

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Simulação de Interação Solo-Estrutura, Estudo-de-caso: Estaca Torpedo

AUTORES:

José Ricardo Pinto Gonzalez
Carlos Eduardo da Silva,
Nestor Oscar Guevara e José Luís Drummond Alves.

INSTITUIÇÃO:

LAMCE - Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia,
PEC - Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

Simulação de Interação Solo-Estrutura, Estudo-de-caso: Estaca Torpedo

Abstract

Mechanical simulation of discontinuous media has been a great challenge for engineering. The analysis models based on continuum mechanics lose efficiency and accuracy when the micro-mechanic discontinuity effects become relevant. Recent advances computational technology make feasible the use of the methods based on granular mechanics.

Modeling discontinuities by the discrete elements method (DEM) with appropriate contact laws allows us to obtain desired macroscopic behavior and material properties. Therefore, there is a recent growth in the application of combination of DEM and finite element method (FEM) for dynamic analysis of problems, with part of domain is discontinuous and the other parts of domain is continuous media.

This work presents combination of a three-dimensional transient algorithm for mechanical behavior analysis of discontinuous media by DEM, using spherical elements, and stabilized FEM for large elasto-plastic deformations problems using triangular shell elements. The algorithms are implemented in an explicit dynamic code. Example problems are included.

Introdução

Foram realizados progressos consideráveis no tratamento de meios granulares como contínuo, onde o material se comporta macroscopicamente como um meio contínuo. Entretanto esta aproximação é apropriada somente quando os efeitos de descontinuidade micro-mecânica não são significantes. Para problemas que apresentam grandes descontinuidades tais como falha mecânica e fluxo granular, os modelos contínuos não prevêem o comportamento no nível microscópico.

Um grande esforço tem sido utilizado na pesquisa de novas tecnologias que resultem no desenvolvimento de métodos e modelos capazes de representar, em uma forma adequada muitos fenômenos que ainda não estão completamente esclarecidos. Neste contexto, as simulações computacionais utilizando métodos de partículas e dinâmica granulares tem sido objeto de pesquisa, na busca de técnicas alternativas para a modelagem de problemas que não podem ser bem representados pelos métodos contínuos tradicionais.

O método dos elementos discretos (DEM) tem sido aplicado em uma ampla gama de problemas relacionados com o comportamento de meios descontínuos desde o trabalho pioneiro de Cundall (1971).

O presente trabalho utiliza uma implementação computacional do algoritmo para simular o lançamento e arrastamento de estaca-torpedo no leito marinho e o problema de produção de areia.

Modelagem por Elementos Discretos

A modelagem por elementos discretos é uma técnica numérica Lagrangeana utilizada para resolver problemas que podem ser representados por um conjunto de corpos discretos ou partículas. Tais elementos discretos podem ser corpos rígidos ou deformáveis e interagir entre si através de forças de contato normais e cisalhantes. Os elementos são representados utilizando funções matemáticas tais como esferas, poliedros, elipsóides e outras formas primitivas. As forças de contato são determinadas por leis Força-Deslocamento e forças de campo, tais como o gravitacional, eletromagnéticas e pressão de fluido. A posição no espaço e tempo de cada elemento discreto é computada através da integração das equações de movimento de Newton. Um esquema explícito de integração temporal é adotado,

resultando em geral em passos de tempo na faixa de (1.0E-6, 1.0E-9) segundos, dependendo das propriedades materiais.

Formulação DEM

O modelo numérico de DEM descrito nas seções a seguir segue a metodologia de Cundall and Strack (1979). O domínio tridimensional é representado por um conjunto de partículas esféricas rígidas, as quais podem estar em contato entre si. Na existência de movimento relativo entre partícula-partícula e partícula-parede, forças de contato podem aparecer. A integração das equações de Newton, com as forças de contato e a gravidade já avaliadas para cada elemento discreto, estabelece o equilíbrio dinâmico do sistema.

Equações de movimento

Ao separar as forças de contato em suas componentes normal e tangencial, podemos calcular a força resultante em cada partícula e também o momento resultante necessárias para calcular a equação da conservação da quantidade de movimento. Considerando o efeito da gravidade, esta equação pode ser escrita como:

$$m_i \ddot{x}_i + C^T \dot{x}_i = \sum_j F_{ij} + m_i g$$

$$I_i \ddot{\theta}_i + C^R \dot{\theta}_i = \sum_j M_{ij}$$

onde m_i , $\ddot{x}_i$ e $\dot{x}_i$ são respectivamente a massa, aceleração e velocidade da partícula e, F_{ij} a força de contato, g é a aceleração da gravidade, I_i , $\ddot{\theta}_i$ e $\dot{\theta}_i$ respectivamente, o momento de inércia, aceleração angular e velocidade angular da partícula, M_{ij} o momento resultante atuando na partícula e C_T e C_R são os coeficientes de amortecimento global de translação e rotação.

Lei de Força-Deslocamento

Diversos modelos para as forças de contato podem ser encontrados na literatura. O modelo adota foi proposto por Cundall and Strack (1979), Figura 1.



Figura 1 - Modelo de Força-Deslocamento

Este modelo combina uma lei de Força-Deslocamento linear (Lei de Hooke) com uma força de amortecimento viscoso proporcional a velocidade relativa das partículas no contato. A magnitude da força normal é dada por:

$$F_n = -k_n \Delta x + C_n v_n$$

onde k_n é a constante elástica na direção normal, Δx a interpenetração, C_n é o coeficiente de amortecimento viscoso normal e v_n a velocidade relativa na direção normal. A força tangencial total é limitada pela lei de atrito de Coulomb. Quando esta força o valor máximo de μF , sendo μ o coeficiente de atrito, ocorre deslizamento relativo.

Busca de Contato

Uma parte considerável da implementação do DEM é a busca de contato. Foi adotado o algoritmo de busca proposto por Allen and Tildesley (1987), que consiste em dividir o domínio em células como pode ser visto na Figura 2, desta forma a busca é reduzida aos elementos da mesma célula e de células vizinhas.

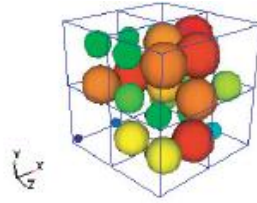


Figura 2 - Domínio dividido em células

Elemento de Casca

O sistema de coordenadas local para um elemento de casca quadrilátero bilinear é definido na sua superfície média, como pode ser visto na Figura 3, Silva (2003).

O sistema co-rotacional é associado a um ponto material e deve ser corretamente relacionado ao sistema local na configuração atual (atualizada). Inicialmente coincidentes ($t=0$), ao longo da evolução da solução eles possuem diferentes velocidades angulares. A transformação entre os sistemas material (co-rotacional) e local é dada pela matriz de rotação.

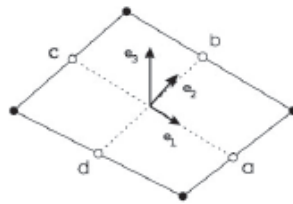


Figura 3 - Sistema de coordenadas do elemento

Interação DEM-FEM

O primeiro passo consiste em encontrar o par casca/partícula em contato, como pode ser visto na Figura 4. Do diagrama da Figura 4 identificamos d , como a distância entre a partícula e o elemento de casca medida ao longo da normal da superfície do elemento.

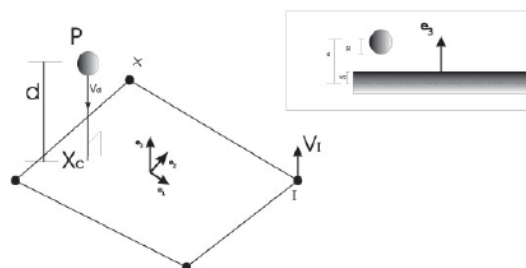


Figura 4 - Acoplamento DEM/FEM

A velocidade de aproximação entre o elemento de casca e da partícula é calculada pela diferença da velocidade da partícula (V_d) e a velocidade do elemento de casca (V_s), ambos em relação a um referencial inercial. A velocidade V_s é obtida através da interpolação das velocidades nodais (V^I) no ponto X_c correspondente a projeção da partícula na área do elemento. Com a velocidade relativa é possível calcular a força de contato (penalização) e transformá-la para os nós do elemento em contato.

Resultados

Os exemplos numéricos a seguir são relativos ao problema de lançamento e arrancamento de estaca-torpedo do leito marinho. A Figura 5 apresenta o modelo da estaca e as dimensões do leito marinho discretizado. A axissimetria da geometria da estaca foi considerada no problema. O leito marinho foi modelado com 229715 partículas esféricas com uma distribuição de diâmetros homogênea na faixa de 2 a 3 centímetros.

Algumas calibrações numéricas são necessárias para avaliar os parâmetros físicos que devem ser utilizado na simulação do problema real. No presente trabalho os parâmetros foram adotados de acordo com dados freqüentemente encontrados na literatura. As propriedades materiais do leito marinho e da estaca encontram-se, respectivamente nas tabelas 1 e 2.

Propriedade Física	Nome clatura	Unidade	Valor (DEM/DEM)	Valor (DEM/FEM)
Rigidez Normal	k_n	GPa	1.0	0.1
Rigidez Tangencial	k_t	GPa	0.1	0.01
Coeficiente de Atrito de coulomb	μ	-	0.8	0.3
Coeficiente de Restituição Normal	ε_n	-	0.98	0.98
Coeficiente de Restituição Tangencial	ε_t	-	0.98	0.98
Massa específica	ρ	Kg/m ³	2800	

Tabela 1 - Parâmetros para contato DEM/DEM e DEM/FEM

Propriedade Física	Valor
Espessura	$t = 1.0 \text{ cm}$
Massa Especifica	$E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$
Modulo de Elasticidade	$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$
Poisson	$\nu = 0.3$
Tensão de Escoamento	$\sigma_Y = 300 \text{ MPa}$
Endurecimento	$E_p = 300 \text{ MPa}$
Passo de Tempo	$\Delta t = 2.5 \times 10^{-7} \text{ s}$

Tabela 2 - Propriedades materiais para estaca

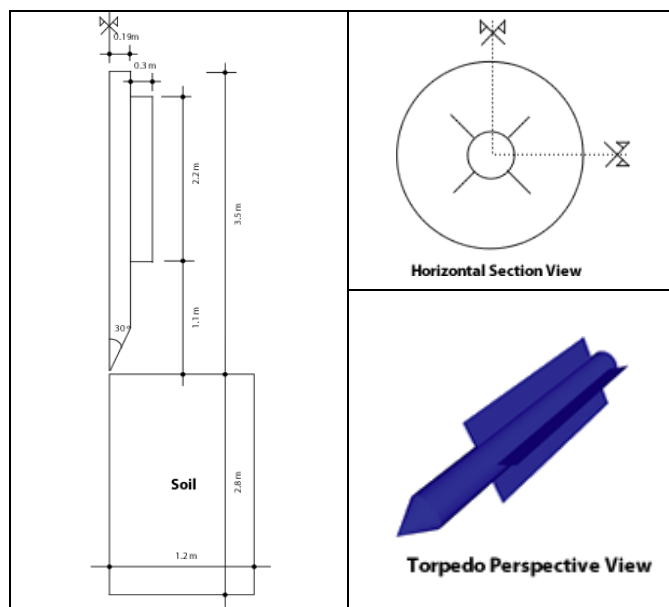


Figura 5 - Modelo da Estaca-Torpedo

Cravação da Estaca-Torpedo

De acordo com Medeiros (2002) a velocidade de impacto da estaca, em testes e em estacas já cravadas, varia entre 10m a 22m/segundo, com altura de queda livre variando de 30m a 150m. A penetração destas estacas na Bacia de Campos, formado por argila normalmente consolidada, varia entre 8m e 22m. Neste teste a velocidade inicial utilizada para a estaca foi de 10m/s e a sua massa total de 2500kg. A evolução dinâmica do solo pode ser observada na Figura 6.

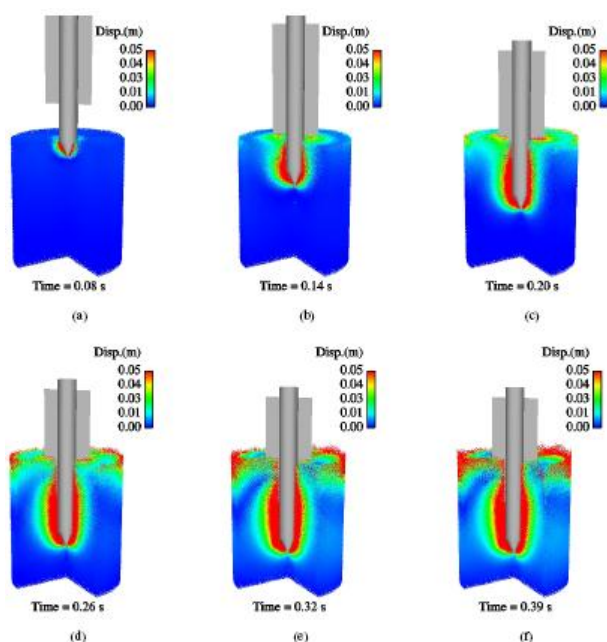


Figura 6 - Penetração da estaca em diferentes instantes de tempo

Arrancamento Estaca-Torpedo

O arrancamento da estaca-torpedo foi simulado através da aplicação de uma aceleração constante de 2m/s^2 na estaca, após ela ter alcançado a posição final de penetração. A evolução dinâmica do deslocamento do solo pode ser observada na Figura 7.

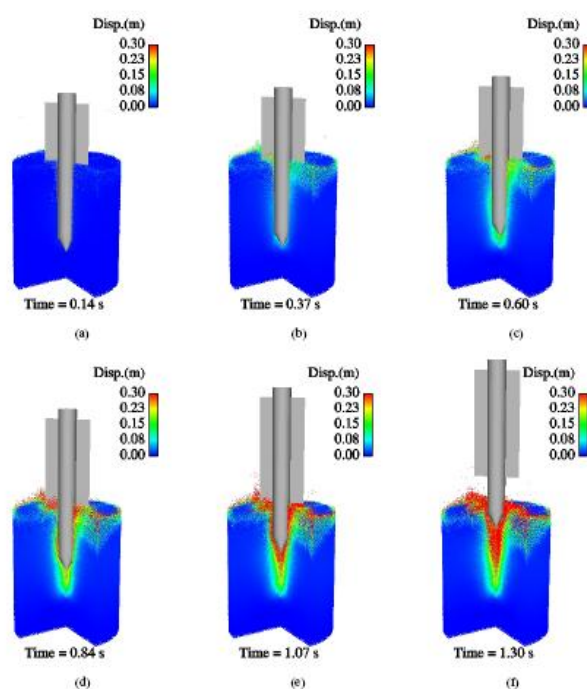


Figura 7 - Arrancamento da Estaca-Torpedo

Produção de Areia

O problema proposto trata do fenômeno de produção de areia em poços de produção de hidrocarbonetos. A formação considerada é, por exemplo, um arenito friável. A geometria do poço, revestimento e eventuais pontos de canhoneio são considerados na modelagem do problema através da geometria do contorno e do meio granular.

Um modelo de elementos finitos subjacente ao modelo de elementos discretos fornece as velocidades do fluido produzido. A interação entre o fluido e as partículas é estabelecida por meio de uma força de arrasto, induzidas no modelo de partículas.

Para uma abordagem inicial foi resolvido o problema de escoamento (potencial) para o fluido produzido, podendo ser possível no futuro a utilização de outros escoamentos mais complexos como um escoamento multi-fásico. Utilizou-se o método dos elementos finitos para solução do problema de escoamento potencial, com uma malha de 5.000 elementos. A Figura 8 apresenta as condições de contorno e o campo de velocidades resultante.

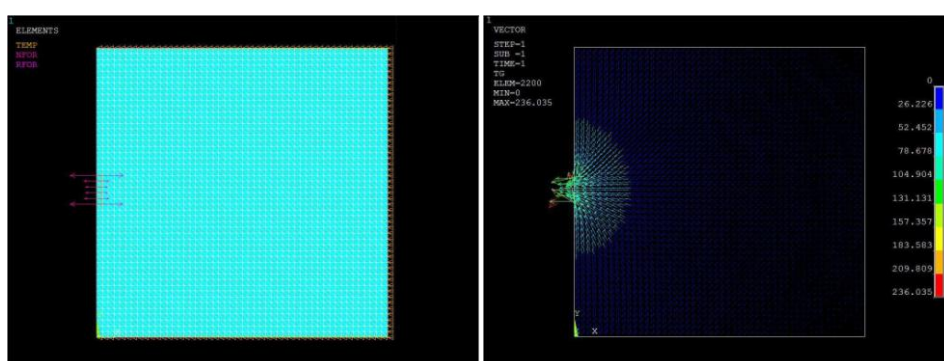


Figura 8 - Condições de Contorno e Campo de Velocidades para malha de MEF

Para discretização da formação foi utilizado um modelo bidimensional com 11.155 partículas com granulometria uniforme de 0,01m distribuídas em um domínio de dimensão unitária como pode ser visto na Figura 9. As propriedades físicas do modelo podem ser vistas na Tabela 3.

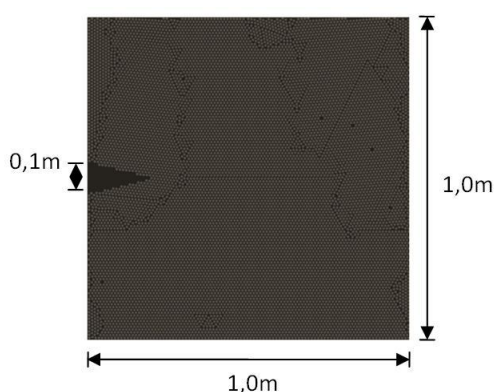


Figura 9 - Produção de Areia

Propriedades Físicas	Valor
K_n	1.00E+8
K_t	1.00E+7
ϕ	15°
c	5.00
ρ	3000
η_n	1.0E-4
η_t	1.0E-4

Tabela 3 - Propriedades do modelo

As propriedades físicas do modelo, tais como coesão e ângulo de atrito, levam à formação de um aglomerado de partículas através das forças de contato. Quando as forças de arrastos, nas partículas, são maiores que as forças de contato inicia-se o desagregamento das mesmas do conglomerado, como pode ser visto na Figura 10.

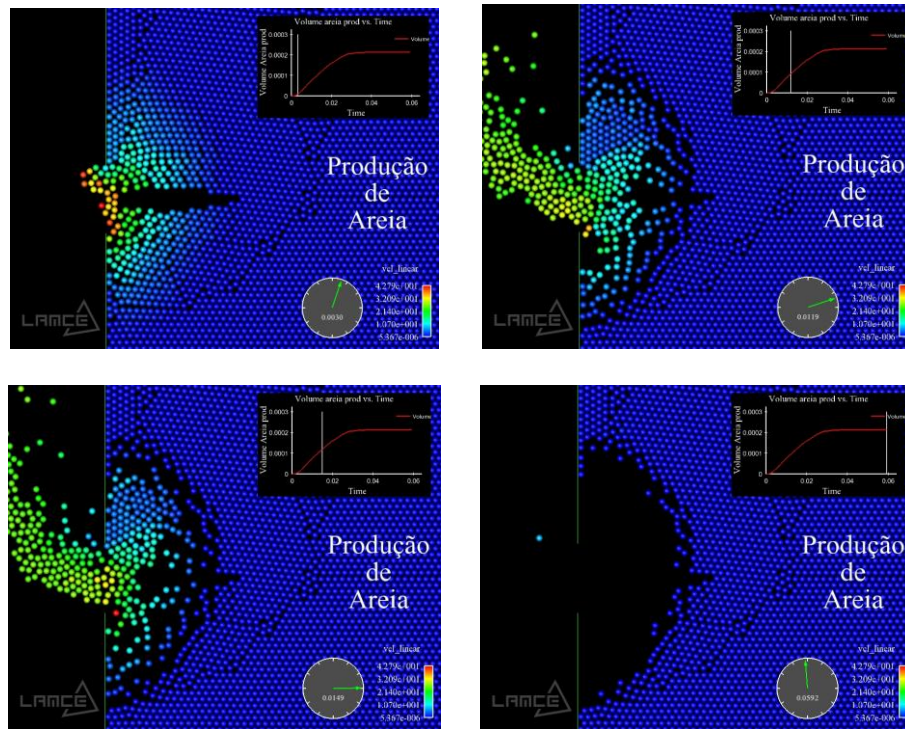


Figura 10 - Produção de Areia

Conclusões

Com os testes realizados foi possível mostrar a aplicabilidade do acoplamento DEM-FEM em um problema de engenharia, i.e. o lançamento e arrancamento de estaca-torpedo em solo marinho e produção de areia. Embora os dados do solo não foram escolhidos realisticamente, pode se observar na simulação os mecanismos básicos presentes no caso real.

Novas investigações, agora com parâmetros reais do solo estão sendo realizados a fim de calibrar as simulações com dados de ensaios.

Referências Bibliográficas

- Allen, M. P. & Tildesley, D. J., 1987. Computer simulation of liquids. Oxford University Press.
- Cundall, P. A., 1971. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. In Proc. Symp. Int. Soc. Rock Mechanics, Nancy, France, vol. 1, pp.II-8.
- Cundall, P. A. & Strack, O. D. L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. Géotechnique, vol. 29, n. 1, pp. 47-65.
- Medeiros, C. J., 2002. Low cost anchor system for flexible risers in deep waters. In Offshore Technology Conference - OTC, pp. 14151, Houston, Texas U.S.A.
- Silva, E. F., 2003. Implementação Computacional do Elemento Quadrilátero de Casca Bilinear com Formulação Co-rotacional para Análise Transiente de Estruturas Laminas. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Tsuji, Y., Kawaguchi, T., & Tanaka, T., 1993. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed. Powder Technology, vol. 77, pp. 79-87.