | Localização longitudinal no perfil (m) | Massa total (kg) | Massa de areia (kg) | Massa de conchas (kg) |
|---------|--------------------|--|------------------|---------------------|-----------------------|
| AI-1 | MS _{sh} | 12,00 | 0,35 | 0,31 | 0,04 |
| AI-2 | MS _{sh} | 13,60 | 0,30 | 0,28 | 0,02 |
| AI-3 | MS _{sh} | 14,80 | 0,18 | 0,12 | 0,06 |
| AI-4 | GS | 15,20 | 0,16 | 0,05 | 0,11 |
| AI-5 | GS | 16,00 | 0,18 | 0,05 | 0,13 |
| AI-6 | GS | 16,60 | 0,34 | 0,17 | 0,17 |
| AI-7 | MS _{of} | 17,20 | 0,20 | 0,18 | 0,02 |
| AI-8 | MS _{of} | 18,00 | 0,22 | 0,16 | 0,06 |

257

258 2.5 Amostras rígidas

259 Amostras indeformadas dos depósitos foram coletadas com aplicação da técnica de
 260 testemunhagem utilizada por Fick *et al.* (2017) em um modelo físico deltaico. Com uso de resina
 261 a base de 3 componentes: Aradur 53-S, Araldite LY 1316 BR e Araldite DY 023, com proporção
 262 de 35%, 59% e 6% respectivamente. A resina foi aplicada em furos e fendas feitos no modelo
 263 físico, e espalhada sobre áreas da sua superfície (Fig. 4A), sendo extraídas, após a secagem (24
 264 h), seis amostras rígidas das acumulações de conchas (Fig. 4B – 4G), que foram nomeadas de

265 AR-1 a AR-6 da mais proximal a mais distal. Estas amostras permitiram observar e analisar com
266 detalhe as características internas dos depósitos de coquinas simulados, como: a orientação em
267 seção das conchas e o grau de empacotamento. As amostras também foram serradas ao meio ou
268 em diversas seções para ampliar a coleta de medições e observação.
269



270

271 Figura 4 – Localização e fotografias das amostras rígidas. A) Modelo 3D do perfil costeiro
272 simulado com a localização das amostras rígidas. B) Amostra AR-1 (12,3 m) – concentração
273 MS_{sh}. C) Amostra AR-2 (13,2 m) – concentração MS_{sh}. D) Amostra AR-3 (14,15 m) –
274 concentração MS_{sh}. E) Amostra AR-4 (15,3 m) – concentração GS. F) Amostra AR-5 (16,7 m) –
275 concentração GS. G) Amostra AR-6 (18,0 m) – concentração MS_{of}.

276 Figure 4 – Location and photos of the rigid samples. A) 3D model of the simulated coastal
277 profile with the rigid samples location. B) Sample AR-1 (12.3 m) – MS_{sh} concentration. C)
278 Sample AR-2 (13.2 m) – MS_{sh} concentration. D) Sample AR-3 (14.15 m) – MS_{sh} concentration.
279 E) Sample AR-4 (15.3 m) – GS concentration. F) Sample AR-5 (16.7 m) – GS concentration. G)
280 Sample AR-6 (18.0 m) – MS_{of} concentration.

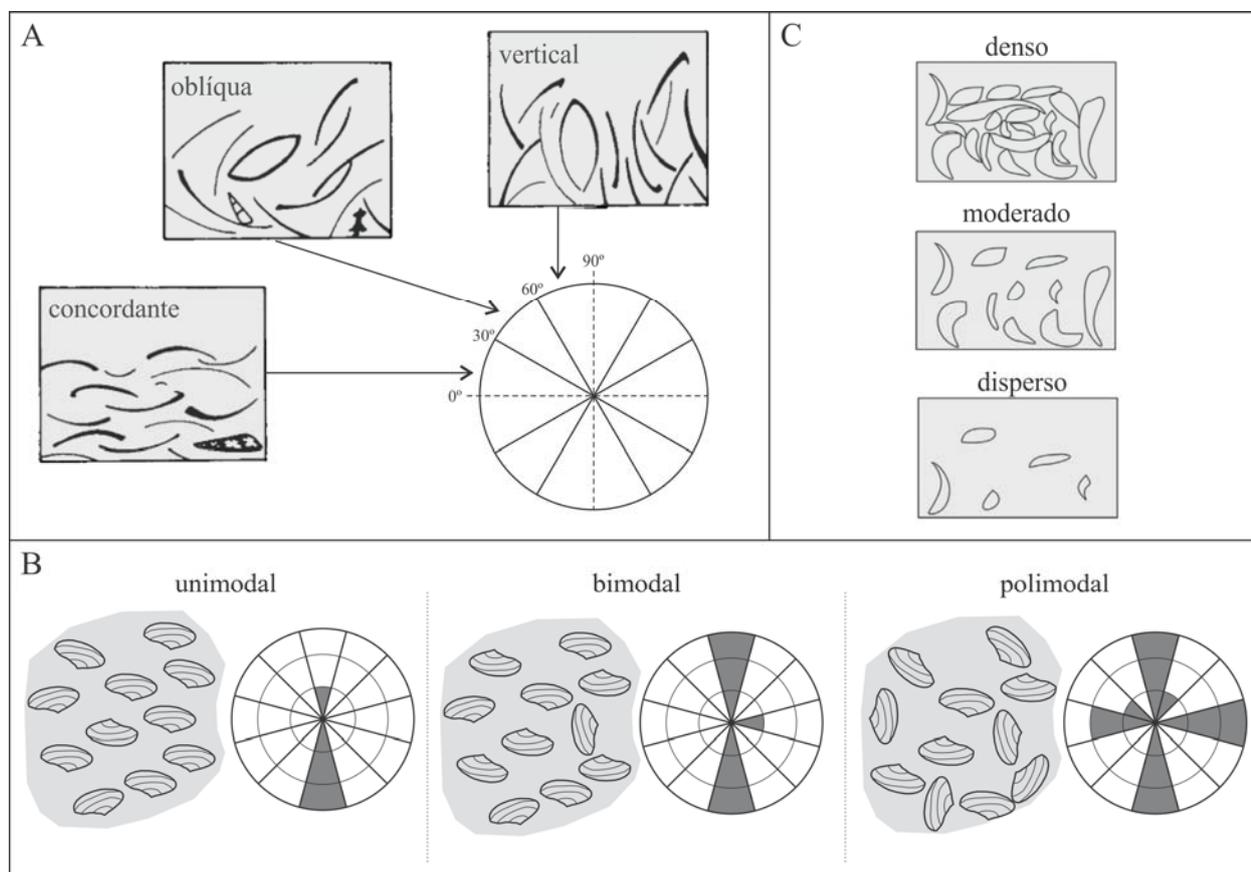
281

282 2.6 Análise dos parâmetros tafonômicos

283 Os parâmetros tafonômicos analisados nas concentrações de conchas foram: orientação
284 topo-base (seção) e em planta, grau de empacotamento e posicionamento da concavidade dos
285 bivalves, e quantificação da proporção de conchas e matriz arenosa (em peso). A orientação
286 topo-base das conchas (inteiras e fragmentadas) foi caracterizada em função da sua inclinação
287 em relação à base da camada (**Fig. 5A**), sendo classificadas em concordante (0° a 30°), oblíqua
288 (30° a 60°) e vertical (60° a 90°), conforme Kidwell *et al.* (1986) e Kidwell (1991). Através de
289 imagens das seções das amostras rígidas, as orientações dos bioclastos foram medidas por meio
290 do aplicativo Corel Draw X6 com organização dos dados percentuais para interpretação
291 estatística. A orientação em planta das conchas (somente inteiras) foi medida pelo azimute do
292 umbo, para os bivalves, e da abertura, para os gastrópodes, tomando como norte o rumo da costa
293 (*onshore*). A partir das fotografias obtidas no imageamento da superfície do modelo físico, essas
294 direções foram medidas utilizando o aplicativo Corel Draw X6 e sua análise foi demonstrada por
295 diagramas de roseta. A classificação da orientação em planta foi feita segundo a moda dos
296 diagramas, sendo classificada em unimodal, bimodal ou polimodal (**Fig. 5B**), conforme proposto
297 por Kidwell *et al.* (1986). Também se utilizou as imagens de superfície para caracterizar o
298 posicionamento da concavidade dos bivalves. O grau de empacotamento foi caracterizado
299 através de uma estimativa visual de imagens (**Fig. 5C**), podendo ser denso (a maioria dos
300 bioclastos se tocam), moderado (bioclastos por vezes se tocam) ou disperso (bioclastos nunca se
301 tocam), conforme Chinelatto *et al.* (2018). A proporção de bioclastos e matriz arenosa foi obtida
302 por meio das amostras de material inconsolidado, como já foi descrito na subseção 3.3. Os

303 parâmetros fragmentação e abrasão não foram levantados pois grande parte do material
 304 bioclásticos usado nas simulações já era fragmentado (~90%) e bastante abrasivo.

305



306

307 Figura 5 – Caracterização dos parâmetros tafonômicos analisados. A) Orientação topo-base
 308 (seção) das conchas conforme Kidwell *et al.* (1986) e Kidwell (1991). B) Orientação em planta
 309 das conchas conforme Kidwell *et al.* (1986) e Kidwell (1991). C) Grau de empacotamento
 310 conforme Chinelatto *et al.* (2018).

311 Figure 5 – Characterization of the taphonomic parameters. A) Top-base orientation (cross
 312 section) of shells according Kidwell *et al.* (1986) and Kidwell (1991). In plan orientation of
 313 shells according Kidwell *et al.* (1986) and Kidwell (1991). C) Packing of the shell concentration
 314 according Chinelatto *et al.* (2018).

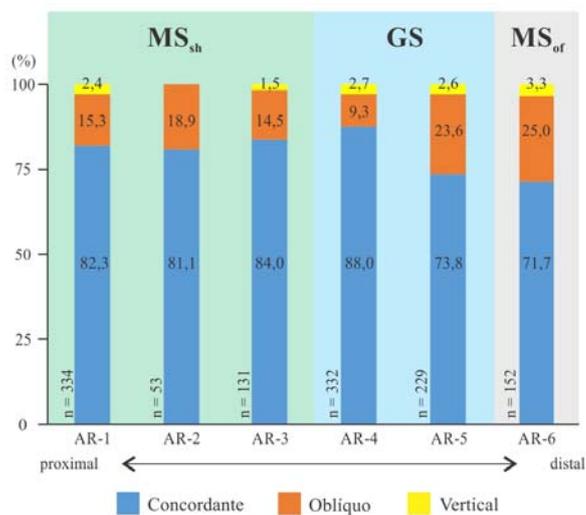
315

316 3 Resultados

317 Os resultados da análise tafonômica feita nas concentrações de conchas do perfil costeiro
 318 simulado foram descritos separadamente para cada tipo de concentração caracterizada por Fick
 319 *et al.* (2018): SA, MS_{sh}, GS e MS_{of}. Gráficos, diagramas e imagens foram usados para apresentar
 320 os dados dos parâmetros orientação em seção das conchas (**Fig. 6**), orientação em planta e

321 posição da concavidade dos bivalves (**Fig. 7**), grau de empacotamento (**Fig. 8**) e conteúdo de
 322 matriz / bioclastos (**Fig. 9**).

323

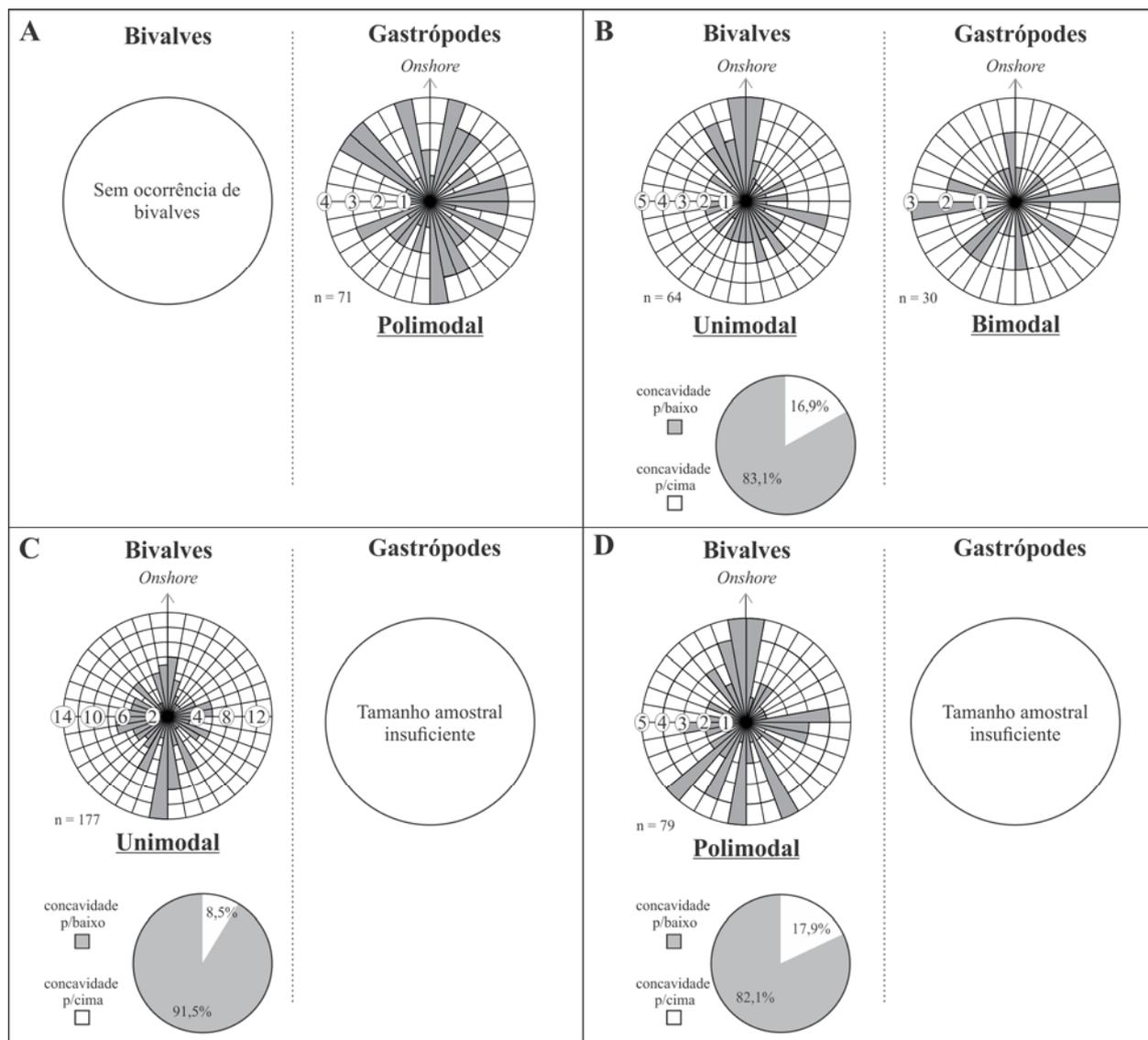


324

325 Figura 6 – Gráfico da orientação topo-base das conchas relativo às amostras rígidas.

326 Figure 6 – Graph of the shell top-base orientation related to the rigid samples.

327

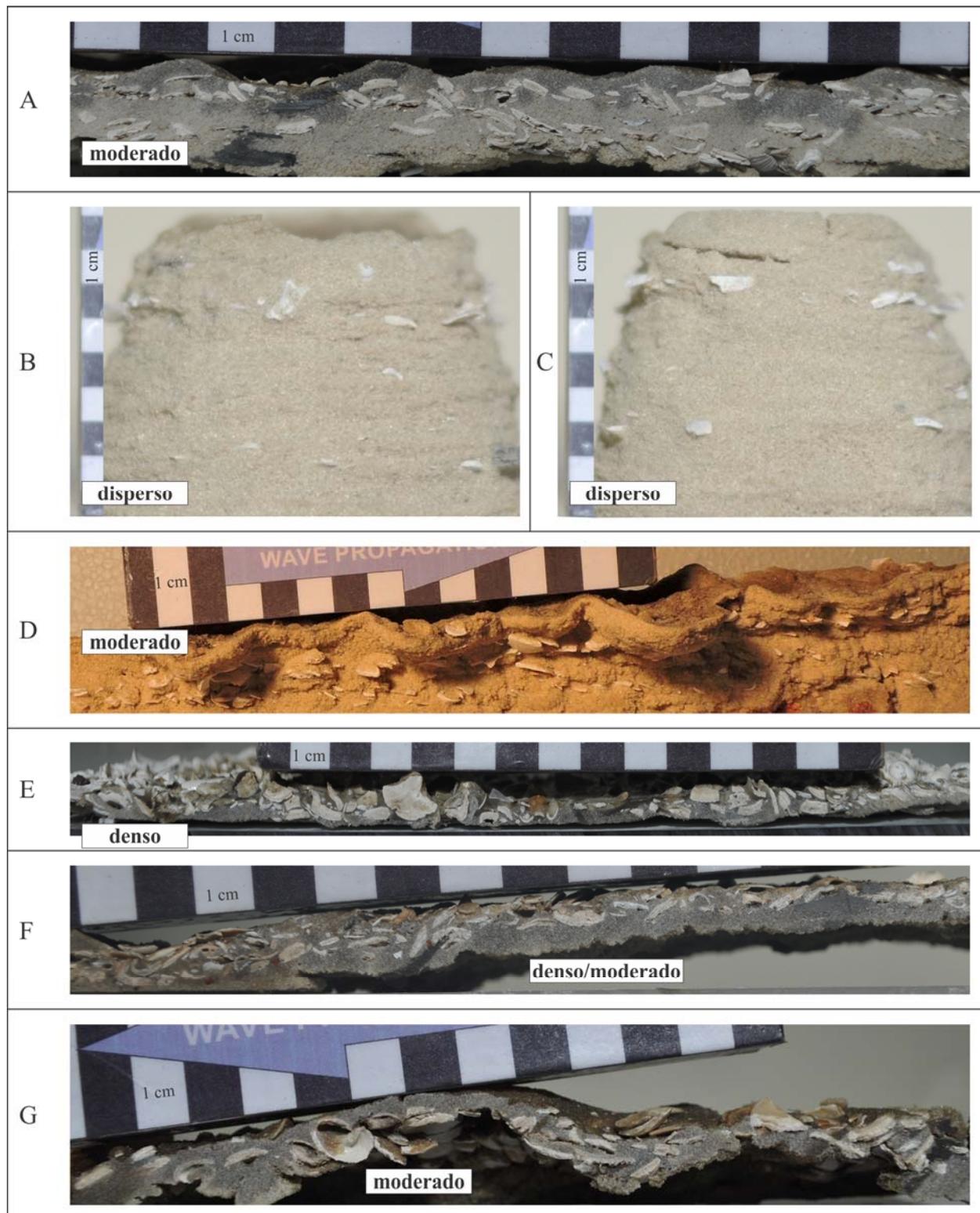


328

329 Figura 7 – Diagramas de roseta da orientação em planta dos bivalves (umbo) e gastrópodes
 330 (abertura) inteiros e gráficos da posição da concavidade dos bivalves. A) Concentração SA. B)
 331 Concentração MS_{sh}. C) Concentração GS. D) Concentração MS_{of}.

332 Figure 7 – Rose diagrams of the in plan orientation of whole bivalves (umbo) and gastropods
 333 (aperture) and graphs of the bivalve concavity positions. A) SA concentration. B) MS_{sh}
 334 concentration. C) GS concentration. D) MS_{of} concentration.

335



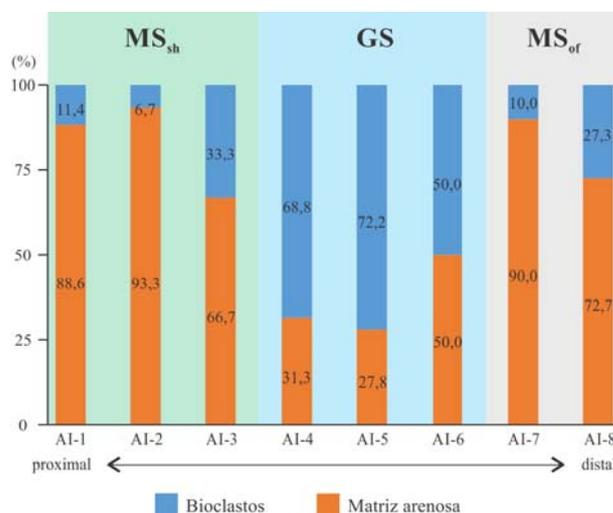
336

337 Figura 8 – Caracterização do grau de empacotamento nas seções das amostras rígidas. A)

338 Amostra AR-1 (concentração MS_{sh}). B) Amostra AR-2 (concentração MS_{sh}). C) Amostra AR-2339 (concentração MS_{sh}). D) Amostra AR-3 (concentração MS_{sh}). E) Amostra AR-4 (concentração340 GS). F) Amostra AR-5 (concentração GS). G) Amostra AR-6 (concentração MS_{of}).

341 Figure 8 – Packing characterization on the rigid sample sections. A) Sample AR-1 (MS_{sh}
 342 concentration). B) Sample AR-2 (MS_{sh} concentration). C) Sample AR-2 (MS_{sh} concentration).
 343 D) Sample AR-3 (MS_{sh} concentration). E) Sample AR-4 (GS concentration). F) Sample AR-5
 344 (GS concentration). G) Sample AR-6 (MS_{of} concentration).

345



346

347 Figura 9 – Gráfico da proporção de matriz e bioclastos das amostras inconsolidadas.

348 Figure 9 – Graph of the matrix and bioclasts ratio of the unconsolidated samples.

349

350 3.1 Concentração SA

351 A concentração de conchas SA (*sparse accumulation*) foi analisada parcialmente, sendo
 352 apenas quantificada quanto a orientação em planta de seus bioclastos, pois tratava-se de
 353 pequenas acumulações de conchas inteiras, exclusivamente de gastrópodes, espalhadas sobre a
 354 superfície da zona mais proximal do perfil simulado (Fick *et al.* 2018). Como não houve
 355 empilhamento de bioclastos, não gerando uma camada, os demais parâmetros tafonômicos não
 356 foram analisados. Entretanto, sua orientação em planta foi medida e caracterizada como
 357 polimodal (**Fig. 7A**), com um certo direcionamento preferencial perpendicular (N-S) à linha de
 358 costa.

359

360 3.2 Concentração MS_{sh}

361 A concentração de conchas MS_{sh} (*matrix-supported from shoreface*) apresentou medidas
 362 de orientação topo-base similares nas suas três amostras rígidas (**Fig. 6**). As conchas estavam
 363 majoritariamente orientadas de maneira concordante (>80%), secundariamente oblíquas (14% a
 364 19%), e pouquíssimas vezes verticais (<2,5%). Quanto a orientação em planta, os bivalves
 365 tiveram um comportamento unimodal (**Fig. 7B**), com seus umbos apontando preferencialmente

366 para a costa (N), enquanto que para os gastrópodes o comportamento foi bimodal, com suas
367 aberturas orientadas em sentidos opostos para os quadrantes E-W, paralelamente a linha de costa.
368 O posicionamento das concavidades das conchas bivalves foi preferencialmente para baixo
369 (*concave-down*), com mais de 83% das ocorrências, enquanto que a posição concavidade para
370 cima (*concave-up*) ocorreu, aproximadamente, em 17% desses indivíduos (**Fig. 7B**). O grau de
371 empacotamento foi caracterizado como moderado a disperso, sendo moderado, em duas das
372 amostras rígidas (**Fig. 8A e 8D**), e disperso, em uma delas (**Fig. 8B e 8D**). Quanto a proporção
373 em peso entre matriz arenosa e bioclastos (**Fig. 9**), as três amostras de material inconsolidado
374 indicaram dominância de matriz arenosa (>50%). No entanto, as duas amostras mais proximais
375 (AI-1 e AI-2) tiveram aproximadamente 90% de matriz, enquanto que na amostra mais distal
376 (AI-3) o percentual foi de pouco menos de 70%, o que caracteriza uma diminuição na quantidade
377 de matriz desta concentração na direção *offshore*.

378

379 3.3 Concentração GS

380 A concentração de conchas GS (*grain-supported*) teve orientação topo-base dos
381 bioclastos preferencialmente concordante (>70%), porém com consideráveis diferenças dos
382 valores entre suas duas amostras rígidas analisadas (**Fig. 6**). Da amostra mais proximal (AR-4)
383 para a mais distal (AR-5), houve uma diminuição de aproximadamente 15% no percentual de
384 conchas concordantes e um aumento das oblíquas, em mesmo percentual. Já as verticais
385 mantiveram praticamente o mesmo valor. A orientação em planta dos bivalves teve
386 comportamento unimodal para direção *offshore* (S), onde 91,5% dessas conchas ficaram com a
387 concavidade para baixo e 8,5% para cima (**Fig. 7C**). Os gastrópodes não tiveram amostragem
388 necessária para uma análise estatística robusta da orientação em planta e, portanto, não foram
389 analisados. O grau de empacotamento foi caracterizado como denso a moderado, sendo denso na
390 amostra mais proximal (**Fig. 8E**) e denso / moderado na amostra mais distal (**Fig. 8F**). Por sua
391 vez, o percentual em peso de bioclastos foi maior ou igual ao de matriz em todas amostras
392 inconsolidadas desta concentração, porém, percebeu-se uma variação nos valores (**Fig. 9**). Nas
393 duas amostras mais proximais (AI-4 e AI-5) o conteúdo de bioclastos foi de aproximadamente
394 70%, enquanto que na amostra mais distal (AI-6) o percentual de bioclastos e matriz foi 50%, o
395 que caracteriza um aumento no conteúdo de matriz desta concentração no sentido *offshore*.

396

397 3.4 Concentração MS_{of}

398 A concentração MS_{of} (*matrix-supported from offshore*) apresentou orientação topo-base
399 (**Fig. 6**) preferencialmente concordante (~70%), e em menor proporção oblíqua (25%) e vertical

400 (~5%). Estes valores indicam que de todas as amostras rígidas analisadas, a amostra
401 representante desta concentração (AR-6) foi a que apresentou o maior percentual de conchas
402 oblíquas ou verticais (~30%). O comportamento da orientação em planta dos umbos dos bivalves
403 foi polimodal para diversas direções, conferindo um certo grau de aleatoriedade para este
404 atributo (**Fig. 7D**). Destes bivalves, 82% ficaram com a concavidade para baixo e 18% para
405 cima. Assim como ocorreu na concentração GS, o número de indivíduos gastrópodes foi
406 insuficiente para analisa-lo estatisticamente. O grau de empacotamento foi caracterizado como
407 moderado (**Fig. 8G**). Já o conteúdo em peso de matriz foi mais elevado do que o de bioclastos
408 em ambas as amostras inconsolidadas desta concentração (**Fig. 9**), sendo 90% na mais proximal
409 e 73% na mais distal, o que caracteriza uma diminuição da quantidade relativa de matriz nesta
410 concentração no sentido *offshore*.

411

412 **4 Discussão dos resultados**

413 As discussões dos resultados são apresentadas a seguir, relatando o comportamento de
414 cada um dos parâmetros tafonômicos analisados ao longo do perfil costeiro simulado. Além
415 disto, alguns pontos desta análise são comparados com os observados por outros autores em
416 estudos de camadas e pacotes de coquinas do registro antigo e moderno, principalmente a
417 interpretação tafonômica da Formação Morro do Chaves de Chinelatto *et al.* (2018), onde
418 semelhanças ou diferenças relativas aos comportamentos mostrados pelo modelo físico são
419 discutidas.

420 A orientação topo-base dos bioclastos mostrou uma tendência de aumentar sua
421 obliquidade ou verticalização no sentido das áreas mais distais do perfil, embora conchas
422 concordantes tenham sido dominantes. Este comportamento é melhor observado nas amostras
423 AR-5 e AR-6 (Fig. 6), que apresentaram cerca de 10% a mais conchas oblíquas ou verticais do
424 que as demais amostras. Ainda, os valores médios de bioclastos verticais ou oblíquos por tipo de
425 concentração de conchas também corroboram com esta tendência, visto que as concentrações
426 MS_{sh}, GS e MS_{of} possuem médias percentuais de 17,54%, 19,1% e 28,3%, respectivamente.
427 Estas observações sugerem que o comportamento da orientação topo-base das conchas está
428 diretamente ligado a dinâmica sedimentológica a que foram submetidas. Bioclastos que sofreram
429 retrabalhamento (MS_{sh}), dinâmica de mais alta energia (Fick *et al.*, 2018), tenderam a ser menos
430 oblíquos / verticais e mais concordantes do que aqueles que estiveram submetidos ao *winnowing*
431 (GS), dinâmica de energia intermediária. Por sua vez, as conchas controladas pelo *bypass*
432 dinâmico (MS_{of}), dinâmica de mais baixa energia, foram menos concordantes e mais oblíquas /
433 verticais do que as duas dinâmicas citadas anteriores.

434 Em zonas de mais intensa ação de ondas e correntes (*foreshore – shoreface superior*), a
 435 orientação topo-base preferencialmente concordante está relacionada ao movimento e transporte
 436 das conchas (retrabalhamento), que partem de sua posição de vida vertical para um
 437 posicionamento paralelo a superfície do leito, que é hidrodinamicamente mais estável e
 438 equilibrado (Brenchley & Newall, 1970, Allen, 1984, Futterer, 1982; Kidwell *et al.*, 1986,
 439 Kidwell & Holland, 1991; Fürsish & Oschmann, 1993; Simões & Kowalewski, 1998). Desta
 440 maneira, embora o cenário de modelagem física de Fick *et al.* (2018) não tenha reproduzido a
 441 condição inicial de vida dos bioclastos (foram espalhados aleatoriamente sobre o fundo), o
 442 comportamento relativo da orientação topo-base ao longo do perfil simulado está de acordo com
 443 o esperado em sistemas naturais. Além disto, este comportamento reforça a comparação entre os
 444 tipos de concentrações de conchas do modelo físico e as tafofácies da Formação Morro do
 445 Chaves de Chinelatto *et al.* (2018). Estas tafofácies T3, T4, e T5-T6, cujos depósitos MS_{sh}, GS e
 446 MS_{of} foram, respectivamente, considerados seus análogos (Fick *et al.*, 2018), apresentam a
 447 mesma tendência, em média, de terem orientações topo-base mais verticais no sentido proximal
 448 para distal (Tabela 2).

449

450 Tabela 2 – Valores percentuais da orientação topo-base e posição da concavidade nas tafofácies
 451 de Chinelatto *et al.* (2018).

452 Table 2 - Percentage values of the top-base orientation and the concavity position in the
 453 taphofacies of Chinelatto *et al.* (2018).

| Tafofácies de Chinelatto et al. (2018) | % de conchas concordantes* | % de conchas oblíquas e verticais * | % Concav. p/ baixo* | % Concav. p/ cima* | Concentrações análogas de Fick et al. (2018) |
|--|----------------------------|-------------------------------------|---------------------|--------------------|--|
| T1 | 49,6 | 50,4 | 45,3 | 40,2 | - |
| T2 | 52,2 | 47,8 | 55,7 | 31,8 | - |
| T3 | 47,6 | 52,4 | 55,6 | 30,4 | MS _{sh} |
| T4 | 32,0 | 68,0 | 37,3 | 39,9 | GS |
| T5 | 35,3 | 64,7 | 41,0 | 40,7 | MS _{of} |
| T6 | 31,7 | 68,4 | 39,7 | 40,8 | MS _{of} |

454 * Valores médios das amostras de cada tafofácie.

455

456 A orientação em planta das conchas mostrou uma tendência unimodal, embora em
 457 sentidos opostos, para os bivalves nas zonas de domínio do retrabalhamento (depósito MS_{sh} –
 458 Fig. 7B) e *winnowing* (depósito GS – Fig. 7C), dinâmicas que promovem maior movimentação
 459 dos bioclastos. Por outro lado, na zona de domínio do *bypass* dinâmico (depósito MS_{of} – Fig.
 460 7D), dinâmica que promove uma movimentação praticamente nula das conchas, a tendência de

461 orientação foi polimodal, ou seja, teve um caráter aleatório. Esses comportamentos indicam que
462 os bioclastos que sofrem mais intensa atuação de um agente hidrodinâmico tendem a ter uma
463 orientação padrão, cujo seu sentido indica a direção deste agente (Kidwell *et al.*, 1986). Segundo
464 Nagle (1967), os eixos de maior comprimento dos bioclastos tendem a se orientar
465 perpendiculares a direção das cristas das ondas incidentes na zona de espraiamento, e paralelos
466 as cristas na zona de quebra e empolamento. Corroborando com Nagle (1967), o comportamento
467 observado na zona de quebra e empolamento do modelo físico, tanto para os bivalves (eixo de
468 maior comprimento a 90° da direção do umbo) quanto para os gastrópodes de roseta bimodal
469 (Fig. 7B), foi paralelo as cristas de onda (direção E-W). Em contrapartida, o comportamento
470 polimodal das orientações do eixo de maior comprimento dos gastrópodes na zona de domínio
471 do espraiamento (depósito SA – Fig. 7A) não concordou com o definido por Nagle (1967).

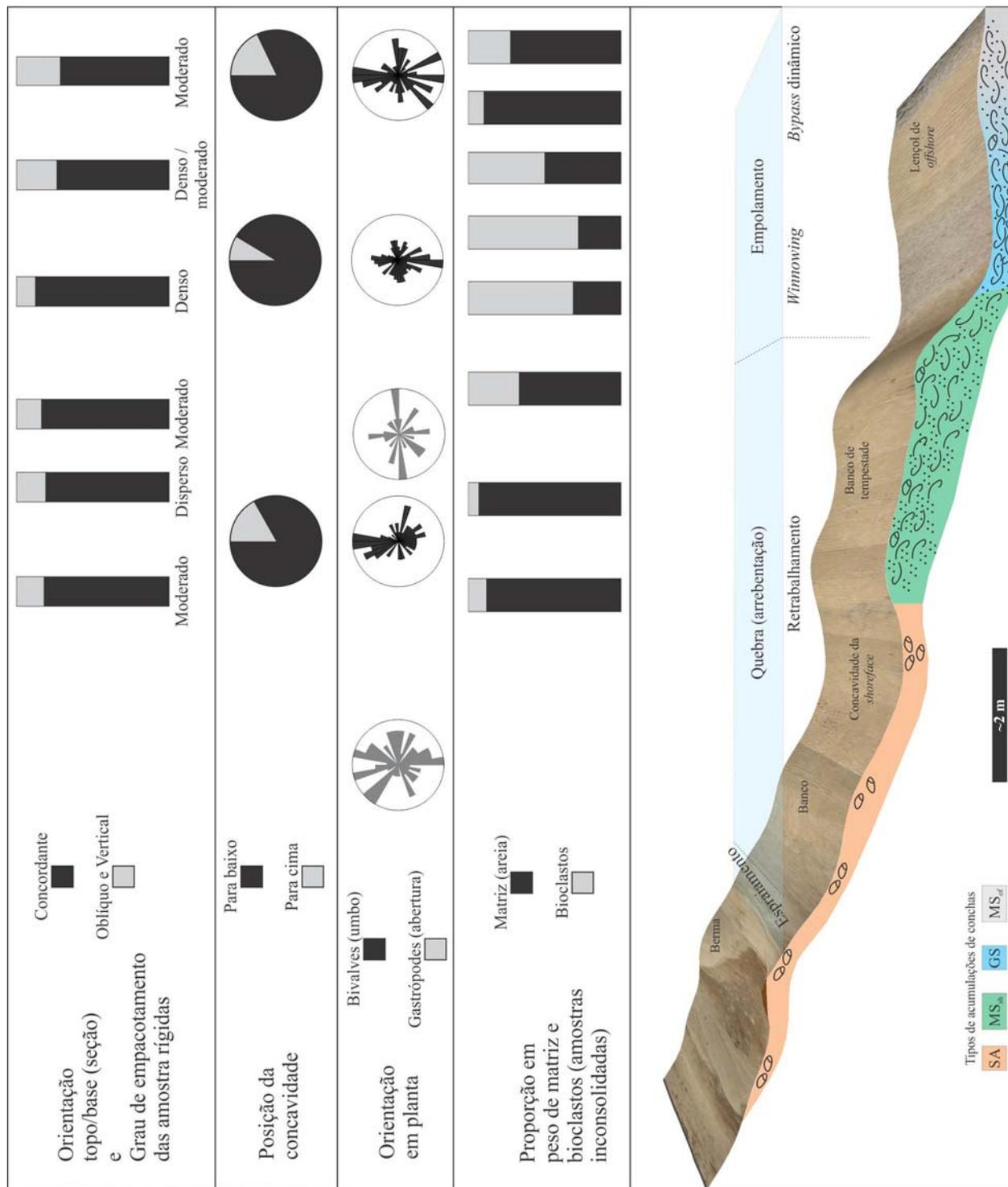
472 Quanto ao posicionamento da concavidade dos bivalves, os resultados de uma maneira
473 geral evidenciam uma forte tendência de concavidade para baixo em todos os tipos de
474 concentração analisados (Fig. 7B, 7C e 7D), o que é esperado para conchas submetidas a algum
475 fluxo trativo de corrente ou onda (Nagle, 1967; Brenchley & Newall, 1970; Allen, 1984; Oliveira
476 & Wood, 1997; Simões & Kowalewski, 1998; Fürsich & Pandey, 1999; Silva, 2016; Porto-
477 Barros *et al.*, 2017), pois denota uma posição hidrodinamicamente mais estável. No entanto, este
478 comportamento não seria esperado no depósito MS_{of}, já que o mesmo foi gerado pelo bypass
479 dinâmico de baixa intensidade energética e teve um percentual similar ao depósito MS_{sh}, que por
480 sua vez foi gerado pelo retrabalhamento de mais alta energia. Ainda, o maior percentual de
481 concavidade para baixo da concentração GS em relação à MS_{sh} também contradiz as
482 expectativas, já que GS foi gerado pela dinâmica de *winnowing* de intensidade energética
483 intermediária (Fick *et al.*, 2018). Em relação as tafofácies de Chinelatto *et al.* (2018), que
484 mostram uma tendência de maior percentual de concavidade para baixo nas tafofácies mais
485 proximais - T1, T2 e T3 - do que nas distais - T4, T5 e T6 - (Tabela 2), no modelo físico não
486 apresentaram uma correlação satisfatória quanto ao comportamento deste parâmetro, já que o
487 maior percentual foi apresentado pelo depósito intermediário GS.

488 O grau de empacotamento e a proporção em peso entre matriz e bioclastos apresentaram
489 uma boa correlação entre si ao longo do perfil simulado (Fig. 10). Os depósitos MS_{sh} e MS_{of},
490 cujas amostras rígidas tiveram empacotamento moderado / disperso dos foram os que
491 apresentaram as maiores proporções de matriz, enquanto que o depósito GS com empacotamento
492 denso / moderado apresentou as maiores proporções de bioclastos. Estes resultados sugerem uma
493 relação direta do grau de empacotamento com a taxa de R-*sediment* (taxa de sedimentação não
494 bioclástica - *sensu* Kidwell, 1986) das suas zonas de ocorrência no modelo físico. MS_{sh} e MS_{of}

495 ocorreram em áreas de deposição de areia no perfil simulado, ou seja, com *R-sediment* positivo,
496 marcadas pela formação do banco de tempestade e do lençol de *offshore* (Fig. 10), o que gerou
497 concentrações com empacotamento moderado / disperso e maior proporção em peso de matriz
498 arenosa. Por outro lado, a concentração GS ocorreu em área de erosão do perfil dominada pelo
499 *winnowing*, ou seja, com *R-sediment* negativo, marcada pelo baixio entre o banco de tempestade
500 e o lençol de *offshore* gerando empacotamento denso e maior proporção de bioclastos (Fig. 10),
501 o que corrobora com os apontamentos de Kidwell & Holland (1991). Neste sentido, pode-se
502 projetar que na concavidade da *shoreface*, outro setor do perfil que teve erosão durante as
503 simulações, também é uma zona propícia a formar concentrações com denso empacotamento
504 (matriz-suportada). Desde que haja um maior transporte de conchas provenientes de seu habitat
505 mais distal (*offshore*), o que não ocorreu nos experimentos de Fick *et al.* (2018), depósitos com
506 mais alto conteúdo de bioclastos tendem a se formar neste setor.

507 Analisando o comportamento dos parâmetros tafonômicos de uma maneira continua ao
508 longo do perfil simulado (Fig. 10), principalmente a orientação topo-base, o empacotamento e a
509 proporção em peso de matriz e bioclastos, constata-se que certos tipos de concentrações de
510 conchas definidos por Fick *et al.* (2018) não possuem limites abruptos, e sim lateralmente
511 transicionais. Isto é bastante visível principalmente entre os depósitos GS e MS_{of}, na qual o
512 empacotamento da amostra rígida mais distal de GS (AR-5) varia de denso a moderado e o
513 conteúdo de matriz já se mostra igual ao de bioclastos (AI-6). Ou seja, neste local este tipo de
514 concentração vai apresentando características semelhantes a MS_{of}: de empacotamento moderado
515 e maior proporção de matriz em relação a bioclastos. Corroborando, a orientação topo-base da
516 amostra AR-5 de GS também apresentou percentuais de conchas oblíquas e verticais
517 semelhantes a amostra AR-6 de MS_{of}. Por outro lado, o comportamento dos referidos parâmetros
518 tafonômicos sugerem limites mais abruptos entre MS_{sh} / GS, especialmente pelos seu
519 empacotamento e proporção de matriz e bioclastos, na qual passam, respectivamente, de
520 moderado a denso e de 66% a 31% de matriz nas suas amostras limítrofes. Estes limites dos
521 depósitos indicam estar associados ao processo de transformação de onda que controlam suas
522 respectivas dinâmicas de acumulação. O limite abrupto entre MS_{sh} e GS sugere estar diretamente
523 relacionado com o ponto de colapso das ondas de tempestade (1º ponto de quebra), separando
524 restritamente os processos de quebra e empolamento, ou seja, dois processos distintos que
525 promovem dinâmicas diferentes, o retrabalhamento e o *winnowing*. Já o limite transicional de GS
526 e MS_{of} se explica pelo fato que ambas as dinâmicas de concentração, *winnowing* e *bypass*
527 dinâmico, foram controladas pelo empolamento e que um gradiente interno de energia,

528 relacionado a maior deformação da onda a medida que se aproxima do banco de tempestade,
 529 possa as ter diferenciado gradualmente.
 530



531
 532 Figura 10 – Compilação dos dados da análise tafonômica integrados ao modelo 3D do perfil
 533 costeiro simulado, no qual estão delimitadas as dinâmicas sedimentológicas de acumulação de
 534 bioclastos e os respectivos tipos de depósito gerados na modelagem física.

535 Figure 10 - Data compilation from the taphonomic analysis integrated to the 3D model of the
536 simulated coastal profile, where are delimited the sedimentological dynamics of bioclast
537 accumulation and the deposit types generated in the physical modeling.

538

539 **5 Conclusões**

540 Este estudo levou às seguintes conclusões:

- 541 • A análise tafonômica nos tipos de concentrações de conchas geradas no modelo físico de
542 Fick *et al.* (2018) aprimorou a caracterização dos mesmos, revelando aspectos que
543 reforçam as comparações com depósitos de coquinas do registro sedimentar. O
544 comportamento das orientações topo-base e em planta ao longo do perfil foram os
545 parâmetros que se mostraram mais semelhantes aos modelos padrões da literatura. Há
546 tendência de um maior percentual de conchas concordantes em zonas proximais, onde
547 domina a dinâmica de retrabalhamento (maior ação de ondas), e maior percentual de
548 oblíquas e verticais em zonas distais (em posição de vida) onde domina a dinâmica de
549 *bypass* dinâmico (menor ação de ondas). Já as orientações em planta dos moluscos
550 mostram comportamentos padrões bem definidos, sendo unimodais e bimodais (indicam
551 a ação efetiva de um agente hidrodinâmico) e com eixo maior paralelo às cristas das
552 ondas incidentes, nos setores de domínio do retrabalhamento (restrito a zona de quebra
553 das ondas) e *winnowing*, enquanto que orientações polimodais, sem padrão definido que
554 indiquem ação de fluxos, marcaram a zona de domínio do *bypass* dinâmico. No entanto,
555 o caráter polimodal dos gastrópodes na zona de espriamento não concorda com o padrão
556 bimodal e de eixo maior perpendicular a direção das cristas de onda esperados para este
557 setor costeiro.
- 558 • Os resultados da análise tafonômica permitiram identificar mais detalhadamente as
559 características dos limites entre as concentrações de conchas, como mostraram os
560 parâmetros orientação topo-base, empacotamento e proporção em peso de matriz e
561 bioclastos. Os valores destes parâmetros evidenciaram um limite mais abrupto (alto
562 contraste de valores) entre os depósitos MS_{sh} e GS, que foram governados por dois
563 diferentes processos ondulatórios: quebra e empolamento; e transicional (valores variam
564 gradualmente) para os depósitos GS e MS_{of}, que foram controlados pelo mesmo processo
565 de empolamento.
- 566 • O imageamento aéreo e o levantamento topográfico do perfil costeiro simulado,
567 apresentados neste trabalho, permitiram uma melhor visualização da morfologia do
568 mesmo e associar as certas feições características aos tipos de concentrações de conchas

569 vistos nas imagens de superfície. O banco de tempestade, o baixio adjacente e o lençol de
570 *offshore* correspondem, respectivamente, aos depósitos MS_{sh}, GS e MS_{of}.

571

572 **Agradecimentos**

573 Agradecemos ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e o Núcleo de Estudos de Correntes em
574 Densidade (NECOD) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela infraestrutura e recursos
575 humanos fornecidos para a realização dos experimentos. Agradecemos, também, ao aluno de Engenharia
576 de Minas, Leonardo Pereira Machado, bolsista de iniciação científica que auxiliou diretamente na análise
577 das amostras rígidas. Além disso, o primeiro autor gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de
578 Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) do governo brasileiro pelo apoio financeiro.
579

580 **Referências bibliográficas**

581 Abrahão, D. & Warne, J.E. 1990. Lacustrine and associated deposits in a rifted continental margin
582 – Lower Cretaceous Lagoa Feia Formation, Campos Basin, offshore Brazil. *In*: Katz, B.J. (Ed.).
583 *Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs*. American Association of
584 Petroleum Geologists, Memoir 50, p. 287-305.

585 Allen, J.R.L. 1984. Experiments on the settling, overtuning and entrainment of bivalve shells and
586 related models. *Sedimentology*, 31: 227-250.

587 Bertani, R.T. & Carozzi, A.V. 1985. Lagoa Feia Formation (Lower Cretaceous), Campos Basin,
588 offshore Brazil: Rift Valley Stage lacustrine carbonate reservoirs – (I). *Journal of Petroleum*
589 *Geology*, 8(1): 37-58.

590 Brenchley, P.J. & Newall, G. 1970. Flume experiments on the orientation and transport of
591 models and shell valves. *Paleogeography, Paleoclimatology and Paleoecology*, 7: 185-220.

592 Carvalho, M.D., Praça, U.M., Silva-Telles, Jahnert, R.J., A.C. & Dias, J.L. 2000. Bioclastic
593 carbonate lacustrine facies models in the Campos Basin (Lower Cretaceous), Brazil. *American*
594 *Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology*, 46: 245-256.

595 Chinelatto, G.F., Vidal, A.C., Kuroda, M.C. & Basilici, G. 2018. A taphofacies model for
596 coquina sedimentation in lakes (Lower Cretaceous, Morro do Chaves Formation, NE Brazil).
597 *Cretaceous Research*, 85: 1–19.

598 Dias, J.L., Oliveira, J.Q. & Vieira, J.C. 1988. Sedimentological and stratigraphic analysis of the
599 Lagoa Feia Formation, Rift Phase of Campos Basin, offshore Brazil. *Revista Brasileira de*
600 *Geociências*, 18(3): 252-260.

- 601 Fick, C., Borges, A.L.O. & Manica, R. 2017. Sedimentologia e estratigrafia de um depósito
602 deltaico gerado por modelagem física empregando amostragem tipo testemunho. *Pesquisas em*
603 *Geociências*, 44(1): 79-91.
- 604 Fick, C., Toldo, E.E & Puhl, E. 2018. Shell concentration dynamics driven by wave motion in
605 flume experiments: Insights for coquina facies from lake-margin settings. *Sedimentary Geology*,
606 374: 98-114.
- 607 Fornari, M., Giannini, P.C.F. & Nascimento, D.R. 2012. Facies associations and controls on the
608 evolution from a coastal bay to a lagoon system, Santa Catarina Coast, Brazil. *Marine Geology*,
609 323-325: 56-68.
- 610 Fürsich, F.T. & Pandey, D.K. 1999. Genesis and environmental significance of Upper
611 Cretaceous shell concentrations from the Cauvery Basin, southern India. *Palaeogeography*,
612 *Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 145: 119-139.
- 613 Fürsich, F.T. & Oschmann, W. 1993. Storm shell beds as tools in basin analysis: the Jurassic of
614 Kachchh, western India. *Journal of Geologic Society of London*, 150: 169-185.
- 615 Futterer, E. 1982. Experiments on the distinction of wave and current influenced shell
616 accumulations. In: Einsele, G. & Seilacher, A. (Ed.). *Cyclic and Event Stratification*. Berlin,
617 Springer-Verlag, p. 175-179.
- 618 Kidwell, S.M. & Holland, S.M. 1991. Field description of coarse bioclastic fabrics. *PALAIOS*,
619 6(4): 426-434.
- 620 Kidwell, S.M. 1986. Models for fossil concentrations: paleobiologic implications. *Paleobiology*,
621 12(1): 6-24.
- 622 Kidwell, S.M. 1991. The stratigraphy of shell concentrations. In: Allison, P.A. & Briggs, D.E.G.
623 (Ed.). *Taphonomy, Releasing the Data Locked in the Fossil Record*. New York, Plenum Press, p.
624 211-290.
- 625 Kidwell, S.M., Fürsich, F.T. & Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and
626 classification of fossil concentration. *PALAIOS*, 1: 228-238.
- 627 Muniz, M.C. 2013. Tectono-Stratigraphic evolution of the Barremian-Aptian Continental Rift
628 Carbonates in southern Campos Basin, Brazil. Londres, 301p. Tese de Doutorado, Royal
629 Holloway University of London.

- 630 Nagle, J.S. 1967. Wave and current orientation of shells. *Journal of Sedimentary Petrology*,
631 37(4): 1124-1138.
- 632 Oliveira, A.M. & Wood, W.L. 1997. Hydrodynamics of bivalve shell entrainment. *Journal of*
633 *Sedimentary Research*, 67(A): 514-526.
- 634 Porto-Barros, J.P., Dal’Bó, P.F., Fernandes, A.C.S. & Borghi, L. 2017. Caracterização
635 sedimentary e tafômica de depósitos bioclásticos na Reserva Tauá e Marina Búzios (Holoceno
636 do Estado do Rio de Janeiro). *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 40(2): 220-233.
- 637 Silva, F.R.S. 2016. Mobilização e transporte de conchas bivalves sob ação de correntes. Porto
638 Alegre, 79p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências,
639 Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 640 Simões, M.G. & Kowalewski, M. 1998. Shell beds as paleoecological puzzles: a case study from
641 the Upper Permian of the Paraná Basin, Brazil. *Facies*, 38: 175-196.
- 642 Tavares, A.C., Borghi, L., Corbett, P., Nobre-Lopes, J. & Câmara, R. 2015. Facies and
643 depositional environments for the coquinas of the Morro do Chaves Formation, Sergipe-Alagoas
644 Basin, defined by taphonomic and compositional criteria. *Brazilian Journal of Geology*, 45(3):
645 415-429.
- 646 Terra, G.J.S., Spadini, A.R., França, A.B., Sombra, C.L., Zambonato, E.E, Juschaks, L.C.S.,
647 Arienti, L.M., Erthal, M.M., Blauth, M., Franco, M.P., Matsuda, N.S., Silva, N.G.C., Moreti-
648 Junior, P.A., D’Avila, R.S.F., Souza, R.S., Tonietto, S.N., Anjos, S.M.C., Campinho, V.S. &
649 Winter, W.R. 2010. Classificação das rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares
650 brasileiras. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 18(1): 9-29.
- 651 Thompson, D.L., Stilwell, J.D. & Hall, M. 2015. Lacustrine carbonate reservoirs from Early
652 Cretaceous rift lakes of Western Gondwana: Pre-Salt coquinas of Brazil and West Africa.
653 *Gondwana Research*, 28: 26-51.

ARTIGO III***Threshold of motion of bivalve and gastropod shells under oscillatory flow in flume experiments***

Periódico: *Sedimentology*.

Língua: Inglês.

Qualis Capes (Geociências): A1.

Situação: aceito para publicação com correções (*major review*)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo consiste em uma síntese integradora dos assuntos abordados pelos três artigos apresentados anteriormente. O estudo da sedimentologia em concentrações de partículas bioclásticas (coquinas) sob ação de fluxo oscilatório (ondas) configurou a espinha dorsal desta tese, partindo da escala do bioclasto (partícula), desde o início de movimento (artigo III), até a escala de fácies – dinâmica geradora (artigo I) e seu produto deposicional (artigo II). Além disto, o uso da modelagem física de ambientes costeiros, no âmbito de suas vantagens e limitações, se estabelece como importante tema de abordagem neste estudo. Para uma melhor compressão dos assuntos, em função dos objetivos lançados no Capítulo 1, as considerações finais serão apresentadas na ordem dos manuscritos relacionados na tese.

Iniciando pelo processo gerador, ou seja, as dinâmicas sedimentológicas de concentração de bioclastos (*sensu* Kidwell, 1986), exploradas no artigo I “*Shell concentration dynamics driven by wave motion in flume experiments: Insights for coquina facies from lake-margin settings*”. Em seus resultados fica evidenciado que as dinâmicas de concentração foram controladas diretamente pelas ondulações e pela condição de energia do ambiente ao longo do perfil de águas rasas. A dinâmica de retrabalhamento, que induziu saltação, rolamento e tração de bioclastos, além de suspensão e transporte de areia, teve ocorrência mais significativa dentro da zona de quebra da onda, setor do perfil de maior agitação na interface água/ sedimento e que apresentou maiores velocidades de fluxo. O efeito da condição de energia da onda se refletiu na extensão do perfil em que o retrabalhamento atuou, sendo mais extenso em condição de onda de tempestade, pois com onda de maior altura e período, a quebra se dava em um ponto mais distal do que na condição de tempo-bom. As dinâmicas de *winning* e *bypass* dinâmico, caracterizadas respectivamente pela remoção de areia por suspensão mais a pouca tração em bioclastos e a migração de formas de fundo sobre bioclastos estáticos, tiveram ocorrência predominante na zona de empolamento das ondas, setor que apresentou menor agitação na interface água/sedimento e mais baixas velocidades de fluxo. Verificou-se que cada dinâmica observada gerou um tipo de concentração de concha distinta das demais, restrita à sua área de atuação (assunto do artigo II). Na comparação das dinâmicas geradas na simulação física, com fácies e modelos

deposicionais para coquinas das bacias marginais brasileiras, os resultados experimentais apontam avanços na interpretação das fácies e posicionamento no perfil de águas rasas. Coquinas compostas majoritariamente por conchas fragmentadas e coquinas compostas por conchas não-fragmentadas, devem ser delimitadas, num perfil costeiro, pela interface da zona de quebra com a zona de empolamento das ondas (1ª linha de quebra) em condições de tempestade. Este cenário pretere os modelos vigentes no qual essas fácies são delimitadas pelo NBTB. Visto a dominância da dinâmica de retrabalhamento dos bioclastos na zona de quebra das ondas, espera-se a ocorrência de maior fragmentação de conchas neste local, enquanto que na zona de empolamento, onde os bioclastos foram pouco mobilizados, as conchas tendem a ficar inteiras. Cabe ainda a ressalva quanto a atuação da deriva de água (corrente) induzida pela incidência de ondas. Essa deriva, de maior intensidade em condições de onda de tempestade, foi predominantemente em direção *offshore*, tendo grande importância no transporte do sedimento suspenso ao longo do perfil, principalmente na parte inferior da coluna d'água.

Seguindo para a análise do produto deposicional: as fácies ou as tafofácies; o artigo II “Análise tafonômica de concentrações bioclásticas geradas em modelagem física de um sistema de águas rasas dominado por ondas”, apresenta um estudo dos parâmetros tafonômicos das concentrações bioclásticas geradas na simulação física. A partir de uma análise tafonômica no depósito do perfil praiado simulado, foram constatados comportamentos característicos dos parâmetros tafonômicos associados as dinâmicas atuantes. As zonas onde o retrabalhamento e o *winning* tiveram dominância, marcadas respectivamente pelas acumulações MS_{sh} e GS, foram caracterizadas pelo mais alto percentual de bioclastos concordantes (topo/base) e orientação em planta unimodal (bivalves) ou bimodal (gastrópodes). A zona onde o *bypass* dinâmico dominou, representada pela concentração MS_{of}, apresentou o maior percentual de conchas oblíquas ou verticais e orientação em planta polimodal. Desta maneira, se sugere que as dinâmicas que promoveram certa interação com bioclastos no fundo, retrabalhamento (maior intensidade) e *winning* (menor intensidade), tendem a gerar padrões de comportamento que os diferencie de seu posicionamento original, enquanto organismos vivos, no fundo. Por outro lado, a dinâmica que não interagiu efetivamente com os bioclastos, o *bypass* dinâmico, tende a não produzir padrões que os diferencie de sua posição em vida, deixando em orientação preferencialmente oblíqua ou vertical e, em planta,

aleatório. Quanto ao empacotamento e a relação matriz / bioclastos, constatou-se que para um mesmo aporte constante e homogêneo de bioclastos, a dinâmica de winnowing foi mais eficiente em produzir um empacotamento denso e com mais alto percentual de bioclastos em relação a matriz não bioclástica. Ainda, destaca-se a concentração SA, posicionada no setor mais proximal do perfil e composta exclusivamente por gastrópodes. A seleção deste tipo de molusco pode ser explicada por sua forma arredondada, que facilitou sua remobilização e transporte da zona de *input* de bioclastos (*shoreface* inferior e *offshore*) até a *backshore*. Explorando esta constatação, o parágrafo a seguir insere o estudo da influência da forma e morfologia das conchas em seu movimento.

Regredindo na escala de observação, o artigo III “*Threshold of motion of bivalve and gastropod shells under oscillatory flow in flume experiments*” investigou o início de movimento das partículas: conchas inteiras de bivalves e gastrópodes; sob fluxo oscilatório (ondas não colapsadas). Este estudo traz dados inéditos, uma vez que a iniciação do transporte em grãos bioclásticos vinha sendo explorada apenas para fragmentos de conchas sob fluxo unidirecional. O manuscrito reportou que conchas de bivalves com diâmetros peneirados (D_{sv}) menores do que 7,93 mm, iniciam seu movimento sob ação de maiores velocidades e tensões de cisalhamento do que os gastrópodes. Somando isto ao fato das conchas de gastrópodes terem fator de forma (F^*) mais próximos a 1, indicando maior arredondamento (facilitando o rolamento), e os bivalves terem F^* mais próximos a zero, indicando mais achatamento, a influência da forma do bioclasto no seu início de movimento e posterior transporte fica claramente evidenciada. Ainda, a maior similaridade das curvas (no Diagrama de Shields) das três espécies de bivalves, de morfologias planas semelhantes, e a disparidade das curvas dos três gastrópodes, de diferentes morfologias (cônica, elíptica e cúbica), sugere que a morfologia da concha também tem seu papel no início de movimento do grão. A boa correlação entre os dados deste trabalho com dados da literatura para grãos bioclásticos sob ação fluxos unidirecionais, sugere que a onda desempenha eficiente ação para iniciar o movimento deste tipo de partículas, tal qual as correntes. No entanto, o posterior efetivo transporte dos bioclastos, a partir do ponto que começam seu movimento, pode necessitar da ação conjunta de onda e corrente, e estar relacionado a uma complexa relação de condições, como: intensidade e direção dos fluxos, textura do sedimento de fundo não-bioclástico (areia ou lama), morfologia e declividade do perfil costeiro, entre outros.

O emprego da modelagem física na etapa de simulação de um perfil praiial e investigação do comportamento das dinâmicas de concentração foi satisfatória. A evolução morfológica do perfil simulado ao longo dos experimentos gerou feições características de perfis reais, como: berma, banco, *shoreface* côncava, banco de tempestade e lençol (ou barra) de offshore. Além disto, reproduziu e permitiu fácil visualização das dinâmicas de concentração de conchas ao longo do fundo do canal de ondas. Estas duas constatações conferem um bom grau de eficácia (“*unreasonable effectiveness*” *sensu* Paola *et al.*, 2009) ao modelo físico de laboratório. Por outro lado, as limitações de escala (tempo e energia) associadas a modelagem física utilizada podem ser colocadas no âmbito da não ocorrência do processo de fragmentação das conchas e do insipiente transporte longitudinal de bioclastos em direção a costa, exceto os gastrópodes.

Recomendações para futuros estudos

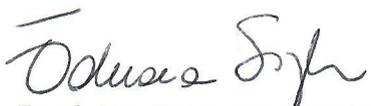
No âmbito das dinâmicas de concentração de bioclastos e seus produtos deposicionais, devem ser explorados outros cenários de simulação física que abordem a influência das taxas de aporte de conchas no sistema e o comportamento morfológico de um perfil praiial formado exclusivamente por bioclastos. Para tal, experimentos de modelagem física em canal de ondas mais prolongados, com taxas variáveis de aporte bioclástico ou utilizando apenas grãos esqueletais devem ser considerados. Além disto, estudos em ambientes costeiros recentes que possuam consideráveis depósitos conchíferos serão de grande valia para o entendimento destes processos, bem como para confirmar as observações obtidas em laboratório. Quanto a estudos sob o ponto de vista hidráulico, recomenda-se a realização de testes de velocidade de queda (W_s) para as conchas de moluscos (bivalves e gastrópodes), de preferência utilizando as mesmas frações granulométricas (D_{sv}) testadas nos experimentos de início de movimento. A obtenção de W_s permitirá calcular o diâmetro equivalente (D_q) desses moluscos, bem como o número de mobilidade (*movability number*). O número de mobilidade expressa a relação da velocidade crítica de cisalhamento (u^* , já obtida – artigo III) com a velocidade de queda, gerando um outro parâmetro adimensional de mensuração do movimento de partículas, o qual vem sendo muito explorado na literatura do assunto.

Referências

- Kidwell, S.M. 1986. Models for fossil concentrations: paleobiologic implications. *Paleobiology*, 12(1): 6 – 24.
- Paola, C., Straub, K.M., Mohrig, D. & Reinhardt, I. 2009. The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews*, 97(1): 1 – 43.

ATA Nº 002/2019

As quatorze horas do dia vinte e nove de janeiro de dois mil e dezenove no Anfiteatro do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – CECO, no Campus do Vale, reuniu-se a Comissão Examinadora constituída pelos doutores: Eduardo Siegle (Instituto Oceanográfico, USP), Fernando Erthal (Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, IG - UFRGS) e Claiton Marlon dos Santos Scherer (PPGGEO/IG/UFRGS) para a defesa da tese intitulada: **“SEDIMENTOLOGIA DAS CONCENTRAÇÕES DE CONCHAS DE MOLUSCOS (COQUINAS) EM AMBIENTE DE ÁGUAS RASAS DOMINADO POR ONDAS: UM ESTUDO EXPERIMENTAL DO BIOCLASTO À FÁCIE”**, a que se submete **CRISTIANO FICK** depois de haver cumprido as exigências regulamentares do Programa. O Coordenador do Programa Prof. Dr. Rommulo Vieira Conceição fez a abertura da sessão e passou a presidência dos trabalhos ao Orientador Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr., conforme o previsto no artigo 69 do Regimento do Programa. O candidato fez a apresentação do seu trabalho e a seguir foi arguido pelos membros da Comissão Examinadora. Às dezessete horas e cinquenta minutos a sessão foi suspensa por cinco minutos para julgamento e atribuição dos conceitos, que foram os seguintes: Eduardo Siegle “A” (EXCELENTE), Fernando Erthal “A” (EXCELENTE), e Claiton Marlon dos Santos Scherer “A” (EXCELENTE). Face aos conceitos foi conferido ao candidato o grau de **DOCTOR EM CIÊNCIAS** pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As dezoito horas a sessão foi encerrada, do que para constar, eu, Roberto Martins Pereira, lavrei a presente Ata que é assinada pela Comissão Examinadora.


Prof. Dr. Eduardo Siegle


Prof. Dr. Fernando Erthal


Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer


Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.
(Presidente)

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

"SEDIMENTOLOGIA DAS CONCENTRAÇÕES DE CONCHAS DE MOLUSCOS (COQUINAS) EM AMBIENTE DE ÁGUAS RASAS DOMINADO POR ONDAS: UM ESTUDO EXPERIMENTAL DO BIOCLASTO À FÁCIE"

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autor: Cristiano Fick

Orientador: Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

Examinador: Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer

Data: 29/01/2019

Conceito: A

PARECER:

A tese de doutorado encontra-se bem estruturada com objetivos claros e bem definidos, focados nos aspectos sedimentológicos, tafonômicos e hidrodinâmicos de depósitos de coquinas. A tese apresenta uma hipótese bem definida, onde os três artigos se entrelaçam gerando um conhecimento sólido e integrado sobre diferentes aspectos referentes a gênese das coquinas. Talvez o ponto problemático seja no que se refere a redução escalar do modelo, onde os parâmetros de onda ~~foram~~ foram alterados, mas a granulometria se manteve inalterada, gerando resultados que podem não responder a realidade. Apesar dos excelentes resultados alcançados, faltou discutir melhor a fragilidade do modelo para gerar um modelo universal para a gênese das coquinas.

Blank lined area for text or drawing.

Assinatura: *Cláudio*

Data: 29/05/2009

Ciente do Orientador: *Cláudio*

Ciente do Aluno: *Leistiane Fick*

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

"SEDIMENTOLOGIA DAS CONCENTRAÇÕES DE CONCHAS DE MOLUSCOS (COQUINAS) EM AMBIENTE DE ÁGUAS RASAS DOMINADO POR ONDAS: UM ESTUDO EXPERIMENTAL DO BIOCLASTO À FÁCIE"

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autor: **Cristiano Fick**

Orientador: Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

Examinador: Prof. Dr. Fernando Erthal

Data: 29/01/2019

Conceito: A

PARECER:

A tese do candidato propõe um problema científico importante e coerente com o período num doutorado. As hipóteses foram testadas com rigor científico e publicadas (quase totalmente) em revistas de amplo alcance, e certamente merecerão muitas citações por bastante tempo. Ou seja, a contribuição científica da presente tese é robusta, mérito do aluno. A tese também é inovadora no sentido de explorar um tema pouco abordado na literatura especializada, executando a modelagem em escala reduzida para compreender a formação de depósitos bioclasticos que constituem rocha-reservatório de hidrocarbonetos.

Alguns conceitos poderiam ser mais bem explorados, como "retabalamento", "coquina", relação entre aporte sedimentar e bioclastico.

Os artigos são de excelente qualidade, e serão amplamente referenciados.

O achado central da tese, o zoneamento dos depósitos em função do gradiente de energia de ondas (artigo II) poderia ter sido explorado em maior detalhe, mas apresenta potencial para melhora após revisão da revista.

Excelente argumentação do candidato, demonstrando plena capacidade científica.

ANEXO I

Título: SEDIMENTOLOGIA DAS CONCENTRAÇÕES DE CONCHAS DE MOLUSCOS (COQUINAS) EM AMBIENTE DE ÁGUAS RASAS DOMINADO POR ONDAS: UM ESTUDO EXPERIMENTAL DO BIOCLASTO À FÁCIE

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autor: Cristiano Fick

Orientador: Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

Examinador: Prof. Dr. Eduardo Siegle

Data: 29/01/2019

Conceito: Excelente (A)

A tese é apresentada na forma de três artigos, conectados de forma a responder as questões propostas. O artigo 1 (Capítulo 4) aborda a dinâmica sedimentológica de concentração de bioclastos em função da ação das ondas ao longo de um perfil de águas rasas. O artigo 2 (Capítulo 5) apresenta uma análise do produto deposicional, com a análise tafonômica das concentrações bioclásticas geradas. O artigo 3 (Capítulo 6) investiga as condições de início de movimento das partículas, ou seja, das conchas inteiras de bivalves e gastrópodes. Os três artigos abordam questões interessantes e inéditas sobre o tema. Dos três artigos, um já foi publicado em revista internacional (Qualis A2) e os outros dois se encontram em fase de revisão. Os artigos estão bem encadeados e compõem bem a tese.

Em adição aos artigos, a tese é composta ainda pelo capítulo de introdução (Capítulo 1), o capítulo que aborda o estado-da-arte sobre o assunto com a revisão da literatura relevante (Capítulo 2) e a descrição dos métodos empregados é apresentada brevemente no Capítulo 3. O Capítulo 7 apresenta as principais conclusões da tese.

O problema apresentado é bastante interessante e relevante, abordado na tese através de experimentos com modelo físico. Os resultados são bem discutidos e apresentados, fornecendo informações relevantes para o avanço do conhecimento sobre o tema.

Uma observação que faço é em relação às escalas relativas à aplicação do modelo físico. Acredito que essa limitação poderia ser abordada em maior detalhamento. Questões relacionadas às escalas espaciais como temporais dos experimentos com o modelo físico são limitações da presente aplicação que poderiam ser melhor exploradas ao longo do texto.

De qualquer forma, a tese é excelente e apresenta dados e análises inéditas relacionadas aos processos de transporte e deposição de conchas em ambientes dominados por ondas.



Prof. Dr. Eduardo Siegle
IOUSP