

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 9 - Indústria, Inovação e Infra-estrutura

REVISÃO DA LITERATURA DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS PARA A MODELAGEM COMPUTACIONAL DE SOLOS¹

LITERATURE REVIEW ON THE USE OF THE DISCRETE ELEMENT METHOD FOR A COMPUTATIONAL MODELING OF SOILS

Luciana Machado Cardoso², Manuel Osorio Binelo³, Paulo Sérgio Sausen⁴, André Luiz Böck⁵

¹ Pesquisa desenvolvida no Programa de Pós Graduação em Modelagem Matemática

² Bolsista CAPES/Prosuc, Aluna do curso de Mestrado em Modelagem Matemática da Unijuí

³ Professor Doutor no curso do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática

⁴ Professor Doutor no curso do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Unijuí

⁵ Professor Doutor no curso de Engenharia Civil da Unijuí

Resumo

O método dos elementos discretos tem sido amplamente utilizado para resolver problemas de engenharia relacionados à mecânica das rochas e dos solos. O método trata os elementos como materiais descontínuos e calcula todas as forças que atuam sobre uma partícula, são necessários cálculos consecutivos de interações entre partículas do problema transiente. Os estudos atuais mostram a aplicação do método dos elementos discretos na área da agricultura para prever o comportamento do solo com o contato de uma ferramenta agrícola, estudos referentes ao ângulo de repouso do solo, para verificar se o método descreve o comportamento do solo de forma real. Na área de Engenharia Civil foram encontrados estudos relacionados a encostas rochosas, a avaliação comportamento do solo/rocha através de simulações e também o comportamento de um solo aterrado com reforço geossintético. Todos os estudos apresentados se mostraram otimistas com relação ao uso do método dos elementos discretos para a descrição do comportamento de solos e rochas. Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de conhecer, analisar e compreender a utilização do método dos elementos discretos na modelagem computacional em solos através de uma revisão sistemática da literatura.

Abstract

The Discrete Element method was used to solve engineering problems related to rock and soil mechanics. The method treats the elements as discontinuous materials and calculates all the forces acting on a particle, they are consecutive calculations of selection iterations until the system reaches equilibrium. The studies shown show the application of the discrete element method in the area of agriculture to predict the behavior of the soil with the contact of an agricultural tool, the studies on the angle of soil recovery, to verify whether the method used or the behavior of the soil in a real way. In the area of Civil Engineering, studies were found related to rocky slopes, an evaluation of soil / rock behavior through simulations and also the behavior of a terrestrial soil with geosynthetic reinforcement. All studies presented are optimistic regarding the use of discrete element methods to describe the behavior of soils and rocks. This research was carried out with the objective of knowing and understanding the use of the method of discrete elements in the computational model in solutions through a systematic review of the literature.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 9 - Indústria, Inovação e Infra-estrutura

Palavras-chave: Método dos elementos discretos, solos, engenharia

Keywords: *Discrete Element Method, soil, engineering*

INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados à mecânica dos solos são geralmente modelados com uma aproximação, é usual admitir que o solo se comporta como um material elástico linear, o que permite a utilização da Teoria da Elasticidade para calcular os recalques e a Teoria da Plasticidade para verificar a possibilidade do solo resistir às solicitações impostas. Essas duas teorias consideram o solo como um contínuo e são utilizadas como uma simplificação da realidade [4].

O comportamento de um solo é essencialmente não-linear e anisotrópico, e para se obter resultados de recalques e tensões mais próximos do real comportamento do solo são utilizados métodos numéricos. Os métodos numéricos mais utilizados na Engenharia de Fundações são o Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos [4].

Atualmente outro método tem sido foco de pesquisadores, o Método dos Elementos Discretos (MED). Este método tem sido amplamente utilizado para resolver problemas de Engenharia relacionados a mecânica das rochas e dos solos. O método trata os elementos como materiais descontínuos e calcula todas as forças que atuam sobre uma partícula, sua posição e orientação é calculada integrando a segunda lei de Newton de movimento [4].

O MED está se tornando amplamente aceito como um método eficaz de abordagem de problemas de engenharia em materiais granulares e materiais descontínuos, especialmente em fluxos granulares, mecânica de rochas e propriedades de deformação de geomateriais [1]. Uma modelagem matemática e computacional utilizando o MED pode representar os grãos como partículas e simular as forças atuantes do solo, calculando as forças que agem para cada partícula e definindo a equação de movimento delas no tempo.

Este artigo apresenta uma revisão da literatura com o objetivo analisar e compreender a utilização do Método dos Elementos discretos na modelagem computacional do comportamento de solos.

REFERENCIAL TEÓRICO

O MED foi desenvolvido por Cundall e Strack em 1971 para ser utilizado em problemas de geologia e engenharia relacionados a mecânica das rochas e mecânica dos solos. No início dos anos de 1970-1980 foram desenvolvidas as ideias de movimento e deformação de sistemas de blocos/partículas [6].

O Método dos elementos discretos permite modelar o sistema a partir da segunda lei do movimento de Newton e da lei de força-deslocamento. Neste método supõe-se que a propagação das forças de contato de uma partícula se dá somente com as partículas mais próximas durante um intervalo de tempo escolhido, para isso são necessários cálculos consecutivos de iterações de partículas até o sistema atingir o equilíbrio [6].

Conforme [9] a interação entre partículas é abordada como um processo dinâmico com estados

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 9 - Indústria, Inovação e Infra-estrutura

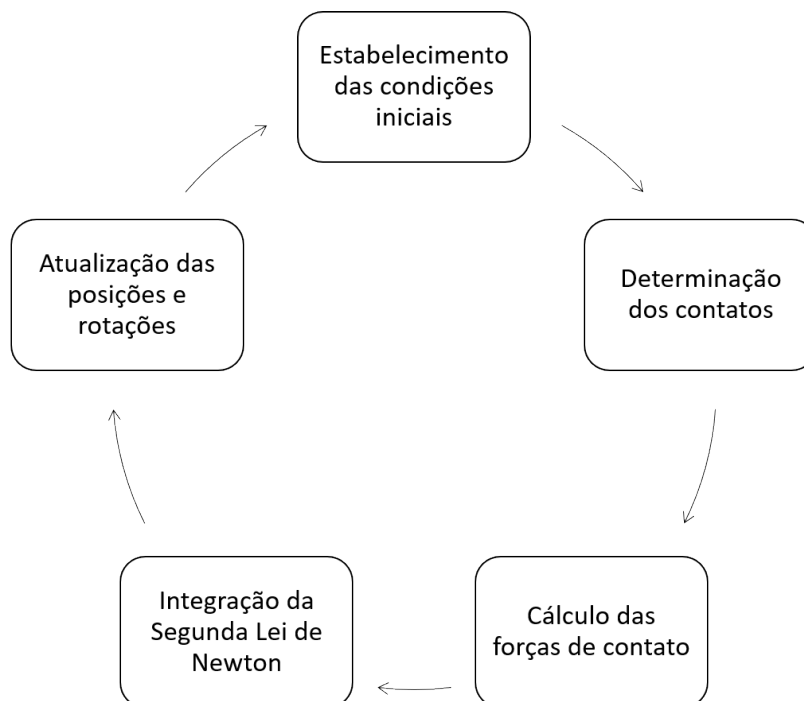
de equilíbrio atingidos sempre que acontecer o equilíbrio das forças. As forças de contato e deslocamento de um conjunto de partículas estão sujeitas a um determinado estado de tensões, onde é encontrado por meio do monitoramento individual do movimento das partículas. O comportamento dinâmico é representado numericamente por um algoritmo de solução explícita no tempo para integrar as acelerações e velocidades, usando o método das diferenças finitas centrais.

O uso de um esquema numérico explícito possibilita simular interações não lineares de um grande número de partículas. Se tais partículas são consideradas rígidas, o comportamento dos contatos é caracterizado utilizando-se uma abordagem de contato suave, na qual sua rigidez é mensurável no contato, então o comportamento dinâmico do sistema é descrito em termos do movimento de cada partícula e das forças entre partículas agindo em cada ponto de contato. Considerando a segunda Lei de Newton, poderá haver equilíbrio estático ou fluxo de partículas [9].

Baseado em [5] a Figura 1 demonstra que o ciclo de funcionamento do MED que se inicia com o estabelecimento das condições iniciais das partículas, após, são detectados os contatos entre os corpos e então são calculadas e aplicadas as forças externas à cada partícula, e por último são atualizadas as posições e rotações das partículas com base nas forças que estão agindo sobre cada partícula integrando as equações de movimento.

O método possui uma ampla variedade de aplicações em mecânica de rochas, mecânica de solos, mecânica de gelo, materiais granulares, processamento de materiais, mecânica de fluidos, sistemas multicorpos, simulação de robôs, animação por computador, etc [6].

Figura 1: Ciclo de Funcionamento do MED



Fonte: Adaptado de [5]

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 9 - Indústria, Inovação e Infra-estrutura

METODOLOGIA

Inicialmente foram definidas as questões de pesquisa.

Questões de pesquisa:

- Quais são as principais áreas de conhecimento onde são utilizadas o Método dos Elementos discretos para modelar o comportamento dos solos?
- O método dos elementos discretos pode descrever o comportamento dos solos?
- Quais são os principais parâmetros utilizados na modelagem das partículas de um solo?
- Quais são os experimentos utilizados para validar a utilização dos modelos propostos?

Posteriormente foi definida a *string* de busca, foram utilizadas as palavras-chaves DEM (*Discrete Element Method*) e *soil* (solo) e também foi utilizada somente a palavra DEM, foram utilizadas para a pesquisa base de dados como *Scopus*, *MS Academic*, *Web of Science*. Então foi realizada a seleção dos trabalhos e descarte de trabalhos irrelevantes e seleção dos trabalhos utilizados.

RESULTADOS

Geralmente a forma das partículas utilizadas nas simulações de MED são circulares para simulações em duas dimensões (2D) e esféricas para simulações em três dimensões (3D) devido a sua simplicidade de modelagem computacional. As partículas são consideradas rígidas, mas pequenas sobreposições são permitidas nos pontos de contato. A magnitude da sobreposição está relacionada à força de contato que é determinada pela lei de deslocamento, todas as sobreposições são pequenas em relação ao tamanho das partículas [3].

No trabalho de [11] foi testada a viabilidade do uso de um software chamado PFC3D para simular o fluxo do solo resultante de uma ferramenta simples de inserção do solo. O software testado utiliza o método dos elementos discretos como motores de simulação. O autor deste estudo quantificou o fluxo do solo jogado após a passagem de uma ferramenta, a quantidade de solo desalojado pela ferramenta foi usado como medida de fluxo. A sensibilidade da simulação às micro propriedades do modelo foi analisada e as saídas do modelo foram avaliadas com dados de testes de corte do solo em um solo arenoso.

Os resultados de [11] demonstraram que dentro das faixas apresentadas das micro propriedades do modelo identificadas neste estudo, a micro propriedade mais sensível foi o módulo de elasticidade da partícula em termos de força de tração. As outras micropropriedades do modelo eram levemente sensíveis ou absolutamente não-sensíveis. Com o ajuste do módulo de elasticidade do componente, o modelo solo-ferramenta foi capaz de produzir forças de tração que eram comparáveis às medições. O modelo solo-ferramenta produziu valores muito mais baixos do solo jogado quando comparado às medições, independentemente da seleção das micro propriedades do modelo. Os valores simulados do solo jogado foram muito menores que a medida. Algumas propriedades do modelo simulado não foram compatíveis quando comparados com o experimento real, porém estas conclusões foram tiradas para um tipo específico de solo, caso as condições de umidade e densidade forem alteradas, outras pesquisas são necessárias [11].

Em [12] foram realizados testes de fluxo para um solo arenoso com composição de 70% areia, 16%

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 9 - Indústria, Inovação e Infra-estrutura

lodo e 14% de argila com um teor de umidade de 22% com as mesmas propriedades que o autor [11] utilizou em sua pesquisa. No experimento utilizou-se um tubo de acrílico com um diâmetro interno de 140 mm e uma altura de 150 mm, o cilindro foi colocado em um piso de concreto como base.

O cilindro foi preenchido com solo até o topo e então, o cilindro foi levantado manualmente na vertical a uma velocidade constante de aproximadamente 10 mm/s, calibrado e controlado manualmente. À medida que o cilindro subiu, o solo começou a fluir para baixo e para fora, formando uma pilha cônica. O ângulo de repouso do solo foi medido como o ângulo da pilha em relação à superfície do piso usando um transferidor em quatro diferentes locais ao redor da pilha. O teste de fluxo foi replicado quatro vezes [12].

Para a simulação foi desenvolvido um modelo onde o cilindro foi representado por uma parede cilíndrica em uma base considerada como uma parede plana. O cilindro foi preenchido com 15523 esferas de 2 mm de diâmetro, e o cilindro estava coberto com uma parede plana para evitar transbordamento das partículas. O modelo foi implementado no software PFCR e não levou em consideração o atrito de rolamento, o autor utilizou para o módulo de elasticidade da partícula o valor de $3e5$ Pa e o coeficiente de atrito entre as partículas e a parede base foi assumida como sendo de 0,65 [12].

Neste estudo [12] pode concluir que a modelagem a partir do Método dos elementos discretos pode simular o fluxo de um solo arenoso, e este pode validar o ângulo de repouso no qual ele obteve um erro de 1,7% entre o ângulo simulado e o ângulo real. O modelo previu com sucesso o deslocamento de qualquer partícula no conjunto de partículas nas três direções. Também pode-se constatar que o diâmetro das partículas nas simulações afetou a cinética total e energia do conjunto de partículas, mas teve pouco efeito na simulação. O autor deixou claro que neste modelo ele não considerou a coesão do solo, e assumiu que o atrito por rolamento era insignificante e que nenhum dos parâmetros do modelo foram calibrados, mas retirados de um estudo anterior, o modelo foi validado com dados limitados de apenas um tipo de solo e deve-se tomar cuidado ao usar o modelo.

Em [1] as simulações estão relacionadas a investigação do mecanismo de arqueamento em aterros empilhados reforçados com geossintéticos com camadas únicas e múltiplas de reforço, correspondendo ao comportamento macro detalhado como estágio de eficiência e recuperação de carga e o micro comportamento, incluindo características de deformação e forças de contato. Nota-se que neste estudo não foi somente observado o comportamento do solo em uma simulação 3D, mas também o comportamento de um material geossintético. Segundo o autor o estudo foi limitado em condições reforçadas com geossintéticos e sem reforço.

Nas conclusões do trabalho o autor descreve que os resultados da simulação foram excelentes e estão em concordância com os resultados experimentais, indicando que a fase de recuperação de carga de um arco pode ser bem simulada pelo método dos elementos discretos. Além disso, os achados confirmaram que a micromecânica parâmetros determinados a partir do trabalho de calibração eram razoáveis [1].

Em [7] uma série de modelagens de MED foi realizada para investigar a estabilidade das encostas compostas por materiais argila-rocha. Para investigar a influência do conteúdo de rochas na encosta para a estabilidade foram utilizados teores de rochas de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Uma metodologia computacional foi aplicada à modelagem numérica para simular rochas reais com alta

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 9 - Indústria, Inovação e Infra-estrutura

precisão e a influência das formas de rochas poderiam ser estudadas sistematicamente. Os resultados da modelagem mostram que a estabilidade da encosta foi aprimorada com o aumento da angularidade da rocha, o que deve ser atribuída a essa forma angular, e que ajudou na formação do bloqueio entre blocos de rocha.

Quando comparado ao fator de segurança (FS) estimado pelas análises tradicionais do Método dos Elementos Finitos (MEF), o FS produzido pelo MED foi geralmente menor no teor de rocha menor e igual a 60%, e maior no teor de rocha superior a 60%. Esse fenômeno pode ser atribuído às diferenças entre os princípios básicos dos dois métodos. O MEF tratou a inclinação como um elemento contínuo e o MED modelou a inclinação com materiais particulados [7].

Os autores [10] apresentam uma investigação experimental numérica combinada para a caracterização do comportamento de cisalhamento de rochas cheias de argila. O modelo desenvolvido foi empregado para modelar a resposta de amolecimento de material de enchimento de juntas de rocha coeso (argila). Os relacionamentos constitutivos do modelo foram aumentados com o comportamento de modo misto e suavização da resposta dos contatos vinculados, o que permitiu reproduzir o dano progressivo da junta de rocha.

O modelo foi implementado no PFC2D e seus parâmetros micro mecânicos foram calibrados com dados experimentais. O procedimento de calibração foi verificado com sucesso repetindo mais dois testes numéricos. O modelo calibrado foi utilizado para simular a mecânica e o comportamento de dano de juntas de rocha contendo material de preenchimento coeso. A comparação entre resultados experimentais e numéricos mostra que o quadro de MED coeso proposto pode reproduzir razoavelmente o comportamento de falha de juntas de rocha cheias de argila com diferentes relações de espessura/asperidade e altura. Este estudo do MED permite que se possa entender melhor a influência da espessura do enchimento, altura da aspereza, e magnitude do estresse normal no mecanismo de falha de rochas perfuradas. Os resultados do MED demonstraram uma boa concordância com os ensaios experimentais [10].

O trabalho de [8] utilizou o MED aplicado ao estudo das tensões em solos granulares. Segundo o autor o MED representa de forma fidedigna o comportamento físico da mecânica dos solos. E que mesmo sendo usual a utilização do MEF, as equações constitutivas dos materiais devem considerar que a camada de solo não resista aos esforços de tração, sendo assim, existem limitações ao uso do MEF, como por exemplo no seu uso para calcular o deslizamento dos grãos do solo, sua coesão, amortecimento e o tipo de ruptura.

Confome [8] foi observado que houve uma aproximação de 90% entre os resultados da aplicação das tensões nas simulações feitas com o MED e também nas simulações feitas com MEF na faixa elástica. E que pode-se concluir que o MED é uma solução interessante para modelar materiais granulares, pois com o MED é possível estudar e obter quaisquer tipos de informação, tornando ilimitada a sua aplicação. O MED é muito eficiente e confiável, no entanto, o custo computacional é extremamente elevado mesmo sendo utilizado uma modelagem em duas dimensões (2D).

Em [2] foi avaliada a aplicação do MED na simulação de fundações superficiais apoiadas em solos de baixa capacidade de suporte. O autor afirma que por se tratar apenas de estimativas de carga de ruptura do solo, o MED se mostra uma ferramenta de modelagem numérica viável e vantajosa na análise de problemas que envolvem materiais granulares.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 9 - Indústria, Inovação e Infra-estrutura

O modelo em MED simulado era uma sapata apoiada em areia fofa com a utilização de reforço para melhorar sua capacidade de carga. Onde foram estudadas as seguintes situações: calibração do modelo e dos parâmetros dos elementos envolvidos em forma de retroanálise utilizando os dados obtidos nos ensaios de laboratório, atrito nulo entre a caixa e os elementos esféricos que compõem a areia, validação do modelo proposto através de método teórico e numérico, comportamento do reforço durante o carregamento e deslocamento da sapata, obtendo a distribuição de tensões de tração ao longo do reforço conforme aumento de tensão na sapata e consequente deslocamento da mesma, duas camadas de reforço, placa de fundação tendo uma geometria quadrada e reforço como geogrelha [2].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa bibliográfica revelou que o MED vem sendo utilizado para modelar o solo para fins agrícolas e em diversas áreas da engenharia, principalmente nas áreas de mecânica dos solos e rochas, permitindo assim entender melhor os fenômenos a nível de contato de partículas. As pesquisas atuais sobre o assunto são diversas, e demonstram que é possível fazer uma modelagem matemática a partir do MED. Os autores apresentados neste artigo apontam que os resultados de seus estudos possuem concordância com a realidade, porém possuem limitações de simulação. Quando são alteradas as condições do solo ou de material, os micro parâmetros devem ser reajustados.

Segundo os autores apresentados existe a necessidade de uma boa calibração dos micro parâmetros de entrada das simulações e que para se obter bons micro parâmetros, primeiramente deve-se realizar experimentos laboratoriais e simulações computacionais destes experimentos, utilizando o MED, posteriormente os micro parâmetros da simulação devem ser ajustados até possuírem concordância com os experimentos.

Analisando todos os estudos apresentados neste artigo pode-se concluir que cada um dos autores optou por um software de simulação, e apesar de diferentes, os softwares realizavam as simulações utilizando o MED como motores de cálculo.

Também pode-se concluir que em todos os estudos algum micro parâmetro não foi considerado na simulação e que foram apontados nas conclusões dos autores como sendo necessário mais pesquisas sobre este parâmetro, ou que a não inclusão de algum micro parâmetro era devido a este não modificar o resultado final da simulação. Outro aspecto importante foi a simulação das partículas com diâmetro maior que a real, todos os estudos apontaram que utilizar as partículas do tamanho real possui um custo computacional muito grande.

Para realizar um experimento utilizando o MED é necessário conhecer o material que está sendo simulado e as suas propriedades, neste artigo chamado de micro parâmetros. Também deve-se possuir conhecimento sobre a ferramenta computacional, software, que irá utilizar para que a simulação possa se aproximar do real.

AGRADECIMENTOS

Agradeço Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 9 - Indústria, Inovação e Infra-estrutura

REFERÊNCIAS

- [1] BADAQHSHAN, E. et al. A 3D-DEM investigation of the mechanism of arching within geosynthetic-reinforced piled embankment. **International Journal of Solids and Structures**, v. 187, p. 58-74, 2020.
- [2] BEHMER, Rômulo Damião Nascimento et al. Simulação numérica de fundação apoiada sobre solo não coesivo reforçado com geotêxtil usando o método dos elementos discretos. 2019.
- [3] CHEN, Ying; MUNKHOLM, Lars J.; NYORD, Tavs. A discrete element model for soil–sweep interaction in three different soils. **Soil and Tillage Research**, v. 126, p. 34-41, 2013.
- [4] HACHICH, W. et al. Fundações–Teoria e prática, 2ª. Edição, PINI, São Paulo, 1998.
- [5] HUAMAN, Carmen Julia Ayquipa. **Simulação 3D pelo Método dos Elementos Discretos de Refluxo de Material de Sustentação de Fraturas em Poços de Petróleo**. 2008. Tese de Doutorado. PUC-Rio.
- [6] JING, Lanru; STEPHANSSON, Ove. **Fundamentals of discrete element methods for rock engineering: theory and applications**. Elsevier, 2007.
- [7] LU, Ye; TAN, Yong; LI, Xiang. Stability analyses on slopes of clay-rock mixtures using discrete element method. **Engineering Geology**, v. 244, p. 116-124, 2018.
- [8] MORILLO, Gabriela Carolina Martinez. **Método das partículas: aplicação no estudo das tensões em materiais granulares**, 2017.
- [9] NEVES, Carlos Eduardo Veras. **Comportamento de materiais granulares usando o método dos elementos discretos**. 2009.
- [10] SAADAT, Mahdi; TAHERI, Abbas. A cohesive discrete element based approach to characterizing the shear behavior of cohesive soil and clay-infilled rock joints. **Computers and Geotechnics**, v. 114, p. 103109, 2019.
- [11] SADEK, Mohammad A.; CHEN, Ying. Feasibility of using PFC3D to simulate soil flow resulting from a simple soil-engaging tool. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 4, p. 987-996, 2015.
- [12] QI, Long; CHEN, Ying; SADEK, Mohammad. Simulations of soil flow properties using the discrete element method (DEM). **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 254-260, 2019.

Parecer CEUA: 48945315.0.0000.5350