

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. CONCLUSÕES

Nesta dissertação empregou-se o método dos elementos discretos (MED), através do programa PFC, para melhor compreender os mecanismos que governam o refluxo do material de sustentação de fraturas criadas por ruptura hidráulica da rocha de formação.

Inicialmente, aplicações numéricas foram executadas considerando as versões bidimensional (PFC2D) e tridimensional (PFC3D) do software. Devido à diferença nos números de contatos e na determinação da porosidade entre ambas as versões, os resultados numéricos obtidos em termos de velocidade de fluxo, forças de contato, etc. não apresentaram boa concordância. Desta forma, optou-se por utilizar apenas a versão 3D, que permitiu simulações mais próximas da natureza do problema, além do processamento computacional ser mais rápido.

Da análise dos quatro cenários discutidos no capítulo 4, as seguintes conclusões gerais podem ser obtidas, em relação a uma fratura com largura normalizada crítica de 4,5:

- a) existe um intervalo de tensões de fechamento no qual o gradiente de pressão necessário para desestabilizar o pacote granular é bastante alto (superior a 75 psi/ft). O mecanismo que controla a estabilidade do pacote granular deve-se à formação de um arco compressivo de sustentação na região frontal do pacote, além da maior resistência ao deslizamento entre partículas do material de sustentação devido à ação das componentes normais das forças de interação. Nesta dissertação, o intervalo ideal de tensões de fechamento situa-se entre 1500 a 5000 psi para propante 12/20 com granulometria uniforme.
- b) Existe um valor limite da tensão de fechamento (nesta dissertação em torno de 5500 psi) acima do qual a instabilidade do pacote decorre principalmente devido às componentes, na direção do eixo da fratura, das

forças de contato que ultrapassam a resistência ao deslizamento entre partículas. Ocorre uma “extrusão” de grãos, que podem ser transportados pelo fluido sob baixos gradiente de pressão. Além deste fato, pode ainda ocorrer o esmagamento de partículas, formação de finos, etc., que diminuem a porosidade e contribuem para a ocorrência do refluxo do material de sustentação, como mostra os gráficos do modelo semi-mecânico de Canon (2003) nas figuras 2.15 e 2.16. No entanto, estes gráficos devem ser interpretados com certa cautela, sobretudo para o caso do propante de cerâmica de elevada resistência, pois não está levando em conta os efeitos mecânicos das forças de contato que tentem a desestabilizar o pacote sob altas tensões de fechamento.

- c) Existe um valor da tensão de fechamento (nesta dissertação em torno de 1000 psi), abaixo do qual o pacote pode ser desestabilizado por fluxo sob valores de gradiente de pressão inferiores a 10 psi/ft. Neste intervalo, o arco de sustentação se encontra sob ação de forças compressivas baixas que, também produzem resistências ao deslizamento entre partículas baixas.
- d) Estes valores de tensão podem sofrer variações, dependendo das características do propante (principalmente da coesão e ângulo de atrito, distribuição granulométrica, rigidez dos grãos em relação à rocha). Asgian et al (1995) com base no MED obtiveram estabilidade do pacote granular para tensão de fechamento de 940 psi, com largura normalizada crítica de 5,5 e gradiente de pressão de 75 psi/ft, considerando maior variação na distribuição granulométrica do propante 20/40 com $G_{\text{propante}} / G_{\text{rocha}} = 0,6$.
- e) Estes valores de tensão podem sofrer variações dependendo da largura normalizada da fratura. Nesta dissertação, constatou-se que para valores menores do que o crítico ($W_r = 4,5$), a tendência é de aumentar a região estável enquanto que para valores acima ocorre um súbito colapso do pacote granular sob baixos valores de gradiente de pressão e quase que independentemente da tensão de fechamento aplicada. Na tabela 4.23 observa-se que o pacote passa subitamente de uma condição estável com largura normalizada 4,5 para uma condição instável com largura normalizada 4,6 e sob gradiente de pressão de 5 psi/ft. Esta brusca mudança de comportamento também foi notada nas análises por elementos

discretos por Asgian et al (1995) onde o pacote granular passou da condição estável com largura normalizada de 5,5 para a condição instável com largura normalizada da fratura de 5,6.

- f) As forças de arraste na direção do fluxo, aplicadas pelo fluido aos grãos de propante, resultaram menores para tensões de fechamento elevadas do que para baixas, porque no primeiro caso há a ação simultânea das componentes das forças de contato na direção do fluxo que tendem a ultrapassar a resistência ao deslizamento entre partículas e colapsar o arco de sustentação do pacote.
- g) Milton-Taylor et al. (1992), estudando em laboratório os efeitos do embutimento das partículas na rocha, constatou estabilidade do material de sustentação de uma fratura de largura normalizada 4,3 sob tensão de confinamento 1000 psi até um gradiente de pressão igual a 50psi/ft. Para uma rocha plástica, com a ocorrência de penetração do propante, a estabilidade do pacote manteve-se inclusive para largura normalizada de fratura igual a 6,1, sob os mesmos valores de tensão de fechamento e gradiente de pressão. Nesta dissertação, onde as partículas e parede foram admitidas rígidas, a estabilidade de uma fratura de largura normalizada 4,3 sob tensão de fechamento 1000 psi foi obtida para gradientes de pressão em torno de 20 psi/ft (tabela 4.23)¹.
- h) A granulometria exerce uma influência significativa na estabilidade do pacote granular (uma das diferenças entre os resultados desta dissertação e do trabalho de Asgian et al (1995) possivelmente é devida à distribuição granulométrica). Os efeitos da granulometria foram investigados por Milton-Taylor et al. (1992) em ensaios de laboratório. Utilizando material com 50% do tamanho de peneira 16/20 e 50% do tamanho 20/40 observaram que o pacote granular tornou-se mais estável do que quando formado com qualquer uma das duas granulometrias isoladamente
- i) Resultados de campo indicam que fraturas são estáveis além das larguras normalizadas críticas determinadas em modelos numéricos ou ensaios de

¹ O pacote foi considerado potencialmente instável quando o colapso do arco de sustentação ocorre na metade posterior do comprimento do modelo

laboratório. Uma possível explicação é que o refluxo ocorra apenas em uma região da fratura próxima ao poço e que a mesma permaneça aberta, sustentada por uma única camada de grãos espaçados (efeito *pinch-out*), com condutividade ainda bastante alta, não afetando a produtividade do poço. Outra explicação é que a aderência entre grãos pode ser maior em campo pela utilização de tratamento no propante. Resultados numéricos prevêm um colapso súbito e catastrófico do pacote granular, enquanto que em campo este fenômeno pode durar por vários meses, com a diferença debitada ao fato de que o modelo numérico não contempla toda a complexidade do problema de campo, como a degradação de gel com o tempo, interação com a rocha, entre outros fatores.

- j) Comparativamente com os resultados obtidos com o programa PFC3D, as melhores previsões foram obtidas com o modelo semi-mecânico (Canon, 2003) que incorpora os efeitos da largura normalizada da fratura, tensão de fechamento, gradientes de pressão e resistência ao esmagamento do propante. O modelo de cunha livre sofre de inconsistências em sua formulação (ver capítulo 2) e o modelo do consórcio Stimlab prevê uma velocidade infinita com o aumento da tensão de fechamento, em contradição ao comportamento discutido no item f) e resultados experimentais mais recentes de Parker et al. (1999), Goel et al. (1999), Jim et al. (1999), dentre outros.

- k) Para uma investigação de fenômeno tão complexo quanto o refluxo do material de sustentação de fraturas, a aplicação do conjunto de ferramentas computacionais, ensaios de laboratório e observações de campo é necessária para uma visão integrada e geral do problema. Embora os resultados obtidos pelo MED possam não refletir exatamente o comportamento de campo, simulações computacionais do problema, como as executadas nesta dissertação, são fundamentais para permitir uma melhor compressão dos mecanismos envolvidos (mecânicos e hidráulicos) e as principais variáveis que controlam os resultados. Refinamentos posteriores, como a interação fluido-partícula-rocha (embutimento), representação do estrangulamento (*pinch-out*), etc. podem melhorar a

capacidade de previsão do modelo, embora as condições de campo nem sempre possam ser reproduzidas.

- l) Finalmente, há que comentar que os tempos de processamento na modelagem do problema pela mecânica das partículas é medido em dias, dependendo do número de partículas envolvidas e do tempo de análise. No entanto, com o rápido desenvolvimento da indústria de computadores, esta dificuldade certamente deverá ser superada em breve, mesmo sem o auxílio de técnicas de multiprocessamento.

5.2. SUGESTÕES

Como sugestão de pesquisas futuras no mesmo tema, considerando a utilização do programa computacional PFC3D, os seguintes aspectos do comportamento de pacotes granulares poderiam ser investigados através de um estudo paramétrico:

- a) Construir gráficos de estabilidade, semelhantes ao do modelo semi-mecânico, considerando variações nos valores das tensões de fechamento, gradientes de pressão e larguras normalizadas de fratura, como se tentou, de forma ainda preliminar, com os gráficos da figura 4.21.
- b) Considerar pacotes com diferentes granulometrias para verificar suas influências nas condições de estabilidade;
- c) Utilizar propantes com diferentes densidades, ângulos de atrito e coesão, inclusive para representação do efeitos de tratamento de propantes (resinas);
- d) Verificar a influência da diferença de rigidez entre as partículas e a rocha da formação;
- e) Melhorar as condições de contornos do modelo 3D, empregando a opção de contornos periódicos para representar uma grande altura da fratura vertical;