

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Avaliação da aplicabilidade do Método dos Elementos Discretos para simulação do experimento *sandbox*

AUTORES:

Ynaê Almeida Ferreira
Luciana Correia Laurindo Martins Vieira
Viviane Carrilho Leão Ramos

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV/CTEC/UFAL

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. 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 6ºPDPETRO.

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS PARA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO *SANDBOX*

Abstract

The fault formation analysis is commonly important to oil exploration activities. The oil tends to migrate to regions with lower pressures in the sediment due to large pressure gradients. The faults has a main role in this mechanism. The existing faults in the sedimentary basin may interfere in different ways in the migration process. Depending on the existing tensions, these faults can become either preferential flow channels, or impermeable zones. The analogue "sand-box" model is a resource that can be used to analyze the fault formation in sedimentary basin. This experiment is usually done in laboratory environment, however it has been modeled numerically. This paper consists of the verification of the capabilities of a simple discrete element model to simulate the faults formation using a numerical model of the "sand-box" experiment. Numerical analysis similar to physical experiments are performed. The results are qualitatively analyzed by comparing the images of the simulations and of the physical tests available in literature.

Introdução

O petróleo é composto por uma mistura complexa de hidrocarbonetos e quantidades variáveis de não-hidrocarbonetos (Thomas *et. al.*, 2004). Um dos elementos essenciais para a ocorrência de petróleo em quantidades significativas em uma bacia sedimentar é a existência de um grande volume de matéria orgânica de qualidade adequada acumulada. Esta matéria orgânica se concentra em certas rochas sedimentares, denominadas de geradoras, que em geral são constituídas de material detrítico de granulometria muito fina, tal como folhelhos ou calcilutitos (Milani *et. al.*, 2000). Essas rochas ao serem submetidas a adequadas condições de temperatura e pressão podem gerar petróleo.

Uma acumulação de petróleo em uma bacia sedimentar requer a associação de uma série de fatores. Entre eles, cita-se a presença de uma rocha geradora e condições temporais adequadas, além da existência de rocha com porosidade e permeabilidade necessária à acumulação e produção do petróleo. As rochas que apresentam as condições necessárias para o armazenamento são denominadas de rochas reservatório. Entretanto para que uma determinada rocha reservatório possua uma reserva de petróleo, é necessária a presença de condições favoráveis à migração do petróleo da rocha geradora até a rocha reservatório, bem como a existência de uma rocha impermeável que retenha o petróleo. À esta rocha impermeável, capaz de reter o fluxo do petróleo denomina-se rocha selante ou capeadora (Thomas *et. al.*, 2004). Para que se tenha uma jazida petrolífera comercial, o arranjo das rochas reservatório e selante deve favorecer a acumulação de um volume significativo de petróleo. A ausência de apenas um desses fatores inviabiliza a formação dessa jazida.

A pressão na rocha geradora é bastante elevada e após a sua geração, o petróleo a abandonar essa rocha migrando para regiões no sedimento com menores pressões. A migração do petróleo através dos sedimentos até a rocha reservatório pode ocorrer por falhas e fissuras nas rochas, por exemplo, quando ocorrem alívios de pressão nessas descontinuidades.

Na camada pré-sal encontra-se rochas geradoras e reservatórios, como um extenso arenito coberto por uma camada impermeável de sal com grande espessura. A complexidade de perfurar espessas camadas de rochas salinas soma-se ao fato da camada pré-sal encontrar-se em diferentes profundidades, a depender do local analisado. O sal tem propriedades físicas específicas, especialmente ao se analisar o

seu comportamento viscoso (Mohriak *et. al.*, 2008). Novas tecnologias têm sido desenvolvidas, permitindo analisar uma gama maior de problemas geotécnicos cada vez mais realistas.

A análise da formação de falhas em bacias sedimentares tem sido objeto de estudos relacionados ao petróleo. O experimento denominado *sandbox* é um dos recursos que pode ser empregado nesse tipo de análise. Este experimento, que tradicionalmente tem sido realizado em laboratório, vem sendo modelado numericamente, como apresentado por Willingshofer *et. al.* (2005), Seyferth e Henk (2006), Marques e Nogueira (2008), Pinto *et. al.* (2010), Schreurs *et. al.* (2006), dentre outros.

Problemas de natureza descontínua, a exemplo das simulações do comportamento de meios granulares, podem ser modelados numericamente através de métodos numéricos adequados. O Método dos Elementos Discretos (MED) tem-se mostrado um dos métodos adequados para esse tipo de análise. No MED o meio granular é considerado como um sistema de partículas individuais. A idéia básica do método consiste em modelar a dinâmica de um meio discreto, em geral representado por um conjunto de partículas de forma circular ou esférica, com o intuito de representar um meio descontínuo de referência. As partículas são tratadas como corpos sólidos independentes, os quais entram em contato uns aos outros, transmitindo forças de interação.

Esse trabalho consiste na verificação das capacidades que um modelo relativamente simples de elementos discretos tem para ser utilizado na análise da formação de falhas geológicas através do experimento *sandbox*. Realizam-se análises numéricas semelhantes a experimentos físicos. Seus resultados são analisados qualitativamente através da comparação da imagens de simulações e ensaios físicos disponíveis na literatura.

Metodologia

Para a realização da análise numérica utiliza-se o programa computacional desenvolvido pelo grupo de pesquisas do Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), denominado DEMOOP (*Discrete Element Method Object Oriented Programming*). O DEMOOP consiste em um *framework* orientado a objetos responsável pela análise de sistemas particulados, através do Método dos Elementos Discretos, o qual permite a realização de simulações em meios discretos (Cintra e Carvalho Jr, 2006).

Todo o sistema é composto por três programas distintos responsáveis pelas atividades de pré-processamento, análise e visualização, o que oferece algumas vantagens vinculadas ao relacionamento entre o sistema e os usuários ou programadores. Estas três partes se comunicam através de arquivos com formatação previamente determinada.

O pré-processamento corresponde à etapa inicial em uma simulação numérica. Nesta fase busca-se, após estabelecido um modelo numérico, uma forma de traduzir informações de problemas reais em dados que o método empregado para a solução numérica proposta possa entender e avaliar (Cintra e Carvalho Jr, 2006). Para um problema que envolva o MED, esta etapa de pré-processamento define informações relativas a meio descontínuo estudado. Defini-se a geometria e os parâmetros para os materiais que compõe as partículas em estudo, como também as condições de restrições, informações dos algoritmos de busca por contato e de integração temporal, dentre outros. Nesta etapa utiliza-se o programa computacional PreDEM. Este programa dispõe de diferentes técnicas de geração de partículas. Entre essas técnicas estão a geração se dá a partir de uma malha de elementos finitos, a geração a partir de imagens, além da utilização das teorias dos Processos Pontuais. O PreDem também dispõe de diálogos onde são definidas as condições de contorno e iniciais além dos parâmetros globais necessários para realização das simulações numéricas usando o MED.

O processador, DEMOOP realiza análise dinâmica e grava os resultados em arquivos de saída, utilizados no pós-processamento. Na etapa de pós-processamento utiliza-se o programa DemView, também desenvolvido pelo grupo de pesquisadores do LCCV (Amorim et al., 2006). Através dele é permitida a visualização da evolução das partículas, de campos vetoriais como velocidade, dentre outros recursos de visualização. Os experimentos numéricos deste trabalho são realizados utilizando os três programas do sistema.

Para a modelagem geométrica utiliza-se o algoritmo disponível no PreDem que utiliza Processos Pontuais. Define-se uma porosidade inicial de 0,5, e uma distribuição granulométrica como apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição granulométrica.

Raio da partícula	Porcentagem de ocorrência
0,5 cm	70%
0,3 cm	30%

São realizadas simulações bidimensionais, nas quais aplica-se um movimento de translação horizontal na parede esquerda. Esta parede apresenta inclinação diferente para cada análise. Assumem-se os ângulos de 30°, 45° e 60°, caracterizando assim três tipos de análises. Na Figura 1 apresenta-se a geometria empregada para os diferentes ensaios, estando os valores nela representados em metros.

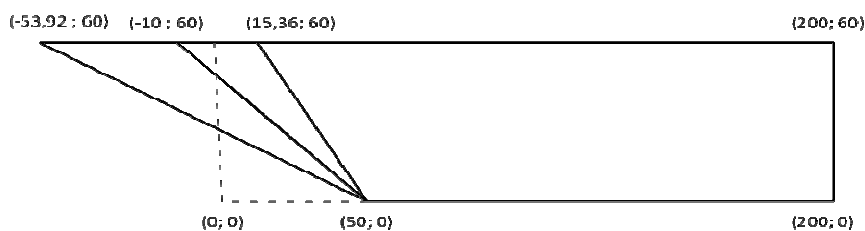


Figura 1 – Geometria da caixa utilizada para as análises com o obstáculo da esquerda móvel, com ângulos de 30°, 45° e 60°.

A relação força-deslocamento utilizada é definida pelo modelo reológico Kelvin. Suas propriedades mecânicas que definem as forças de contato entre as partículas são: rigidez normal (k_n), rigidez tangencial (k_t), porcentagem do amortecimento viscoso normal crítico (c_n) e tangencial crítico (c_t), apresentados na Tabela 2. São realizadas simulações com e sem rigidez tangencial para cada inclinação.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas de contato dos elementos discretos.

Inclinação do Obstáculo	Número de Partículas	k_n (N/m)	k_t (N/m)	c_n (%)	c_t (%)
30°	5968	10^8	10^8	99	99
45°	5618	10^8	10^8	99	99
60°	5412	10^8	10^8	99	99
30°	5968	10^8	0	99	99
45°	5618	10^8	0	99	99
60°	5412	10^8	0	99	99

Em todos os casos o tempo de simulação é de 60 segundos. A parede inclinada inicia o seu movimento após 5 segundos de análise, tempo este necessário para as partículas se acomodarem diante da ação da

gravidade. O algoritmo de integração utilizado é explícito, portanto, para que a análise apresente estabilidade, adota-se um incremento de tempo correspondente a 20% do incremento de tempo crítico da análise.

O experimento numérico proposto é comparado com imagens de um vídeo demonstrativo no qual realiza-se um experimento físico para obstáculos com 30°, 45° e 60° de inclinação (Sandbox experiment ..., 2009).

Resultados e Discussão

Após o processamento das simulações, inicia-se a etapa de pós-processamento, utilizando-se do programa DemView.

Em um primeiro momento, os experimentos foram realizados considerando rigidez tangencial nula. As Figuras 2, 3 e 4, mostram os resultados encontrados para as inclinações de 30°, 45° e 60° respectivamente.

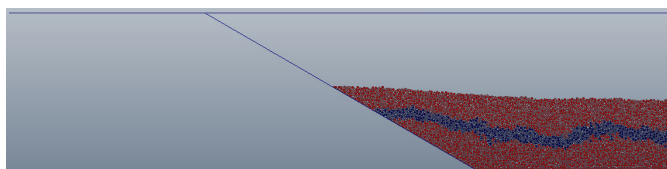


Figura 2– Inclinação de 30°: Configuração ao final da simulação, no tempo $t=60s$.

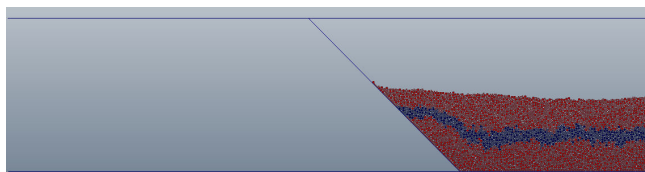


Figura 3– Inclinação de 45°: Configuração ao final da simulação, no tempo $t=60s$.



Figura 4– Inclinação de 60°: Configuração ao final da simulação, no tempo $t=60s$.

Em seguida realizam-se as análises para rigidez tangencial de valor igual a 10^8 N/m. Este valor gera um comportamento semelhante ao de areia seca, segundo o observado por Silva Filho e Vieira (2011). As Figuras 5, 6 e 7, apresentam os resultados encontrados para as inclinações de 30°, 45° e 60° respectivamente.

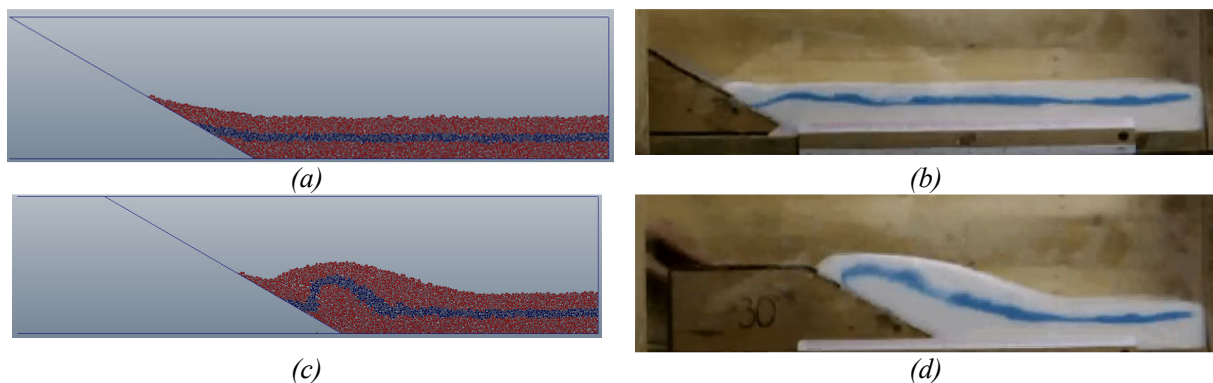


Figura 5– Inclinação de 30°: (a) Partículas após acomodação, no tempo $t=5s$; (b) Ensaio físico no tempo $t=0s$; (c) Partículas com o obstáculo em movimento; (d) Ensaio físico em movimento.

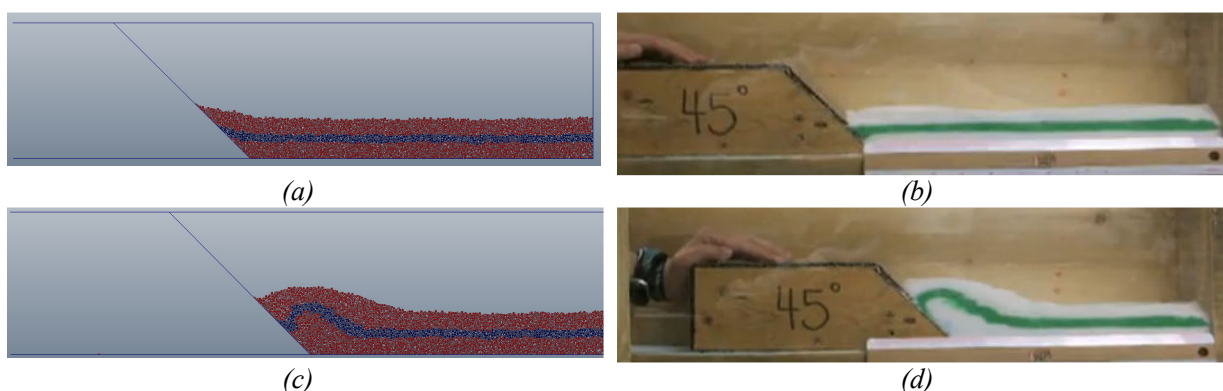


Figura 6– Inclinação de 45°: (a) Partículas após acomodação, no tempo $t=5s$; (b) Ensaio físico no tempo $t=0s$; (c) Partículas com o obstáculo em movimento; (d) Ensaio físico em movimento.

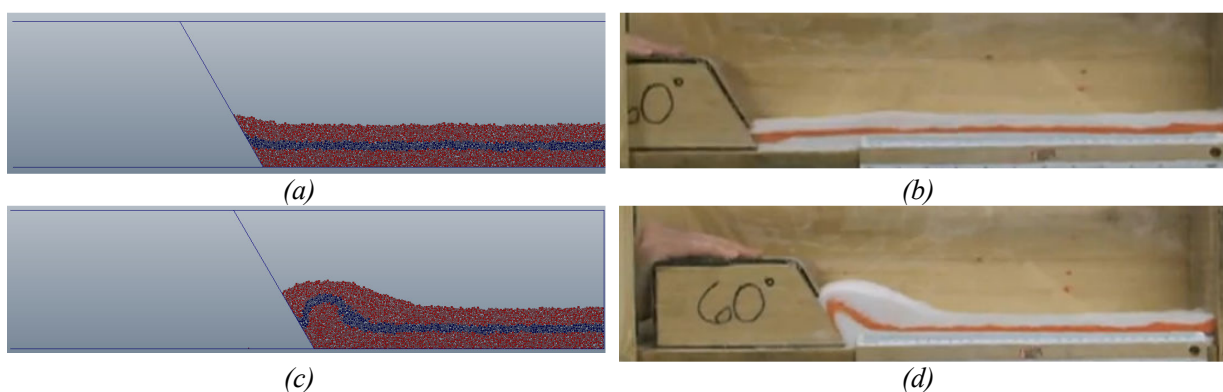


Figura 7– Inclinação de 60°: (a) Partículas após acomodação, no tempo $t=5s$; (b) Ensaio físico no tempo $t=0s$; (c) Partículas com o obstáculo em movimento; (d) Ensaio físico em movimento.

Analisando as imagens apresentadas nas Figuras 2, 3 e 4, percebe-se que para a rigidez tangencial nula as partículas possuem comportamento semelhante ao de fluidos, não apresentando qualquer semelhança com os resultados obtidos no experimento físico. Esta condição não é adequada para a simulação do problema a ser estudado.

Nas figuras 5, 6 e 7, situações onde o modelo considera a rigidez tangencial com valor 10^8 N/m, observam-se dois momentos da simulação numérica em comparação com dois momentos do ensaio físico.

As Figuras 5a e 5b, 6a e 6b, 7a e 7b apresentam a configuração gerada após o término da acomodação em comparação ao início do experimento físico. Observa-se que devido à irregularidade nas camadas de areias coloridas utilizadas no experimento, não foi possível reproduzir fielmente a geometria das

camadas. Entretanto, utilizou-se uma coloração dupla (vermelho e azul) para facilitar a visualização do movimento das partículas ao longo da simulação e a comparação entre os ensaios.

As Figuras 5c e 5d, 6c e 6d, 7c e 7d apresentam as configurações obtidas após o deslizamento da parede esquerda. Observa-se que, mesmo diante das irregularidades existentes no modelo físico, das diferenças dos diâmetros dos grãos e da própria escala geométrica do problema, é possível observar semelhanças entre os resultados numéricos e físicos. Em todos os casos observa-se a formação de uma espécie de domo próximo à parede em movimento, cuja visualização é facilitada pela faixa de partículas de cor azul.

Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que o Método dos Elementos Discretos apresenta-se como uma ferramenta numérica adequada para o estudo de problemas físicos que envolvam meios de natureza granular. Observa-se também que a correta definição dos parâmetros físicos é condição essencial para a obtenção de resultados realistas.

Das análises das Figuras 5c e 5d, 6c e 6d, 7c e 7d, observa-se que é possível obter resultados físicos e numéricos semelhantes mesmo utilizando um modelo numérico com relação força-deslocamento simples e com diferenças de escala nas dimensões do problema e na granulometria do meio. Esse fato demonstra que o programa computacional utilizado tem potencial para realizar simulações desse tipo.

Agradecimentos

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo para o Setor Petróleo e Gás – PRH40/UFAL.

Ao apoio financeiro do Laboratório de Computação Científica e Visualização da Universidade Federal de Alagoas – LCCV/UFAL, através da Rede Galileu.

Referências Bibliográficas

- Amorim, J. A. de; Cintra, D. T.; Lira, W. W. M. (2006). Uma interface gráfica-interativa para visualização dinâmica do método dos elementos discretos. Anais do XXVII Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia (CILAMCE), Belém, Brasil.
- Cintra, D. T.; Carvalho Jr., H. (2006). Desenvolvimento de ferramentas de análise e visualização do Método dos Elementos Discretos e suas aplicações na engenharia. Monografia de Graduação (Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, UFAL, Maceió, Brasil.
- Marques, F. O.; Nogueira, C. R. (2008). Normal fault inversion by orthogonal compression: Sandbox experiments with weak faults. *Journal of Structural Geology* 30: 761–766.
- Milani, E. J.; Brandão, J. A. S. L.; Zalán, P. V.; Gamboa, L. A. P. (2000). Petróleo na margem continental brasileira: Geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 18(3).
- Mohriak, W.; Szatman, P.; Anjos, S. M. C. (2008). Sal: Geologia e Tectônica. Exemplos de bacias Brasileiras. São Paulo: Beca Edições LTDA.

- Pinto, L.; Muñoz, C.; Nalpas, T.; Charrier, R. (2010). Role of sedimentation during basin inversion in analogue modeling. *Journal of Structural Geology* 32: 554 – 565.
- Sandbox experiment with folding and faulting (2009), Website (consulta em abril de 2010): http://wn.com/Landforms_resulting_from_Folding_and_Faulting.
- Seyferth, M.; Henk, A (2006). A numerical sandbox: high-resolution distinct element models of halfgraben formation. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 95: 189–203.
- Schreurs, G. *et. al.* (2006). Analogue benchmarks of shortening and extension experiments. *The Geological Society of London, Special Publications*, 253: 1-27.
- Silva Filho, J. W. P.; Vieira, L. C. L. M. (2011). Avaliação da influência da rigidez tangencial sobre o ângulo estático de repouso em um modelo de elementos discretos. *Anais do V Congresso de Engenharia, Ciência e Tecnologia (CONECTE)*, Centro de Tecnologia, UFAL, Maceió, Brasil.
- Thomas, J. E. *et. al.* (2004). Fundamentos de engenharia de petróleo. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS.
- Willingshofer, E.; Sokoutis, D; Burg, J. P. (2005). Lithospheric - scale analogue modelling of collision zones with a pre - existing weak zone. *The Geological Society of London, Special Publications*, 243: 277-294.