

Ângulo de Repouso em Acumulações Bioclásticas de Conchas de Moluscos e sua Influência na Evolução Depositional

Lorenzo Spilki¹, Cristiano Fick¹, Eduardo Puhl¹

Resumo: O ângulo de repouso é um parâmetro físico fundamental no controle da instabilidade de depósitos sedimentares, governando o limiar de deflagração de fluxos gravitacionais como deslizamentos, escorregamentos, fluxos de detritos e correntes de turbidez. O presente trabalho investiga experimentalmente o ângulo de repouso de sedimentos bioclásticos compostos por conchas da espécie *Anomalocardia brasiliensis*, com foco na influência de variações texturais e do meio fluido sobre a estabilidade deposicional. Foram preparadas cinco amostras com diferentes proporções de areia (0,5-2 mm) e grânulos/seixos (3-8 mm), totalizando composições de 100%, 87%, 50%, 13% e 0% de fração grossa. Os ensaios foram realizados em aparato do tipo caixa com comporta, com no mínimo três repetições por configuração, em condições secas e submersas. Os ângulos foram determinados por processamento digital de imagens. O aparato foi previamente calibrado com microesferas de vidro, obtendo-se resultado compatível com a literatura (29°). Em condições secas, os ângulos variaram de 41,6° (100% areia) a 46° (100% grânulos/seixos), evidenciando correlação direta entre granulometria e estabilidade. Em condições submersas, observou-se redução generalizada dos ângulos, com a fração arenosa sofrendo queda de 15,7% (−6,5°) e a fração grossa apenas 6,3% (−2,9°), resultado atribuído ao empuxo e ao efeito lubrificante da água nos contatos intergranulares. Os resultados demonstram que o ângulo de repouso é uma variável dependente da interação entre granulometria, morfologia das partículas e condições ambientais, fornecendo parâmetros críticos para a calibração de modelos numéricos de transporte e deposição de sedimentos em reservatórios.

Abstract: The angle of repose is a fundamental physical parameter governing the instability threshold of sedimentary deposits and the triggering of gravity-driven flows such as slides, slumps, debris flows, and turbidity currents. This study experimentally investigates the angle of repose of bioclastic sediments composed of shells of the species *Anomalocardia brasiliensis*, focusing on the influence of textural variations and fluid environment on depositional stability. Five samples were prepared with varying proportions of sand (0.5-2 mm) and granules/pebbles (3-8 mm), covering compositions of 100%, 87%, 50%, 13%, and 0% coarse fraction. Tests were conducted using a sliding-gate box apparatus, with at least three replicates per configuration, under both dry and submerged conditions. Angles were determined through digital image processing. The apparatus was previously calibrated using glass microspheres, yielding results consistent with the literature (29°). Under dry conditions, angles ranged from 41.6° (100% sand) to 46° (100% granules/pebbles), confirming a direct correlation between grain size and stability. Under submerged conditions, a generalized reduction in angles was observed: the sandy fraction experienced a 15.7% decrease (−6.5°), while the coarse fraction decreased by only 6.3% (−2.9°), attributed to buoyancy effects and the lubricating action of water at intergranular contacts. The results demonstrate that the angle of repose is a variable dependent on the interaction between grain size, particle morphology, and environmental conditions, providing critical parameters for the calibration of numerical models of sediment transport and deposition in hydrocarbon reservoirs.

Palavras-Chave: ângulo de repouso; sedimentos bioclásticos; fluxos gravitacionais; estabilidade de taludes; hidrodinâmica intergranular

¹) Engenharia Ambiental, UFRGS. Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD/IPH/UFRGS). E-mail: lorenzo.spilki@gmail.com

Keywords: angle of repose; bioclastic sediments; gravity flows; slope stability; intergranular hydrodynamics

INTRODUÇÃO

Fluxos gravitacionais são fundamentais na ressedimentação e na formação de rochas-reservatório porque possuem alta capacidade de redistribuir grandes volumes de sedimento, gerando superfícies erosivas, lobos e espessas camadas sedimentares que controlam continuidade, conectividade e heterogeneidade dos corpos. O processo costuma iniciar com deslizamentos (*slides*) e escorregamentos (*slumps*), evoluindo para fluxos de detritos e correntes de turbidez (SHANMUGAM, 2016). Um dos parâmetros físicos que governam o início desses eventos e sua deposição é o ângulo de repouso: no modo estático, ele define o limiar de instabilidade; no dinâmico, fixa a inclinação típica das superfícies de deposição.

Ao serem depositados livremente, materiais granulares tendem a se organizar em uma estrutura cônica. O ângulo de repouso, também denominado ângulo crítico, define a inclinação máxima que as faces desse cone podem sustentar sem sofrer deslizamentos, representando o limite físico de estabilidade do material (POSAMENTIER & MARTINSEN, 2010). Embora diversas variáveis possam influenciar essa medida, em condições normais cada tipo de sedimento apresenta um ângulo de equilíbrio característico determinado por suas propriedades texturais.

A pesquisa propõe-se a analisar a estabilidade de sedimentos bioclásticos determinando seu ângulo de repouso diante de variabilidades texturais e ambientais, especificamente em meios secos e submersos. Ao isolar essas variáveis, o trabalho visa estudar a influência da hidrodinâmica sobre a mecânica das partículas, permitindo uma compreensão aprofundada de como esses fatores controlam a arquitetura e a evolução das sequências deposicionais.

MÉTODOS

Material ensaiado

As conchas utilizadas são bivalves da espécie *Anomalocardia brasiliana*, da região da planície costeira de SC (FORNARI, 2012). O material bioclástico foi classificado em duas frações granulométricas: areia (0,5-2 mm) e grânulos/seixos (3-8 mm). Foram preparadas cinco amostras com diferentes proporções de mistura, abrangendo desde as composições puras (100% de cada fração) até combinações intermediárias de 87%, 50% e 13%. Essa variação permitiu analisar o comportamento do material em todo o espectro textural proposto.



Figura 1 – Variação textural do material bioclástico: areia (0,5-2 mm) e grânulos/seixos (3-8 mm) (Foto do autor).

Tabela 1 – Variações texturais estudadas.

Composição	Grânulos e Seixos (3-8 mm)	Areia (0,5-2 mm)
1	100%	0
2	87%	13%
3	50%	50%
4	13%	87%
5	0	100%

Aparato experimental e ensaios

Para assegurar a representatividade estatística, cada configuração experimental foi submetida a um mínimo de três repetições. O protocolo foi aplicado em dois cenários distintos: condições secas e ambiente submerso. Para a determinação do ângulo de repouso, utilizou-se um aparato do tipo “caixa com comporta” — um tanque retangular com face transparente. O procedimento baseia-se no confinamento do material seguido pela abertura controlada de uma comporta deslizante, liberando a base do depósito e induzindo a instabilidade. Os ensaios submarinos foram realizados em um tanque de 1000 L, com janelas transparentes que possibilitaram observação e registro (vídeo e fotografia) dos processos ocorrendo sob a água.



Figura 2 – Foto da caixa com parede móvel (foto do autor) e desenho esquemático (elaborado pelo autor) com as dimensões do aparato e localização da câmera.

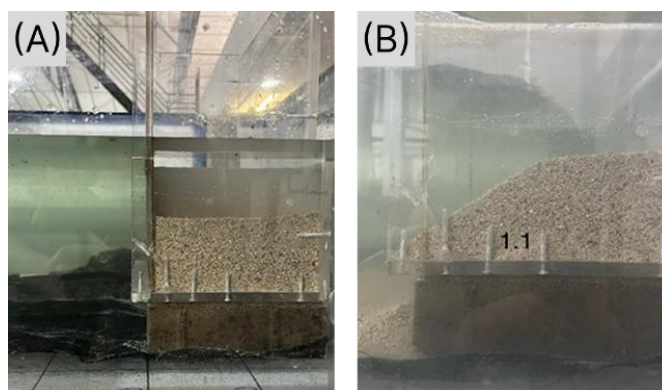


Figura 3 – Demonstração do método de ensaio em condições subaquáticas, A) condição inicial e B) condição final, executado com areia bioclástica (Foto do autor).

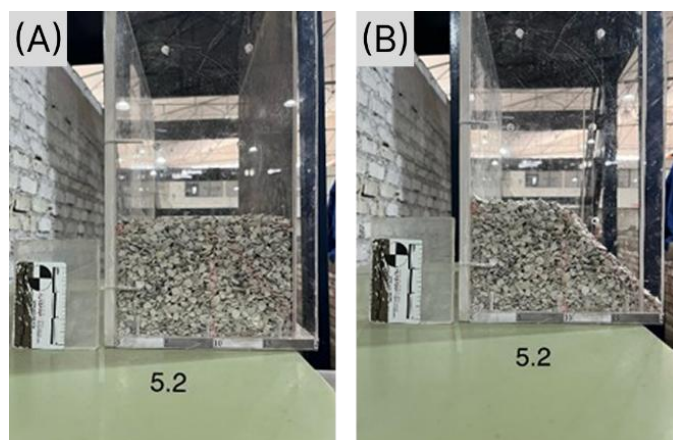


Figura 4 – Demonstração do método de ensaio em condições secas, A) condição inicial e B) condição final, feito com grânulos e seixos bioclásticos (Foto do autor).

Análise das imagens

A etapa analítica consistiu no processamento digital das imagens capturadas durante os ensaios. Utilizou-se o software vetorial Adobe Illustrator para a determinação geométrica dos ângulos de repouso, baseando-se no traçado de linhas tangentes à face do talude deposicional nas fotografias, permitindo análise precisa da inclinação formada pelos sedimentos em relação à base horizontal.

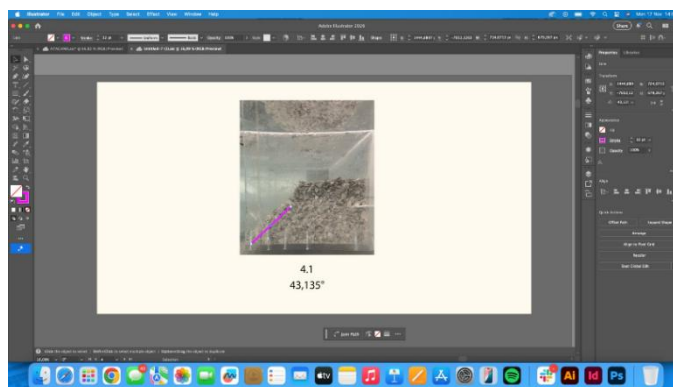


Figura 5 – Captura de tela do software Adobe Illustrator (Foto do autor).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do aparato

A calibração foi realizada com microesferas de vidro como material de referência padrão. O ângulo de repouso obtido para as partículas esféricas de tamanho regular foi de 29° , apresentando alta correspondência com os registros literários consolidados (GOMEZ-ARRIARAN et al., 2025). Essa concordância validou a precisão e a acurácia do sistema de medição, confirmando que o aparato está apto para a determinação das características angulares de meios granulares com alto grau de confiança metodológica.

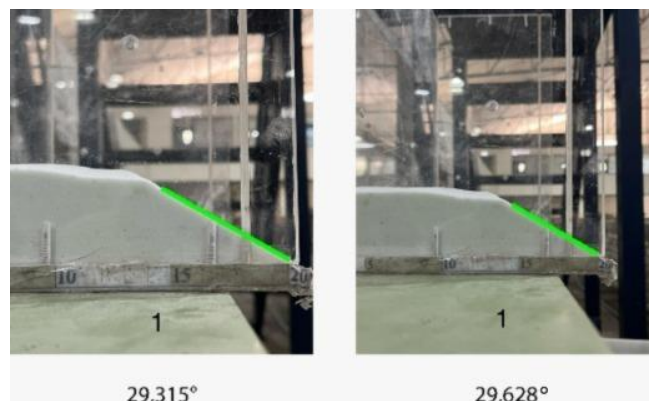


Figura 6 – Valores de ângulo de repouso obtidos com microesferas de vidro de tamanho uniforme e regular (Foto do autor).

Condições secas

Em condições secas, a análise textural evidenciou uma correlação direta entre estabilidade deposicional, granulometria e grau de imbricamento das partículas. As amostras constituídas exclusivamente por grânulos e seixos exibiram a máxima resistência ao cisalhamento, atingindo o ângulo de repouso de 46°. Observou-se uma redução sistemática na inclinação do talude proporcional ao incremento da matriz arenosa na mistura, resultando no valor mínimo para a amostra de 100% areia (41,6°). Esse comportamento demonstra que a fração grossa, em virtude de sua angularidade e textura superficial, confere maior atrito interno, permitindo a sustentação de geometrias mais íngremes na ausência de fluidos intersticiais.

Tabela 2 – Tabela com dados coletados em ensaios em condições secas, com valores médios de ângulo de repouso (Dados obtidos pelo autor).

Composição	Ângulo de Repouso em graus (°)			
	Série 1	Série 2	Série 3	Média
1) 100% Grânulos e seixos (3-8mm)	45,06	45,31	47,64	46,00
2) 87% Grânulos e seixos (3-8mm) 13% Areia (0,5-2mm)	44,71	45,47	45,34	45,17
3) 50% Grânulos e seixos (3-8mm) 50% Areia (0,5-2mm)	43,95	45,24	44,62	44,60
4) 13% Grânulos e seixos (3-8mm) 87% Areia (0,5-2mm)	42,94	40,16	42,59	41,89
5) 100% Areia (0,5-2mm)	42,34	41,23	41,23	41,60

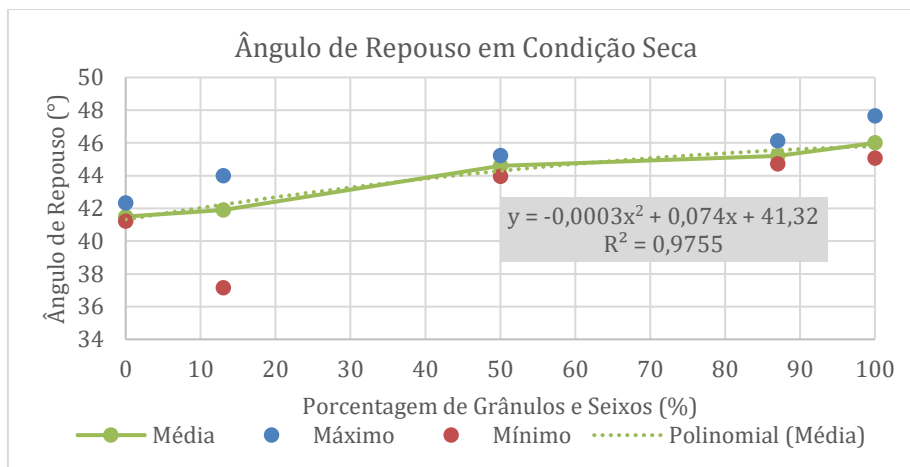


Figura 7 – Gráfico representando valores médios de ângulo de repouso em condições secas, com máximos e mínimos (Elaborado pelo autor).

Condições submersas

Sob condições submersas, observou-se uma redução generalizada nos ângulos de repouso em todas as variações texturais, fenômeno atribuído à ação conjunta do empuxo, que reduz a tensão normal efetiva entre os grãos, e do efeito lubrificante da água nos contatos intergranulares. O impacto da saturação não foi homogêneo: a fração arenosa demonstrou suscetibilidade muito superior à influência hidrodinâmica, sofrendo redução angular drástica de aproximadamente 15,7% ($-6,5^\circ$). Em contraste, a estrutura formada por grânulos e seixos mostrou-se mais robusta, com perda de estabilidade de apenas 6,3% ($-2,9^\circ$), evidenciando que, em ambientes aquosos, a estrutura de grãos grossa preserva melhor suas propriedades de atrito do que as matrizes finas.

Tabela 3 – Tabela com dados coletados em ensaios em condições submersas, com valores médios de ângulo de repouso (Dados obtidos pelo autor).

Composição	Ângulo de Repouso em graus (°)			
	Série 1	Série 2	Série 3	Média
1) 100% Grânulos e seixos de 3-8mm	44,13	43,71	41,47	43,10
2) 87% Grânulos e seixos (3-8mm) 13% Areia (0,5-2mm)	43,14	41,87	42,05	42,35
3) 50% Grânulos e seixos (3-8mm) 50% Areia (0,5-2mm)	40,04	39,20	40,18	39,81
4) 13% Grânulos e seixos (3-8mm) 87% Areia (0,5-2mm)	37,73	37,16	36,84	37,24
5) 100% Areia (0,5-2mm)	34,17	35,35	35,50	35,01

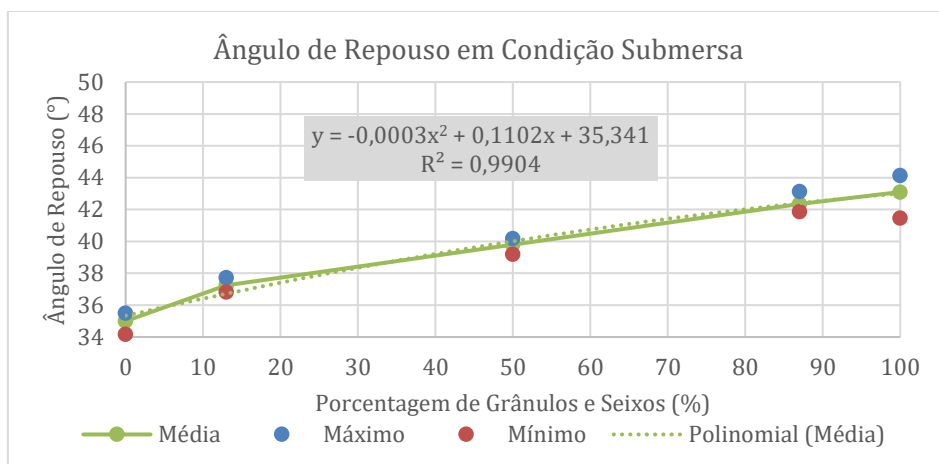


Figura 8 – Gráfico representando valores médios de ângulo de repouso em condições submersas, com máximos e mínimos (Elaborado pelo autor).

Comparação entre resultados

Os resultados demonstram que a estabilidade deposicional de partículas bioclásticas é controlada por uma interação dinâmica entre textura sedimentar e condições ambientais. Embora o aumento da granulometria favoreça naturalmente ângulos de repouso mais elevados devido ao melhor travamento mecânico, a presença de água atua como fator desestabilizador. O dado mais relevante reside na sensibilidade diferencial: enquanto a fração grossa preserva grande parte de sua estabilidade sob a água, a matriz arenosa sofre redução drástica de resistência. Essa disparidade sugere que, em ambientes submersos, a suscetibilidade à instabilidade é acentuada nas frações finas, maximizando o contraste de risco em comparação com os taludes suportados por material grosseiro.

Tabela 4 – Tabela com valores de ângulo de repouso obtidos para diferentes variações texturais de material bioclástico (Dados obtidos pelo autor).

Composição	Grânulos e Seixos (3-8 mm)	Areia (0,5-2 mm)	Ângulo de Repouso em graus (°)	
			Seca	Submersa
1	100%	0	46,00	43,10
2	87%	13%	45,17	42,35
3	50%	50%	44,60	39,81
4	13%	87%	41,89	37,24
5	0	100%	41,60	35,01

CONCLUSÃO

Conclui-se que o ângulo de repouso não é um parâmetro constante, mas uma variável dependente da interação complexa entre granulometria e morfologia das partículas. Os dados evidenciam que texturas de maior granulometria e irregulares, caracterizadas por alto atrito interno, tendem a sustentar taludes com inclinações superiores a 45°, dificultando o fluxo sedimentar. Em contrapartida, a presença de água atua invariavelmente na redução desses valores devido às forças hidrodinâmicas de empuxo. A quantificação precisa dessas variações, tanto em cenários secos quanto

submersos, fornece parâmetros críticos para a calibração de modelos numéricos, aprimorando a fidelidade das simulações de modelagem hidrodinâmica ou até mesmo modelagem de grandes escalas do tipo estratigráfica.

Os próximos desdobramentos serão direcionados à transposição dos dados de estabilidade estática para a predição de eventos dinâmicos de movimento de massa, com foco na integração dos dados de ângulo de repouso com experimentos de alto estrutural, visando o aprimoramento da modelagem estratigráfica e a acurácia na simulação do transporte e deposição de sedimentos em reservatórios.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro para realização desta pesquisa na UFRGS (T.C. Nº 0050.0125772.23.9) pelas empresas Pré-Sal Petróleo S.A. (PPSA) e ao Consórcio de Libra (Libra Group), que compreende Petrobras, Shell Brasil, Total Energies, CNODC e CNOOC Brasil. Agradecimentos especiais aos interlocutores do projeto: Leonardo Tedeschi (Petrobras/Libra/AT), Jian Zhao (CNODC/LIBRA/AT) e Cláudio Roisenberg (Petrobras).

REFERÊNCIAS

- GOMEZ-ARRIARAN, I. et al. (2025). Hygroscopic equilibrium time dependence of stability characteristic angles in granular media. *Powder Technology*, v. 464, 121268, p. 4.
- SHANMUGAM, G. 2016. Slides, slumps, debris flows, turbidity currents, and bottom currents, in: Cochran, J. K., Bokuniewicz, H. J., Yager, P. L., *Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition)* Volume 4, 2019, pp. 228-257
- POSAMENTIER, H. W.; MARTINSEN, O. J. 2010. The character and genesis of submarine mass transport deposits: insights from outcrop and 3D seismic data. *SEPM, Special Publication*, 95, 7-38.
- FORNARI, M., GIANNINI, P.C.F. and NASCIMENTO, D.R. (2012). Facies associations and controls on the evolution from a coastal bay to a lagoon system, Santa Catarina Coast, Brazil. *Mar. Geol.*, 323, 56–68.