



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Biológicas
Departamento de Física



Miguel Andrade Cardoso

Alcance de fluxos de sedimentos em colapsos de colunas granulares na geometria canalizada

Ouro Preto
2026

Miguel Andrade Cardoso

Alcance de fluxos de sedimentos em colapsos de colunas granulares na geometria canalizada

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Física

Área de Concentração: Ciências Exatas e da Terra

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Decot Galgano

Coorientador: Msc. Gabriel Carvalho Matoso

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C268a Cardoso, Miguel Andrade.

Alcance de fluxos de sedimentos em colapsos de colunas granulares na geometria canalizada. [manuscrito] / Miguel Andrade Cardoso. - 2026. 38 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Decot Galgano.

Coorientador: Me. Gabriel Carvalho Matoso.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas. Graduação em Física .

1. Física. 2. Mecânica do solo. 3. Recalque de estruturas. 4. Deslizamentos (Geologia). 5. Sedimentos (Geologia). I. Galgano, Giovanni Decot. II. Matoso, Gabriel Carvalho. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 53:624.12

Bibliotecário(a) Responsável: Renata Mara de Almeida - CRB-6: 2507



FOLHA DE APROVAÇÃO

Miguel Andrade Cardoso

Alcance de fluxos de sedimentos em colapsos de colunas granulares na geometria canalizada

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Física da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Física

Aprovada em 05 de março de 2026

Membros da banca

Dr. Giovanni Decot Galgano - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Américo Tristão Bernardes - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Edson José de Carvalho - Universidade Federal de Ouro Preto

Giovanni Decot Galgano, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Giovanni Decot Galgano**, COORDENADOR(A) DE CURSO DE BACHARELADO EM FÍSICA, em 12/08/2026, às 08:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1160445** e o código CRC **300CD18A**.

Agradecimentos

Ao longo desses anos, agradeço primeiramente aos meus pais e à minha família por todo o apoio e confiança. Ao meu irmão, Rodolfo, por todo companheirismo e ajuda, a qual foi fundamental nessa trajetória. À Amanda, pelo carinho e por ter sido uma família para mim; aprendi muito enquanto ao seu lado.

Agradeço aos amigos que fiz. Daniel, Sidinei e Guilherme por terem sido bons amigos e ombros de confiança durante essa etapa da minha vida. Aos amigos da República Tigrada, República Tcheca e República Matriarcado pela resenha e o golo e aos amigos Bethina, Brenner, Laura, Luan, Junio, Maria Luisa, Matoso, Rayssa, Victor, Wilck e Wilcker também pela resenha, mas também pela amizade e trabalho em equipe.

Aos professores do departamento de física, por desenvolverem meu interesse em física e pelos ensinamentos que levarei a diante, em especial aos professores Américo e Giovanni, também pelos ensinamentos, mas principalmente pela oportunidade e desenvolvimento como profissional.

Resumo

Este trabalho investiga o alcance de fluxos de sedimentos gerados por colapsos de colunas granulares em geometria canalizada, com ênfase na validação de simulações numéricas aplicadas à previsão de deslizamentos. A motivação decorre da elevada incidência de movimentos de massa no Brasil e da necessidade de modelos preditivos confiáveis para análise de riscos geológicos. O estudo fundamenta-se na mecânica dos meios granulares, considerando tanto sistemas secos quanto umedecidos ao incorporar os efeitos de interações coesivas associadas à presença de fluidos intersticiais. Foram realizados experimentos controlados de colapso de colunas granulares em canal, com o objetivo de determinar o comportamento do fluxo e o alcance final do material. Paralelamente, foram desenvolvidas simulações numéricas por meio do Método dos Elementos Discretos, reproduzindo as mesmas condições geométricas e físicas dos experimentos. Os parâmetros do modelo foram calibrados a partir da comparação sistemática entre os resultados experimentais e numéricos, buscando coerência entre a descrição discreta das interações partícula-partícula e o comportamento macroscópico observado. Os resultados demonstram que, mediante calibração adequada, o modelo numérico reproduz satisfatoriamente a dinâmica do colapso e o alcance final dos fluxos granulares, tanto no caso seco quanto no úmido. Conclui-se que o Método dos Elementos Discretos constitui uma ferramenta consistente para a modelagem de fluxos granulares e apresenta potencial para aplicação na previsão de riscos associados a deslizamentos.

Palavras-chave: Mecânica granular; Fluxos granulares; Colapso de coluna granular; Método dos Elementos Discretos; Validação numérica.

Abstract

This work investigates the runout of sediment flows generated by granular column collapses in a channelized geometry, with emphasis on the validation of numerical simulations applied to landslide prediction. The motivation arises from the high incidence of mass movements in Brazil and the need for reliable predictive models for geological risk assessment. The study is grounded in granular mechanics, considering both dry and wet systems, and incorporates the effects of cohesive interactions associated with the presence of interstitial fluids. Controlled laboratory experiments of granular column collapse were conducted to determine flow behavior and final runout distance. In parallel, numerical simulations were developed using the Discrete Element Method, reproducing the same geometric and physical conditions as the experiments. The parameters of the model were calibrated through systematic comparison between experimental and numerical results, ensuring consistency between the discrete particle-scale description and the observed macroscopic behavior. The results demonstrate that, with appropriate calibration, the numerical model satisfactorily reproduces the collapse dynamics and final runout of granular flows in both dry and wet conditions. It is concluded that the Discrete Element Method constitutes a consistent and robust tool for modeling granular flows and presents significant potential for application in landslide risk prediction.

Keywords: Granular mechanics; Granular flows; Granular column collapse; Discrete Element Method; Numerical validation.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	7
2	TEORIA	14
2.1	Os Meios Granulares	14
2.1.1	Interações Coesivas	14
2.1.2	Os Fluxos Granulares	17
2.1.2.1	Estabilidade Granular	18
2.1.2.2	Dinâmica de Escoamento	20
2.1.3	Colapsos Granulares	21
2.2	Métodos de Elementos Discretos (DEM)	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Materiais	25
3.1.1	Sistema Granular	25
3.1.2	Experimento do Colapso Granular em Canal	25
3.2	Procedimentos	26
3.2.1	Alinhamento da caixa de vidro	26
3.2.2	Preencher a coluna granular	26
3.2.3	Nivelamento da coluna granular	27
3.2.4	Colapso e alcance granular	27
3.2.5	Simulação	27
4	RESULTADOS	29
4.1	Colapso Granular Seco	29
4.2	Colapso Granular Úmido	31
4.3	Validação das simulações	32
5	CONCLUSÕES	34
5.0.1	Trabalhos futuros	34
	REFERÊNCIAS	35

Capítulo 1

Introdução

Deslizamentos podem causar prejuízos à sociedade através de danos a infraestruturas, instalações, habitações além, é claro, das vidas perdidas ou diretamente afetadas nesses acidentes. Esses desastres resultam em obstáculos para o desenvolvimento social econômico da região atingida e geram custos altíssimos para o governo e/ou empresas. As obras de intervenção ao Morro da Forca em Ouro Preto, rompido em 2022, por exemplo, custaram aproximadamente 5 milhões de reais à prefeitura (1). Outro desastre, no estado do Paraná, gerou um prejuízo de 60 milhões de reais por dia às transportadoras devido ao bloqueio de uma rodovia por um deslizamento, o que resultou em um “efeito dominó” sobre os custos de outros setores da região (2).

As ocorrências desses fenômenos geológicos no Brasil não são incomuns. Na verdade, são muito frequentes. Diversos trabalhos apontaram o Brasil como um país com alta taxa de deslizamentos e um elevado número de fatalidades em decorrência desses fenômenos. Os estudos feitos por Kirschbaum *et al.* (3, 4, 5) utilizaram o banco de dados da GLC (Global Landslide Catalog) que, realizado pela NASA entre 2007 e 2018, registrou deslizamentos desencadeados por chuva em todo o mundo através de noticiários, artigos, blogs, outros bancos de dados de desastres naturais, Google Alerts, entre outras formas de pesquisa, e, por esses dados, identificaram que o Brasil é bastante vulnerável a deslizamentos, principalmente em períodos chuvosos. Outros estudos, como Petley e Froude (6) e Petley (7), utilizaram do banco de dados Global Fatal Landslide Database, ou Durham Fatal Landslide Database, e, diferente do banco de dados do GLC, os deslizamentos registrados foram somente os que resultaram em fatalidades, independentemente do fator que os desencadeou. Estes dados apontam que na América do Sul 37% dos deslizamentos desencadeados por chuva resultaram em mortes no Brasil (6).

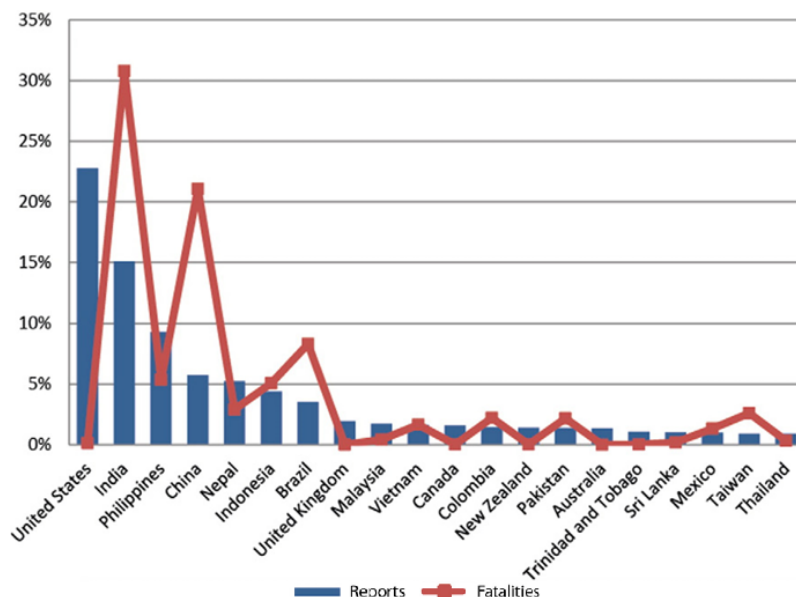


Figura 1.0.1 – Casos de deslizamentos e mortes catalogados pelo GLC de 2007 a 2013, número de casos de deslizamentos (Azul) e estimativa de mortes (Vermelho) ambos em percentual. Fonte: Adaptado de Kirschbaum, Stanley e Zhoua (3, p. 5).

Os movimentos de massa são fortemente ligados à interação entre a declividade e a intensidade pluvial de uma região. No entanto, existem diversos outros fatores que podem influenciar na suscetibilidade desses fenômenos geológicos (3, 6, 7, 8, p. 7, p. 2167, p. 3, p. 37). Conforme apresentado na figura 1.0.1, de 2007 a 2013, o Brasil foi o sétimo país com o maior número de casos de deslizamentos e o terceiro com o maior número de mortes por deslizamentos, ficando atrás somente da China e da Índia. Cabe ressaltar que, dentre todos os vinte países apresentados na figura 1.0.1, o Brasil e o Reino Unido são os menos afetados por atividades sísmicas, devido ao fato de ambos os países estarem distantes das falhas geológicas dos

limites tectônicos. Os sismos tectônicos são bastante associados à regiões de alta susceptibilidade de deslizamentos. Esses tremores desestabilizam o solo, enfraquecem a estabilidade das encostas ao abrir fraturas nas quais as águas provenientes das chuvas percolam facilmente e influenciam mais efetivamente fenômenos com a capacidade de redesenhar paisagens, como os movimentos de massa e as erosões (5, 7, p. 6-7, p. 929). Esse fato explica o alto índice de deslizamentos nos demais países na figura 1.0.1, principalmente, devido as fronteiras da placa Eurasiana, em países asiáticos, como Índia, China, Filipinas, Nepal e Indonésia, os quais foram os países que apresentaram o maior número de casos de deslizamentos no mundo (3, p. 6), e em países americanos, como Estados Unidos e Canadá, devido as fronteiras da placa Norte-Americana. Esse detalhe é mais nítido ao considerarmos a figura 1.0.2, onde as regiões vermelho são as regiões mais suscetíveis a deslizamentos, as quais, de fato, tendem a se alinhar com as regiões de limites tectônicos, conforme ilustrado por Press *et al.* (9, p. 63). Portanto, no Brasil, não existe a contribuição do principal agente desencadeador de movimentos de massa, mas sim de outros fatores.

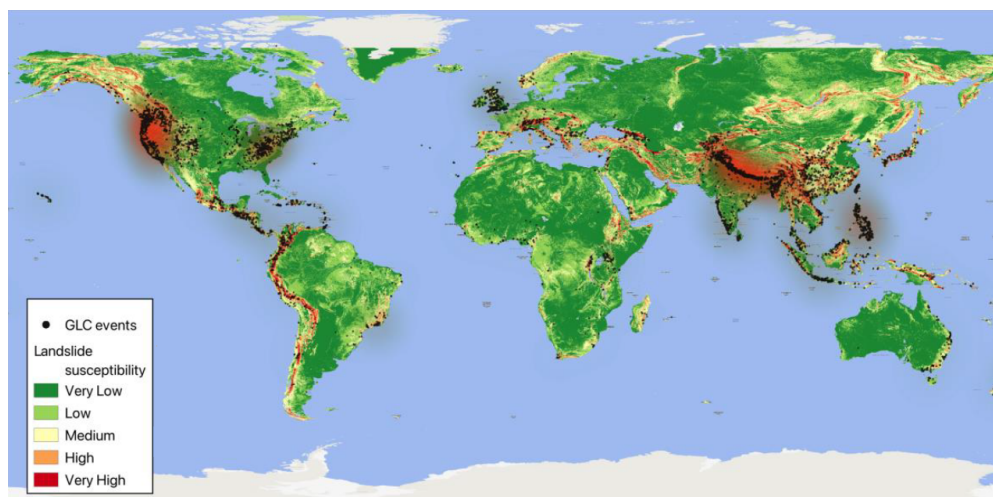


Figura 1.0.2 – Estimativa de regiões de suscetibilidade de deslizamentos e cada caso de deslizamento registrado durante o período de 2007 a 2018 de funcionamento do GLC (pontos pretos). Fonte: Kirschbaum *et al.* (4, p. 5).

Fatores socioeconômicos também demonstraram ter influência no impacto desses desastres. Em países mais desenvolvidos, os deslizamentos causaram maiores danos financeiros do que mortes. Isso pode ser observado na figura 1.0.1, na qual países mais ricos obtiveram um número extremamente baixo de casos de morte. Os Estados Unidos, por exemplo, tiveram apenas 30 mortos entre 2007 e 2013, para uma das maiores densidades de deslizamento no mundo enquanto que, em países mais pobres, o impacto desses desastres foi maior em termos de vidas humanas (3, 7, p. 6, p. 929-930). É importante salientar que, de acordo com Guzzetti (10), a ocorrência de baixos números de mortes, mesmo para um histórico de alta incidência de deslizamentos na região da Itália, deve-se ao sucesso dos programas de mitigação de danos de deslizamentos. Isso explica os baixos valores de mortos em países como Estados Unidos, Reino Unido, Canadá e Austrália, em comparação com os demais países na figura 1.0.1. Sendo assim, em vista da necessidade de programas como esse, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais desenvolveu um novo sistema a fim de gerar previsões mais precisas e rápidas desses eventos pelo território nacional (11).

Outro ponto a ser considerado é a interferência humana. Um fator que contribui é o desmatamento em regiões íngremes, já que a maioria das encostas são reforçadas pela presença da flora local. A vegetação contribui para a estabilidade das encostas ao unir as partículas do solo e intensificar a evaporação (5, p. 7). Além disso, interferências menos agressivas ao meio ambiente, como estradas, também são fatores frequentemente associados às incidências de deslizamentos, principalmente, vias construídas ao longo de terrenos montanhosos (3, 5, p. 6-7, p. 7-8). O peso de automóveis e trens em movimento causam uma diferença de pressão no solo, gerando vibrações que, como os sismos tectônicos, se propagam desestabilizando estruturas próximas (12, p. 129) e também podendo desestabilizar o solo. No entanto, atividades como mineração ilegal e construções irregulares são citadas como as principais atividades antrópicas relacionadas à incidência de movimentos de massa (3, 4, 5, 6,

p. 10, p. 14, p. 7, p. 17). No Brasil não é diferente, já que 47% do total de deslizamentos ocorridos nas montanhas do Maciço da Tijuca, no Rio de Janeiro, nos últimos 30 anos ocorreram em favelas. A expansão metropolitana desordenada da cidade fez com que os moradores mais pobres ocupassem cada vez mais as encostas (13, p. 130).

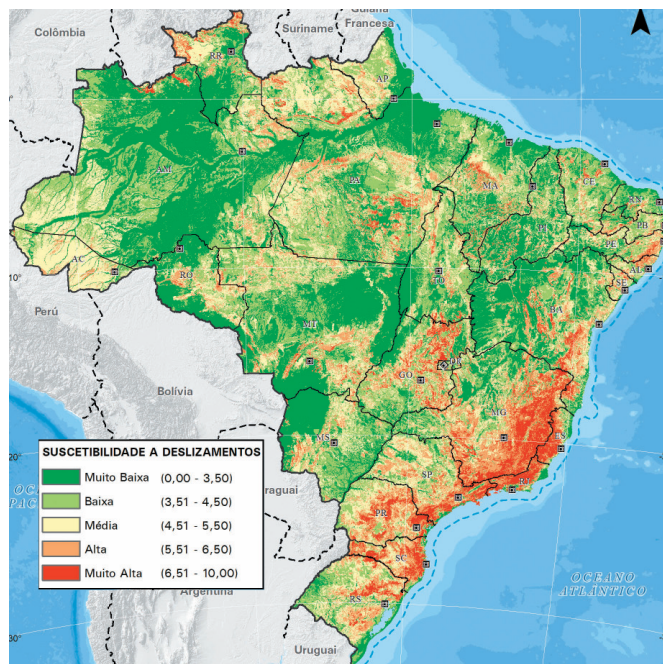


Figura 1.0.3 – Mapa de susceptibilidade a deslizamentos. Fonte: Adaptado de IBGE (8, p. 44).

O mapa de susceptibilidade produzido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (8, p. 44), figura 1.0.3, não levou em consideração nenhum dos fatores discutidos anteriormente. Entretanto, por meio de uma análise de características, como declividade, formações geológicas e pluviosidade de todo o território nacional, entre varias outras, foram destacadas as principais regiões de maior vulnerabilidade do país, as quais entram em ótima concordância com os dados analisados pelos trabalhos anteriores (3, 4, 5, 6, 7, p. 6, p. 10-11, p. 155, p. 2165, p. 3). A combinação de alto relevo, comum nas regiões costeiras do sul e do sudeste brasileiros, com intensas quedas d'água, comuns nos períodos de calor, aliada às perturbações causadas pelas atividades antrópicas, constrói um ambiente extremamente propício para a ocorrência de deslizamentos (13, p. 123). Um exemplo que claramente vivencia essa realidade é a própria cidade de Ouro Preto, que conta com 313 áreas de risco identificadas pela Defesa Civil Municipal (1). Essas regiões, afetadas por estes fatores, são de extrema importância nacional por concentrarem o principal polo econômico do país e abrigarem a maior densidade demográfica nacional, o que destaca ainda mais sua relevância, tanto do ponto de vista de seu valor econômico quanto de seu valor em vidas humanas. Dessa maneira, devido à importância da previsão e análise de riscos geológicos, os deslizamentos se tornaram objeto de estudos em diversas áreas do conhecimento, como geologia, física e engenharias.

No solo, podemos encontrar grãos de diversos tipos, tamanhos e formatos que, como pode ser verificado qualitativamente na figura 1.0.4, existe uma dispersão no tamanho dos grãos, a qual pode ser padronizada pela escala de Wentworth (15, p. 23). Sendo assim, fenômenos geológicos como os movimentos de massa e até mesmo a erosão são, por definição, fenômenos granulares. Portanto, movimentos como deslizamentos, rastejos e avalanches podem ser considerados fluxos granulares resultantes da força gravitacional e, de forma mais técnica, fluxos granulares em colapso, nos quais as principais interações são as forças de contato. A primeira área acadêmica a estudar o comportamento de grãos mediante suas diversas interações e condições físicas é a mecânica dos solos, que, mesmo tendo Karl Therzaghi (16) como principal personalidade em seu desenvolvimento, apoia-se em trabalhos anteriores, como o modelo da pilha de areia de Coulomb, a estabilidade de terras de Rankine (17) e a dilatância de Reynolds (18) entre outros, para estudar as propriedades mecânicas e hidráulicas dos grãos do solo, além de seu comportamento físico em condições diferentes (15, 16, p. 21, p. 23).

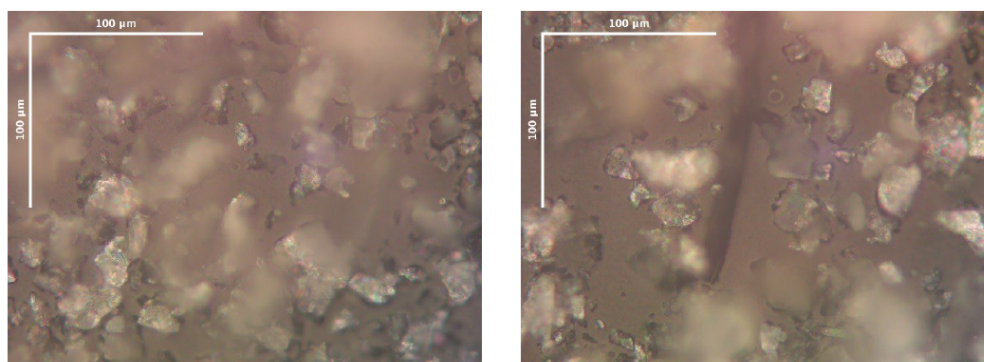


Figura 1.0.4 – Grãos de uma amostra de solo seco (à esquerda) e solo úmido (à direita). Fonte: Adaptado de Carvalho (14, p. 42).

Os primeiros trabalhos dedicados exclusivamente aos meios granulares começam a aparecer aos poucos como um assunto correlato à mecânica dos solos, nos meados do século XX, como Sokolowskii (19). Seu trabalho revisita os conceitos de estabilidade e equilíbrio, já bem estabelecidos na mecânica dos solos, para meios granulares em condições estáticas, com a finalidade de servir de base teórica para áreas como a geotecnia. No entanto, o trabalho pioneiro na física dos meios granulares é N. Oshima (20, 21), o primeiro nos trabalhos sobre os meios granulares, principalmente na sua descrição discreta. O autor utilizou de diversas formulações da física, como a mecânica do contínuo e a mecânica estatística para determinar equações para o movimento, a estabilidade e quantidades estatísticas, como, por exemplo, a entropia e a energia do sistema. Posteriormente, com o amadurecimento desses estudos, esses trabalhos obtiveram mais destaque como área acadêmica e passaram a ter modelagens físicas mais sofisticadas a fim de buscar respostas a questões ainda mais complexas, como os fluxos granulares. Os trabalhos propostos por Goodman e Cowin (22), Savage (23) e Kanatani (24, 25, 26) estão entre os primeiros artigos sobre o tema e as primeiras tentativas de construir teorias para descrever os fluxos granulares, desafio que persiste até os dias atuais.

Goodman e Cowin (22) analisaram dois problemas de fluxo gravitacional de materiais granulares: o fluxo em um plano inclinado e o fluxo entre placas verticais paralelas, utilizando uma abordagem teórica para modelar esses fluxos como um meio contínuo. Os autores destacam que os fluxos granulares são descritos por uma combinação entre um comprimento característico do material, como o tamanho dos grãos, e as condições de confinamento e gravidade. Já Savage (23) trabalhou no fluxo gravitacional granular sem coesão, de forma teórica e experimental em calhas inclinadas e canais verticais usando grãos de poliestireno, provavelmente o primeiro trabalho que utiliza de um sistema granular controlado, como o presente trabalho. O autor propôs uma formulação baseada no critério de Mohr–Coulomb. O modelo foi aplicado à análise de escoamentos bidimensionais simples e confrontado com os ensaios realizados.

Nos trabalhos de Kanatani (24, 25, 26), é destacado que os estudos sobre os meios granulares, até aquele momento, pertenciam somente às áreas da mecânica dos solos e da mecânica dos pós. A mecânica dos solos se dedicava ao estudo do equilíbrio de materiais granulares no estado quase-estático sob alta-tensão, e a mecânica dos pós se dedicava a entender o transporte de materiais granulares através de vários equipamentos, como canais, calhas e tubulações. Tais trabalhos abordavam o desenvolvimento de teorias contínuas para a descrição de fluxos granulares. No entanto, não eram contemplados pela mecânica dos solos nem pela mecânica dos pós. Nesses trabalhos, o autor se distancia dos estudos dos meios granulares feitos pela mecânica dos solos e da mecânica dos pós. Nenhuma das duas áreas, até então, havia dado atenção ao tema de fluxos granulares e, de fato, ao entendimento completo da mecânica granular. Assim, evidenciava-se a necessidade de uma área de estudo dedicada somente aos materiais granulares. Os fluxos granulares são a parte mais importante, já que representam a maior gama de aplicações de um sistema granular e, no entanto, são os mais complicados de descrever. Nestes trabalhos, Kanatani, continua com a abordagem utilizada por N. Oshima (20, 21), sendo o primeiro a utilizar de formulações da mecânica estatística e da mecânica do contínuo de forma tanto teórica quanto computacional para modelar fluxos gravitacionais rápidos e lentos.

Com a evolução da capacidade computacional durante o século XX, as modelagens computacionais começaram a ter

mais destaque e, em paralelo aos trabalhos de Goodman e Cowin (22), Savage (23) e Kanatani (24, 25, 26), essas modelagens, como o Método dos Elementos Discretos (DEM), ganharam bastante atenção na física granular e na mecânica dos pós desde a sua implementação em 1979 devido sua capacidade de tratar partículas individualmente. Esta técnica, elaborada por Cundall e Strack (27), foi desenvolvida com o intuito de descrever o comportamento de um conjunto de discos e esferas voltados para a análise de problemas no campo da geociências. O DEM transforma um sistema contínuo em um conjunto de partículas individuais. Essas simulações monitoram o movimento das partículas e a interação entre elas, contato por contato, a partir de um simples princípio teórico: a aplicação das leis da mecânica newtoniana. Isso possibilita acompanhar a evolução temporal de quantidades como posição, velocidade, orientação e forças entre as partículas do sistema (27, 28, p. 47-49, p. 21-22). No estudo de fluxos granulares, realizar todas essas tarefas, até mesmo nos dias atuais, demanda de um alto custo computacional e, principalmente, para sistemas com um grande número de partículas, como o solo. Uma técnica alternativa que trata o meio granular como um meio contínuo foi implementada posteriormente, reduzindo o custo computacional dessas simulações. A saber, essa técnica é conhecida como modelo reologia - $\mu(I)$.

Segundo Anita Mehta (29), o ramo da física granular se desenvolveu, de fato, somente quando os métodos de física estatística foram introduzidos no escopo dos meios granulares, o que ocorreu a partir da implementação do modelo dos autômatos celulares. Bak, Tang e Wiesenfeld (30) trouxeram uma perspectiva moderna e inovadora ao antigo modelo da pilha de areia. Um modelo que parecia simples, por esses pesquisadores, foi revelado ser um problema com uma complexidade ainda mais profunda. A partir desse modelo, foi proposta a self-organized criticality (SOC), uma teoria que combina auto-organização e criticalidade para descrever a complexidade de sistemas dinâmicos. O desenvolvimento dessa não só permitiu que os meios granulares fossem estudados através de modelos estatísticos, como também despertou o interesse entre os físicos pelos meios granulares (30, 31, 32, p. 1-4, p. 1-2, p. 1). Sistemas complexos são sistemas físicos que apresentam propriedades, como muitos graus de liberdade e leis de potência, entre outras. Esses fatores são todos encontrados nos sistemas granulares e não podem ser separados a fim de obter um sistema isolado e, conseqüentemente, mais simplificado, tornando esses sistemas complexos possíveis de serem analisados (15, 33, 34, p. 4-5, p. 1-2, p. 99-103). A complexidade intrínseca ao comportamento desses materiais contribui para a ausência de equações constitutivas no *status quo* do campo da física granular, pois nenhuma lei ou teoria proposta até hoje conseguiu reproduzir a diversidade de comportamentos observados em sistemas granulares. Atualmente muitas pesquisas sobre fluxos granulares procuram suprir essa necessidade por meio de descrições tanto contínuas quanto discretas (35, 36, 37, p. 2, p. 1, p. 727).

A área acadêmica da *física dos meios granulares*, ou também *mecânica granular*, começa, portanto, no final do século XX, sendo marcada por trabalhos como Jaeger e Nagel (38) e Jaeger, Nagel e Behringer (39). Nestes artigos, os autores apresentaram os meios granulares ao compilar todos os estudos e abordagens mais atuais; também introduziram conceitos novos, como a presença dos três estados da matéria no comportamento dos meios granulares. Além disso, consolidaram o nome “física granular” e a atual definição de material granular, a qual este trabalho utiliza. Como visto anteriormente, em trabalhos mais clássicos, como Goodman e Cowin (22), Savage (23) e Kanatani (24, 25, 26), é comum que os meios granulares sejam definidos como qualquer conglomerado de partículas sólidas, independentemente do tamanho, diferente do que está definido na seção 2.1. Essa definição “clássica” de meio granular, como um estudo em conjunto com a mecânica dos solos e a mecânica dos pós, persistiu entre os pesquisadores, como Campbell (40), até cair em desuso por volta de 2000, sendo em Duran (41) um dos últimos trabalhos a manter essa definição. A física dos meios granulares divide o meio granular em dois casos: *meio granular seco* e *meio granular molhado*. De uma forma bem direta, os meios granulares molhados se refere a sistemas granulares com líquidos imersos entre os grãos, normalmente água, e os meios granulares secos se refere a meios granulares sem a presença desses líquidos. Portanto, para o caso seco, se desconsidera a interação das partículas com o ambiente ao seu redor, ou seja, com esses líquidos nos interstícios dos grãos (41, 42, p. 19, p. 197). Os estudos sobre meios granulares são bastante amplos e podem ser principalmente aplicados em setores industriais e farmacêuticos, além de fenômenos geológicos, o que determinou e determinará os caminhos que essas pesquisas seguirão. Nos últimos anos, as pesquisas no campo da física dos meios granulares têm atacado seus objetos de estudo por meio de abordagens experimentais e computacionais, normalmente, ambas as abordagens em conjunto. A seguir, serão destacadas duas linhas de pesquisa dentro do escopo da física

dos meios granulares, que se relacionam com este trabalho, e onde é salientado sua importância e aplicação.

Meio granular molhado

Dedica-se a pesquisar a interferência de fluidos nos interstícios dos grãos impacto nas propriedades mecânicas dos sistemas granulares, como também chamados de coesão ou de forças capilares, as quais são abordadas no seção 2.1.2 deste trabalho. Lian, Thornton e Adams (43) foram os primeiros a pesquisar e determinar matematicamente a força causada por pontes líquidas entre duas partículas. Porém, seu trabalho deixou em aberto os efeitos das pontes líquidas em sistemas com muitas partículas. Dessa forma, posteriormente diversos trabalhos, como Richefeu, Youssoufi e Radjaï (44), Gans, Pouliquen e Nicolas (45), Hornbaker *et al.* (46) e Novak, Samadani e Kudrolli (47), aprofundaram em investigar os resultados de seus efeitos em sistemas com muitas partículas determinando propriedades importantes para os meios granulares molhados, como o aumento do ângulo de repouso e a capacidade de resistência à esforços cisalhantes.

Reologia em meios granulares

A reologia é uma área da ciência que se dedica a pesquisar sobre a deformação e os fluxos de materiais sólidos (48, p. 105), os quais são temas de grande importância para os meios granulares devido sua alta aplicabilidade. Sendo assim, apesar do esforço de diversos pesquisadores para encontrar uma lei constitutiva para representar os fluxos granulares, como visto anteriormente, somente em 2006 a partir dos trabalhos de Pouliquen, Forterre e Jop (37, 49) foi determinada uma lei para fluxos granulares densos, que posteriormente ficou conhecida como reologia - $\mu(I)$. Até aquele momento, as leis constitutivas para os regimes gasoso e sólido dos fluxos granulares já haviam sido encontradas. A lei para o regime gasoso foi determinada por Goldhirsch (50) através da teoria cinética dos gases e o regime sólido introduzido por Nedderman (51) a partir das equações da mecânica dos solos. Dessa forma, os autores da reologia - $\mu(I)$ completaram mais uma peça no quebra cabeça para o entendimento dos meios granulares. No entanto, atualmente alguns trabalhos tentam otimizar o modelo $\mu(I)$, como: R. Farhang *et al.* (52), que tentaram estender o modelo para o caso de um meio granular molhado ao adicionar coesão e viscosidade de um fluido e Gray, Blanty e Gaume (53), que apontaram erros no modelo ao destacar soluções mal-postas para valores muito pequenos e muito altos, ou seja, nos transientes da modelagem do fluxo, o que indica que uma compreensão física do modelo está em falta. Para solucionar esse problema, Gray, Blanty e Gaume (53) e outros trabalhos propõem utilizar da teoria de estado crítico da mecânica dos solos em conjunto com o modelo $\mu(I)$ devido a capacidade do modelo de estado crítico de capturar muito bem o transiente entre fluido e sólido dos solos e, dessa forma, solucionar o problema do modelo reologia - $\mu(I)$.

No presente trabalho, é apresentado um estudo sobre fluxos granulares gerados por colapsos de colunas granulares e o seu processo de validação em simulações aplicadas à processos geológicos. Experimentos de colunas granulares em colapso são usados como referência para o estudo da falha e da reologia de materiais sob a ação da gravidade. A literatura apresenta diferentes formas e geometrias para a execução de colapsos granulares. Um exemplo é o colapso de cilindros granulares, que podem ser encontrados nos trabalhos de Li *et al.* (54) e Lajeunesse, Monnier e Homsy (55). Outro, mais comum, é o colapso de uma coluna em geometria de canal realizados por Li *et al.* (54), Balmforth e Kerswell (56), N. Nguyen, H. Bui e G. Nguyen (57), Artoni *et al.* (58) e Cabrera e Estrada (59), o qual é utilizado neste trabalho. Os colapsos granulares em geometria de canal são experimentos tradicionais na área da física dos meios granulares devido a sua fácil reprodutibilidade, simplicidade e riqueza fenomenológica (54, 56, p. 3, p. 399) e são utilizados no entendimento de fluxos granulares a partir de diversos parâmetros e fatores em busca do alcance final dos sedimentos e na validação de simulações. Além disso, tanto o colapso de cilindros granulares quanto o colapso de colunas granulares são aplicados nas indústrias e na previsão de fenômenos geológicos. Neste trabalho, a técnica do DEM foi empregada para modelar simulações com as mesmas condições e materiais desses experimentos, garantindo que ambas as condições sejam as mais próximas possíveis. São feitas comparações entre simulações e experimentos, onde os parâmetros da simulação foram ajustados com base nos dados e imagens do comportamento do fluxo granular observado experimentalmente, até que ambos apresentassem resultados equivalentes (54, 57, 60, 61). Seguindo essa metodologia, foram realizadas diversas simulações usando o DEM, as quais replicaram os experimentos sob as mesmas condições e dimensões obtendo-se resultados capazes de construir um modelo com potencial preditivo do alcance de fluxos granulares.

Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é validar simulações de rupturas de colunas granulares que garantam resultados confiáveis e consistentes.

Objetivos Específicos

- Realizar experimentos de colapso de colunas granulares, tanto secas quanto umedecidas, para determinar e analisar a forma e o comportamento do fluxo granular durante o colapso;
- Realizar a comparação entre simulação e experimento a fim de verificar sua validade;
- Contribuir com o desenvolvimento de um método computacional capaz de prever o alcance de deslizamentos.

Capítulo 2

Teoria

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento do presente trabalho e estabelece as bases conceituais necessárias para a compreensão dos fenômenos abordados ao longo deste trabalho. São apresentados os principais conceitos relacionados aos sistemas granulares, suas interações mecânicas e o efeito da presença de fluidos, assim como os critérios de ruptura aplicáveis e o mecanismo dos métodos dos elementos discretos.

2.1 Os Meios Granulares

O meio granular abrange uma ampla gama de materiais, podendo ser desde pequenos minerais em transporte até as grandes rochas que compõem os anéis de Saturno, mas nunca de partículas singulares. Um sistema considerado um meio granular é a manifestação da interação de várias partículas macroscópicas.

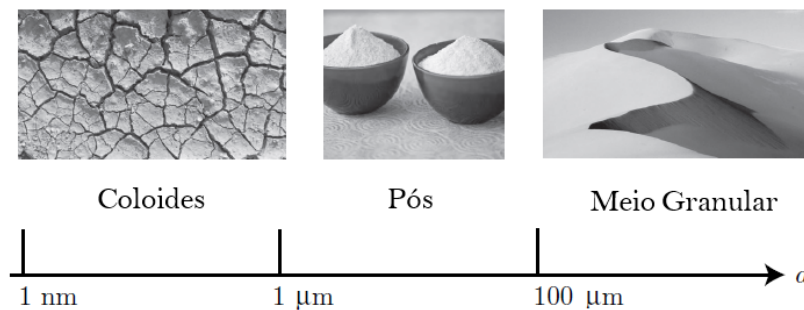


Figura 2.1.1 – As diferentes escalas de agrupamentos de partículas. Fonte: Adaptado de Andreotti, Forterre e Pouliquen (15).

Segundo Andreotti, Forterre e Pouliquen (15), as partículas podem ser classificadas em três tipos por escalas bem definidas, conforme ilustrado na figura 2.1.1, de acordo com o conjunto de interações que operam dentro de cada uma delas.

- **Meio Granular:** Partículas maiores que $100\ \mu\text{m}$

O *meio granular*, ou material granular, são partículas macroscópicas rígidas o suficiente para terem apenas pequenas deformações, nas quais as únicas interações possíveis são as interações por contato. As interações por contato levam em consideração o atrito, as colisões elásticas e a elasticidade (15, 62).

- **Pó:** Partículas entre $1\ \mu\text{m}$ e $100\ \mu\text{m}$

O *pó* compõe o início da escala microscópica e, por consequência, as interações por contato não são as únicas interações em atividade. Aqui, interações, como as forças de Van der Waals, umidade atmosférica e o arrasto, também se tornam fatores consideráveis no comportamento de um sistema composto por pós (15).

- **Coloide:** Partículas entre $1\ \text{nm}$ e $1\ \mu\text{m}$

O *coloide* representa as menores partículas e, nessa escala nanoscópica, interações, como agitação térmica e movimento browniano, atuam junto com as demais interações citadas anteriormente (15).

2.1.1 Interações Coesivas

Diferente das demais escalas, os sistemas granulares são descritos por somente dois tipos de interações, as quais são classificadas em *interações por contato* e *interações coesivas*. As forças de coesão, ou simplesmente *coesão*, são os tipos de

interações que não necessariamente precisam do contato físico para atuar e são capazes de unir as partículas de um sistema granular umas às outras ou entre às superfícies próximas, alterando o comportamento e as propriedades mecânicas desse sistema. Essas forças estão ligadas à presença de umidade, eletrostática, forças de Van der Waals e pontes sólidas presentes nas partículas (15, 62, 63).

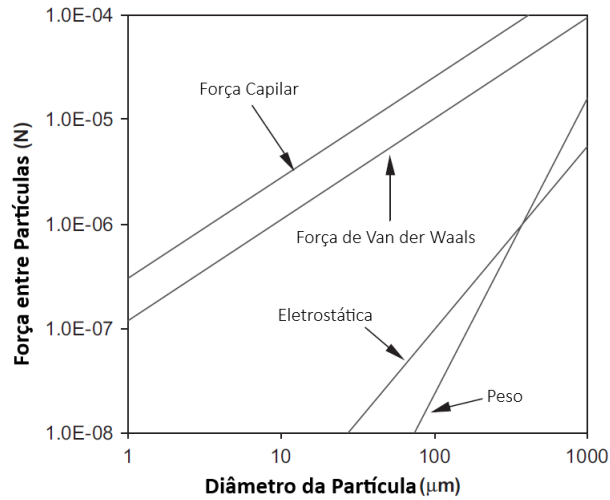


Figura 2.1.2 – A influência do tamanho das partículas em algumas forças coesivas em comparação com a força peso baseado em: (i) forças de van der Waals: $A = 6.5 \times 10^{-20}$ J, $h = 1.65$ Å; (ii) força capilar: $\gamma = 72.8 \times 10^{-2}$ N m⁻¹ (água); (iii) forças eletrostáticas: $\epsilon_r = 1$; (iv) peso específico do material: $\rho_g = 3 \times 10^3$ kg m⁻³. Fonte: Adaptado de Rumpf (64).

Conforme na figura 2.1.2, as forças coesivas se tornam maiores que a força peso à medida que tratamos de partículas cada vez menores e, conseqüentemente, em escalas menores, as forças coesivas são mais intensas.

• Forças Eletrostáticas

A origem das forças eletrostáticas em um sistema granular está na triboeletricidade, ou seja, na eletrização por atrito, o que depende de alguns fatores, entre eles a umidade atmosférica e o tipo de material. Logo, as interações por contato podem, conseqüentemente, levar a eletrização do sistema (15). A força eletrostática é descrita pela Lei de Coulomb que, para representar a eletrostática em um sistema granular, segundo Krupp (65), pode ser aproximada como

$$\mathbf{F}^e = -\frac{Q^2}{16\pi\epsilon_0 h^2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2}}\right) \hat{\mathbf{n}}_{ij} \quad (2.1.1)$$

em que h , é a distância entre as partículas, R , o raio da partícula, Q , a carga presente nas partículas, e $\hat{\mathbf{n}}_{ij}$, o versor normal das partículas. É importante destacar que, de acordo com Rumpf (64), para sistemas misturados em um líquido condutor elétrico, podemos desconsiderar a influência das forças eletrostáticas, pois, nesse caso, as pontes líquidas permitiriam a troca de cargas entre as partículas do empacotamento e, conseqüentemente, há a neutralização elétrica do sistema.

• Forças Capilares

A força capilar normalmente é dominante em sistemas granulares e pós, pois supera, em magnitude, as demais forças presentes nesses sistemas. As forças capilares são geradas por pequenos volumes de líquidos nos interstícios das partículas do sistema granular e, dessa maneira, formam “pontes” que ligam as partículas umas às outras. Essas pontes são suficientemente intensas para manter as partículas coesas devido às interações combinadas de tensão superficial do fluido e de diferença de pressão associada à curvatura da interface líquida. Como consequência, surge uma força atrativa que dificulta a separação das partículas (63, 66). Nos solos, isso causa o que é conhecido como *poropressão negativa*, ou *sucção*. De acordo com Lian, Thornton e Adams (43), a força capilar entre duas partículas pode ser dada por

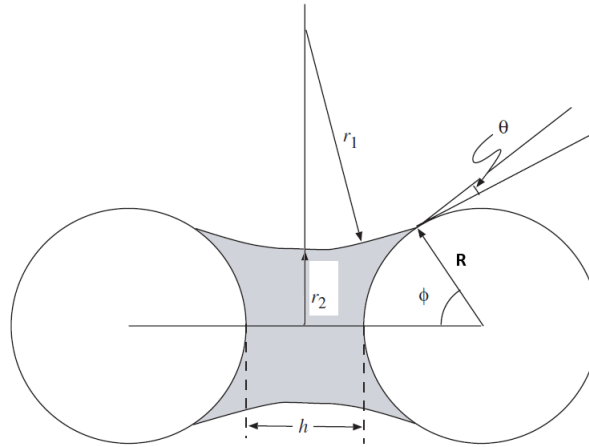


Figura 2.1.3 – Ponte líquida entre duas partículas. Fonte: Adaptado de Mitarai e Nori (62).

$$\mathbf{F}^c = -[2\pi R\gamma \sin\phi \sin(\theta + \phi) + \pi R^2 \Delta p \sin^2\phi] \hat{\mathbf{n}}_{ij} \quad (2.1.2)$$

em que R é o raio da partícula, γ é a tensão superficial do líquido, Δp a diferença de pressão, θ o ângulo de contato, ϕ ângulo de meio-preenchimento e $\hat{\mathbf{n}}_{ij}$, o versor normal das partículas, conforme na figura 2.1.3. Nessa forma, é mais nítido que a equação para a força capilar é a soma de dois termos, um termo para a tensão superficial dada por γ e outro para a sucção, que considera a diferença de pressão Δp , o qual é dada por

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.1.3)$$

sendo r_1 e r_2 , respectivamente, o raio da ponte líquida e o raio que expressa a curvatura da ponte líquida (43, 62), conforme ilustrado na figura 2.1.3. A força capilar é máxima quando as partículas estão em contato e decai rapidamente a medida que são separadas por uma distância h (15).

Pela equação 2.1.2, é possível conceber como a presença de pequenas quantidades de um líquido entre as partículas de um sistema granular pode alterar seu comportamento. Na figura 2.1.4, observamos como uma pequena quantidade de fluido altera as propriedades e o comportamento coletivo do sistema granular, o que pode variar muito dependendo do material das partículas do sistema e o líquido misturado.

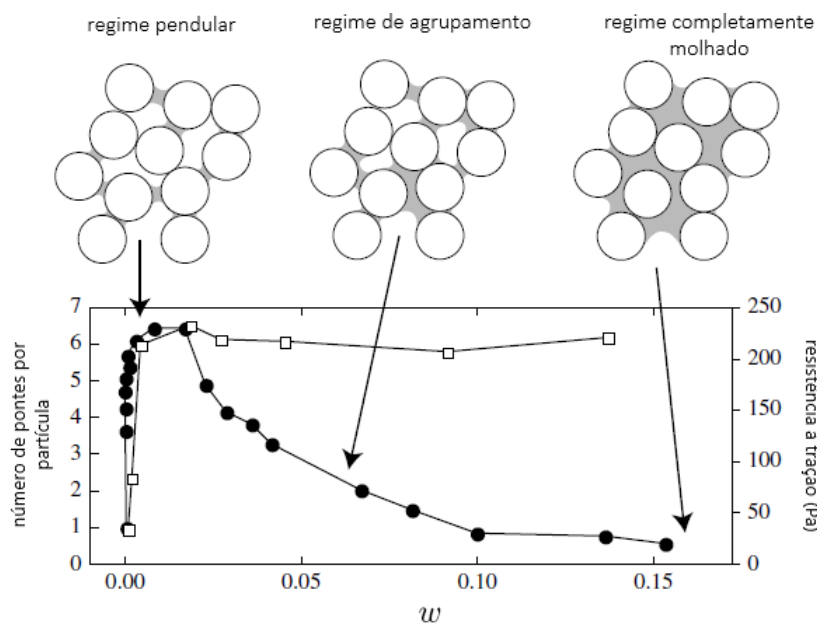


Figura 2.1.4 – As fases de um sistema granular em função do número de pontes líquidas e umidade. Os pontos pretos (●) representam os números de pontes líquidas e os quadrados (□) representam a tensão necessária para separar as amostras e ambas em função do volume de líquido relativo (w - volume do líquido por volume do sistema granular). Fonte: Adaptado de Andreotti, Forterre e Pouliquen (15).

A presença de pequenas quantidades de líquido desenvolve a **fase pendular** de coesão capilar no sistema. Aqui, a força capilar, ou *coesão capilar*, é máxima e, conseqüentemente, exige de uma maior tensão para romper essas pontes líquidas, como pode ser observado pelos (□) na figura 2.1.4. Nesse estado, as pontes líquidas são mais intensas devido a diferença de pressão e a tensão superficial serem máximas quando ligam partículas uma a outra, como pode ser visto pelos pontos (●). Logo, essas forças tanto de pressão quanto a da tensão superficial atuam em cada partícula mais de uma vez, assim, necessitando de uma maior força para retirar uma partícula de sua posição.

Na presença de maiores quantidade de líquido, atinge a **fase de agrupamento**. Aqui, a força capilar começa, aos poucos, a perder sua intensidade, conforme os (□) na figura 2.1.4. Nessa condição, a quantidade de líquido é suficiente para que as pontes líquidas comecem a englobar as partículas e, assim, percam parte das forças vindas da pressão e da tensão superficial, como pode ser observado pelos (●) na figura 2.1.4.

Na **fase completamente molhado**, a quantidade de líquido é tanta que, como pode ser observado na figura 2.1.4, não há mais pontes líquidas no sistema. No entanto, a força capilar praticamente ainda se manteve a mesma, formando um *plateau* de coesão capilar.¹

Se continuássemos a adicionar líquido até preencher todos os espaços vazios, o sistema granular deixaria de ser um meio granular e se tornaria, o que é conhecido pela física dos meios granulares, como *suspensão*, que é um sistema de líquido com partículas imersas (15). Para a mecânica dos solos, esse é o ponto em que o solo satura e ao invés das partículas se atraírem, nessa ocasião, há a repulsão entre elas devido a perda total das forças capilares entre as partículas no líquido, o que é conhecido, como *poropressão positiva* (67).

2.1.2 Os Fluxos Granulares

Uma característica dos sistemas de muitas partículas sólidas, como os sistemas granulares, é a capacidade de assumir o comportamento dos três estados da matéria. Se agitados, por exemplo, as partículas de um sistema granular têm um

¹ A classificação das fases de umidade apresentada pela figura 2.1.4 pode variar conforme a referência, como a utilizada por Mitarai e Nori (62).

comportamento similar ao de um gás; no estado estático, são como sólidos. Já o estado líquido é encontrado nos fluxos granulares; as partículas de um sistema granular escoam como líquidos. Também há ocasiões em que os grãos podem transitar entre os regimes e mudar do regime gasoso para líquido, por exemplo, e, dependendo da ocasião, podem apresentar os três regimes simultaneamente (15, 35), como está ilustrado na figura 2.1.5. O regime líquido têm duas características importante, os quais serão mais profundamente discutidos a seguir.

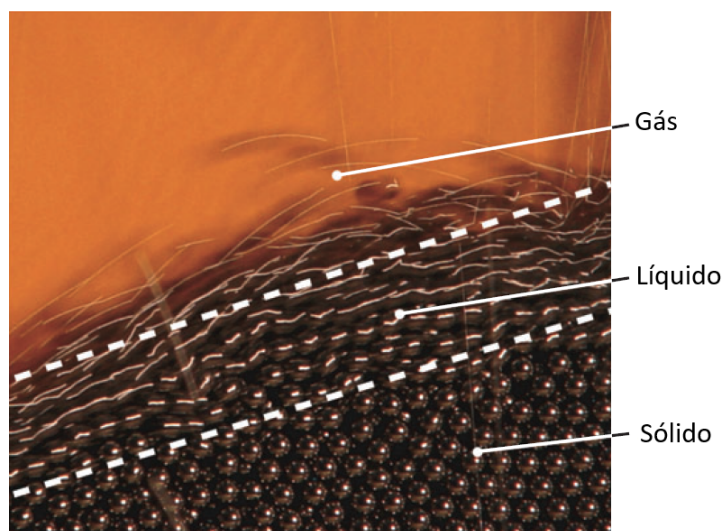


Figura 2.1.5 – Os 3 regimes possíveis para um sistema granular em um fluxo de bolinhas de aço na formação de uma pilha. Fonte: Adaptado de Forterre e Pouliquen (35).

2.1.2.1 Estabilidade Granular

Para que o sistema granular escoe, primeiramente, ele deve atingir a criticalidade ao ser inclinado acima de um determinado ângulo conhecido como *ângulo crítico* ou *ângulo de repouso* (35) revelando, assim, seu comportamento plástico. Esse fenômeno pode ser descrito por formulações conhecidas como critérios de ruptura, as quais buscam refletir as condições de um material no momento em que ele cede. Dentre esses critérios de ruptura, o mais comum, devido a sua eficiência e simplicidade, é o critério de ruptura de Mohr-Coulomb que, além de representar o comportamento dos solos muito bem (67, 68), também é capaz de representar o dos meios granulares. A equação de Mohr-Coulomb, apresentada na equação (2.1.4), permite analisar e determinar a capacidade de um material de suportar a uma determinada carga

$$|\tau| = c + \sigma \tan(\phi) \quad (2.1.4)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento ou resistência ao cisalhamento, c é a coesão², ou *intercepto coesivo*, σ , tensão normal, e ϕ , o ângulo de atrito interno.

Através da equação 2.1.4, é construída uma reta conhecida como envoltória de ruptura, representada pela reta denominada de envoltória teórica na figura 2.1.6. Tanto a envoltória teórica quanto a envoltória experimental delimitam uma região de tensões cisalhantes suportadas pelo material em questão. As tensões cisalhantes suportadas pelo material situam-se abaixo da envoltória teórica e, quanto mais próximas dela, maior é a probabilidade da ruptura. Em contrapartida, acima da envoltória as tensões cisalhantes não são permitidas, pois pelo critério de Mohr-Coulomb o material já teria se rompido. No entanto, a envoltória experimental é mais precisa na análise de estabilidade de materiais devido aos valores de tensão cisalhamento extrapolados no extremos da reta teórica (67, 69).

² A coesão, c , não se relaciona com as forças coesivas citadas na seção 2.1.2. Para Terzaghi (16), c é um parâmetro matemático voltado para representar os solos, definido pela equação de Mohr-Coulomb e encontrado a partir de testes de cisalhamento direto e triaxial (67, 69). De fato, as forças capilares discutidas anteriormente influenciam no valor do intercepto coesivo, porém a abordagem para explicar a coesão em sistemas granulares e particulados feita pela mecânica dos solos é diferente da física dos meios granulares, o que torna inválida essa correlação.

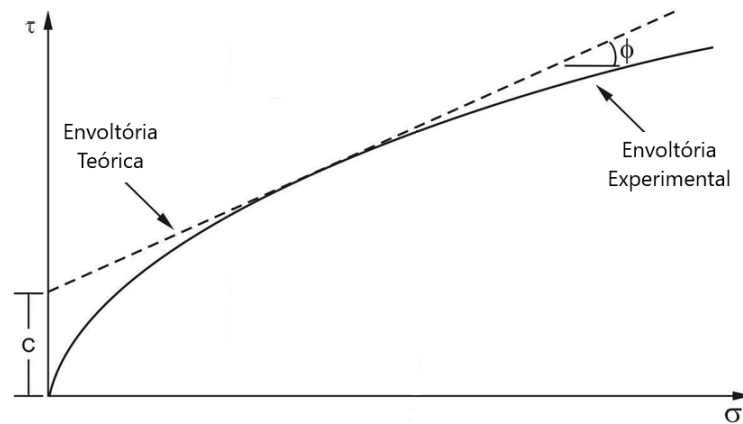


Figura 2.1.6 – Envoltórias de ruptura teórica e experimental da equação de Mohr-Coulomb. Fonte: Elaborada pelo Autor

As tensões normais σ_1 , σ_2 e σ_3 aplicadas em cada coordenada cartesiana do material resultam em um círculo de Mohr e o inset na figura 2.1.7 ilustra um material cilíndrico sob condições de tensões normais nas coordenadas radial (σ_3) e axial (σ_1). Esses valores de tensões são plotados em um gráfico de tensão cisalhante (τ) em função da tensão normal (σ), construindo os círculos de Mohr, conforme ilustrado na figura 2.1.7. E da mesma forma como anteriormente, o quanto mais próximo o raio do semi círculo está da envoltória mais tensões normais aproximam o material da ruptura, como, por exemplo, os semi círculos 1 e 2 na figura 2.1.7, no qual o círculo 2 está mais seguro e longe da ruptura que o círculo 1, que tecnicamente está na iminência de ruptura (67, 69).

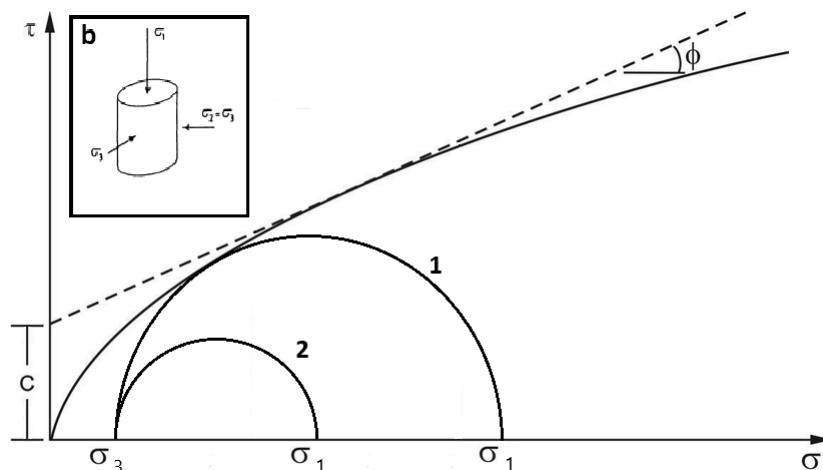


Figura 2.1.7 – As tensões normais aplicadas representadas pelos seus círculos de Mohr e (b) representação física. Fonte: Elaborada pelo Autor

Para o caso de materiais úmidos, a equação de Mohr-Coulomb recebe outra interpretação, também conhecida como sua forma efetiva

$$|\tau| = c' + \sigma' \tan(\phi') \quad (2.1.5)$$

em que, c' é a coesão efetiva, ϕ' é o ângulo de atrito interno efetivo e σ' é a tensão normal efetiva dada por $\sigma' = \sigma - u$ sendo σ a tensão normal e u a poropressão negativa ou positiva a depender do nível de umidade do sistema. A poropressão tem a capacidade de deslocar o círculo de mohr da sua posição por um valor u (67, 68), conforme ilustrado na figura 2.1.8.

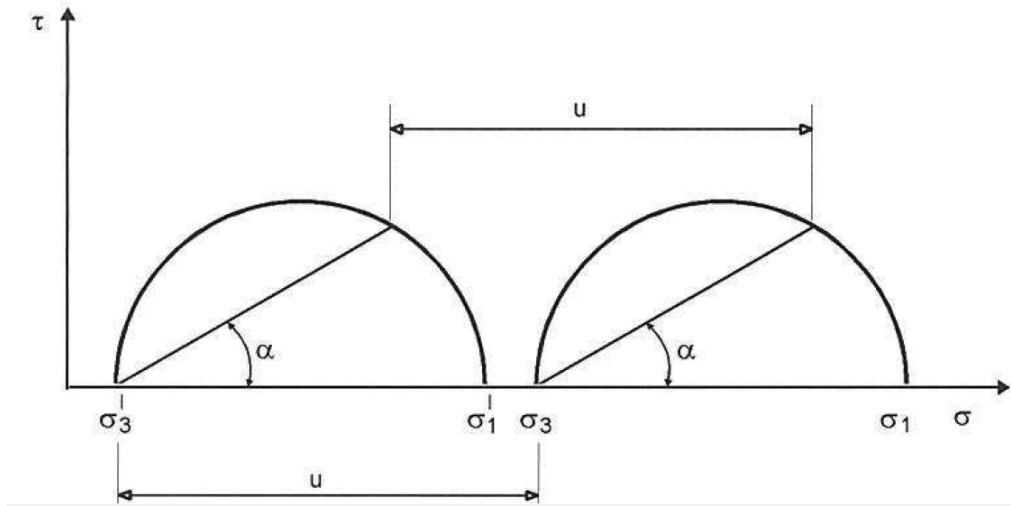


Figura 2.1.8 – Circulo de Mohr deslocado pela poropressão (u). Fonte: C. Pinto (67).

Para o caso de solo saturado e, conseqüentemente, de poropressão positiva, o círculo de Mohr se desloca para a esquerda no gráfico τ por σ , conforme na figura 2.1.6, e, dessa forma, antecipa o encontro com a envoltória e o rompimento do material; ou seja, menos resistência ao cisalhamento no material.

Para o caso de solo não saturado, temos a poropressão negativa, nessa condição, o círculo de Mohr se desloca para a direita se distanciando da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb indicando maior resistência ao material.

2.1.2.2 Dinâmica de Escoamento

Os fluxos granulares apresentam um comportamento viscoso não trivial devido a sua complexa dependência à taxa de cisalhamento. Para um sistema granular em estado líquido e, de forma análoga à viscosidade dinâmica de um fluido, a viscosidade de um sistema granular em fluxo pode ser dada por

$$\eta(|\dot{\gamma}|, P) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{P\mu(I)}{|\dot{\gamma}|} \quad (2.1.6)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento, P é a pressão isotrópica e $\mu(I)$ a função de atrito interno do fluxo granular. A taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) é dado pelo gradiente da velocidade e avalia a variação da velocidade do sistema granular em relação à profundidade do fluxo granular de forma macroscópica, conforme ilustrado na figura 2.1.9. Sendo assim, uma importante propriedade da equação 2.1.6 é a sua divergência à infinito quando a velocidade do fluxo é nula ou constante por toda a sua profundidade (37), o que demonstra a capacidade da relação de matematicamente modelar o regime sólido dos fluxos granulares.

A função de atrito interno $\mu(I)$ é dada por

$$\mu(I) = \mu_s + \frac{\mu_2 - \mu_s}{1 + \frac{I_0}{I}} \quad (2.1.7)$$

em que I_0 , μ_s , μ_2 são parâmetros reológicos constantes dos materiais encontrados através especificamente da montagem experimental ilustrada na figura 2.1.10 e I é um parâmetro adimensional denominado *número inercial* dado por

$$I(\dot{\gamma}, P) = \dot{\gamma} d \sqrt{\frac{\rho_s}{P}} \quad (2.1.8)$$

em que ρ_s é a densidade do material granular e d o tamanho das partículas. Os parâmetros μ_s e μ_2 são os valores limites inferior e superior estimados computacionalmente (37, 49) que representam, respectivamente, a capacidade mínima e máxima de um material granular fluir. Isso pode ser observado pelo limite da equação 2.1.6, demonstrado a seguir

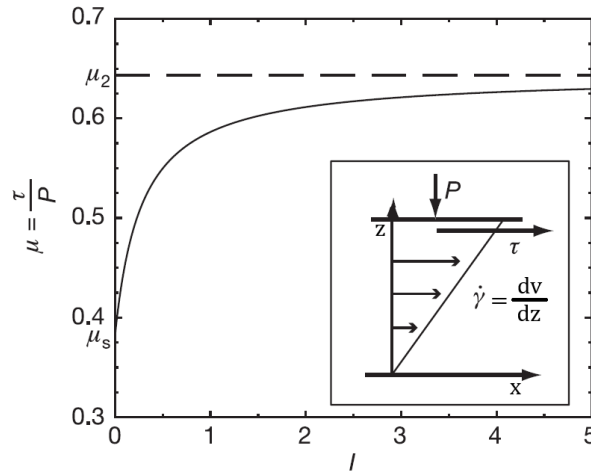


Figura 2.1.9 – Comportamento matemático do modelo $\mu(I)$ - reologia e a suas componentes física em um fluxo granular. Fonte: Adaptado de Jop, Forterre e Pouliquen (37).

$$\lim_{I \rightarrow 0} \mu_s + \frac{\mu_2 - \mu_s}{1 + \frac{I_0}{I}} = \mu_s \quad (2.1.9)$$

$$\lim_{I \rightarrow \infty} \mu_s + \frac{\mu_2 - \mu_s}{1 + \frac{I_0}{I}} = \mu_2 \quad (2.1.10)$$

Voltando à propriedade da equação 2.1.6 anteriormente discutida: $\mu(I)$ divergir para valores de taxa de cisalhamentos ($\dot{\gamma}$) muito pequenos comprova a existência de um critério de ruptura. Isso demonstra a inexistência de um fluxo granular para valores menores que μ_s e que, nesse ponto, o sistema granular transita do regime sólido para o regime líquido. Portanto, $\mu(I)$ modela tanto o regime sólido quanto o regime líquido de um fluxo granular sendo uma função que serve como transição entre ambos os regimes e só, de fato, entra no regime líquido quando

$$\tau > \mu_s P \quad (2.1.11)$$

o qual é o nosso critério para ruptura e é baseado no critério de ruptura de Drucker-Prager³ (37, 49). Portanto, devido ao caráter plástico e a dinâmica viscosa presente nos fluxos granulares, os meios granulares podem ser aproximados e tratados como fluídos visco-plásticos, como os fluídos de Bingham (15, 35, 37, 49).

2.1.3 Colapsos Granulares

Para realizar os colapsos granulares, a configuração experimental de geometria em canal consiste em uma caixa de vidro, semelhante a um aquário, com um compartimento para o preenchimento de grãos que formarão a coluna granular, conforme ilustrado na figura 2.1.11. Um sistema granular é despejado no compartimento e, então, a coluna granular é formada e, posteriormente, com a remoção da comporta, é induzido o seu colapso. O colapso granular ocorre quando o estado de tensões dos grãos atinge o limite de resistência ao cisalhamento do material, ou seja, pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, quando a tensão cisalhante atinge o valor limite determinado pela coesão e pelo atrito interno. Assim, a partir desse ponto, se estabelece uma superfície de cisalhamento ao longo da qual o material perde estabilidade e é capaz de escoar.

O método apresentado pela literatura, como por exemplo nos trabalhos de Li *et al.* (54) e Artoni *et al.* (58), compreende normalizar as componentes comprimento inicial (R_0) e altura inicial (H_0), da coluna granular inicial e o comprimento final (R_∞) a partir das equações a seguir

³ O critério de ruptura de Drucker-Prager é uma adaptação numérica do critério de Mohr-Coulomb (68).

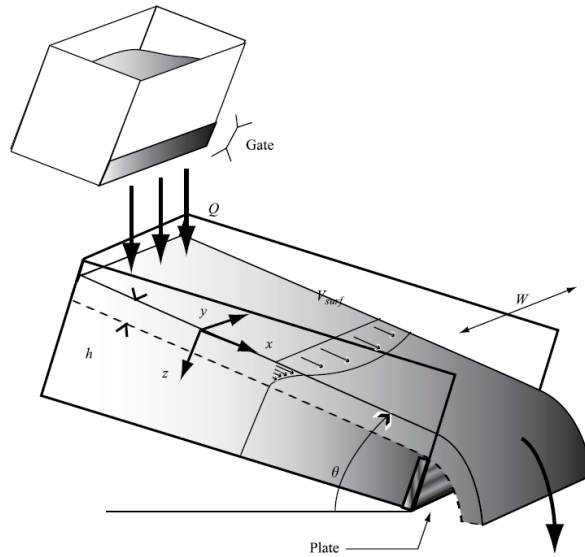


Figura 2.1.10 – Montagem experimental usada na medida dos parâmetros do $\mu(I)$. Fonte: Jop, Forterre e Pouliquen (49).

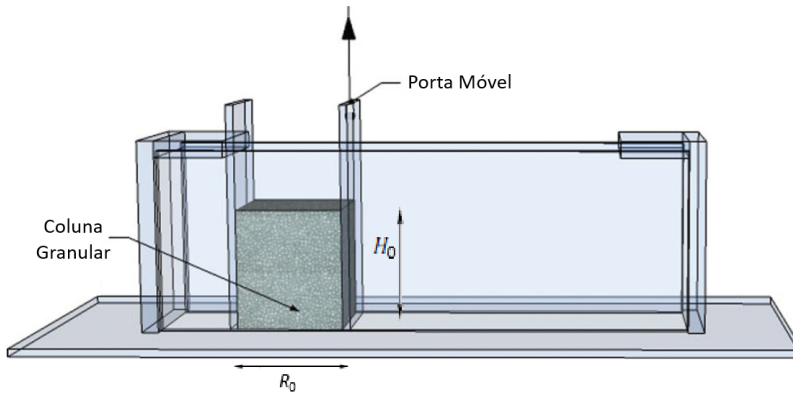


Figura 2.1.11 – Experimento de Colapso Granular em Geometria Canalizada. Fonte: Adaptado de Artoni *et al.* (58).

$$a = \frac{H_0}{R_0} \quad (2.1.12)$$

$$R^* = \frac{R_\infty}{R_0} - 1 \quad (2.1.13)$$

sendo a , o *aspect ratio*, e R^* , o *Run-Out* ou alcance normalizado. Compreender as características do depósito granular, como o alcance, a altura e a morfologia final, é de suma importância para certas aplicações de fluxos granulares, como, por exemplo, deslizamentos. Até o momento, os resultados alcançados na literatura sugerem que o alcance de um fluxo granular é predominantemente influenciado pelo *aspect ratio*, a (54). Em experimentos de colapsos granulares realizados por Lajeunesse, Mangeney-Castelnau e Vilotte (70), foi identificada a existência de dois regimes de comportamento para o alcance (R^*) em função do *aspect ratio* (a), como pode ser visto na figura 2.1.12.

Quando um determinado valor de transição, a_0 , é alcançado, o comportamento do alcance é alterado para um comportamento diferente. Portanto, o alcance normalizado ($R^*(a)$) em função do *aspect ratio* a é uma função com comportamento composto por 2 regimes. O primeiro regime ocorre para $a \leq a_0$, segundo trabalhos como Li *et al.* (54) e N. Nguyen, H. Bui e G. Nguyen (57), é dado pela função linear

$$R^* = \alpha_1 a + \beta_1 \quad (2.1.14)$$

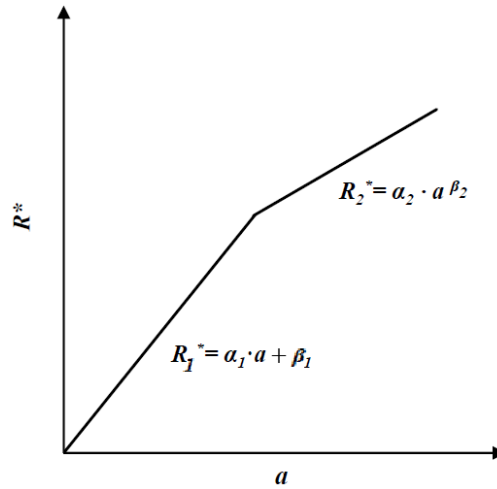


Figura 2.1.12 – Comportamento de alcance granular encontrado em experimentos de colapso granular. Fonte: Adaptado de Li *et al.* (54).

O segundo regime, apresentado em trabalhos como Li *et al.* (54) e N. Nguyen, H. Bui e G. Nguyen (57), ocorre para $a > a_0$ e, por outro lado, apresenta um comportamento exponencial, dado por

$$R^* = \alpha_2 a^{\beta_2} \quad (2.1.15)$$

Embora essas duas formas da lei de escala sejam amplamente reconhecidas, os valores de transição a_0 e as constantes das leis de escala (ou seja, α_1 , α_2 , β_1 e β_2) encontrados pela literatura são diversos, o que pode ser atribuído à ampla variedade de materiais granulares e/ou às diversas configurações empregadas em experimentos e simulações (57). No entanto, mesmo a sendo o principal fator para alcance de fluxos granulares, existem outros fatores ligados à montagem experimental e aos materiais utilizados. De acordo com N. Nguyen, H. Bui e G. Nguyen (57), o ângulo de atrito interno (ϕ) é um dos parâmetros intrínsecos dos materiais importantes no resultado do alcance normalizado (R^*). À medida que tratamos de valores de ϕ cada vez maiores, as constantes das leis de escala α_1 e α_2 decaem consideravelmente, enquanto β_1 e β_2 têm uma queda menos acentuada. Outros parâmetros intrínsecos dos materiais, como módulo de Young, Poisson e densidade, não impactaram os valores das constantes das leis de escala quanto ao ângulo de atrito interno. Segundo Balmforth e Kerswell (56), condições experimentais, como a espessura da caixa de vidro, podem influenciar o alcance granular devido as forças de atrito entre os grãos e as paredes da caixa. Balmforth e Kerswell (56) observaram um menor alcance em fluxos granulares para fluxos gravitacionais gerados em canais mais estreitos e destacam a influência do atrito das paredes com as partículas do sistema granular como condição responsável e propõem a seguinte relação para verificar a linearidade de diversas espessuras de canais.

$$R^* \approx \gamma a^\alpha \quad (2.1.16)$$

em que γ e α são parâmetros que têm seus valores determinados tanto pelos materiais quanto pelo tamanho do canal.

2.2 Métodos de Elementos Discretos (DEM)

As simulações dos fluxos granulares em canal foram realizadas a partir do DEM. O método de elementos discretos é um modelo matemático para descrever o movimento das partículas de forma individual, onde grandezas, como as forças de contato, deslocamento, velocidade e posição, são calculados partícula por partícula a partir da segunda Lei de Newton

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{F}_i^C + m_i \vec{g} + \vec{F}_i^{fp} \quad (2.2.1)$$

$$\vec{T}_i = \vec{I}_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} - (\vec{I}_i \cdot \vec{\omega}_i) \times \vec{\omega}_i \quad (2.2.2)$$

sendo, respectivamente, o movimento de translação e rotação. Em que $\mathbf{v}_i$ e ω_i são as velocidades translacional e angular da partícula i , de massa m_i e tensor de inércia $\mathbf{I}_i$. O movimento translacional da partícula é normalmente governado pela força de contato $\mathbf{F}_i^C$, pela força gravitacional $m_i \mathbf{g}$ e pela força de interação fluido-partícula $\mathbf{F}_i^{fP}$, caso haja um meio fluido no sistema particulado (27, 28). Além disso, também há as leis de força-deslocamento que calculam forças adicionais originadas nas interações devido ao contato entre os discos à cada passo da simulação, as quais são as forças normal e as forças cisalhantes dadas, respectivamente, pelas equações a seguir

$$\Delta F_n = k_n \Delta n = k_n \{(\dot{x}_i - \dot{y}_i) e_i\} \Delta t \quad (2.2.3)$$

$$\Delta F_s = k_s \Delta s = k_s \{(\dot{x}_i - \dot{y}_i) t_i - (\dot{\theta}_{(x)} R_{(x)} + \dot{\theta}_{(y)} R_{(y)})\} \Delta t \quad (2.2.4)$$

sendo, k_n , a rigidez normal, k_s , a rigidez de cisalhamento, e_i , o vetor unitário normal ao contato, t_i , o vetor unitário tangencial, obtido através da rotação de e_i em 90° no sentido horário, e Δt o passo de tempo (27). A energia no modelo pode ser dissipada através da fricção, do amortecimento de contato. O uso do amortecimento é essencial para que o conjunto granular consiga atingir um estado de equilíbrio. Sem esses amortecimentos, o sistema não seria capaz de alcançar o equilíbrio exato, embora, na prática, as oscilações possam ser minimizadas reduzindo-se a velocidade de carregamento aplicada. O amortecimento de fricção ocorre em qualquer contato quando o valor absoluto de força cisalhante é máximo, dado pelo análogo à equação 2.1.3, $\Delta F_s = F_n \tan \phi_n + c$ enquanto o amortecimento global atua como um fator a mais nas equações da segunda lei de Newton apresentadas no início da seção (27).

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo, são descritos os procedimentos experimentais e os materiais utilizados para desenvolver este trabalho. A escolha dos métodos e materiais foi fundamentada por diversos trabalhos da literatura mencionados anteriormente e que também forneceram um caminho claro e coerente para obtermos resultados precisos e replicáveis.

3.1 Materiais

3.1.1 Sistema Granular

Como sistema granular, foi escolhido um material controlado e simples. Grãos de vidro são adequados devido seu formato regular, preço mais acessível e fácil reprodutibilidade experimental, e, por isso, são comumente encontrados na literatura em diversos trabalhos, como Lajeunesse, Monnier e Homsy (55), Balmforth e Kerswell (56), Cabrera e Estrada (59) e Chupin *et al.* (60). Cada grão do nosso sistema granular, conforme na figura 3.1.1, dispõe de um tamanho médio de $(2,66 \pm 0,04)$ mm.

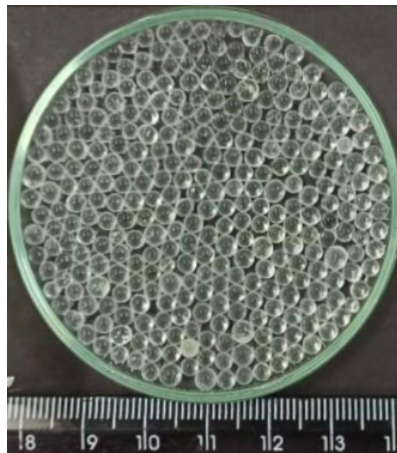


Figura 3.1.1 – Amostra de Grãos de Vidro. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.2 Experimento do Colapso Granular em Canal

Os experimentos de colapso granular foram realizados em uma caixa de vidro com dimensões de 80 cm de comprimento, 20 cm de largura e 20 cm de altura. A caixa possui um compartimento com uma parede de vidro móvel, permitindo a formação de uma coluna granular com 10 cm de comprimento, 18 cm de largura e 20 cm de altura, com uma capacidade de aproximadamente 3,5 litros para acomodar o sistema granular, conforme mostrado na figura 3.1.2.

Como visto anteriormente no capítulo 2.1, o alcance dos fluxos granulares apresenta dois regimes a partir de um determinado valor de transição a_0 . Para o nosso caso, os fluxos granulares gerados em geometria canalizada, conforme Lajeunesse, Mangeney-Castelnau e Vilotte (70), têm o seu valor de transição a_0 próximo à 3, o que corresponderia a colunas granulares com altura de 30 cm. Sendo assim, devido a dois fatores, neste trabalho não esperamos visualizar o regime para $a > a_0$, conforme descrito pela equação 2.1.14. A capacidade da coluna granular feita pela caixa de vidro, figura 3.1.2, suporta até no máximo um aspect ratio de 2 e não houve um volume de grãos de vidro o suficiente para capturar altos valores de aspect ratios de modo que iremos encontrar somente o caráter linear dos colapsos granulares descritos pela equação 2.1.14.



Figura 3.1.2 – Caixa de vidro. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2 Procedimentos

3.2.1 Alinhamento da caixa de vidro

Conferir, com o auxílio de uma bolha de nível, se a caixa de vidro está bem alinhada e não terá algum ponto de preferência para o escoamento dos materiais granulares, e corrigir caso esteja e posiciona-lá sobre uma malha quadriculada, como pode ser visualizada mais claramente pela figura 3.2.3.



Figura 3.2.1 – Caixa de vidro alinhada. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.2 Preencher a coluna granular

As colunas granulares foram preenchidas em volumes iguais de aproximadamente 178 ml a fim de realizar passos de 1 cm de altura a cada medida, ou seja, pela equação 2.1.12, equivalente a 0,1 de aspect ratio. Para o caso molhado, adicionamos, para cada medida, uma umidade (w) determinada por

$$w = \frac{M_a}{M_g} \quad (3.2.1)$$

adicionamos M_a , massa de água, e M_g , massa de grãos, em um recipiente separado e muito bem agitados por um minuto, conforme realizado por Richefeu, Youssoufi e Radjaï (44).

3.2.3 Nivelamento da coluna granular

O topo da coluna granular é sempre nivelado e padronizado para não haver um fluxo granular com posição ou direção de preferência após seu colapso.

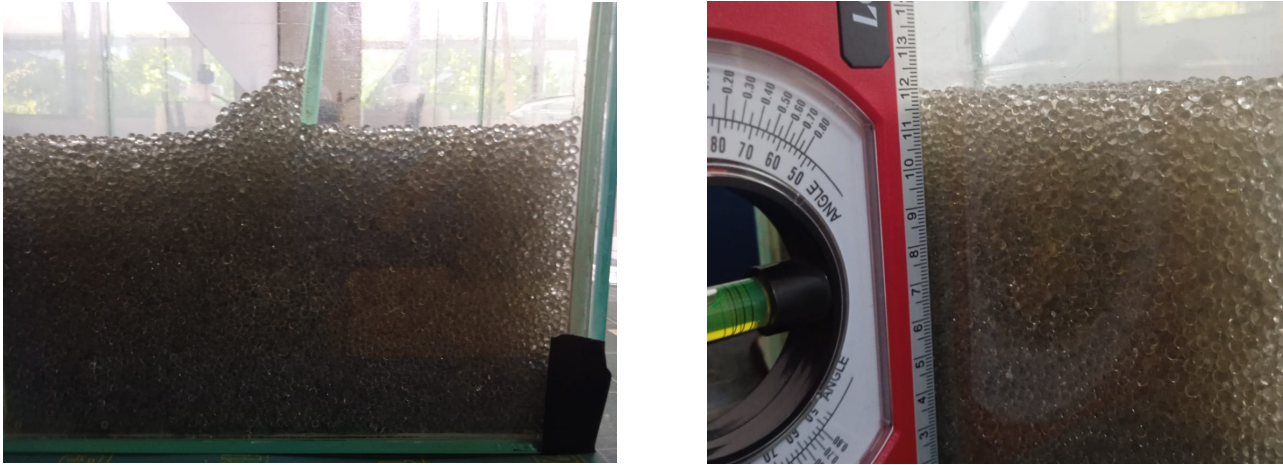


Figura 3.2.2 – Nivelamento do topo da coluna granular (a) e medida da altura da coluna granular (b). Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.4 Colapso e alcance granular

O compartimento da coluna granular é liberado e, dessa maneira, o colapso da coluna granular ocorre em um fluxo que se deposita na base do canal com uma determinada morfologia. A figura 3.2.3 pode ser separada em duas regiões: a região de grãos acumulados; região inferior onde os grãos estão se empilhando, e uma região de grãos isolados, a região superior da imagem, onde os grãos se isolam e, portanto, a base do canal se torna mais nítida. Assim, para determinar o alcance do fluxo, é necessário excluir as partículas que supostamente rolaram pela base do canal e, portanto, não entraram em repouso após o colapso granular. Os critérios para destacar os grãos no limiar do alcance foram excluir os grãos ou grupos de grãos isolados, considerar somente as partículas que, pelo menos estão, em contato com as demais partículas empilhadas e determinar uma fileira de partículas em contato de um lado ao outro do canal. Dessa forma, uma “corrente” de partículas irá formar o limite do alcance granular, conforme os grãos destacados na figura 3.2.3. Para realizar a análise a partir das figuras, foi utilizado o auxílio do automeris.io, uma plataforma na web que auxilia na extração de dados de gráficos, imagens e plotagens. Em que, a partir de uma calibração dos eixos cartesianos dentro da própria figura, podemos obter a posição de cada grão.

3.2.5 Simulação

Simulações de colapsos granulares semelhantes aos experimentos, com as mesmas condições e dimensões, ou seja, em escala 1:1 foram replicadas por Carvalho (14) através do DEM, conforme a figura 3.2.4, a fim de realizar medidas de alcance em função do aspect ratio dos grãos simulados. Portanto, os colapsos granulares em geometria de canal simulados têm seu canal com as mesmas geometrias apresentadas na seção 3.1 e grãos de vidro com mesmo tamanho, densidade e parâmetros mecânicos que os grãos reais. Para simular os grãos de vidro foram utilizados os dados da tabela 1. Nesta etapa, a simulação é calibrada a partir da escolha de um valor para o parâmetro amortecimento que melhor apresente um alcance próximo ao

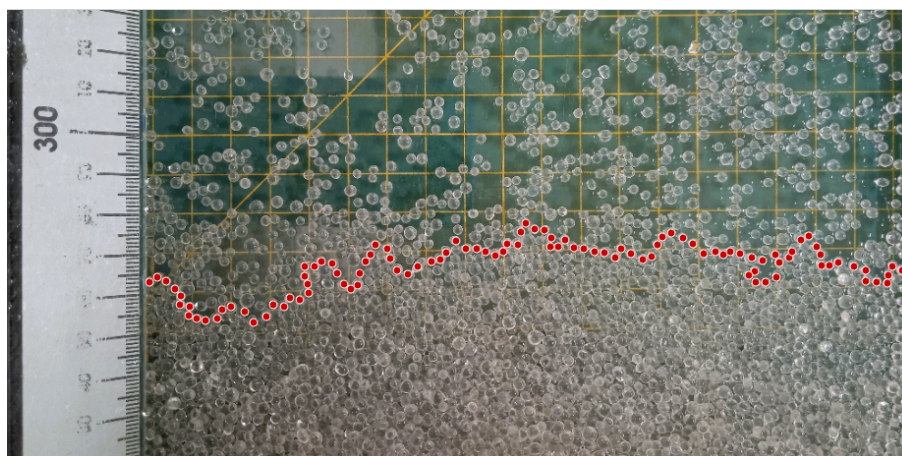


Figura 3.2.3 – Limite do alcance granular destacado pelos grãos de vidro em vermelho. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Raio médio	$(1,37 \pm 0,45) \text{ mm}$
Ângulo de atrito interno (71)	$29,5^\circ$
Ângulo de repouso	$(24,8 \pm 0,8)^\circ$
Densidade	$(2469 \pm 10) \text{ kg/m}^3$
Módulo de Young (71)	65 GPa
Coefficiente de Poisson (72)	0,245

Tabela 1 – Parâmetros grãos de vidro nas simulações. Fonte: Carvalho (14).

medidos nos experimentos. Para esse valor de amortecimento encontrado, a simulação é reproduzida para diferentes aspect ratios da mesma forma que foi feito com os experimentos (14) a fim de capturar os resultados mais próximos aos encontrados nos experimentos.

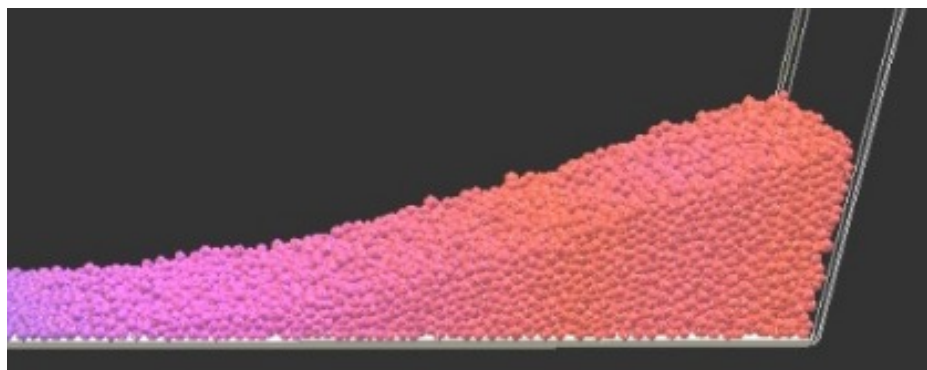


Figura 3.2.4 – Simulação do colapso granular em geometria canalizada. Fonte: Carvalho (14).

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os dados obtidos a partir dos experimentos ou simulações realizados ao longo deste trabalho. Nesta seção, serão analisados os comportamentos observados nos sistemas granulares seco e úmido, evidenciando as diferenças decorrentes da presença de forças coesivas associadas às pontes capilares. Em seguida, os resultados experimentais em caso seco são comparados com aqueles obtidos numericamente, com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo em reproduzir o alcance atingido pelos experimentos. Por meio dessa análise, busca-se compreender a influência das interações coesivas na dinâmica do material granular e verificar a consistência da metodologia empregada na representação dos fenômenos observados.

4.1 Colapso Granular Seco

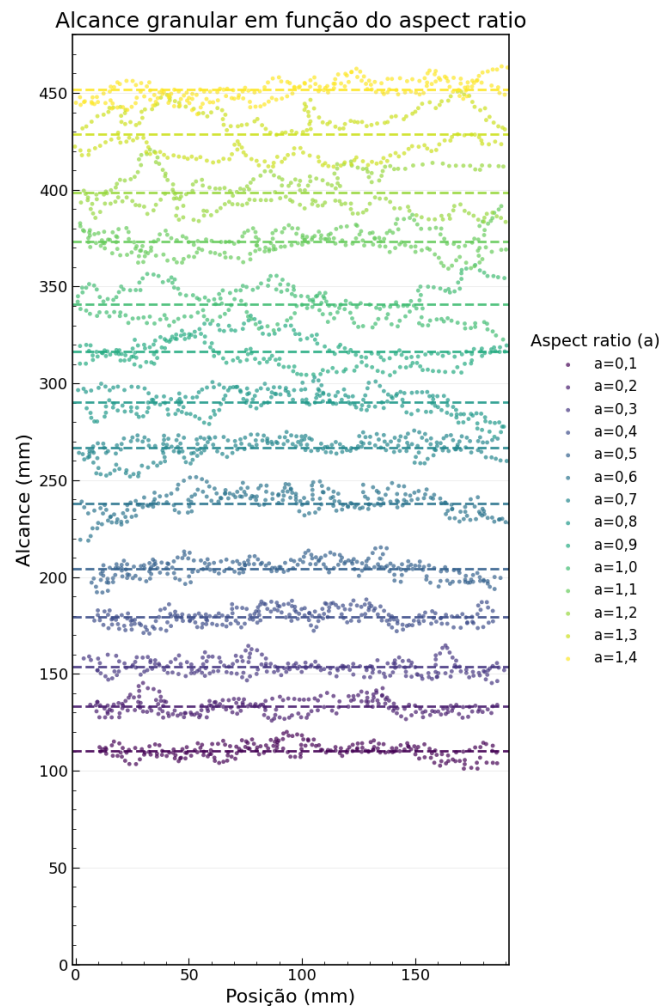


Figura 4.1.1 – Comparação dos alcances de colapsos granulares secos em geometria canalizada com seus respectivos aspect ratios. Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na figura 4.1.1, é destacado a posição dos grãos de vidro que compõem o alcance gerado pelo colapso granular em condição seca para diferentes alturas de coluna granular na caixa de vidro. Para o resultado de alcance de cada aspect ratio

há uma reta tracejada de mesma cor representando a média do valor de alcance atingido pelas partículas. Portanto, são dados brutos que podemos observar o caráter linear do alcance granular, conforme esperado e destacado pela literatura em trabalhos, como Li *et al.* (54) e N. Nguyen, H. Bui e G. Nguyen (57), devido aos valores de alcance médio terem saltos próximos de (26 ± 7) mm a medida que coluna granular cresce em 10 mm. Já a figura 4.1.2 apresenta os mesmos dados apresentados na figura 4.1.1, porém nela os dados foram expressos em um gráfico do alcance normalizado em função do aspect ratio, conforme as equações 2.1.13 e 2.1.12, respectivamente, e como normalmente é realizado na literatura.

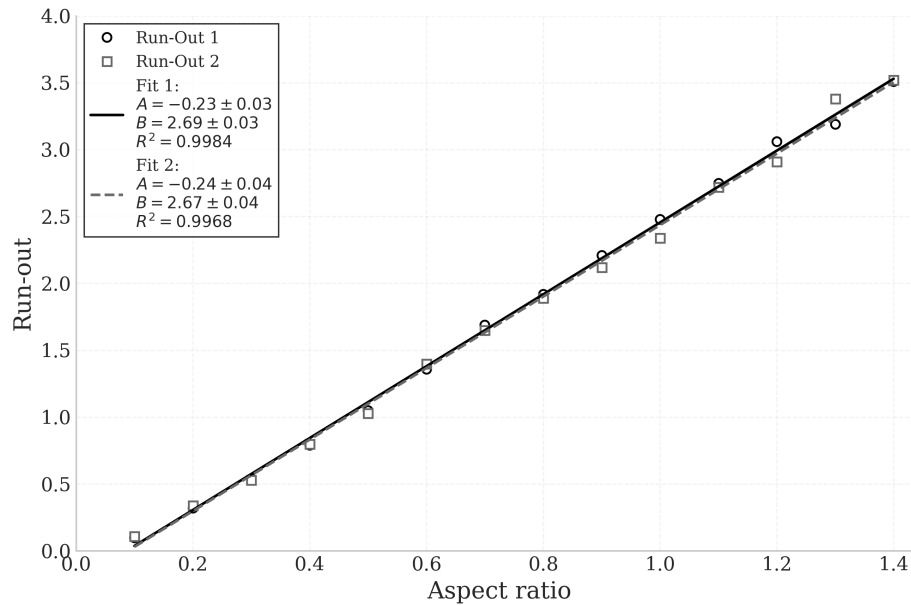


Figura 4.1.2 – Colapsos granulares secos realizados. Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na figura 4.1.2, o comportamento linear previsto pela literatura e determinado pela equação 2.1.14 é mais claro devido ao comportamento linear expresso pelos dados de alcance obtidos. É possível observar também que os dados do run-out 1 e run-out 2 concordam muito bem ao analisarmos o ajuste linear de ambos. Portanto, de acordo com a literatura, o comportamento linear para esses materiais e a montagem experimental utilizada pode ser dado por

$$\alpha_1 = 2,68 \pm 0,01 \quad (4.1.1)$$

$$\beta_1 = -0,23 \pm 0,01 \quad (4.1.2)$$

resultando para o alcance normalizado a seguinte relação

$$R^* = (2,68 \pm 0,01)a - (0,23 \pm 0,01) \quad (4.1.3)$$

A partir da lei de potência expressa pela equação 2.1.16 é possível realizar uma regressão não linear dos dados encontrados e verificar a influência das paredes do canal no alcance final do sistema granular ao determinar os valores de γ e α . Dessa forma, encontramos que

$$\gamma = 2,42 \pm 0,02 \quad (4.1.4)$$

$$\alpha = 1,16 \pm 0,03 \quad (4.1.5)$$

Segundo Balmforth e Kerswell (56), em canais mais estreitos, os valores de aspect ratios menores que 3 já são capazes de encontrar o regime exponencial. No entanto, para o caso seco realizado neste trabalho, não houve influência do atrito com as paredes do canal, o que pode ser observado pelo valor α muito próximo de 1 determinando um comportamento linear dos dados.

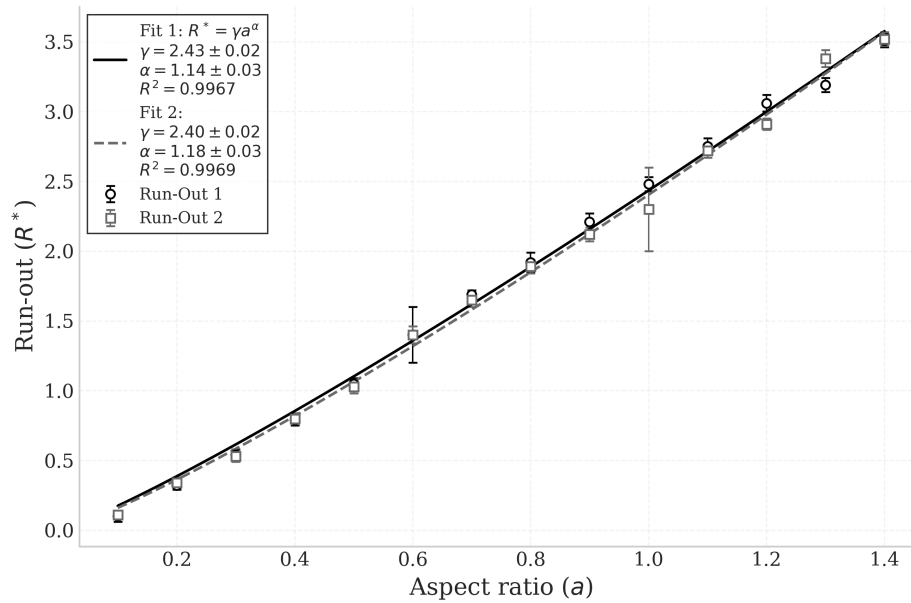


Figura 4.1.3 – Efeito de atrito das paredes do canal. Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.2 Colapso Granular Úmido

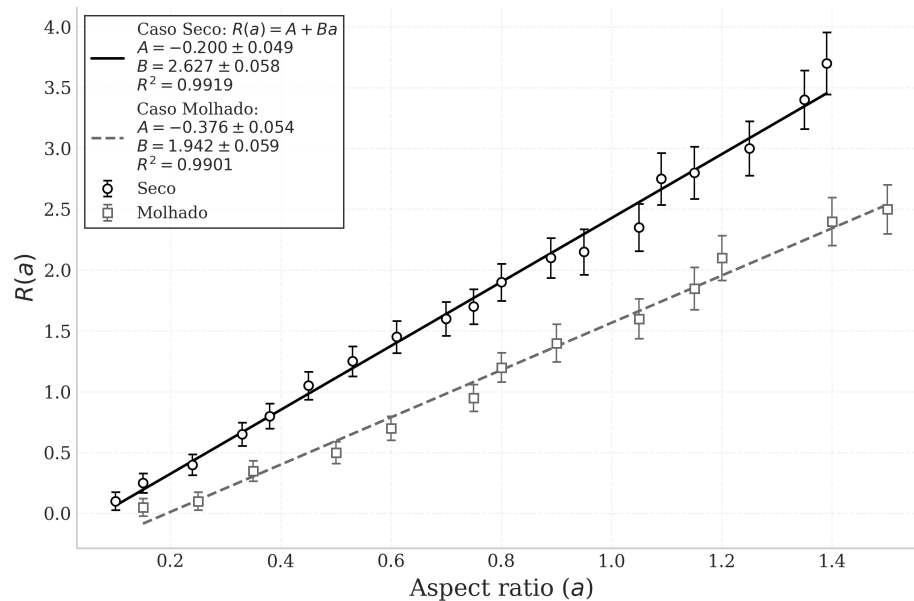


Figura 4.2.1 – Comparação entre os alcances normalizados dos colapsos granulares secos e dos molhados. Fonte: Elaborada pelo Autor.

Conforme a figura 4.2.1, podemos notar que o efeito de coesão causada pelas pontes líquidas entre os grãos afetou o resultado dos alcances, conforme o esperado. Isso, é claro, demonstra empiricamente a inviabilidade da equação 4.1.5 para o caso de colapsos granulares úmidos. Para o caso molhado da figura 4.2.1, a umidade utilizada foi a de um valor dentro do caso da fase completamente molhada determinada por V. Richefeu, M. Youssoufi e Radjaï (44) para sistemas granulares compostos de grãos de vidro e, portanto, está no caso de alcance saturado demonstrado na figura 4.2.2. Sendo assim, o alcance normalizado saturado pode ser determinado pelos valores de coeficiente angular e linear, respectivamente

$$\alpha_1 = 1,94 \pm 0,06 \quad (4.2.1)$$

$$\beta_1 = 0,38 \pm 0,05 \quad (4.2.2)$$

Com o alcance normalizado dado por

$$R^* = (1,94 \pm 0,06)a - (0,38 \pm 0,05) \quad (4.2.3)$$

Assim, as forças coesivas entre os grãos reduziram o alcance final consideravelmente, essa redução pode ser melhor visualizada a partir da análise no gráfico 4.2.2.

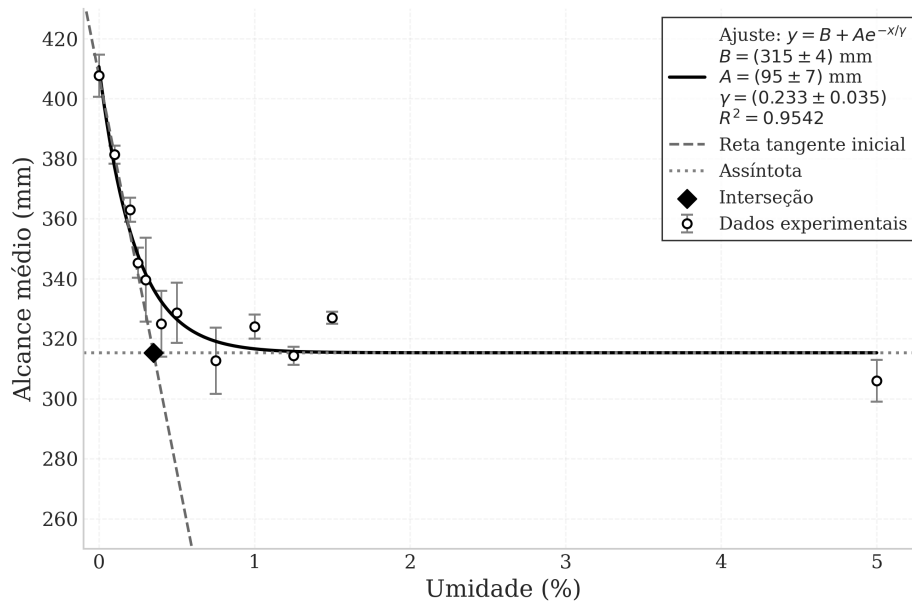


Figura 4.2.2 – Colapsos granulares com aspect ratio de 1,3 variando a umidade. Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na figura 4.2.2, foram realizados colunas granulares com altura de 13 cm, ou seja, aspect ratio de 1,3 com diversas umidades diferentes e, dessa forma, foi observado como o alcance varia com diferentes umidades. Por esse método, foi observado uma mudança abrupta no alcance do fluxo para pequenos valores percentuais de umidade, o que está de acordo com a literatura. Os efeitos de coesão capilar são mais intensos em pequenas quantidades de água e depois seguido de uma saturação no alcance destacada por assíntota horizontal com um valor de aproximadamente (315 ± 4) mm. Isso demonstra que o efeito de umidade no alcance granular tem dois comportamentos, como expresso pelas retas da figura 4.2.2. A partir de uma reta que determina o primeiro comportamento e a assíntota, podemos encontrar o ponto em que o alcance granular satura devido sua umidade intersticial, o qual é de aproximadamente 0,35 %. No caso úmido, foi observada uma maior influência do atrito com as paredes do canal no alcance devido ao aumento da coesão capilar com as paredes do canal.

4.3 Validação das simulações

A comparação dos resultados dos alcances normalizados atingidos em função do aspect ratio pelos experimentos com os simulados é representada na figura 4.3.1. As retas construídas pelo ajuste linear dos dados coletados experimentalmente e computacionalmente demonstram uma boa concordância demonstrando que a simulação é capaz de fazer uma boa representatividade do alcance de fluxos granulares.

Através de uma análise mais minuciosa da figura 4.3.1, de fato, os resultados entre experimento e simulação discordam para os valores mais altos e mais baixos de aspect ratio, porém, vale destacar, que o resultado da simulação tem um comportamento

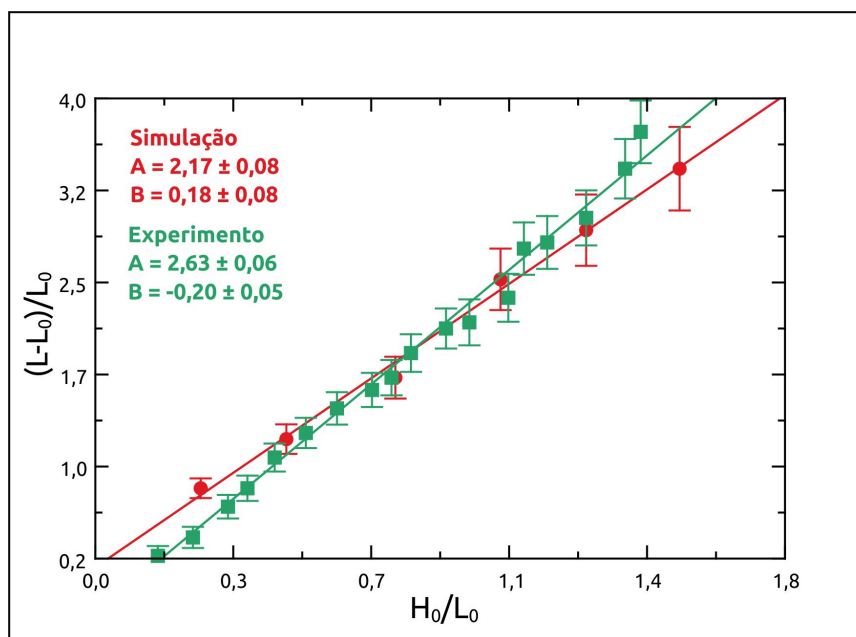


Figura 4.3.1 – Comparação entre os alcances dos colapsos granulares em geometria canalizada. Fonte: Carvalho (14).

linear e, além disso, estar próximo do experimental para o valor de amortecimento escolhido, nos demonstra que o modelo computacional desenvolvido captura bem o comportamento linear e é capaz de determinar o alcance de fluxos granulares para o experimento. No entanto, isso não limita seu potencial e sim demonstra a sua capacidade de modelar o alcance de fluxos granulares em situações diversas principalmente por meio de técnicas de calibração e validação mais rigorosas. Portanto, ao menos para experimentos de colapso granular em geometria canalizada dentro do regime de comportamento linear do alcance normalizado, a modelagem computacional determinou bem o alcance granular.

Capítulo 5

Conclusões

O comportamento dos fluxos granulares avaliados pelos experimentos de colapso granulares em geometria canalizada, trouxeram as seguintes conclusões

Os colapsos de colunas granulares secas realizados representaram o comportamento linear esperado, conforme determinado pela literatura, para aspect ratios abaixo de 3, devido aos valores de alcance granular saltarem (26 ± 7) mm a medida que coluna granular cresce 10 mm. Esse alcance pode ser determinado pela equação do alcance normalizado em função do aspect ratio $R^* = (2,68 \pm 0,01)a - (0,23 \pm 0,01)$.

A lei de potência $R^* = \gamma a^\alpha$ tem seus parâmetros com valores de $\gamma = 2,42 \pm 0,02$ e $\alpha = 1,16 \pm 0,03$. Esses valores concordam bem com os valores encontrados por Balmforth e Kerswell (56), o qual é um valor de $\alpha \approx 0,9 \pm 0,1$ para canais com maiores larguras. Isso ocorre devido a montagem e materiais usados serem similares. Balmforth e Kerswell (56) utilizou grãos de vidro com tamanho de 3 mm e um canal com largura de 20 cm, mesmas medidas utilizadas neste trabalho.

A influência da coesão capilar no alcance do sistema granular foi comprovada quantitativamente, conforme esperado e apresentado pela literatura. Os alcances atingiram um valor próximo de $R^* = (315 \pm 4)$ mm a partir de um valor de umidade, determinada pelo ponto de inflexão da curva apresentada pela figura 4.2.2, de 0,35%, além de uma diminuição no alcance granular nas regiões laterais do canal devido à capilaridade presente em maiores níveis de coesão.

A comparação entre resultados experimentais e simulados demonstrou concordância quantitativa entre os coeficientes dos ajustes realizados e reprodução adequada do regime linear do alcance normalizado. Esses resultados confirmam a consistência da calibração dos parâmetros, validando a abordagem numérica como ferramenta preditiva para o alcance de fluxos granulares canalizados.

5.0.1 Trabalhos futuros

Como perspectivas para trabalhos futuros, a seguir algumas possibilidades de continuidade e aprofundamento das investigações desenvolvidas nesta pesquisa.

- Desenvolver um mecanismo de dissipação de energia mais representativo para as simulações granulares, a fim de incorporar os efeitos da umidade e reduzir a dependência do parâmetro de amortecimento empregado no modelo atual;
- Realizar experimentos de colapso granular utilizando um compartimento com porta giratória, conforme a configuração experimental empregada por Balmforth e Kerswell (56). Essa modificação retira a influência da porta sobre o alcance atingido pelo colapso granular e, dessa forma, se obtém um experimento mais controlado.

Referências

- 1 VILELA, I. Morro da força, em ouro preto, apresenta risco iminente de deslizamento. *Agência Primaz de Comunicação*, 2023. Disponível em: <<https://www.agenciaprimaz.com.br/2023/01/08/morro-da-forca-ouro-preto/>>. Acesso em: 4 de junho de 2024. 7, 9
- 2 AZEVEDO, F. Prejuízos com bloqueios por deslizamentos chegam a 60 mil reais por dia. *Folha de Londrina*, 2022. Disponível em: <<https://www.folhadelondrina.com.br/economia/prejuizos-com-bloqueios-por-deslizamento-chegam-a-r-60-mi-por-dia-3225837e.html?d=1>>. Acesso em: 4 de junho de 2024. 7
- 3 KIRSCHBAUM, D.; STANLEY, T.; ZHOU, Y. Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, Elsevier, v. 249, p. 4–15, 2015. 7, 8, 9
- 4 KIRSCHBAUM, D. B. et al. Spatial and temporal analysis of global landslide reporting using a decade of the global landslide catalog. *Sustainability*, MDPI, v. 15, n. 4, p. 3323, 2023. 7, 8, 9
- 5 STANLEY, T.; KIRSCHBAUM, D. B. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Natural hazards*, Springer, v. 87, p. 145–164, 2017. 7, 8, 9
- 6 FROUDE, M. J.; PETLEY, D. N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v. 18, p. 2161—2181, 2018. 7, 9
- 7 PETLEY, D. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, Geological Society of America, v. 40, n. 10, p. 927–930, 2012. 7, 8, 9
- 8 IBGE. *Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação*. Rio de Janeiro: Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2019. 7, 9
- 9 PRESS, F. et al. *Para Entender a Terra*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 8
- 10 GUZZETTI, F. Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering geology*, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 89–107, 2000. 8
- 11 MCTI e Cemaden lançam o Sistema GeoRisk para monitoramento e previsão de deslizamentos de terra. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/02/mcti-e-cemaden-lancam-o-sistema-georisk-para-monitoramento-e-previsao-de-deslizamentos-de-terra>>. Acesso em: 25 de abril de 2025. 8
- 12 BRITO, L. A.; SOARES, Á. M. d. S.; NAZARI, B. Vibração: fonte de incômodo à população e de danos às edificações no meio urbano. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 13, n. 1, p. 129–141, 2013. 8
- 13 COELHO-NETTO, A. L. et al. Landslide susceptibility in a mountainous geoecosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The role of morphometric subdivision of the terrain. *Geomorphology*, Elsevier, v. 87, n. 3, p. 120–131, 2007. 9
- 14 CARVALHO, G. M. *MAPEAMENTO DE ALCANCE DE RUPTURA EM TALUDES: SIMULAÇÕES DE MECÂNICA GRANULAR*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2025. 10, 27, 28, 33
- 15 ANDREOTTI, B.; FORTERRE, Y.; POULIQUEN, O. *Granular Media: Between fluid and solid*. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 9, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 21
- 16 TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. *Theoretical Soil Mechanics*. 3. ed. Sacramento: JOHN WILEY AND SONS, 1940. 9, 18
- 17 RANKINE, W. M. On the stability of loose earth. *Proceedings of the Royal Society of London*, JSTOR, p. 9–27, 1856. 9
- 18 REYNOLDS, O. Lxvii. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. with experimental illustrations. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Taylor & Francis, v. 20, n. 127, p. 469–481, 1885. 9
- 19 SOKOLOVSKII, V. V. *Statics of granular media*. Moscow: Fizmatgiz, 1965. 10

- 20 OSHIMA, N. Asymmetrical stress tensor and its application to granular medium. In: *Proceedings of the 3rd Japan National Congress for Applied Mechanics*. Tokyo, Japan: Japan National Committee for Theoretical and Applied Mechanics, 1953. p. 77–83. 10
- 21 OSHIMA, N. Dynamics of granular media. *Memoirs of the unifying study of the basic problems in engineering science by means of geometry*, v. 1, p. 111–120, 1955. 10
- 22 GOODMAN, M.; COWIN, S. A continuum theory for granular materials. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, Springer, v. 44, n. 4, p. 249–266, 1972. 10, 11
- 23 SAVAGE, S. B. Gravity flow of cohesionless granular materials in chutes and channels. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 92, n. 1, p. 53–96, 1979. 10, 11
- 24 KANATANI, K.-i. A continuum theory for the flow of granular materials. *Theoretical and Applied Mechanics*, v. 27, p. 571–578, 1979. 10, 11
- 25 KANATANI, K.-I. A micropolar continuum theory for the flow of granular materials. *International Journal of Engineering Science*, Elsevier, v. 17, n. 4, p. 419–432, 1979. 10, 11
- 26 KANATANI, K.-i. A continuum theory for the flow of granular materials (ii). *Theoretical and Applied Mechanics*, v. 28, p. 485–492, 1980. 10, 11
- 27 CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. A discrete numerical model for granular assemblies. *geotechnique*, Thomas Telford Ltd, v. 29, n. 1, p. 47–65, 1979. 11, 24
- 28 GUO, Y.; CURTIS, J. S. Discrete element method simulations for complex granular flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Annual Reviews, v. 47, n. 1, p. 21–46, 2015. 11, 24
- 29 MEHTA, A. *Granular Physics*. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 11
- 30 BAK, P.; TANG, C.; WIESENFELD, K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. *The Physical Review Letters*, The American Physical Society, v. 59, n. 4, p. 381–385, 1987. 11
- 31 MEHTA, A. *Granular Matter: An interdisciplinary approach*. 1. ed. New York: Springer-Verlag, 1994. 11
- 32 GOLYK, V. A. Self-organized criticality. *Projects MIT*, 2012. 11
- 33 GERSHENSON, C. Self-organizing systems: what, how, and why? *npj Complexity*, Nature Publishing Group UK London, v. 2, n. 1, p. 10, 2025. 11
- 34 GLERIA, I.; MATSUSHITA, R.; SILVA, S. D. Sistemas complexos, criticalidade e leis de potência. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 26, p. 99–108, 2004. 11
- 35 JOP, P.; FORTERRE, Y.; POULIQUEN, O. Flows of dense granular media. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008. 11, 18, 21
- 36 POULIQUEN, O. Granular flows. In: EDP SCIENCES. *E3S Web of Conferences*. Marseille, 18 august 2023. v. 415. Disponível em: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/52/e3sconf_dfhm82023_01019/e3sconf_dfhm82023_01019.html. Acesso em: 02 de agosto de 2024. 11
- 37 JOP, P.; FORTERRE, Y.; POULIQUEN, O. A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 441, n. 7094, p. 727–730, 2006. 11, 12, 20, 21
- 38 JAEGER, H. M.; NAGEL, S. R. Physics of the granular state. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 255, n. 5051, p. 1523–1531, 1992. 11
- 39 JAEGER, H. M.; NAGEL, S. R.; BEHRINGER, R. P. Granular solids, liquids, and gases. *Reviews of modern physics*, APS, v. 68, n. 4, p. 1259, 1996. 11
- 40 CAMPBELL, C. S. et al. Rapid granular flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 22, n. 1, p. 57–90, 1990. 11
- 41 DURAN, J. *Sands, Powders, and Grains: An introduction to the physics of granular materials*. 1. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2000. 11

- 42 DURAN, J. Deformation of the packing: Static and dynamic arching effect in granular materials. In: HERRMANN, H. J.; LUDING, S. (Ed.). *Physics of Dry Granular Media: 350*. 1. ed. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 1998. cap. 2.2, p. 197–217. 11
- 43 LIAN, G.; THORNTON, C.; ADAMS, M. J. A theoretical study of the liquid bridge forces between two rigid spherical bodies. *Journal of colloid and interface science*, Elsevier, v. 161, p. 138–147, 1993. 12, 15, 16
- 44 RICHEFEU, V.; YOUSOUFI, M. S. E.; RADJAI, F. Shear strength properties of wet granular materials. *Physical Review*, 2006. 12, 27, 31
- 45 GANS, A.; POULIQUEN, O.; NICOLAS, M. Cohesion-controlled granular material. *Physical Review E*, APS, v. 101, n. 3, p. 032904, 2020. 12
- 46 HORNBAKER, D. J. et al. What keeps sandcastles standing? *Nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 387, n. 6635, p. 765–765, 1997. 12
- 47 NOWAK, S.; SAMADANI, A.; KUDROLLI, A. Maximum angle of stability of a wet granular pile. *Nature physics*, Nature Publishing Group UK London, v. 1, n. 1, p. 50–52, 2005. 12
- 48 LOWRIE, W. *Fundamentals of Geophysics*. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 12
- 49 JOP, P.; FORTERRE, Y.; POULIQUEN, O. Crucial role of sidewalls in granular surface flows: consequences for the rheology. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 541, p. 167–192, 2005. 12, 20, 21, 22
- 50 GOLDBIRSH, I. Rapid granular flows. *Annual review of fluid mechanics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 35, n. 1, p. 267–293, 2003. 12
- 51 NEDDERMAN, R. Statics and kinematics of granular materials. *Cambridge University*, v. 11, 1992. 12
- 52 RADJAI, F. et al. Additive rheology of complex granular flows. *Nature Communications*, Annual Reviews, v. 11, n. 1476, 2020. 12
- 53 BLANTY, L.; GRAY, J.; GAUME, J. A critical state (i)-rheology model for cohesive granular flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 997, 2024. 12
- 54 LI, Y. et al. Effect of basal friction on granular column collapse. *Granular Matter*, Springer, v. 26, n. 3, p. 1–16, 2024. 12, 21, 22, 23, 30
- 55 LAJEUNESSE, E.; MONNIER, J.; HOMSY, G. Granular slumping on a horizontal surface. *Physics of fluids*, AIP Publishing, v. 17, n. 10, 2005. 12, 25
- 56 BALMFORTH, N. J.; KERSWELL, R. R. Granular collapse in two dimensions. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 538, p. 399–428, 2005. 12, 23, 25, 30, 34
- 57 NGUYEN, N. H.; BUI, H. H.; NGUYEN, G. D. Effects of material properties on the mobility of granular flow. *Granular Matter*, Springer, v. 22, n. 3, p. 59, 2020. 12, 22, 23, 30
- 58 ARTONI, R. et al. Collapse of quasi-two-dimensional wet granular columns. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, APS, v. 87, n. 3, p. 032205, 2013. 12, 21, 22
- 59 CABRERA, M.; ESTRADA, N. Granular column collapse: Analysis of grain-size effects. *Physical Review*, 2019. 12, 25
- 60 CHUPIN, L. et al. Pressure-dependent threshold in a granular flow: Numerical modeling and experimental validation. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Elsevier, v. 291, p. 104529, 2021. 12, 25
- 61 LARSSON, S. et al. The particle finite element method for transient granular material flow: modelling and validation. *Computational Particle Mechanics*, Springer, v. 8, p. 135–155, 2021. 12
- 62 MITARAI, N.; NORI, F. Wet granular materials. *Advances in Physics*, Taylor & Francis, v. 55, n. 1–2, p. 1–45, 2006. 14, 15, 16, 17
- 63 ZHU, H. P. et al. Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments. *Chemical engineering science*, Elsevier, v. 62, n. 13, p. 3378–3396, 2007. 15

- 64 RUMPF, H. The strength of granules and agglomerates. *Agglomeration*, Interscience, p. 379–418, 1962. 15
- 65 KRUPP, H. Particle adhesion theory and experiment. *Advan. Colloid Interface Sci.*, v. 1, p. 111–239, 1967. 15
- 66 RADJAI, F.; RICHEFEU, V. Bond anisotropy and cohesion of wet granular materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society Publishing, v. 367, n. 1909, p. 5123–5138, 2009. 15
- 67 PINTO, C. de S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 17, 18, 19, 20
- 68 AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. *Introdução à Mecânica das Rochas*. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2002. 18, 19, 21
- 69 DAS, B. M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6. ed. Sacramento: São Paulo: Thomson Learning, 2007. 18, 19
- 70 LAJEUNESSE, E.; MANGENEY-CASTELNAU, A.; VILOTTE, J. Spreading of a granular mass on a horizontal plane. *Physics of fluids*, American Institute of Physics, v. 16, n. 7, p. 2371–2381, 2004. 22, 25
- 71 XU, W. et al. Triaxial test on glass beads simulating coarse-grained soil. *Res. Cold Arid Reg.*, v. 14, n. 4, p. 274–280, 2022. ISSN 2097-1583. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2097158322000131>. 28
- 72 TANG, H. et al. Measurement of Restitution and Friction Coefficients for Granular Particles and Discrete Element Simulation for the Tests of Glass Beads. *Materials (Basel)*, v. 12, n. 19, p. 3170, sep 2019. ISSN 1996-1944. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/19/3170>. 28