

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1.

Importância e definição do problema

A modelagem de fenômenos naturais é importante para o desenvolvimento de um país. Os cientistas e técnicos ao terem maior conhecimento das ameaças naturais permitem o desenvolvimento de obras ou medidas de prevenção que garantam um menor impacto do evento, um melhor conhecimento sobre os setores mais vulneráveis a esses eventos e maior estabilidade financeira para os investidores externos ou internos contra perdas por desastres.

As corridas de massa são fenômenos imprevisíveis na sua ocorrência, rápidos e os de maior impacto econômico direto. A caracterização destes fenômenos tem sido considerada objeto de estudo especializado pela comunidade internacional por causa do pouco entendimento dos mecanismos de início e da dinâmica do movimento deste tipo de fluxo de massa. Além de que sua distribuição geográfica não é limitada aos países em desenvolvimento, estes se apresentam até nos grandes centros urbanos onde se têm um número grande de vidas expostas. Algumas medidas preventivas se têm promovido, mas em alguns casos estas ampliaram os impactos (rompimento de aterros ou barragens dissipadoras de energia). Atualmente, se está criando uma maior consciência na aleatoriedade da natureza e das formulações simplistas das modelagens na área geotécnica, em especial pela variação estatística dos parâmetros dos modelos no que se refere à convergência numérica dos mesmos, o que leva a ter uma grande gama de diferentes modelos segundo as preferências e habilidades matemáticas dos pesquisadores e o propósito dos usuários. Por outro lado, o avanço da tecnologia tem permitido realizar estudos mais realistas deste tipo de evento. A criação e adaptação de novas ferramentas numéricas e gráficas fazem o processo de gestão de risco contra corridas de massa mais eficaz e eficiente, mas uma adaptação errada pode provocar o mesmo desastre ou ampliar seus efeitos.

Sob esta perspectiva, este trabalho apresenta uma aplicação numérica da formulação lagrangiana para o movimento hidrodinâmico de partículas na modelagem de corridas de massa (especialmente de corridas de detritos) usando alguns algoritmos numéricos da dinâmica não-linear como o de Relaxação Dinâmica e computação gráfica. Utilizam-se formatos que podem ser usados junto com outras ferramentas clássicas da gestão de risco como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), criando assim uma ferramenta complementar a algumas metodologias existentes. O método numérico utilizado aqui (Método de Elementos Discretos, MED) é de recente uso na área da simulação de materiais geotécnicos, o qual vai ganhando maior popularidade por certas vantagens diante dos métodos numéricos tradicionais (Elementos Finitos, FEM; Diferencias Finitas, DFM; etc.), porém um não se mostra melhor do que os outros. Estes métodos parecem ser complementares entre si.

As aplicações aqui introduzidas são consideradas pioneiras na área da simulação de corridas de massa no Brasil assim como na Costa Rica, país da origem do autor. A importância futura para o desenvolvimento de pesquisas no Brasil e principalmente na região centro-americana é muito grande devido à frequência destes fenômenos, assim como de novas iniciativas na gestão de riscos naturais a nível regional. A falta deste tipo de metodologia aumenta ano a ano o risco associado às corridas de massa nas principais cidades latino-americanas. Cabe mencionar que esta ferramenta não tem espaço físico ou temporal definido, é uma ferramenta numérica criada para se adaptar à maioria das condições físicas de ocorrência dos fluxos que possam ser considerados como corridas de detritos principalmente.

1.1.1. *Importância na Região Latino-americana*

Ao longo do tempo, os países de América Latina e o Caribe têm tentado desenvolver-se dentro dos seus próprios problemas políticos e econômicos, acumulados desde os primeiros dias da colônia, indistintamente sejam estes de origem espanhola, inglesa, portuguesa ou francesa.

Nos últimos anos os desastres naturais tenham marcado um retrocesso pauta neste desenvolvimento, em alguns deles com maior força do que em outros, propiciando o atraso econômico nacional ou até regional. Deste modo, os problemas econômicos fundamentais da região estão diretamente ligados à vulnerabilidade diante das catástrofes naturais. Alguns desses eventos provocam além dos danos diretos (perdas de vidas, pessoas feridas e danos econômicos), outras conseqüências como prejuízos no PIB (Produto Interno Bruto), na balança comercial, no endividamento externo, no equilíbrio fiscal e nos índices de investimentos internos.

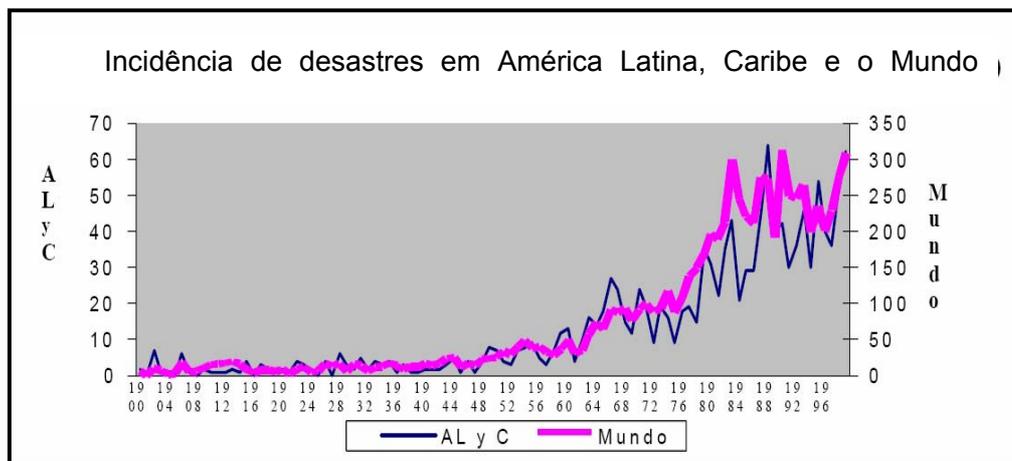


FIGURA 1.1- Evolução comparativa da freqüência de desastres na América Latina e o Caribe, e o Mundo no século passado ^[2].

Por isso, é importante que estes países comecem a adotar medidas de prevenção e de diminuição dos impactos dos desastres. Assim, organismos multilaterais como a Organização das Nações Unidas (ONU) e Organização dos Estados Americanos (OEA), têm organizado diferentes atividades a nível internacional (como a DIRDN, “Decênio Internacional para a Redução dos Desastres Naturais” na década de 90), relacionadas a prevenção e gestão dos riscos naturais para reduzir a forte tendência de subdesenvolvimento e desastres. Destas iniciativas surgiram grandes avanços sobre a caracterização da ameaça e da vulnerabilidade como os principais fatores do risco e a proposta de uma nova visão sobre a gestão dos riscos como parte complementar dos planos políticos dos países ^[1]. Mas também, ficou claro o acréscimo da freqüência dos desastres na região (ver FIGURA 1.1), o maior impacto direto e indireto nas economias e as

grandes deficiências acumuladas através dos tempos no conhecimento geral sobre o risco ^[2]

Por outro lado, no primeiro quinquênio deste século, tem-se visto os primeiros frutos dessas iniciativas no avanço do estudo preliminar das ameaças naturais e antropogênicas, assim como na determinação da vulnerabilidade dos aglomerados urbanos. Mas por outro lado, ainda prevalecem evidentes algumas falhas do modelo econômico tradicional, o fraco impacto da pesquisa no melhoramento do conhecimento dos fatores de risco e a falta de informação do público em geral sobre sua participação na gestão de riscos.

Recentemente, por desastres ocorridos na região, tem-se notado a falta de maior conhecimento nos mecanismos prévios à manifestação do fenômeno natural assim como da vulnerabilidade do meio urbano. A falta de modelagens físicas ou metodologias qualitativas menos simplistas tem levado a acreditar em prognósticos que resultaram muito conservadores e ajudaram a aumentar o impacto do desastre.

Um outro fator de consideração é o fato de como são manipuladas as estatísticas dos desastres, pois na região os terremotos, furacões e erupções vulcânicas aparecem como os maiores desastres quando na verdade sabe-se que muitas das vítimas destas eventualidades foram afetadas por “eventos secundários” ativados por fatores como a alta vibração do terreno, a saturação do solo, o derretimento de gelo e a erosão de encostas pela atividade humana prévia à manifestação do fenômeno natural ^[2]. Assim, os cientistas e técnicos têm procurado desenvolver melhores metodologias para entender estes processos e contribuir ao melhoramento da gestão de riscos.

1.2. Objetivos do trabalho

Os principais propósitos deste trabalho são descritos a seguir:

1.2.1.

Objetivo Geral

Fornecer uma ferramenta numérica para a análise bidimensional de corridas de massa, especialmente as denominadas fluxo de detritos com o uso do Método de Elementos Discretos (DEM).

1.2.2.

Objetivos Específicos

- Classificar e caracterizar os fenômenos de fluxos ou corridas de massa.
- Caracterizar os principais métodos numéricos utilizados nas modelagens de corridas de massa.
- Atualizar as rotinas sobre o Método de Elementos Discretos (DEM) descritas no programa SAND.
- Avaliar o uso de superfícies curvas linearizadas mediante algoritmos de interpolação cúbica *Spline* na corrida de massas.
- Caracterizar o conceito de Relaxação Dinâmica para solução de sistemas dinâmicos.
- Aplicar os conceitos de programação de objetos da linguagem C++ para a modelagem de corridas de massa.
- Aperfeiçoar as rotinas de procura de contatos entre partícula-partícula e partícula-paramento na procura de eficiência no tempo de corrida do programa.
- Avaliar a funcionalidade das rotinas implementadas no programa original com um caso de superfície irregular complexa.

1.3.

Alcance da Pesquisa

O presente trabalho parte da existência de um programa desenvolvido na PUC-Rio, inicialmente para aplicações na área da Geomecânica Computacional, especificamente para problemas de contacto aplicado na Mecânica de Rochas. Este programa está baseado no programa RBM desenvolvido por Cundall (1974). Mas, uma aplicação homóloga ao programa aqui utilizado foi desenvolvida em parceria com o CENPES/ PETROBRAS e o TECGRAF ^[3] para aplicações em produção de areia em poços de petróleo. Deste último, é que se realizam as principais modificações nas rotinas do programa para as aplicações na dinâmica do movimento bidimensional das corridas de massas.

Nos projetos mencionados anteriormente uma porção do material geotécnico era encaixotado para realizar a simulação. Trabalhou-se a uma escala reduzida onde o material simulado encontrava-se relativamente confinado por paramentos lineares ou segmentos de círculos (número pequeno de anteparos) e os deslocamentos das partículas eram pequenos. Este trabalho atualiza as rotinas existentes para conseguir usar um maior número de segmentos de anteparos e de partículas na simulação, tentando evitar o aumento do tempo de corrida do programa. Aliás, a massa simulada caracteriza-se por apresentar grandes deslocamentos e sem confinamento. Para conseguir este propósito, trabalha-se diretamente com as rotinas relacionadas à geração dos paramentos, malha inicial de partículas e determinação de contatos.

A partir destas modificações realiza-se uma pequena análise de sensibilidade dos outros parâmetros (como amortecimento, passo de tempo e rigidez) não alterados do programa original durante as corridas das simulações para confirmar suas validações para este tipo específico de eventos. Assim, pretende-se disponibilizar uma nova ferramenta para a simulação de corridas de massa.

Finalmente, leva-se a avaliar a ferramenta para o caso de uma superfície irregular complexa simulando condições reais vistas no campo.

Por outro lado, este trabalho incorpora uma breve recopilação bibliográfica sobre informação já existente no âmbito internacional no tocante à modelagem assim como da caracterização física destes eventos naturais cujas referências são limitadas no Brasil. Além do mais as terminologias, tipologias e classificações de estes eventos são comumente confundidas entre os estudiosos de diferentes áreas. A maioria dos estudos disponíveis apresenta diversos pontos de vista evidenciando a falta de um maior entendimento destes fenômenos e de consenso internacional na nomenclatura e critérios de classificação. Não se pretende impor nenhum ponto de vista neste aspecto no trabalho. Somente mostra-se os diversos contextos existentes para se ter consideração deles em futuros trabalhos relacionados a simulação, pois nenhum modelo numérico atual faz consideração da complexa realidade destes fenômenos.

1.3.1. Trabalhos Prévios

As ferramentas numéricas existentes são caracterizadas por dissertações anteriores disponíveis na biblioteca setorial de pós-graduação na PUC-Rio, especialmente as referentes a soluções de sistemas dinâmicos não-lineares em aplicações na Geotecnia com o Método de Relaxação Dinâmica ^{[4], [5], [6]}. Embora estes possam ficar em alguns aspectos por fora dos objetivos da pesquisa, recorre-se a monografias e artigos científicos de fácil acesso nos sites eletrônicos de jornais ou revistas técnico-científicas reconhecidas nas áreas de Geotecnia, Computação Gráfica e Análise Numérica. Este material é referenciado ao longo dos parágrafos dos capítulos seguintes.

Entre estes trabalhos destacam-se duas linhas tradicionais de pesquisa, os trabalhos sobre métodos numéricos sob o enfoque lagrangiano para o Método de Elementos Finitos (FEM) e para o Método dos Elementos Discretos (DEM). Sob estes enfoques têm-se criado escolas de pesquisadores das quais se podem mencionar algumas de suas principais tendências e especialidades na área.

Sobre DEM, os trabalhos mais destacados são os da escola italiana, tanto na área de simulação de condições de disparo e do movimento do fluxo propriamente dito como relações estatísticas para aplicações de gestão do risco associado às

corridas de massa bidimensionais [7], [10], [18], [26], [40], [48]. A técnica numérica mais usada nesta região é o Método de Celas Automatas. Mas é o trabalho de Calvetti [10] que faz referência a uma aplicação bidimensional com DEM para corridas de detritos e menciona outros métodos numéricos existentes e aplicados de forma geral na Europa. Este autor faz a simulação para um canal de inclinação constante, fazendo análise de sensibilidade do modelo para a variação de tamanho das partículas, principalmente na forma de deposição da massa, verificando que para partículas de menor tamanho a massa tende a se acumular na base do paramento inclinado, ou seja, simula o menor avance frontal da corrida comparado a simulação do mesmo volume com partículas de maior tamanho.

A escola canadense, por outro lado, tem-se dedicado mais aos métodos contínuos sob enfoque lagrangiano [35], [36], [37], [38]. Embora estes trabalhos sirvam de referência só para a simulação destes fenômenos para os objetivos desta pesquisa. Recentemente, tem-se evoluído aos problemas tridimensionais sobre superfícies irregulares. O trabalho desenvolvido por Hungr [37] é o mais representativo e chega até simulações tridimensionais sobre superfícies não-lineares. Porém, este enfoque não deixa de ser complexo na programação, denso na modelagem numérica e com certas limitações computacionais que o mesmo autor menciona nos seus artigos.

As escolas chinesa e japonesa talvez sejam as mais avançadas em simulações bi e tridimensionais sob enfoques de elementos finitos e aplicação de modelos reológicos complexos [9], [12], [23], [34], [47], [60] ou mais realistas segundo o avanço e entendimento físico do processo. O trabalho de Takahashi [12] talvez seja a melhor referência no estudo do comportamento reológico das corridas de detritos disponível para a comunidade internacional. Este autor propõe um modelo por camadas para simulações numéricas, o que ajuda a entender grandemente o fenômeno de segregação, o que é impossível de simular com FEM.

Recentemente, a comunidade internacional tem-se interessado em pesquisar mais nas aplicações do DEM, mas infelizmente não se tem tanta literatura disponível sobre o tema. A informação é limitada, e geralmente só estão disponíveis resultados finais das aplicações numéricas sem deixar claras hipóteses e valores dos parâmetros utilizados no modelo.

1.3.2.

Descrição Metodológica

De forma geral, a metodologia computacional de um processo simulado com DEM segue as seguintes etapas: geração da geometria e malha de elementos discretos, detecção de contatos, aplicação de leis físicas nos pontos de contatos e visualização do processo. Neste caso a geometria dos elementos é constante e representada por discos de uma unidade de profundidade.

Seguindo estas etapas foram feitas várias corridas com diversas configurações de parâmetros e variações nos valores dos parâmetros de entrada do modelo numérico. Entre todas as configurações foi selecionada uma como a padrão ou de comparação para as outras.

Primeiramente, para a malha inicial de partículas criou-se uma malha de 4022 discos com raio de 3,0 m em configuração densa, com densidade constante de $2,5t/m^3$. A distribuição densa de partículas permitiu a menor formação de espaços vazios e menor tempo de demora do processo. Usou-se o processo de sedimentação por camadas sucessivas para formar a massa inicial instável. A simulação da massa instável inicial acontece em duas etapas: sedimentação e densificação do material, como acontecem normalmente na natureza. Este processo é demorado e nele foram usadas combinações de parâmetros que facilitassem o processo (atrito nulo, rigidez de 10^4 N/m), pois a configuração espacial final de partículas é o único que interessa desta etapa.

Usaram-se configurações lineares normais assim como curvas spline cúbicas segmentadas para representar as diferentes configurações de parâmetros. A segmentação das curvas foi feita a partir de quatro a cinco segmentos lineares.

Para cada configuração foi extraído um perfil de profundidades para trinta pontos e um outro perfil de velocidade cada cinco ou sete pontos ao longo do comprimento da corrida. Estes pontos não são fixos, pois sua posição varia entre a primeira partícula em avanço da corrida e a última. Vários testes prévios à escolha final mostraram que alguns parâmetros deviam ser mudados por causa da escala da configuração a simular e do número envolvido de partículas e parâmetros. Assim

para cada configuração se variou um parâmetro enquanto que os outros ficaram constantes cujos valores corresponderam aos valores padrão.

Finalmente, são usadas curvas irregulares nos parâmetros como exemplos de aplicação e de avaliação da idoneidade do programa para simulação destes eventos que poderiam corresponder a casos generalizados que possam ser encontrados em campo. Em especial para simular certos mecanismos típicos do movimento da massa dos fluxos.

1.3.3.

Limitações da pesquisa

Fica evidente que ao se tratar de um programa computacional existe a limitante da capacidade para realizar o ciclo de cálculos numéricos num tempo adequado o qual se quer determinar durante o desenvolvimento da pesquisa, pois também se considera a existência de alguns algoritmos lógicos de programação que ajudam a otimizar tanto o tempo quanto a capacidade de armazenamento de dados.

A pesquisa se limita ao espaço bidimensional por enquanto, pois o desenvolvimento dos algoritmos em terceira dimensão requer maior tempo de teste e conhecimento de técnicas numéricas e de programação mais avançadas. O programa SAND pode ser tratado como um programa genérico que conforme surgem aplicações vão-se adicionando nele novas rotinas, aumentando a sua versatilidade e funcionalidade. Então, numa etapa inicial estas rotinas podem conviver sem problemas maiores, mas se sugere que numa etapa da evolução do programa seja feito um trabalho de otimização do programa tanto em uso de memória dinâmica para não ir perdendo eficiência cada vez que se adiciona uma rotina.

Este trabalho limita-se à criação da ferramenta numérica e a dar algumas sugestões sobre a sensibilidade de alguns dos parâmetros de entrada e da idoneidade do método para a simulação de corridas de detritos e de fenômenos similares. Por enquanto, os mesmos parâmetros (rigidez e amortecimento) do Método de Cundall não estão associados a parâmetros físicos reais, por isso não

podem ser facilmente comparados com métodos de Elementos Finitos e seus parâmetros.

No caso dos exemplos numéricos realiza-se só a corrida para simular o fenômeno sem fazer análises profundas qualitativas, pois se trata de uma análise bidimensional de teste da idoneidade numérica deste método. Esta ferramenta deve ser primeiramente aplicada em casos simples para ir conferindo e corrigindo suas limitações numéricas para logo avançar a aplicações mais complexas ou reais. Também não se requer de corroborações em campo de feições de corridas, pois o programa ainda está muito limitado para incorporá-las na análise. O programa só simula mecanismos do fenômeno dinâmico do movimento da massa de um fluxo.

1.4. Conteúdo

Este trabalho foi dividido em capítulos que permitissem um esclarecimento gradual dos conceitos envolvidos na simulação numérica de corridas de detritos.

No segundo capítulo, após apresentar as principais características físicas e taxonômicas das corridas de massa, assim como o esclarecimento da terminologia usada, são descritos alguns aspectos básicos dos modelos reológicos mais utilizados para a simulação destes eventos.

Apresentam-se no terceiro capítulo, de forma geral, os principais métodos numéricos utilizados na modelagem dinâmica de corridas de detritos. Após uma descrição do ciclo numérico do DEM, é introduzida a solução particular a estas equações dadas pela metodologia de Relaxação Dinâmica. Assim, apresenta-se a sistemática numérica do DEM dentro da modelagem proposta.

Também, neste mesmo capítulo são descritos os conceitos básicos para considerar grumos de partículas circulares como elementos discretos dentro da análise o que significa a incorporação da solução das equações do movimento para corpos rígidos. No seguinte capítulo, descreve-se o programa SAND e as modificações introduzidas para atingir os propósitos do trabalho. Na mesma

caracterização, mostram-se alguns algoritmos que foram usados para aperfeiçoar a capacidade do programa.

No quinto capítulo, mostra-se alguns resultados do programa SAND incluindo as suas novas modificações. No capítulo final são listadas as conclusões obtidas do estudo e sugestões para dar continuidade ao trabalho tanto na otimização de rotinas quanto a sua aplicação a outros problemas.