

5 Conclusões

Neste trabalho desenvolveu-se uma ferramenta numérica com acoplamento fluidomecânico (mono e bifásico) para ser utilizada em análises, na escala do poro e da partícula sólida, de problemas relacionados à geomecânica do petróleo, como dano mecânico da formação e produção de sólidos. A principal diferença desta ferramenta numérica em relação a trabalhos anteriores que acoplam o DEM com o LBM monofásico (DEM-LBM) (Cook e Noble, 2004, Boutt et al., 2007) está na implementação da formulação do LBM sugerida por (He e Luo, 1997) permitindo a aplicação de gradientes de pressão sensivelmente maiores do que na formulação convencional, o que é importante para as simulações de produção de sólidos. Este trabalho mostrou também que a força capilar entre os grãos pode ser calculada com o LBM bifásico proposto por Gunstensen e Rothman (Gunstensen e Rothman, 1991) (RKLBM). Em relação ao acoplamento bifásico (DEM-RKLBM) propôs-se um esquema simples que conserva a massa dos dois fluidos, que, entretanto, só deve ser aplicado em simulações quasi-estáticas.

O programa computacional implementado foi verificado através de comparações com soluções analíticas ou resultados publicados na literatura. Simulações relacionadas às aplicações de interesse foram realizadas e serão úteis no aperfeiçoamento do programa e da metodologia aplicada.

Como qualquer método para estudos na microescala, o DEM-LBM é um método de alto custo computacional, entretanto uma vantagem é que ele é um método com características adequadas à paralelização. Esta vantagem não foi explorada neste trabalho mas deve ser implementada brevemente para permitir simulações de maior porte.

A seguir apresenta-se as principais conclusões e sugestões para futuros trabalhos relacionados a cada assunto abordado.

Dano mecânico de formação

As simulações de tensão-deformação-permeabilidade reproduziram qualitativamente o comportamento esperado para materiais geológicos, entretanto a representação do esqueleto sólido deve ser aperfeiçoada visto que a magnitude

da permeabilidade absoluta e sua variação com as deformações foram diferentes das reportadas na literatura para materiais geológicos reais (Soares, 2007). Estas discrepâncias parecem estar relacionadas a diferenças da tortuosidade e superfície específica entre uma amostra real e a amostra sintética. A representação do esqueleto sólido através de esferas (com sua aparente baixa complexidade em relação aos materiais geológicos naturais) parece influenciar também o fluxo bifásico, principalmente em relação aos valores de saturação residual. Tendo em vista estas observações os seguintes tópicos são sugeridos para futuros trabalhos:

1. Comparar os resultados das simulações com materiais geológicos menos complexos (areias limpas, por exemplo).
2. Aperfeiçoar a amostra sintética usada nas simulações com o auxílio da análise de imagens de materiais geológicos de interesse, incluindo (a) um novo algoritmo de geração de partículas que produza uma granulometria semelhante a dos materiais geológicos, (b) a representação de partículas sólidas por elipsóides, e (c) a representação da cimentação entre grãos. Sugere-se para a representação da cimentação ou um modelo geométrico de cimento ou microelementos discretos.
3. Estudar a variação da permeabilidade relativa com a deformação do meio sólido em modelos simples constituídos de tubos conectados.

Produção de sólidos

As simulações relacionadas à produção de sólidos sugerem que a produção de sólidos só ocorre quando há ruptura da cimentação entre partículas por processos mecânicos, e que o gradiente de pressão e a resistência residual influenciam tanto a taxa de produção como o total de material produzido. Com base nos resultados obtidos sugere-se os seguintes tópicos para futuros trabalhos:

1. Realizar simulações de geometrias simplificados para estudar o efeito de cada parâmetro (coeficiente de atrito, deformabilidade da amostra, tamanho dos grãos, etc) no processo de erosão.
2. Realizar simulações para estudar a relação entre a porosidade (modificada pela erosão) e os parâmetros de deformabilidade e resistência da amostra (enfraquecimento da amostra pela erosão).
3. Relacionar os modos de ruptura da rocha a padrões de produção de sólidos.

4. Realizar simulações com mais partículas e, principalmente, tridimensionais porque o processo de erosão fica dificultado pela configuração bidimensional. Relacionar os resultados destas simulações com os modelos constitutivos macroscópicos apresentados na literatura (Papamichos, 2001, Wang, 2003, Detournay et al., 2006), pois acredita-se que a principal contribuição desta ferramenta numérica neste assunto está relacionada ao melhor entendimento dos parâmetros destes modelos constitutivos.

Sugere-se ainda comparar a eficiência, em relação ao tempo de simulação, do método numérico apresentado neste trabalho com outros métodos apresentados na literatura, principalmente com os métodos de fronteira imersa (Hofler, 2000).

Uma relevante limitação das simulações realizadas está relacionada à condição bidimensional adotada, que impede o carregamento de partículas no interior da amostra. Esta limitação deve ter influenciado os resultados principalmente porque impede o enfraquecimento da amostra devido a erosão. Entretanto, para a realização de simulações tridimensionais é imprescindível a paralelização do código.

Força capilar

Foram realizadas simulações que mostraram que a força capilar de equilíbrio entre duas partículas sólidas circulares é satisfatoriamente calculada com o RKLBM. As discrepâncias encontradas entre os valores analíticos e numéricos parecem estar relacionadas a discretização grosseira em alguns casos. Um esquema para o tratamento da reconstrução de nós que mudam de condição (sólido/fluido) que conserva as massas de fluidos foi proposto. Entretanto, observou-se que a redistribuição dos fluidos nestes nós provoca uma forte perturbação no domínio, o que exige que alguns passos de fluxo sejam executados para que a nova situação de equilíbrio seja alcançada. Desta forma, o esquema proposto só deve ser usado em simulações quasi-estáticas, quando é irrelevante o movimento dos fluidos. Sugere-se que o esquema atual seja aplicado no estudo do efeito da força capilar na resistência à tração para diferentes condições como heterogeneidade da amostra, forma de grãos (circular e elíptico) e molhabilidade dos grãos.