

2

Trabalhos Relacionados

O Método dos Elementos Discretos se tornou uma alternativa para modelagem de meios descontínuos em relação aos métodos tradicionais utilizados na mecânica clássica. Na década de 70, muitos trabalhos surgiram apresentando exemplos da utilização do MED. Os trabalhos pioneiros utilizando este método são os de Cundall (3) e de Cundall e Strack (4). Eles utilizaram forças de contato e de atrito entre partículas rígidas ou deformáveis, modeladas por um sistema de molas e colisão amortecida. Cundall (3) apresentou exemplos de meios fraturados compostos por blocos, além de um sistema de discos para simular meios granulares. Cundall introduziu o processo de relaxação dinâmica para resolver o equilíbrio das equações do meio discreto. Por causa da natureza de interação entre as partículas, o MED se torna bem sensível ao passo de tempo utilizado. Por este motivo, Vinogradov e Sun (24) introduziram um controle de precisão e eficiência aplicado em dois níveis na interação entre as partículas para aprimorar o método. Desde então, o número de contribuições envolvendo o MED vem crescendo em diversas áreas, como por exemplo em geotecnia, com o uso em escavações subterrâneas em rochas fraturadas (15, 14), em problemas de interações entre rochas e estruturas (22), e também em simulações de fluidos ou fluxo no sistema de fraturas de uma rocha (2, 14, 11), após algumas extensões e adaptações do método.

Alguns métodos, conhecidos como orientado a eventos, ou como não suaves, são baseados apenas no cálculo das mudanças causadas por colisões entre partículas. A interação entre as partículas não é suave e a velocidade não é contínua ao longo do tempo (alguns saltos podem ocorrer durante a colisão). O método orientado a eventos, geralmente limitado a grãos circulares ou esféricos, não leva em consideração múltiplos contatos. Por isso, este método é aplicado somente para o caso de um meio com alguns poucos e dispersos grãos. O método de contato dinâmico não suave, iniciado por Jean e Moreau (10), é mais geral, com o contato entre as partículas sendo modelado pela lei de contato unilateral de Coulomb, considerando o atrito, onde, múltiplos contatos entre partículas podem ser considerados com orientação a eventos.

As pesquisas em simulação de partículas geralmente encontram os maiores desafios no desenvolvimento de algoritmos eficientes para detectar a colisão entre

as partículas. A subdivisão do espaço foi inicialmente idealizada por Alder e Wainwright (1). Alguns trabalhos utilizam coerência temporal e espacial do movimento das partículas (21, 16), porém, o mapeamento dessas otimizações na GPU pode se tornar bastante complexo. O trabalho de Kipfer *et al.* (12) atribuiu o identificador da célula a cada partícula, sendo usado posteriormente como chave de ordenação entre as partículas. Com as partículas ordenadas, potenciais colisões na vizinhança da célula eram facilmente consultadas no vetor ordenado. O sistema proposto por Kipfer *et al.* (12) só considera a colisão com a partícula mais próxima.

O trabalho de Purcell *et al.* (18) apresenta uma solução bem original para construção da grade uniforme. Seu algoritmo usa o programa de vértices da placa de vídeo para organizar as partículas na grade, depois utiliza o *stencil buffer* para lidar com as múltiplas partículas mapeadas na mesma célula. A limitação para este algoritmo é o conhecimento prévio do número máximo de partículas que serão armazenadas dentro da mesma célula. A proposta de Venetillo e Celes (23) é semelhante a de Purcell, utilizando também o programa de vértices da GPU para a montagem da grade, porém, a organização das partículas que devem ser armazenadas na mesma célula é feita através de uma lista encadeada. O algoritmo realiza múltiplas passadas, de acordo com o número máximo de partículas contidas em uma mesma célula. O trabalho de Ivson *et al.* (8) utiliza a grade uniforme para armazenar os triângulos de uma cena, no procedimento de traçado de raios.

O uso de placas gráficas para simular sistemas de partículas cresceu bastante nos últimos anos com a evolução do hardware gráfico. O trabalho apresentado por Latta (13) produzia um sistema de partículas inteiramente na GPU, porém, só eram consideradas colisões das partículas com o meio. Kipfer *et al.* (12), já conseguiu implementar uma simulação com colisões entre partículas e entre partículas e obstáculos, na GPU. O sistema usou o método de integração de Euler para calcular as equações de movimento, com a resposta a colisão sendo feita através do cálculo do tempo de colisão e ajuste da posição e da velocidade da partícula.

A simulação de partículas apresentada por Venetillo e Celes (23) adotou o método de integração de Verlet (5) para cálculo da posição das partículas, enquanto a resposta à colisão era computada através do método de relaxação, apresentado por Jakobsen (9). O sistema consegue simular até 1 milhão de partículas em ambientes confinados a taxas interativas.

O presente trabalho realiza a simulação de partículas esféricas deformáveis através do Método dos Elementos Discretos com colisão entre partículas e entre partículas e o ambiente, inteiramente implementado na GPU. O trabalho propõe uma solução para armazenar o histórico das forças tangenciais em cada contato, possibilitando o cálculo de forças normais e tangenciais entre os elementos do sistema.