

## **CAPÍTULO 6**

---

# **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **6.1**

#### **Conclusões**

Uma vez provadas as rotinas implementadas e depois de se obter resultados para alguns casos específicos, pode-se dizer que a metodologia do DEM é idônea para a simulação de corridas de detritos. Este método permite simular algumas feições físicas das corridas de maneira simples e sem muito cálculo numérico complexo como é requerido em outras metodologias numéricas. A parte visual joga um papel muito importante neste ponto, pois ao partir do conceito de partícula fundamental o fenômeno deixa de ser visto de forma generalizada e podem-se apreciar algumas irregularidades que outros métodos não permitem como a segregação da massa, o efeito de fluidificação, o comportamento do material superficial nas mudanças bruscas de pendente assim como os movimentos relativos de um grupo de partículas respeito a outro. Nisto, diz-se que o método é considerado eficaz, pois com um algoritmo regido por leis físicas simples consegue-se simular feições de grande importância no estudo de corridas de detritos a um custo numérico relativamente baixo. Mas também neste ponto poderia ser mais eficiente respeito a outras metodologias numéricas que precisariam de programações complexas para conseguir realizar ditas simulações.

Por outro lado, os parâmetros de entrada do método não são variáveis complexas, mas podem apresentar confusão pelo fato de serem variáveis tomadas de modelos físicos simples muito utilizados em outras áreas da Engenharia e que neste caso, só têm significado para a convergência e estabilidade numérica do método. Isto faz que a calibração do modelo possa ser complicada e demorada em tempo de programação quanto de execução. Faltam maiores referências bibliográficas sobre intervalos de magnitude válidos para ditas variáveis (atrito, rigidez, frequência, coeficiente de amortecimento, entre outras).

Em especial, faltam correlações com variáveis do comportamento reológico (viscosidade principalmente) que é a metodologia mais estudada, aplicada e aceita para a simulação deste tipo de fenômenos físicos seguindo filosofias para médios contínuos e cujos resultados têm sido de grande difusão científica.

Porém, deve advertir-se que segundo os perfis de velocidades aqui obtidos (Vede FIGURA 5.5 e 5.6), a solução numérica proposta pela metodologia DEM pode entrar em posição com alguns dos supostos básicos dos modelos reológicos tradicionais. Como por exemplo, o fato da existência do fenômeno de segregação interna da massa móvel e a possibilidade de revezamento das partículas pelo qual poderia não ser válida uma comparação quantitativa entre os parâmetros de um método e o outro. Por outro lado, os modelos reológicos usam parâmetros diretamente associados a propriedades do material em quanto no DEM são só variáveis do modelo numérico.

Ainda com tudo isso, a aplicação neste trabalho do método do DEM demonstrou ser muito efetivo na simulação física das corridas para qualquer tipo de superfície de escoamento. Mas neste ponto, a implementação de superfícies linearizadas a partir de curvas spline cúbicas facilitou a idoneidade deste tipo de superfície no método ao produzir resultados mais concordantes com as descrições de campo e teóricas como as mencionadas por Lorenzini <sup>[7]</sup> e Cheng <sup>[9]</sup> independentemente dos parâmetros de entrada utilizados. Com o programa original ao tentar aumentar o número de parâmetros impactou negativamente no tempo de execução, pelo qual se programou uma rotina simples para reduzir dito impacto. Respeito ao estado original do programa SAND, pode-se dizer que este foi otimizado de certa forma, pois a rotina de procura de contatos reduziu quase em um terço o tempo de execução inicial e de vez permitiu ampliar o trecho de aplicação deste até agora conseguido na PUC-Rio.

Simulações pequenas e controladas permitiram avaliar as bondades dos parâmetros de entrada principalmente na simulação de feições físicas (profundidade, segregação) e cinemáticas (deslocamentos e velocidades). As principais variáveis do modelo como rigidez normal e tangencial, coeficientes de amortecimento, atrito e

parâmetros de amortecimento autolocal e global mostraram serem influentes segundo o tipo de feição a ser simulada.

Dentre elas a de maior importância é a fração do tempo crítico que leva rapidamente à estabilidade ou instabilidade o modelo. Neste ponto parece existir uma contradição técnica do método, pois para frações pequenas o método parece ficar mais estável e de vez aumenta significativamente o tempo de execução. Por isso recorre-se ao uso de algoritmos mais eficientes na procura de contatos. As outras variáveis têm as suas limitantes, mas algumas delas podem ser controladas variando dita fração de tempo. Este fato já tinha sido relatado pelo próprio Cundall <sup>[41], [44], [45]</sup>.

De forma geral, observou-se que a variação de alguns parâmetros parecia reproduzir algumas feições feitas pela variação de outros parâmetros. Entre eles cabe mencionar que a variação da razão de rigidezes apresentou tendências similares às produzidas pela variação proporcional inversa da frequência  $f_T$  ou à variação proporcional direta do atrito, principalmente no tipo de superfície da massa móvel e depositada, assim como as feições de segregação. Porém, cada uma destas configurações proporciona uma variação de velocidades distinta como era de esperar, pois como já se mencionou a velocidade está ligada ao comportamento reológico. Então se conclui que existe uma relação, ao menos qualitativa entre os parâmetros reológicos e do modelo DEM. Esta relação deve ser estudada, não é fácil, mas ajudaria a resolver algumas incongruências entre ambas as metodologias.

Por outro lado, as simulações mostraram o uso relevante do amortecimento autolocal do que o autoglobal. Ainda este último seja parametricamente mais simples do que o primeiro, durante a simulação este produziu inconveniências na simulação (deslocamentos descontrolados em algumas partículas), cuja solução impactou diretamente no tempo de execução do programa (como diminuir o valor da fração de tempo crítico), fazendo pouco efetivo o uso deste tipo de amortecimento para a esta simulação.

Então, diz-se que as rotinas implementadas ao programa original mostraram aumento na eficiência e eficácia deste relativamente. Ainda que fique claro que quando se aumenta o número de partículas e parâmetros em demasia estas já não

seriam tão eficientes, pois na bibliografia consultada como Müller <sup>[24]</sup>, Ferrez <sup>[56]</sup>, Munjiza <sup>[57]</sup>, Nezami <sup>[58]</sup> e Schaller <sup>[59]</sup>, fazem-se referência a outros métodos de procura de contatos e geração de malha de partículas mais eficientes e até simulando condições reais para grandes sistemas. Mas para chegar a este ponto precisa-se alta destreza na programação e computadores de alta tecnologia como para reduzir significativamente a sobrecarga de memória e o tempo de execução das simulações. Também cabe aclarar que esta é uma limitação geral da metodologia DEM. Para pensar em maiores aplicações a paralelização de processos e triangulação dinâmica são as referências mais citadas.

Por experiência do autor deste trabalho no uso de sistemas de informação geográfica e gestão de riscos, este considera possível e de grande idoneidade a implementação deste programa dentro de uma metodologia conjunta de planejamento urbano tradicional para delimitação de zonas de alto e baixo risco contra este tipo de fenômenos naturais e outros similares. Pois o parâmetro simulado mais importante é o alcance da corrida na planície de deposição que é calculado com grande facilidade sem grande número de cálculos complexos, nada que não possa ser implementado nas rotinas de um sistema georeferenciado.

## **6.2 Recomendações e propostas para futuros trabalhos**

O programa atual está ainda em etapa de desenvolvimento pelo qual suas aplicações práticas podem ser ainda muito limitadas.

Existem algumas limitações na parte do uso geral do programa como para pensar num uso generalizado do método. A interface de entrada de dados não é muito versátil para um usuário não familiarizado na linguagem LUA 5.0, pois de preferência qualquer usuário está mais familiarizado com o ambiente WINDOW.

Por outro lado, o programa atualmente no conta com um manual o espécie de livro de ocorrências onde sejam descritas as modificações feitas. Isto facilitaria a introdução de melhores efetivas, pois no presente trabalhos se deram por certas algumas rotinas que logo depois com as primeiras simulações tiveram de serem

revisadas e corrigidas. Assim que este trabalho inicia este tipo de descrições para um futuro trabalho mais detalhado do programa.

Seria importante procurar uma base de dados reais sobre ocorrências e descrições de eventos ocorridos para calibrar o modelo, mas antes disto recomenda-se fazer algumas melhoras antes de iniciar esta etapa.

Primeiro, deve trabalhar-se na programação do algoritmo de triangulação dinâmica para o caso bidimensional. Pois vendo as referências consultadas, estas apontam este método como o mais efetivo pelo momento disponível. Depois é preciso adaptar do modelo de Cundall para o caso tridimensional junto com a triangulação dinâmica. Que no caso de estarem ambas as rotinas disponíveis para o caso 2D é mais fácil adaptar a estas novas condições. Simultaneamente deve trabalhar-se no uso de interpolação de superfícies de terreno 3D para facilitar o seu uso nas rotinas anteriores. Pero estas rotinas são usadas em outras áreas assim que sua programação pode resultar trivial.

Outro ponto para trabalhar fortemente é a saída gráfica 3D e a geração da malha inicial da massa instável, os processos de sedimentação e densificação em 3D podem resultar muito demorados pelo aumento de cálculos e contatos numa partícula. Associado a estas adaptações está implícito o uso de alta tecnologia pelo que é requerido também certo investimento nada baixo em equipamento com características especiais como rede para paralelização de processos. Com estas adaptações pode-se pensar em calibrações com eventos reais ou simulações a escala.

Fica aberta a aplicação para simulação de quedas de rochas e uso de outro formato geométrico de partículas (elípticas, paralelepípedos ou grumos de partículas).