



ESTUDO DO ÂNGULO DE REPOUSO DO SOLO COM O USO DO MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS ¹

STUDY OF SOIL ANGLE REPOSE USING THE DISCRETE ELEMENTS METHOD

Edson Baal², Manuel Osorio Binelo³, Maurício de Campos⁴

¹ Pesquisa realizada no Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ.

² Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha; discente do curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da UNIJUÍ.

³ Docente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da UNIJUÍ, orientador da pesquisa.

⁴ Docente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da UNIJUÍ, coorientador da pesquisa.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o estudo do ângulo de repouso do solo com o uso do Método de Elementos Discretos (MED). Atualmente, as simulações MED vem ganhando destaque nas pesquisas que envolvem materiais granulares, como nas investigações sobre a interação roda e terreno de veículos fora estrada. Nesse contexto, tem-se a necessidade de ajustar as propriedades do material simulado com o material físico, o que pode ser realizado através da comparação do ângulo de repouso do material. Utiliza-se a ferramenta computacional *Yade* para modelar um sistema virtual composto por base, tubo oco preenchido com partículas esféricas em seu interior que simula solo. Ao aplicar um deslocamento vertical ao tubo, o particulado forma um talude permitindo assim a medição do ângulo de repouso do material. Para validar os resultados simulados, procede-se com um teste prático em bancada para obtenção do ângulo de repouso do solo. Ao final tem-se a obtenção dos valores para o ângulo de repouso do solo e a comparação entre resultados simulados e resultados práticos.

Palavras-chave: Ângulo de repouso do solo. Método de elementos discretos. Simulação computacional.

ABSTRACT

The present work presents the study of the angle of repose of the soil using the Discrete Element Method (DEM). Currently, DEM simulations are gaining prominence in research involving granular materials, such as investigations on the wheel and terrain interaction of off-road vehicles. In this context, there is a need to adjust the properties of the simulated material with the physical material, which can be done by comparing the angle of repose of the material. The Yade computational tool is used to model a virtual system composed of a base, a hollow tube filled with spherical particles in its interior that simulates soil. By applying a vertical displacement to the tube, the particulate forms a slope allowing the measurement of the angle of repose of the material. To validate the simulated results, a practical bench test is carried out



to obtain the angle of repose of the soil. At the end, the values for the angle of repose of the soil are obtained and the comparison between simulated results and practical results is obtained.

Keywords: Soil angle of repose. Discrete element method. Computer simulation.

INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo determinar o ângulo de repouso do solo a partir de uma simulação computacional de Método de Elementos Discretos (MED) na ferramenta computacional *Yade*, e fazer a comparação com resultados práticos.

O Método de Elementos Discretos vem ganhando destaque nas pesquisas com meios granulares, como o caso da interação roda e terreno de veículos agrícolas, conforme indicam alguns trabalhos, tais como KHOT *et al.* (2008), Jun *et al.* (2011), Smith *et al.* (2013, 2014), Jiang *et al.* (2018) e Sunusi *et al.* (2020). De acordo com Smith *et al.* (2014) métodos numéricos, como o método de elementos discretos, têm sido utilizados para modelar a interação roda e terreno também impulsionado pela evolução dos recursos computacionais. O método de elementos discretos representa o solo como um conjunto de elementos definidos pelo seu tamanho, posição, velocidade e orientação. Quando essas partículas colidem uma com as outras, ou com uma parede de um objeto externo, forças e torques são determinados a partir de equações definidas. O modelo da interação roda e solo com a utilização de partículas individuais permite significativa modificação de propriedades como estrutura de empacotamento do solo e não homogeneidades, o que favorece a simulação da interação roda e terreno em condições mais próximas da realidade.

Ao simular o material a granel, como o solo, é necessário ajustar as propriedades do material modelado de tal forma que coincida com as propriedades do material físico. De acordo com Müller *et al.* (2021), um parâmetro frequentemente utilizado para esse propósito é o ângulo de repouso, que consiste no maior ângulo possível em relação a horizontal, que o material pode ser empilhado sem colapsar.

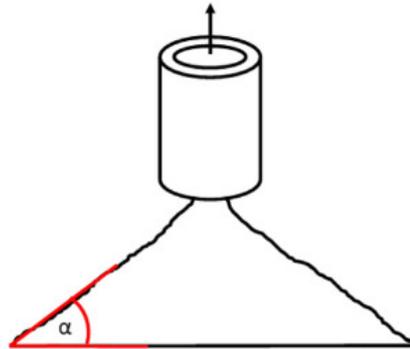
MATERIAL E MÉTODOS

Para determinar o ângulo de repouso do solo, utiliza-se o método do cilindro de elevação, conforme apresentado por Müller *et al.* (2021). Assim, o material granular é colocado em um cilindro com extremidades passantes que fica apoiado em uma base, conforme indicado



na Figura 1. O cilindro é então levantado com uma velocidade constante e lenta para minimizar os efeitos do atrito da lateral do cilindro com o solo. O ângulo resultante do material com a horizontal é chamado de ângulo de repouso estático.

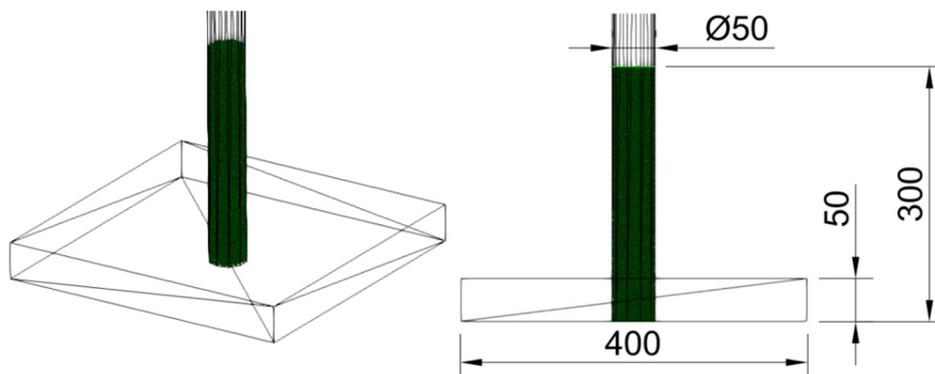
Figura 1 – Obtenção do ângulo de atrito estático com o método do ângulo de elevação



Fonte: Müller (2021)

Para fazer a simulação do Método de Elementos Discretos, utiliza-se a ferramenta computacional *Yade*. A modelagem do sistema virtual consiste em uma base quadrada de 400 mm de lado com abas 50 mm de altura nas extremidades. Ao centro da base, posiciona-se um cilindro oco de 50 mm de diâmetro, preenchido com partículas esféricas de 1,5 mm de diâmetro em uma altura de 300 mm, conforme Figura 2.

Figura 2 – Modelagem do sistema virtual no *Yade*



Fonte: Autores



As partículas esféricas representam o solo. Para a simulação, considerou-se as seguintes propriedades: densidade de 1000 kg/m^3 e módulo de *Poisson* de 0,45 conforme Marangon (2009), ângulo de atrito interno de 36° conforme Silva e Carvalho (2007) e módulo de elasticidade de $62,75 \text{ MPa}$ conforme Borges *et al.* (2018).

Para comparar os resultados da simulação computacional, realiza-se um teste prático de formação de ângulo de repouso de solo com o auxílio de uma bancada, composta por um tubo oco de 50 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, conforme Figura 3

Figura 3 – Bancada de teste do ângulo de repouso do solo

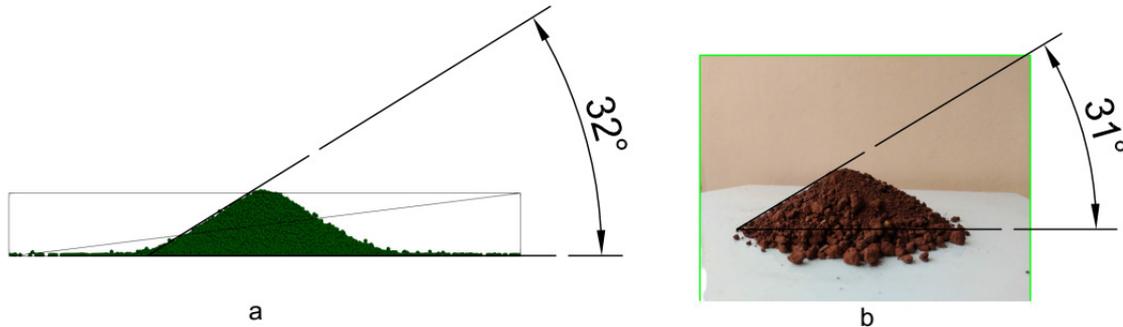


Fonte: Autores

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 tem-se o ângulo de repouso do solo obtido na simulação MED (a), e no teste prático de bancada (b). No programa de desenho auxiliado por computador, uma linha horizontal e outra tangente à lateral são traçadas junto ao talude de solo para efetuar a medição do ângulo de repouso.

Figura 4 – Ângulo de repouso do solo: simulação MED (a), teste prático (b)



Fonte: Autores

Observa-se que o ângulo de repouso do solo na simulação MED é de 32°, e no teste prático é de 31°. Na simulação MED, considerou-se uma granulometria constante do solo simulado, já no teste prático, observa-se diferenças consideráveis entre partículas menores e partículas aglutinadas de solo. Apesar disso, observa-se que o ângulo de repouso obtido pela simulação MED possui valor próximo ao ângulo obtido pelo teste prático.

Um indicativo da diferença de 1° entre os valores do ângulo de repouso pode estar no procedimento de realização do teste prático, que pode ser aperfeiçoado, adotando-se guias para o deslocamento vertical do tubo oco.

Após a realização da simulação e do teste prático, são geradas imagens do talude do solo formado. Essas imagens são carregadas em um programa de desenho auxiliado por computador para proceder com a medição do ângulo de repouso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação MED mostrou-se eficaz para a obtenção do ângulo de repouso de materiais granulares como o solo. Ao trabalhar com solos no teste prático, observa-se características específicas como aglutinamento de partículas, o que leva a granulometrias desuniformes. Em um primeiro momento, essa desuniformidade não acarretou em diferenças significativas entre valores de ângulo de repouso obtidos em simulação e em testes práticos.

Como trabalhos futuros, sugere-se repetir o experimento com uma bancada equipada com guias laterais para o deslocamento vertical do tubo oco. Também, sugere-se investigar a



relação das propriedades do solo, como a densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e ângulo de atrito interno e suas influências no ângulo de repouso do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGES, Jesce John da Silva; FREITAS, Marta Lúcia Rolim de Almendra; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. Variação do Módulo de Elasticidade de um solo colapsível de Petrolina-PE com e sem inundação. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2018.

JIANG, Mingjing; DAI, Yongsheng; CUI, Liang; XI, Banglu. Experimental and DEM analyses on wheel-soil interaction. **Journal of Terramechanics**, v. 76, p. 15-28, 2018.

JUN, Ai; CHEN, Jaun-Fei; ROTTER, J. Michael; OOi, Jin Y. Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. **Powder Technology**, v. 206, n. 3, p. 269-282, 2011.

KHOT, L. R.; SALOKHE, V. M.; JAYASURIYA, H. P. W.; NAKASHIMA, H. Experimental validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction. **Journal of Terramechanics**, v. 44, n. 6, p. 429-437, 2008.

MÜLLER, Dominik; FIMBINGER, Eric; BRAND, Clemens. Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis. **Powder Technology**, v. 383, p. 598-605, 2021.

MARANGON, Márcio. Parâmetros dos solos para cálculo de fundações. **Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora**, 2009.

SILVA, Apolino José Nogueira da; CARVALHO, Fabíola Gomes de. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 853-862, 2007.

SMITH, William; MELANZ, Daniel; SENATORE, Carmine; IAGNEMMA, Karl; PENG, Huaei. Comparison of discrete element method and traditional modeling methods for steady-state wheel-terrain interaction of small vehicles. **Journal of Terramechanics**, v. 56, p. 61-75, 2014.

SMITH, William; PENG, Huaei. Modeling of wheel-soil interaction over rough terrain using the discrete element method. **Journal of Terramechanics**, v. 50, n. 5-6, p. 277-287, 2013.

SUNUSI, Idris Idris; ZHOU, Jun; WANG, Zhen Zhen; SUN, Chenyang; IBRAHIM, Ibrahim Ealtayeb; OPIYO, Samwel; Korhou, Tachalla; SOOMRO, Shakeel Ahmed; SALE, Nura Alhaji. Intelligent tractors: Review of online traction control process. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105176, 2020.