

4

MODELAGEM DO REFLUXO DO MATERIAL DE SUSTENTAÇÃO

4.1

INTRODUÇÃO

Nesta seção apresentam-se as modelagens numéricas da estabilidade do pacote granular no interior das fraturas mediante aplicação do programa computacional PFC. São considerados quatro cenários distintos, enumerados de 1 a 4.

Os dados dos cenários 1 e 2 foram retirados da dissertação de mestrado de Velozo (2006) e Santos (2004) e para o cenário 3 da dissertação de Cachay (2005). O cenário 4 replica o cenário 1, com algumas variações em relação à tensão de fechamento, temperatura e pressão no poço. Para o cenário 1 foram feitas análises bi (PFC2D) e tridimensionais (PFC3D).

Para os quatro cenários o poço foi considerado vertical. A geometria da fratura referente aos cenários 1 e 2 foi obtida através do simulador de propagação 3D de fraturas “MFRAC III – *A Three Dimensional Hydraulic Fracturing Simulator*” (Santos, 2004), enquanto que para o cenário 3 esta foi retirada da literatura (Canon, 2003).

As propriedades do material de sustentação das fraturas foram obtidas através da consulta a catálogo de fornecedores (*Clearwater* e *Carboceramics*). Em todos os cenários considerou-se propante de bauxita de granulometria 12/20, com propriedades detalhadas nas tabelas 4.1 e 4.2¹.

¹ De acordo com a norma API RP60 a granulometria do propante 12/20 tem diâmetros de partícula no intervalo $0,85\text{mm} < d_p < 1,7\text{mm}$.

4.2

CENÁRIO 1

4.2.1

Características

A produtividade de um poço é estabelecida mediante o índice de produtividade (IP), definido para a condição de fluxo permanente como a relação entre a vazão de produção do poço (Q_p) e a diferença entre as pressões no reservatório (p_e) e no fluido no fundo do poço (p_f).

Tabela 4.1 - Características do Material de Sustentação dos Cenários 1, 2 e 4 (Veloze, 2006)

CARACTERISTICAS DO MATERIAL	SIMBOLO	VALOR
Diâmetro médio	d_p	1,25 mm (0,0492 in)
Densidade do grão (aparente)	SGp	3,6
Massa específica (bulk)	ρ_p	2,07 g/cm ³ (131 lb/ft ³)
Resistência máxima	Smax	15000 psi
Esfericidade	Φ_p	0,9
Ângulo de atrito	ϕ	35
Porosidade	n	0,4
Módulo de cisalhamento	G	1,4989e10 Pa
Coefficiente de Poisson	v	0,15

Tabela 4.2 - Características do Material de Sustentação do Cenário 3 (Cachay, 2005)

CARACTERISTICAS DO PROPANTE	SIMBOLO	VALOR
Diâmetro médio	d_p	1,041 mm (0,041 in)
Densidade do grão (aparente)	SGp	3,56
Massa específica aparente (bulk)	ρ_p	2,07 g/cm ³ (131 lb/ft ³)
Resistência máxima	Smax	16000 psi
Esfericidade	Φ_p	0,9
Ângulo de atrito	ϕ	35
Porosidade	n	0,4
Módulo de cisalhamento	G	1,4989e6 Pa
Coefficiente de Poisson	v	0,15

$$IP = \frac{Q_p}{p_e - p_f} \quad (4.1)$$

O cenário 1 representa uma formação de baixa permeabilidade, em grande profundidade, e sob altas temperaturas. O poço, neste cenário, foi considerado

com índice de produtividade $IP = \frac{2m^3 / \text{dia}}{\text{kgf} / \text{cm}^2}$.

As características da formação rochosa, do poço, do fluido e da fratura estão apresentadas nas tabelas 4.3, 4.4., 4.5, 4.6, respectivamente.

Tabela 4.3- Características da Formação

CARACTERÍSTICAS DA ROCHA	SÍMBOLO	VALOR
Permeabilidade	K	5 mD
Temperatura	T	138 °C (280 °F)
Tensão de Fechamento	$P_{c,net}$	52,91 MPa (7673,48 psi)
Espessura da zona de interesse	h_p	20 m (65,62 ft)
Raio do reservatório	r_e	400 m (1312 ft)
Coeficiente de Poisson	ν	0,15
Módulo de Young	E	34474 MPa (5e6 psi)
Módulo de cisalhamento	G	14989 MPa (2,17e6 psi)
Tensão horizontal mínima	σ_{min}	62,05 MPa (9000 psi)

Tabela 4.4 - Características do Poço Vertical

CARACTERÍSTICAS DO POÇO	SÍMBOLO	VALOR
Pressão no fundo do poço	P_{wf}	13,79 MPa (2000 psi)
Pressão no reservatório -estática	P_e	27,58 MPa (4000 psi)
Vazão de produção	Q_p	0,0033 m ³ /s (9936 ft ³ /dia)

Tabela 4.5 - Características do Fluido

CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO	SÍMBOLO	VALOR
Densidade API	API	40° API
Viscosidade dinâmica	μ	0,73 cp
Massa específica	ρ_f	825,1kg/m ³ (51,51 lb/ft ³)
Velocidade do fluido	v	0,0103 m/s (0,0337 ft/s)
Gradiente de pressão na fratura	dP/dx	3,41 psi/ft

Tabela 4.6 - Características da Fratura

CARACTERÍSTICAS DA FRATURA	SÍMBOLO	VALOR
Largura média	W	6,04 mm (0,24 in)
Largura normalizada	W_r	4,88
Largura máxima da fratura	W_{max}	13,73 mm (0,54 in)
Comprimento da fratura	L	149,26 m (489,68 ft)
Altura da fratura	h_f	51,99 m (170,58 ft)
Permeabilidade do pacote granular	k_f	2,28x105 mD
Concentração do propante	C_p	9,54 kg/m ² (1,95 lb/ft ²)
Condutividade	C_d	1346,3 mD.m (4417 mD.ft)

4.2.2

Modelagem utilizando os programas PFC2D e PFC3D

Na modelagem pelo método dos elementos discretos da fratura, do material de sustentação (discos, no caso 2D e esferas, no caso 3D) e do fluido, foram adotadas as seguintes etapas:

4.2.2.1

Geração das partículas

O primeiro passo é a geração de milhares de partículas dentro de um segmento da fratura, representada por uma caixa de paredes rígidas com largura normalizada ($W_r + 2$) e comprimento normalizado $L/d_p = 50$. O comprimento normalizado adotado nesta dissertação foi o mesmo do trabalho de Asgian et al, (1995) que, após várias simulações numéricas, concluíram que o valor L/d_p igual a 50 representa adequadamente um modelo para estudo do refluxo de propantes com base no método dos elementos discretos.

As partículas foram geradas com uma distribuição granulométrica uniforme, com diâmetros variando entre as faixas de valores estabelecidas na tabela 4.7 mostradas na figura 4.1 e atendendo à porosidade de 40% do pacote granular. Os contactos entre partículas obedecem à lei Hertz-Mindlin (item 3.2.6.2), onde os contactos se tornam mais rígidos com o aumento da força compressiva (por causa do aumento da área de contato).

O resultado da geração de partículas é mostrado nas figuras 4.2 (análise 2D) e 4.3 (análise 3D).

Tabela 4.7 - Granulometria utilizada nos cenários 1,2 e 4

diâmetro (mm)	% peso acumulado
1,200	0
1,215	11
1,225	21
1,235	31
1,245	43
1,255	54
1,265	65
1,275	77
1,285	89
1,295	100

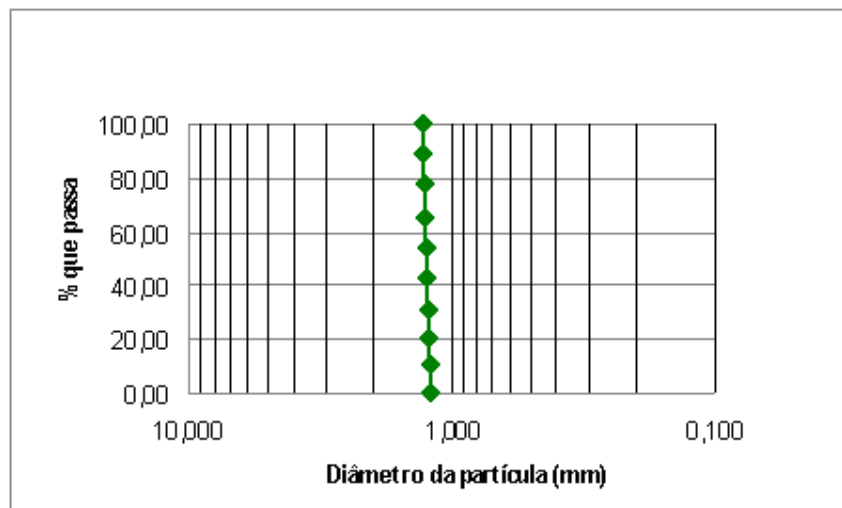


Figura 4.1- Granulometria adotada para os cenários 1,2 e 4.

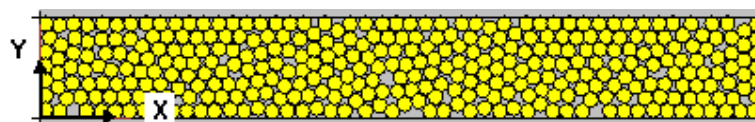


Figura 4.2 – Geração de partículas (discos) pelo programa PFC2D.

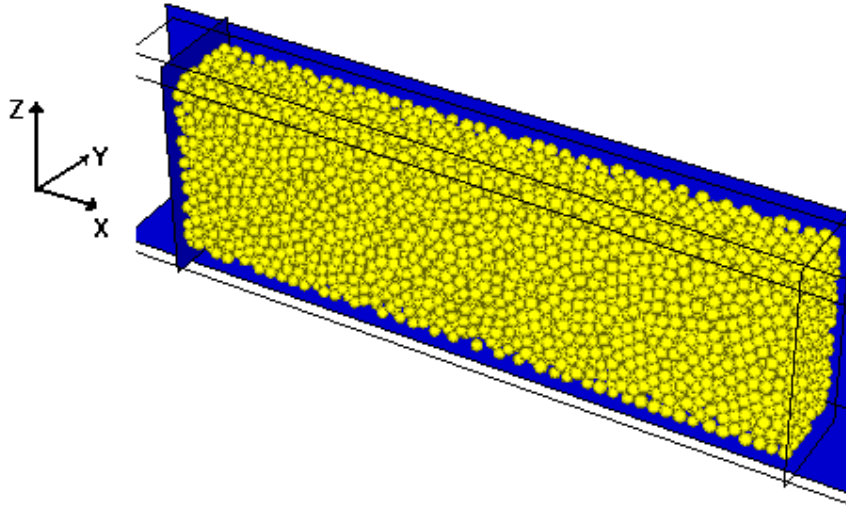


Figura 4.3 – Geração de partículas (esferas) pelo programa PFC 3D.

4.2.2.2 Condições de contorno

Na simulação 2D as partículas mais escuras em contato com o topo e a base da caixa (figura 4.4) são consideradas como paredes da fratura, com propriedades da rocha de formação (tabela 4.3). A face da fratura junto ao poço permite o livre movimento das partículas e a face oposta é formada por partículas impedidas de se movimentar no plano da fratura.

As condições de contorno adotadas nas análises 3D são apresentadas na figura 4.5. Foram testadas diversas alturas relativas do modelo 3D, considerando-se os valores (h/d_p) iguais a 5, 10, 15 e 20, cujos resultados serão discutidos no item 4.2.2.5.

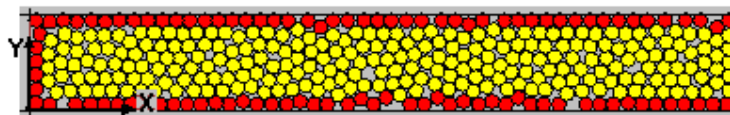


Figura 4.4 - Condições de contorno no problema bidimensional.

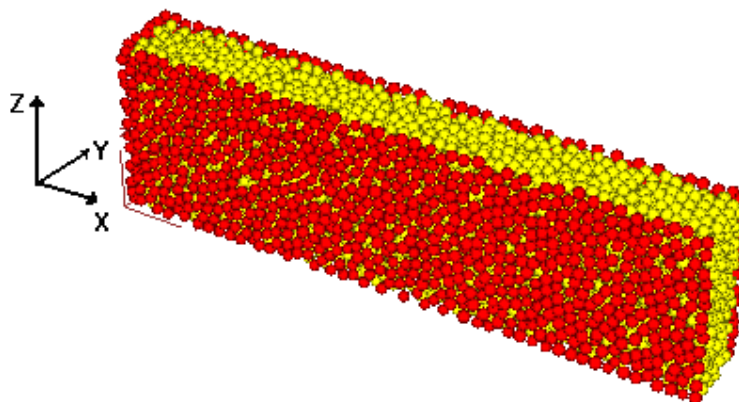


Figura 4.5 – Condições de contorno no problema tridimensional.

4.2.2.3 Tensão de fechamento

No caso 2D, para aplicação da tensão de fechamento sobre o pacote granular, todos os contornos do modelo (4 lados) são movimentados a baixas velocidades, comprimindo o pacote. Através de um mecanismo servo-controlado (disponível em subrotina FISH da biblioteca do PFC2D) as tensões hidrostáticas induzidas são controladas até que atinjam o valor da tensão de fechamento especificada pelo usuário.

Na simulação 3D, o movimento dos contornos acontece com as seis faces do paralelepípedo da figura 4.5. A subrotina para servo-controle disponível no PFC3D foi modificada para adaptar a geometria cilíndrica original para um paralelepípedo.

Após atingido o valor da tensão de fechamento, certa quantidade de partículas, no contorno lateral da direita, é removida para simular a presença do poço (figuras 4.6 e 4.7). O início do fluxo de partículas acontece, provocado por causas mecânicas (tensão de fechamento). Vale a pena também observar na figura 4.6 a formação de trajetórias de tensão, já nesta fase da análise.

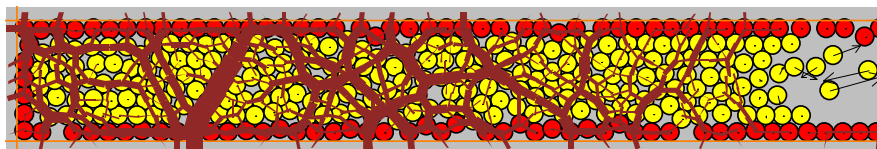


Figura 4.6 – Fluxo de partículas pela aplicação da tensão de fechamento (caso 2D).

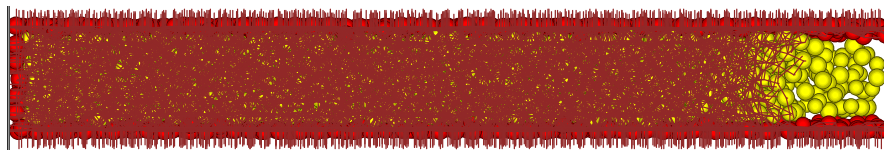


Figura 4.7 - Fluxo de partículas pela aplicação da tensão de fechamento (caso 3D).

4.2.2.4

Aplicação do fluido

Novamente atingido o equilíbrio após a aplicação da tensão de fechamento, o fluido é aplicado na face lateral posterior, para o qual são definidas as propriedades de viscosidade dinâmica, densidade e gradiente de pressão. As figuras 4.8 e 4.9 apresentam as trajetórias de fluxo indicadas pelos vetores de velocidade.

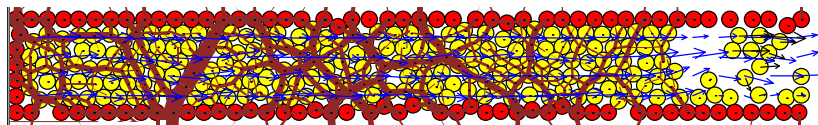


Figura 4.8 – Vetores de velocidade do fluido na simulação 2D.

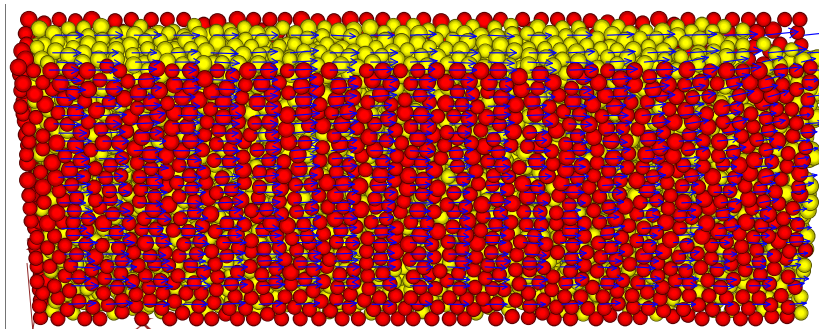


Figura 4.9 – Vetores de velocidade do fluido na simulação 3D.

4.2.3

Comentários sobre a definição do modelo 3D

Foram executadas análises considerando o modelo com as seguintes alturas normalizadas (h/d_p) : 5, 10, 15 e 20, com o objetivo de verificar a influência dos contornos artificiais da base e do topo do modelo sobre os resultados das simulações numéricas.

Para a altura normalizada $h/d_p = 5$ não há ocorrência do refluxo (figura 4.10) enquanto que para a configuração $h/d_p = 10$ observa-se que um grupo de partículas da região central junto ao poço se movimenta no tempo $t = 2s$ (figura 4.11), porém o pacote granular continua ainda estável. Para as alturas normalizadas $h/d_p = 15$ e $h/d_p = 20$ o fenômeno do refluxo do material de sustentação já se manifesta em $t = 2s$ (figura 4.12).

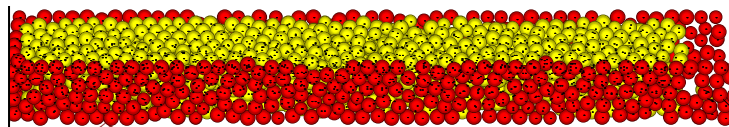


Figura 4.10 – Resultados em $t=2s$ para modelo com $h/d_p = 5$.

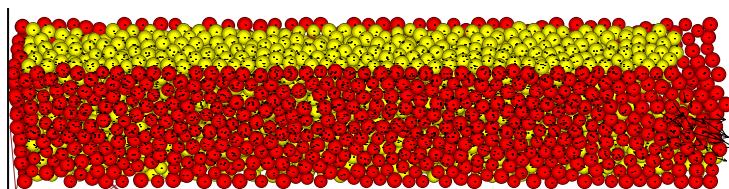


Figura 4.11 – Resultados em $t=2s$ para modelo com $h/d_p = 10$.

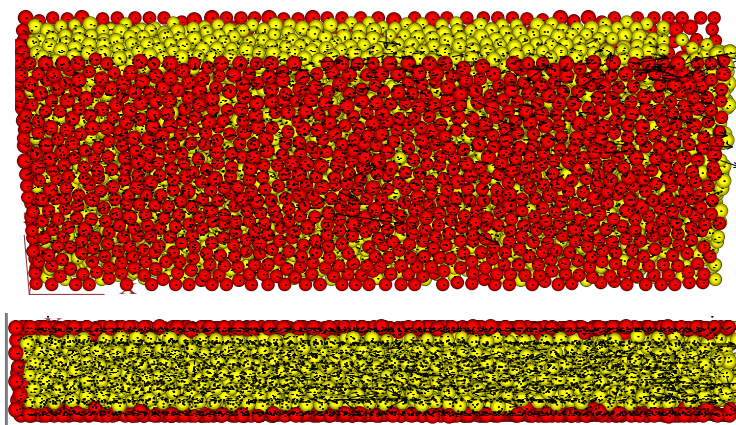


Figura 4.12 – Resultados em $t=2s$ para modelo com $h/d_p = 20$ (vista lateral na figura superior e vista de topo na figura inferior).

As velocidades de fluxo ao longo do eixo central da fratura podem ser observadas na figura 4.13, onde são comparados os valores obtidos com as simulações 2D e 3D. Como pode ser observado considerando partículas esféricas (3D) as velocidades são de 3 a 5 vezes superiores às velocidades na hipótese de discos (2D). Nota-se também que na análise 2D a velocidade do fluido através dos

poros é cerca de 5 vezes maior do que a velocidade aparente (v_f) determinada pela lei de Darcy (equação 4.2):

$$v_f = \frac{Q_p}{\frac{W}{12} h_f} \quad (4.2)$$

onde v_f é a velocidade do fluido em ft/s, Q_p é a vazão de produção do poço em ft^3/s , W a largura média da fratura em polegadas (in) e h_f a altura da fratura em pés (ft).

Os resultados das análises 3D em termos de velocidades do fluido com $h/d_p = 10, 15$ e 20 são similares entre si, variando de um valor mais alto na região posterior do pacote granular, para uma velocidade média na região central e decrescendo na região próxima ao poço (no caso $h/d_p = 20$, este decréscimo foi menos pronunciado porque grande parte das partículas já havia se movimentado).

A partir destes resultados optou-se por considerar uma altura de fratura na simulação 3D com o valor $h/d_p = 15$.

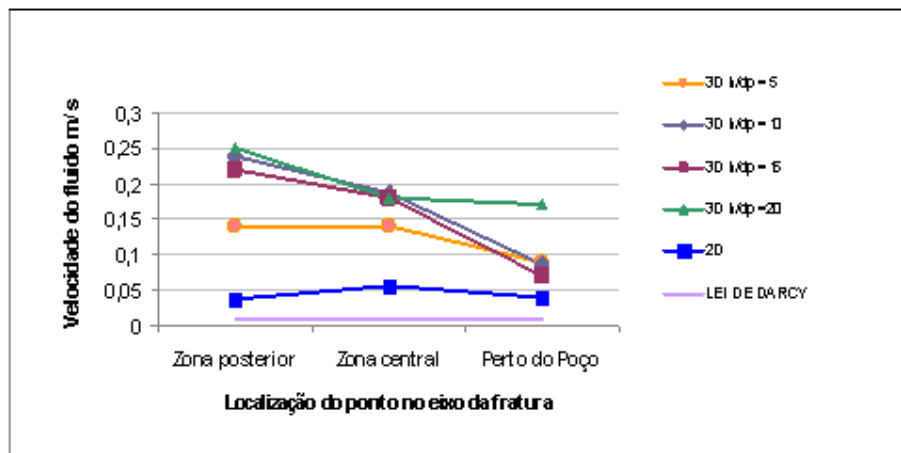


Figura 4.13 - Velocidades do fluido ao longo do eixo da fratura em três pontos do pacote granular, determinados com os programas PFC2D e PFC3D.

4.2.4 Comparações entre as modelagens 2D e 3D

A largura normalizada da fratura e a tensão de fechamento foi a mesma nas análises 2D e 3D. Na análise 3D a porosidade (n) escolhida foi de 0,4. Na análise 2D a porosidade selecionada, após várias tentativas, foi 0,2 de modo que a largura

normalizada da fratura e a tensão de fechamento fossem as mesmas em ambas as simulações (2D e 3D).

Logo, é de se esperar que o número de contatos entre esferas seja maior do que o número de contatos entre discos, o que é semelhante a dizer que as forças de contato no modelo 3D sejam menores do que no modelo 2D.

Por sua vez, as maiores forças de contato no modelo bidimensional provocam maior superposição entre as partículas, necessitando-se de uma lei de contato com maior rigidez no modelo 2D para evitar a ocorrência de superposições exageradas e irreais de partículas.

Em consequência, o tempo computacional para uma análise 2D é muito maior do que análise 3D, porque o passo de tempo na formulação explícita adotada pelo PFC é inversamente proporcional à rigidez do contato

A tabela 4.8 apresenta algumas comparações, para o cenário 1, das análises 2D e 3D.

Tabela 4.8 – Comparações entre modelos 2D e 3D para o cenário 1

Modelagem 2D		Modelagem 3D	
Porosidade menor	~ 0,20	Porosidade maior	~0,40
Máximas forças de contato maiores	~1640 N	Máximas forças de contato menores	400 - 500 N
Superposições nos contatos maiores (limitação aumentando-se valor de G)	G = 1.500 GPa	Superposições nos contatos menores	G =15 MPa
Velocidade do fluido maior do que a velocidade aparente estimada pela lei de Darcy	0,03-0,05 m/s	Velocidade do fluido bastante maior do que a velocidade aparente estimada pela lei de Darcy	0,07-0,27 m/s
Passo de tempo menor	1,00E-10	Passo de tempo maior	1,67E-07
Estabilidade	estável	Estabilidade	instável

Pelo exposto conclui-se que as análises de estabilidade de pacotes granulares no caso da possibilidade da ocorrência do refluxo do material de sustentação parece ser mais confiável em simulações 3D do que em 2D. A partir deste ponto, todos os resultados apresentados se referem a análises 3D executadas com o programa computacional PFC3D.

4.2.5 Resultados

O cenário 1, cujas propriedades foram detalhadas nas tabelas 4.1, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, é característico de reservatórios de grande profundidade, sob altas temperaturas (138°C) e elevadas tensões de fechamento (7673 psi). A largura normalizada da fratura é (W_r)= 4,88 e o gradiente de pressão no fluido (dP/dx) é de 3,41 psi/ft.

Os resultados das análises via MED apresentam um pacote granular instável (tabela 4.10, 6ª linha). Este resultado concorda com os resultados das análises empíricas feitas por Velozo (2006), conforme tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resultados da análise de estabilidade por modelos empíricos (Velozo, 2006)

MODELO	VARIAVEL DE CONTROLE	VALOR (V)	VALOR CRITICO (V_c)	V/V_c	RESULTADO
Stimlab	Velocidade (V_c)	0,034 ft/s	7,34 ft/s	0,005	estável
Semi-mecânico	Gradiente de pressão (dP/dx)	3,41 psi/ft	2,72 psi/ft	1,254	instável
Cunha livre	Largura normalizada (W_r)	4,88	4,31	1,132	instável
Velocidade mínima de fluidificação	Velocidade (V_f)	0,034	0,020 ft/s	1,685	instável

O único método que apresentou resultado discrepante foi o do consórcio Stimlab. Todavia, a correlação empírica proposta admite que a velocidade crítica tende a infinito à medida que a tensão de fechamento for continuamente majorada. Conseqüentemente, para valores da tensão de fechamento da fratura superiores a 7.000 psi (48 MPa) a correlação do consórcio Stimlab é pouco confiável (Asgian, et al., 1994; Sparlin e Hagen, 1995).

Variações das características do cenário 1 foram analisadas a seguir, mantendo-se a tensão de fechamento constante, mas variando os valores da largura normalizada da fratura e do gradiente de pressão do fluido, com o objetivo

de melhor compreender os mecanismos de instabilidade do pacote granular nos diversos casos analisados.

Os resultados estão sumarizados na tabela 4.10, onde a barra vertical na última coluna indica a posição do arco de sustentação na face livre do propante. Nesta pesquisa, definiu-se um pacote como potencialmente instável quando ocorre o colapso do arco de sustentação formado pela aplicação da tensão de fechamento, desde que situado na metade posterior do comprimento do modelo.

Tabela 4.10 – Análises de estabilidade do pacote granular com variações do cenário 1

W/d_p	No de grãos de propante modelados	Tensão de fechamento (psi)	Gradiente de pressão (psi/ft)	Resultado	Posição do arco
5,5	3596	7673	sem fluido	instável	
5,5	3596	7673	3	instável	
4,88	3408	7673	sem fluido	instável	
4,88	3408	7673	2	instável	
4,88	3408	7673	2,7	instável	
4,88	3408	7673	3,41	instável	
4,5	2992	7673	sem fluido	estável	
4,5	2992	7673	2	estável	
4,5	2992	7673	5	instável	
4,3	2875	7673	sem fluido	estável	
4,3	2875	7673	3,45	estável	
4,3	2875	7673	4,7	estável	
4,3	2875	7673	10	instável	
4,3	2875	7673	50	instável	
4	2683	7673	sem fluido	estável	
4	2683	7673	3,45	estável	
4	2683	7673	50	estável	
4	2683	7673	100	estável	
3,6	2311	7673	3,45	estável	
3,6	2311	7673	4,7	estável	
Cenário original					

Dos resultados conclui-se que:

- para fratura com pequena largura normalizada ($W_r = 4$) o pacote granular é estável mesmo com o fluido sob elevado gradiente de pressão (100 psi/ft);
- para fratura com largura normalizada $W_r = 4,3$ o material de sustentação tornou-se instável com o fluido sob gradiente de pressão dez vezes inferior (10 psi);

- c) para fratura com largura normalizada $W_r = 4,5$ o pacote granular apresentou instabilidade sob gradiente de pressão igual a 5 psi/ft;
- d) para fratura com largura normalizada $W_r = 4,88$, apenas com a aplicação da tensão de fechamento o pacote granular já é potencialmente instável (“extrusão de partículas”), deixando-o totalmente incapaz de resistir às forças hidrodinâmicas.

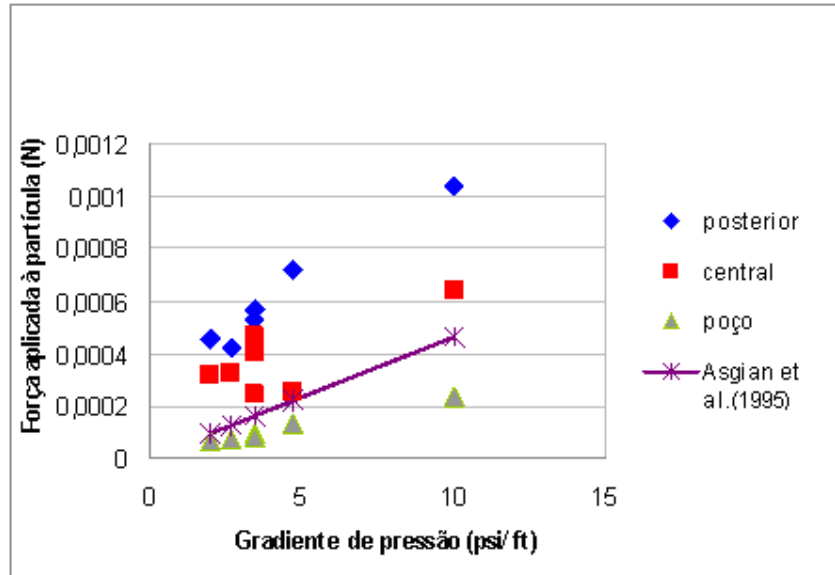


Figura 4.14 – Forças de arraste aplicadas nas partículas em função do gradiente de pressão ao longo do eixo da fratura, nas regiões posterior, central e próxima ao poço, nas variações do cenário 1.

Os valores das forças de arraste aplicadas pelo fluido nas partículas (na direção horizontal do fluxo) estão mostradas na figura 4.14, juntamente com as forças de arraste correspondentes utilizadas por Asgian et al, (1995) e calculadas

como $F = \frac{8}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^3 \frac{dP}{dx}$ (ver figura 3.14). Notar na figura 4.14 que as forças de

arraste consideradas no programa TRUBAL por Asgian et al, (1995) variam linearmente em função do gradiente de pressão, enquanto que aquelas determinadas pelo PFC3D dependem de diversos parâmetros do fluido e do pacote granular (equação 3.28). As forças de interação na parte posterior da fratura apresentam grandes diferenças de valores entre ambas as metodologias.

4.3 CENÁRIO 2

4.3.1 Características

O cenário 2 representa uma formação de alta permeabilidade, em profundidade e temperatura intermediárias (93°C), sob tensão de fechamento igual a 5533 psi com largura normalizada da fratura (W_r) de 12. O poço, neste cenário, foi considerado com índice de produtividade (IP) de $\frac{10m^3 / dia}{kgf / cm^2}$. Detalhes das propriedades podem ser conferidos nas tabelas 4.11 a 4.14.

Tabela 4.11 - Características da Formação

CARACTERÍSTICAS DA ROCHA	SÍMBOLO	VALOR
Permeabilidade	K	100 mD
Temperatura	T	93 (200 °F)
Tensão de Fechamento	$P_{c,net}$	38,15 MPa (5533,63 psi)
Espessura da zona de interesse	h_p	20,0 m (65,62 ft)
Raio do reservatório	r_e	400 m(1312 ft)
Coeficiente de Poisson	ν	0,15
Módulo de Young	E	34474 MPa (5e6 psi)
Módulo de cisalhamento	G	14987 MPa (2,2 e6 psi)
Tensão mínima horizontal	σ_{min}	34,47 MPa (5000 psi)

Tabela 4.12 - Características do Poço Vertical

CARACTERÍSTICAS DO POÇO	SÍMBOLO	VALOR
Pressão no fundo do poço	P_{wf}	12,4 MPa (1800 psi)
Pressão no reservatório - estática	P_e	24,1 MPa (3500 psi)
Vazão de produção	Q_p	0,0138 m ³ /s (42163 ft ³ /dia)

Tabela 4.13 - Características do Fluido

CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO	SÍMBOLO	VALOR
Densidade API	API	40 ° API
Viscosidade dinâmica	μ	1,25 cp

Massa específica	ρ_f	825,0 kg/m ³ (51,51 lb/ft ³)
Velocidade do fluido	v	0,0322 m/s (0,1057 ft/s)
Gradiente de pressão na fratura	dP/dx	10,68 psi/ft

Tabela 4.14 - Características da Fratura

CARACTERÍSTICAS DA FRATURA	SÍMBOLO	VALOR
Largura média	W	15,07 mm (0,59 in)
Largura normalizada	W_r	12
Largura máxima da fratura	W_{max}	26,09 mm (1,03 in)
Comprimento da fratura	L	50,55 m (165,84 ft)
Altura da fratura	h_f	28,62 m (93,90 ft)
Permeabilidade do pacote granular	k_f	3,90e ⁵ mD
Concentração do propante	C_p	15,04 kg/m ² (3,08 lb/ft ²)
Condutividade	C_d	3572 mD.m (11719 mD.ft)

4.3.2 Resultados

Este cenário foi estudado anteriormente por Velozo (2006) empregando métodos empíricos para previsão do refluxo do material de sustentação da fratura. Seus resultados estão novamente mostrados na tabela 4.15. Novamente se observa que o modelo do consórcio Stimlab apresenta um valor de velocidade crítica alto, porque a tensão de fechamento ainda é elevada para uma utilização confiável do modelo. Observe também que pelo modelo da Cunha Livre o valor da largura normalizada resultou negativo, o que reflete as inconsistências do modelo já mencionadas no capítulo 2.

Pela análise do cenário 2, de acordo com o MED, o pacote granular também se apresenta instável (tabela 4.16) o que, de certa forma, seria esperado em função da grande largura normalizada da fratura ($W_r = 12$).

Observe também que pelo modelo semi-mecânico o pacote é considerado instável para gradientes de pressão superiores a 0,553 psi/ft enquanto que pelo MED o pacote torna-se instável apenas pela aplicação da tensão de fechamento. De certa forma, os resultados entre ambos os modelos são consistentes porque o gradiente de pressão crítico do modelo semi-mecânico é bastante baixo .

Tabela 4.15 Resultados da análise de estabilidade por modelos empíricos para o cenário 2 (Velozy, 2006).

MODELO	VARIAVEL DE CONTROLE	VALOR (V)	VALOR CRITICO (Vc)	V/Vc	SITUAÇÃO
Stimlab	Velocidade (Vc)	0,061 ft/s	0,124 ft/s	0,005	estável
Semi-mecânico	gradiente de pressão (dP/dx)	6,12 psi/ft	0,553 psi/ft	1,254	instável
Cunha livre	Largura normalizada (Wr)	12	-9.636	1,132	instável
Velocidade Mínima de Fluidificação	Velocidade (Vf)	0,061	0,013 ft/s	4,802	instável

Variações do cenário 2 também foram investigadas, mantendo-se constante a tensão de fechamento e variando-se os valores dos gradientes de pressão e das larguras normalizadas (ver detalhes na tabela 4.16).

- para fratura com largura normalizada $W_r = 4,3$ o material de sustentação apresenta-se estável mesmo sob gradientes de pressão elevados (100 psi/ft).
- para fratura com largura normalizada $W_r = 4,5$ o pacote granular apresenta instabilidade sob pequenos gradientes de pressão (5 psi/ft), de maneira similar ao caso examinado nas variações do cenário 1 (tabela 4.10).
- para fratura com largura normalizada $W_r = 5$ o material de sustentação é instável com gradiente de pressão de apenas 2 psi /ft.
- para fratura com largura normalizada $W_r = 5,5$ apenas com a aplicação da tensão de fechamento as partículas iniciaram o movimento em direção ao poço (“extrusão”), deixando o pacote granular totalmente instável quando da aplicação do fluido.

Tabela 4.16 – Análises de estabilidade do pacote granular com variações do cenário 2

W/d _p	No de grãos de propante modelados	Tensão de fechamento (psi)	Gradiente de pressão (psi/ft)	Resultado	Posição do arco
12	9098	5533	sem fluido	instável	
5,5	3600	5533	sem fluido	instável	
5,5	3600	5533	21	instável	
5	3405	5533	sem fluido	estável	
5	3405	5533	2	instável	
5	3405	5533	25,6	instável	
4,5	2979	5533	sem fluido	estável	
4,5	2979	5533	3	estável	
4,5	2979	5533	5	instável	
4,5	2979	5533	10	instável	
4,5	2979	5533	28,5	instável	
4,5	2979	5533	35	instável	
4,3	2850	5533	sem fluido	estável	
4,3	2850	5533	29,8	estável	
4,3	2850	5533	40	estável	
4,3	2850	5533	80	estável	
4,3	2850	5533	100	estável	
Cenário original					

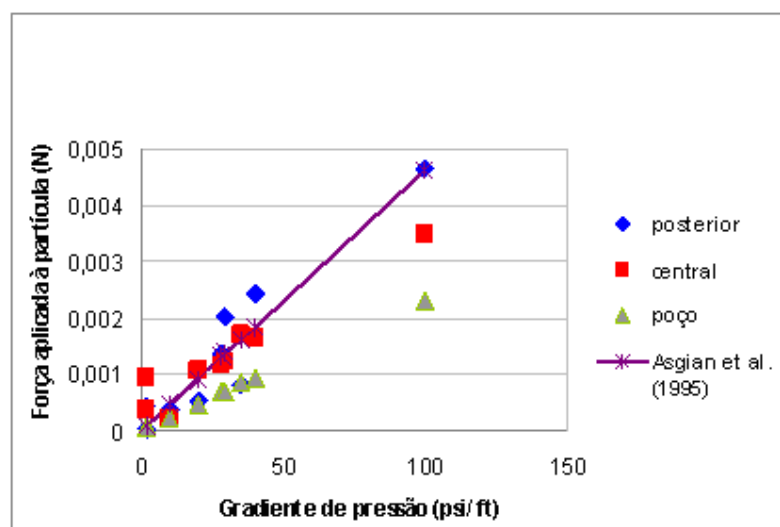


Figura 4.15 – Forças de arraste aplicadas nas partículas em função do gradiente de pressão ao longo do eixo da fratura, nas regiões posterior, central e próxima ao poço, nas variações do Cenário 2.

Os valores das forças de arraste aplicadas pelo fluido nas partículas (na direção horizontal do fluxo) estão mostradas na figura 4.15, juntamente com as forças de arraste correspondentes utilizadas por Asgian et al, (1995). No caso das

análises com tensões de fechamento intermediárias as forças de arraste calculadas pelo programa PFC3D na parte posterior da fratura são similares às aquelas determinadas pela expressão aproximada de Asgian, Cundall e Brady (1995) – ver figura 3.14.

4.4

Cenário 3

4.4.1

Características

As partículas foram geradas com uma distribuição granulométrica uniforme, com diâmetros variando entre as faixas de valores apresentadas na tabela 4.17 e mostradas na figura 4.16 e atendendo à condição de porosidade do pacote granular considerada igual a 40%.

As características da formação, do poço, do fluido e da fratura referentes ao cenário 3 estão apresentadas, respectivamente, nas tabelas 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21.

Tabela 4.17 - Granulometria do material de sustentação no cenário 3

diâmetro (mm)	% peso acumulado
1,00	9
1,01	18
1,02	26
1,03	35
1,04	46
1,05	56
1,06	66
1,07	78
1,08	89
1,09	100

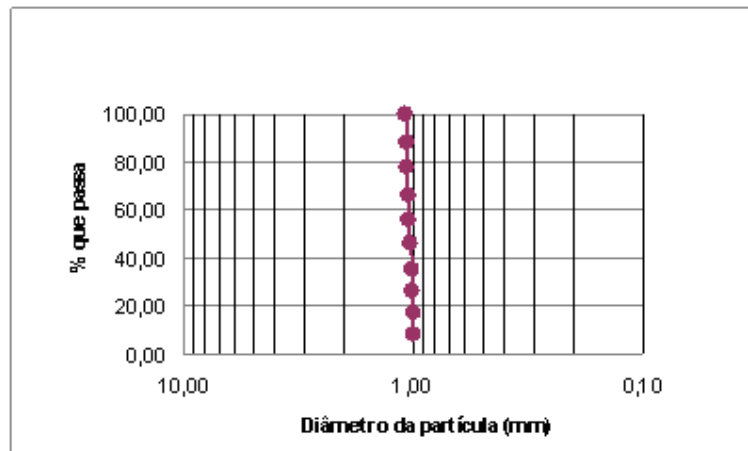


Figura 4.16 - Granulometria do material de sustentação no cenário 3.

Tabela 4.18 – Características da formação

CARACTERÍSTICAS DA ROCHA	SÍMBOLO	VALOR
Permeabilidade	K	50 mD
Temperatura	T	51 °C (124 °F)
Tensão de Fechamento	$P_{c,net}$	16,94 MPa (2457,16 psi)
Espessura da zona de interesse	h_p	15,1 m (49,54 ft)
Raio do reservatório	r_e	400 m (1312 ft)
Coeficiente de Poisson	ν	0,15
Módulo de Young	E	34474 MPa (5e6 psi)
Módulo de cisalhamento	G	14989 MPa (2,17 e6 psi)

Tabela 4.19 - Características do poço vertical

CARACTERÍSTICAS DO POÇO	SÍMBOLO	VALOR
Pressão no fundo do poço	P_{wlf}	2,7579 MPa (400 psi)
Pressão no reservatório - estática	p_e	3,8610 MPa (560 psi)
Vazão de produção	Q_p	0,000463 m ³ /s (1412,6 ft ³ /dia)

Tabela 4.20 - Características do fluido

CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO	SÍMBOLO	VALOR
Densidade API	API	32º API
Viscosidade dinâmica	μ	20 cp
Massa específica	ρ_f	865 kg/m ³ (54 lb/ft ³)
Velocidade do fluido	v	0,015 m/s (0,050 ft/s)
Gradiente de pressão na fratura	dP/dx	27,17 psi/ft

Tabela 4.21 - Características da fratura

CARACTERÍSTICAS DA FRATURA	SÍMBOLO	VALOR
Largura normalizada	W_r	4,84
Comprimento da fratura	L	29,17 m (95,71 ft)
Altura da fratura	h_f	20,92 m (68,65 ft)
Permeabilidade do pacote granular	k_f	5×10^5 mD
Concentração do propante	C_p	5.8589 kg/m^2 ($1,20 \text{ lb/ft}^2$)

4.4.2 Resultados

Este cenário foi estudado anteriormente por Cachay (2005) empregando também vários modelos empíricos para previsão do refluxo do material de sustentação da fratura. Seus resultados são mostrados na tabela 4.22.

O resultado obtido pelo programa PFC3D indica que para as condições do cenário 3 o pacote granular é instável. Foram realizadas análises para larguras normalizadas (W_r) de fratura de 4,6 (instabilidade ocorre com gradiente de pressão de 5 psi/ft), $W_r = 4,7$ e $W_r = 5$ (para ambas o refluxo acontece com gradiente de pressão de 2 psi/ft). Embora o tabela não mencione resultados para $W_r = 4,84$ pode-se concluir, naturalmente, que o cenário 3 torna-se instável para valores do gradiente de pressão superiores a 2 psi/ft.

Observa-se novamente que a previsão fornecida pelos modelos semi-mecânico e elementos discretos coincidem. O resultado real do poço, situado na bacia de Campos (Sergipe), fornecido pela Petrobrás, também indica a ocorrência da produção do material de sustentação.

Tabela 4.22 Resultados das análises de estabilidade por modelos empíricos para o cenário 3 (Cachay, 2005).

MODELO	VARIAVEL DE CONTROLE	VALOR (V)	VALOR CRÍTICO (V_c)	V/ V_c	SITUAÇÃO
Stimlab	Velocidade (V_c)	0,050	0,15	0,335	Estável
Semi-mecânico	gradiente de pressão (dP/dx)	27,17 psi/ft	10,14 psi/ft	2,68	Instável
Cunha livre	Largura normalizada (W_r)	4,48	(-)10,22	(-)0,438	Estável

Variações das características do cenário 3 foram analisadas a seguir, mantendo-se a tensão de fechamento constante, variando-se os valores da largura normalizada da fratura e do gradiente de pressão do fluido. Deste estudo, pode-se concluir que:

- a) para fratura com largura normalizada $W_r = 4,5$, o material de sustentação apresenta-se estável até para valor de gradiente de pressão igual a 80 psi/ft;
- b) para fratura com larguras normalizada $W_r = 6,0$, o pacote granular torna-se instável somente com a aplicação da tensão de fechamento.
- c) para fraturas com larguras normalizadas $4,6 < W_r < 5,5$ o pacote granular torna-se potencialmente instável mesmo para baixos valores dos gradientes de pressão;
- d) nota-se que para pequena variação da largura normalizada da fratura (de 4,5 para 4,6) o pacote granular torna-se potencialmente instável. Esta variação brusca do comportamento também foi mencionado por Asgian et al, (1995) que observaram a ocorrência de instabilidade em fratura com largura relativa $W_r = 5,6$ (apenas sob tensão de fechamento 2150 psi/ft) e estabilidade para largura relativa da fratura $W_r = 5,5$ sob gradientes de pressão até o valor 75 psi/ft e tensão de fechamento de 940 psi/ft.

Os valores das forças de arraste aplicadas pelo fluido nas partículas (na direção horizontal do fluxo) estão mostradas na figura 4.17, juntamente com as forças de arraste calculadas pela metodologia de Asgian et al, (1995). No caso destas análises, sob tensões de fechamento mais baixas do que nos cenários 1 e 2, as forças de arraste calculadas pelo PFC3D são novamente superiores às determinadas no programa TRUBAL (Asgian et al, (1995).

Tabela 4.23 – Análises de estabilidade do pacote granular com variações do cenário 3.

W/d _p	No de grãos de propante modelados	Tensão de fechamento (psi)	Gradiente de pressão (psi/ft)	Resultado	Posição do arco
6	3920	2457,00	sem fluido	instável	
5,5	3599	2457,00	sem fluido	estável	
5,5	3599	2457,00	2	instável	
5	3286	2457,00	sem fluido	estável	
5	3286	2457,00	2	instável	
4,7	3101	2457,00	sem fluido	estável	
4,7	3101	2457,00	2	instável	
4,6	3033	2457,00	sem fluido	estável	
4,6	3033	2457,00	3	estável	
4,6	3033	2457,00	5	instável	
4,6	3033	2457,00	50	instável	
4,5	2959	2457,00	sem fluido	estável	
4,5	2959	2457,00	20	estável	
4,5	2959	2457,00	40	estável	
4,5	2959	2457,00	60	estável	
4,5	2959	2457,00	80	estável	

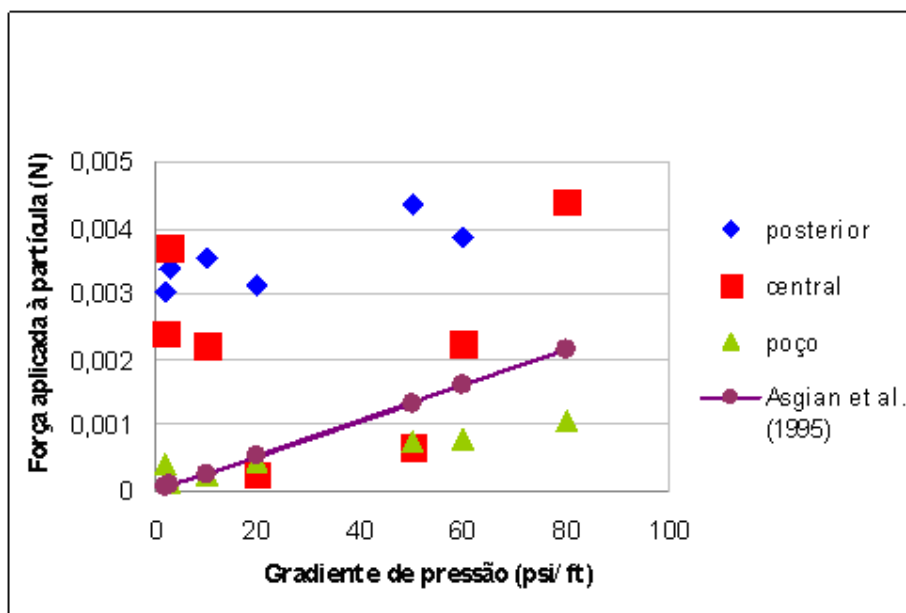


Figura 4.17 – Forças de arraste aplicadas nas partículas em função do gradiente de pressão ao longo do eixo da fratura, nas regiões posterior, central e próxima ao poço, nas variações do cenário 3.

4.5

Cenário 4

4.5.1

Características

O quarto cenário é definido com as mesmas características do cenário 1, exceto pelos valor da tensão de fechamento (de 7673 psi para 1000 psi). As características da formação, do poço, do fluido e da fratura referentes ao cenário 4 estão apresentadas, respectivamente, nas tabelas 4.24, 4.25 e 4.26.

Tabela 4.24 - Características da Formação

CARACTERÍSTICAS DA ROCHA	SÍMBOLO	VALOR
Permeabilidade	K	5 mD
Tensão de Fechamento	$P_{c,net}$	6,89 MPa (1000 psi)
Coeficiente de Poisson	ν	0,15
Módulo de Young	E	34474 MPa (5e6 psi)
Módulo de cisalhamento	G	14989 MPa (2,17 e6 psi)
Tensão mínima horizontal	σ_{min}	62,05 MPa (9000 psi)

Tabela 4.25 - Características do Poço Vertical

CARACTERÍSTICAS DO POÇO	SÍMBOLO	VALOR
Pressão no fundo do poço	P_{wf}	1 MPa (145 psi)

Tabela 4.26 - Características do Fluido

CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO	SÍMBOLO	VALOR
Densidade API	API	40° API
Viscosidade	μ	25,89 cp
Massa específica	ρ_f	825,1 kg/m ³ (51,51 lb/ft ³)

4.5.2

Resultados

Considerando fixa a tensão de fechamento e variando os valores dos gradientes de pressão e das larguras normalizadas, os resultados mostrados na tabela 4.27 indicam que:

- a) para fratura com largura normalizada $W_r = 4,3$ o material de sustentação apresenta-se instável com gradiente de pressão igual ou superior a 20 psi/ft,
- b) para fratura com largura normalizada $W_r = 4,5$ o pacote granular volta a ser instável com gradiente de pressão de 5 psi/ft, como aconteceu nos cenários 1 e 2.
- c) para fratura com largura normalizada $W_r = 5$ e 5,5 o material de sustentação apresenta-se instável com gradientes muito pequenos (2 psi/ft)
- d) para fratura com larguras normalizada $W_r = 6,0$ o pacote granular é instável apenas com a aplicação da tensão de fechamento.

Nas condições do cenário 4, as forças de arraste aplicadas sobre os grãos de propante são também geralmente maiores do que aquelas calculadas pela aproximação de Asgian et al, (1995), conforme figura 4.18.

Tabela 4.27 – Análises de estabilidade do pacote granular para o cenário 4.

W/d_p	No de grãos de propante modelados	Tensão de fechamento (psi)	Gradiente de pressão (psi/ft)	Resultado	Posição do arco
6	3914	1000,00	sem fluido	instável	
5,5	3596	1000,00	sem fluido	estável	
5,5	3596	1000,00	2	instável	
5,5	3596	1000,00	20	instável	
5	3185	1000,00	sem fluido	estável	
5	3185	1000,00	2	instável	
4,5	2976	1000,00	sem fluido	estável	
4,5	2976	1000,00	5	instável	
4,5	2976	1000,00	10	instável	
4,5	2976	1000,00	30	instável	
4,5	2976	1000,00	50	instável	
4,3	2779	1000,00	sem fluido	estável	
4,3	2779	1000,00	10	estável	
4,3	2779	1000,00	20	instável	
4,3	2779	1000,00	100	instável	
4	2596	1000,00	sem fluido	estável	
4	2596	1000,00	100	estável	

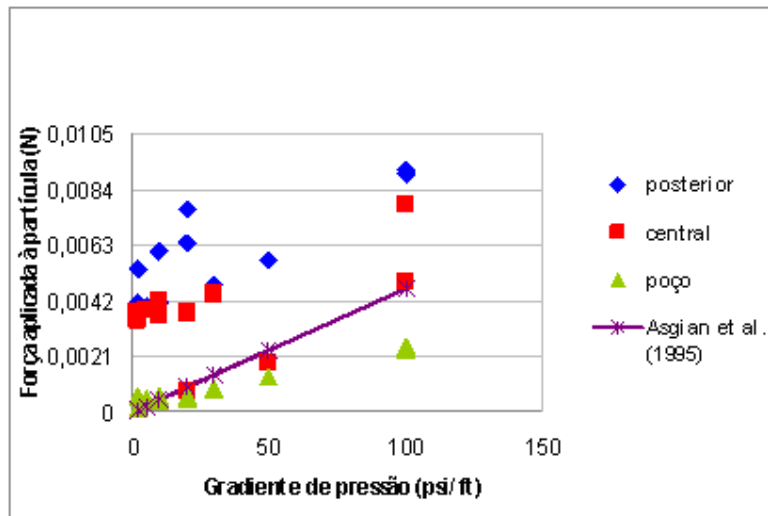


Figura 4.18 - Forças de arraste aplicadas nas partículas em função do gradiente de pressão ao longo do eixo da fratura, nas regiões posterior, central e próxima ao poço, no cenário 4.

4.6

Análise dos resultados de estabilidade de todos os cenários

4.6.1

Forças de contato máximas

A figura 4.19 apresenta a variação das forças de contato máximas, em função da largura normalizada da fratura, para todos os casos analisados nesta pesquisa.

Verifica-se, como esperado, que as forças de contato máximas são maiores no primeiro cenário (tensão de fechamento 7673 psi) e menores nos cenários 3 e 4 (tensão de fechamento de 2457psi e 1000psi, respectivamente). Neste gráfico, os símbolos vazados indicam os casos em que ocorreu a instabilidade do pacote granular somente com a aplicação da tensão de fechamento.

O gráfico da figura 4.20 mostra a influência da tensão de fechamento na “extrusão” de grãos, em função da largura normalizada da fratura. Observe-se que para altos valores da tensão de fechamento alguns autores (Canon, 2003) consideram como causa principal da ocorrência do refluxo a possibilidade de esmagamento dos grãos de propante, produção de finos, etc. mas estes resultados, assim como das observações experimentais de Parker et al (1999), Weaver et al.

(1999), Goel et al. (1999), indicam que os efeitos das componentes das forças de contato na direção do eixo da fratura são importantes e significativos.

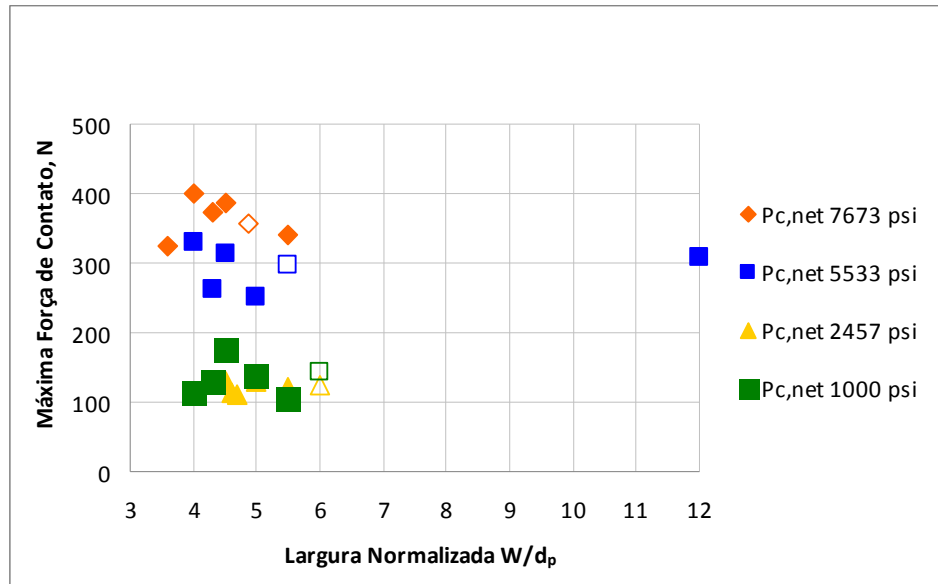


Figura 4.19 – Forças de contato máximas para todas as análises dos cenários 1, 2, 3 e 4.

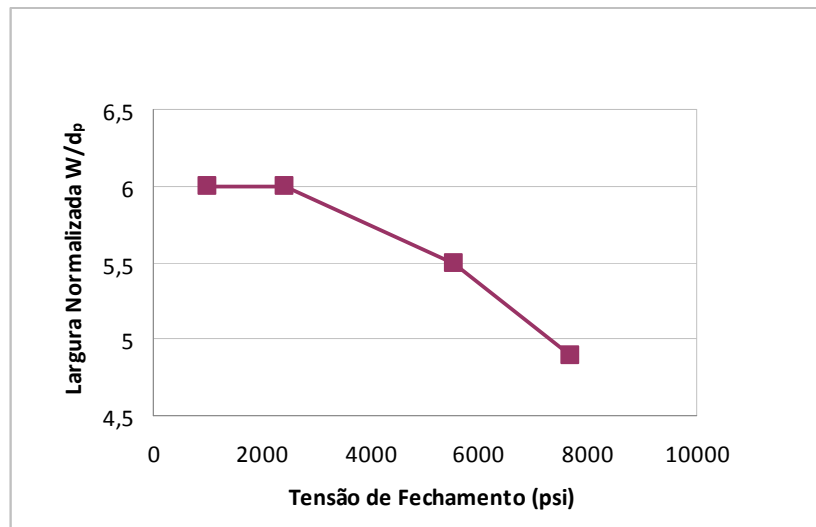


Figura 4.20 – Variação das larguras normalizadas de instabilidade com tensão de fechamento (sem fluxo).

4.6.2

Gradientes de pressão mínimos

Dependendo da tensão de fechamento, existem gradientes de pressão mínimos sob os quais o pacote granular torna-se instável. A partir dos resultados das análises numéricas deste dissertação, construíram-se as curvas dos gráficos da figura 4.21, indicando a variação dos gradientes mínimos de pressão em função da tensão de fechamento e da largura normalizada da fratura. Evidentemente, face ao número restrito de casos analisados, estes resultados preliminares devem ser compreendidos como indicações e não recomendações.

Da figura, pode-se observar que:

- a) Fraturas com largura normalizada acima de 4,5 mostraram-se instáveis para tensões de fechamento superiores a 5500 psi, provavelmente devido à ação das componentes horizontais das forças de contato;
- b) fraturas com largura normalizada até 4,5 e sob tensão de fechamento intermediárias (1500 psi a 5000psi) mostraram-se estáveis mesmo para gradientes de pressão superiores a 100 psi/ft. No trabalho de Asgarian et al (1995) um gradiente de pressão superior a 75 psi/ft foi necessário para tornar instável o pacote granular (propante 20/40) em fratura com largura normalizada $W_f = 5,5$ sob tensão de fechamento de 940 psi.
- c) para larguras normalizadas acima de 5, e independentemente da tensão de fechamento, baixos valores dos gradientes de pressão foram suficientes para desestabilizar o material de sustentação da fratura.

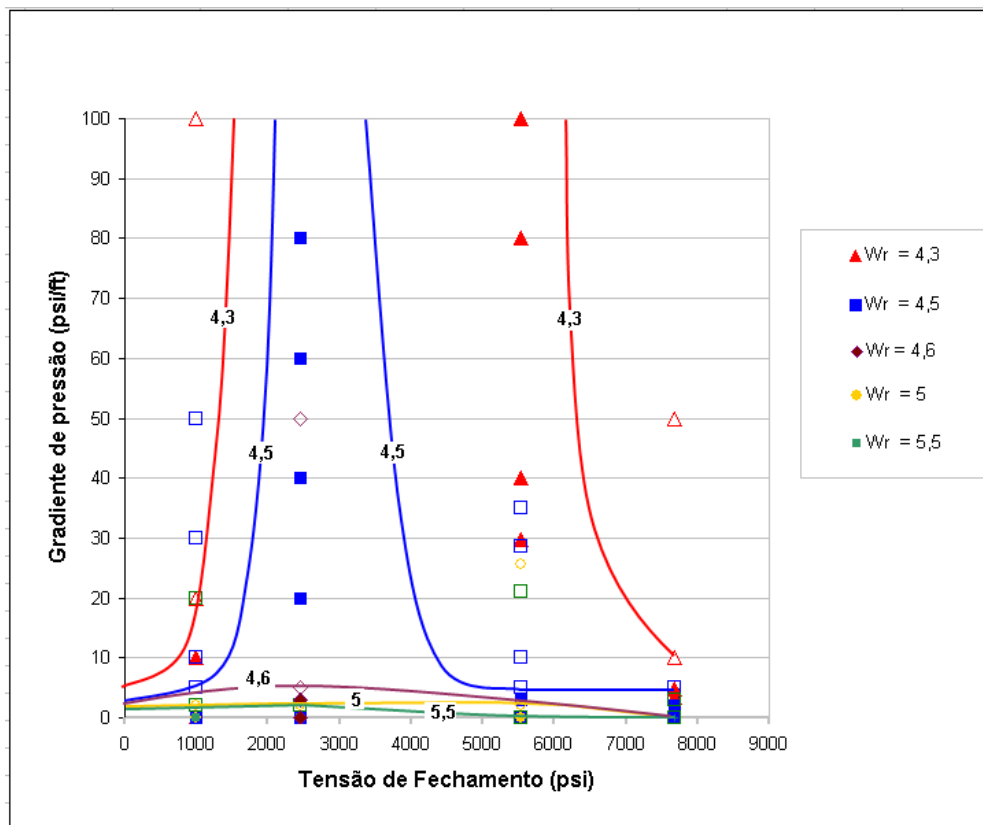


Figura 4.21 – Curvas de instabilidade do pacote granular, em função dos gradientes de pressão, tensão de fechamento e largura normalizada da fratura. Os símbolos vazados indicam ocorrência de instabilidade.

Na figura 4.22 pode se apreciar que as forças de arraste na direção do fluxo, aplicadas pelo fluido aos grãos de propante situados no eixo da fratura na região posterior do modelo, são maiores para os cenários 1 (tensão de fechamento 7673 psi, temperatura de 138°C) e 2 (tensão de fechamento 5533 psi e temperatura de 93°C) e menores para os cenários 3 e 4.

Como as forças de contato são maiores nos cenários 1 e 2, e portanto maior a tendência de desestabilização do pacote granular por causas mecânicas, os valores das forças de arraste aplicadas pelo fluido não precisam ser tão altas quanto no caso dos cenários 3 (tensão de fechamento 2457 psi) e 4 (tensão de fechamento 1000 psi). A temperatura também exerce influência nesta análise, pois para poços a grandes profundidades, com o aumento da temperatura da formação e diminuição da viscosidade do fluido, os valores das forças de arraste também decrescem.

Também é possível observar que as forças de arraste aplicadas às partículas são pequenas, bastante menores do 1% das forças de contato médias grão-a-grão, de acordo com Asgian et al (1995), mas suficientes para causar o colapso do arco de sustentação do pacote granular.

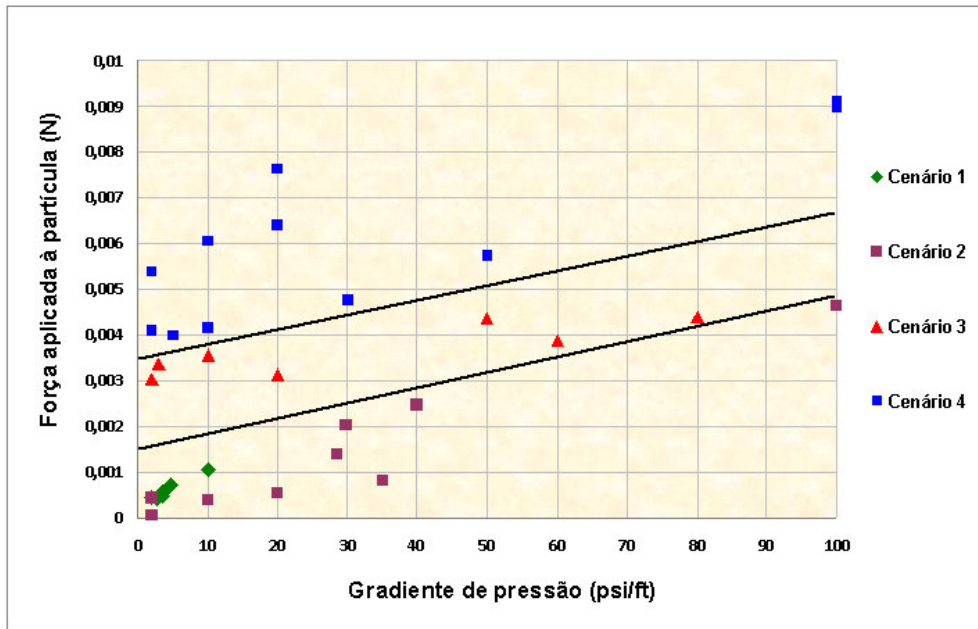


Figura 4.22 – Comparação das forças de arraste na região posterior do modelo da fratura.

A tabela 4.28 compara os resultados obtidos pelo método dos elementos discretos (programa PFC3D) com os modelos semi-empíricos semi-mecânico, cunha livre e do consórcio Stimlab. Da comparação dos resultados, houve maior convergência de resultados com o modelo semi-mecânico. Da análise das figuras 4.21, 2.15 e 2.16 pode-se observar que ambos os modelos apresentam as mesmas tendências de comportamento, evidenciando maior estabilidade do pacote granular para tensões de fechamento intermediárias (2000 a 4000 psi).

Tabela 4.28 – Comparação entre modelos para previsão do refluxo de material de sustentação.

MODELO	Cenário1	Cenário 2	Cenário 3
MED (PFC3D)	Instável sob tensão de fechamento	Instável sob tensão de fechamento	Instável com gradiente de pressão > 2psi/ft
Semi-mecânico	Instável com gradiente de pressão > 2,72 psi/ft	Instável com gradiente de pressão > 0,5 psi/ft	Instável para gradiente de pressão > 10,14 psi/ft
Cunha livre	Estável para largura normalizada < 4,3	Estável	Estável
Consórcio Stimlab	Estável	Estável	Estável

4.6.3

Comparações com resultados da literatura

- a) Asgian et al (1995), considerando propante de tamanho 20/40 como material de sustentação de fratura sob tensão de fechamento de 940 psi, concluíram que de acordo com os resultados de simulação baseadas no MED o pacote granular de largura $W_r = 5,5$ tornava-se instável para uma força de arraste gerada por gradiente de pressão igual a 75 psi/ft.
- b) Canon (2003) concluiu com base nas respostas do modelo semi-mecânico que para fratura com largura normalizada (W_r) de 5,5 e sob tensão de fechamento de 1000 psi, um gradiente de pressão de 2 a 5 psi/ft causa a instabilidade do material de sustentação da fratura;
- c) Milton-Tayler (1992), para a mesma tensão de fechamento de 1000 psi, a partir de resultados de ensaios de laboratório observou que, dependendo da rigidez da rocha do reservatório, um gradiente de pressão de 50 psi/ft foi necessário para desestabilizar uma fratura de largura normalizada de 4,3. No caso de rochas “plásticas”, para o mesmo gradiente de pressão de 50 psi/ft, o valor da largura normalizada aumentou para 6,1, devido aos efeitos do embutimento dos grãos de propante na rocha da formação.
- d) Na presente pesquisa (rocha e propante com mesmo valor do módulo de cisalhamento G), considerando a mesma tensão de fechamento de 1000psi e mesma largura normalizada de fratura (W_r) de 5,5, o pacote granular tornou-se instável com gradiente de pressão de apenas 2 psi/ft. Para larguras normalizadas de 4,3 o gradiente de pressão de 10 psi/ft foi suficiente para provocar a instabilidade;

As razões entre as diferenças observadas pode ser as seguintes:

- a) Asgian et al (1995) utilizaram um material de sustentação com uma maior faixa de diâmetros de partícula do que no presente trabalho (figura 4.23). De acordo com Milton-Tayler (1992), ensaios de laboratório mostram que a estabilidade é menor para materiais com granulometria mais uniforme.
- b) Asgian et al. (1995) simularam propante mais rígido do que a rocha (razão entre módulos de cisalhamento igual a 0,6) enquanto que na presente dissertação ambas os materiais foram admitidos com a mesma rigidez.

- c) Conforme já comentado, as formulações empregadas para o cálculo das forças de arraste pelo programa TRUBAL (Asgian et al, 1995), e neste trabalho, com o programa PFC3D, são diferentes². Assim, para o cenário 4 (tensão de fechamento de 1000psi) as forças de arraste calculadas por Asgian et al. (1995) resultam menores (figura 4.18), fazendo com que, na comparação dos resultados numéricos, o pacote granular estudado com o PFC3D seja menos estável.

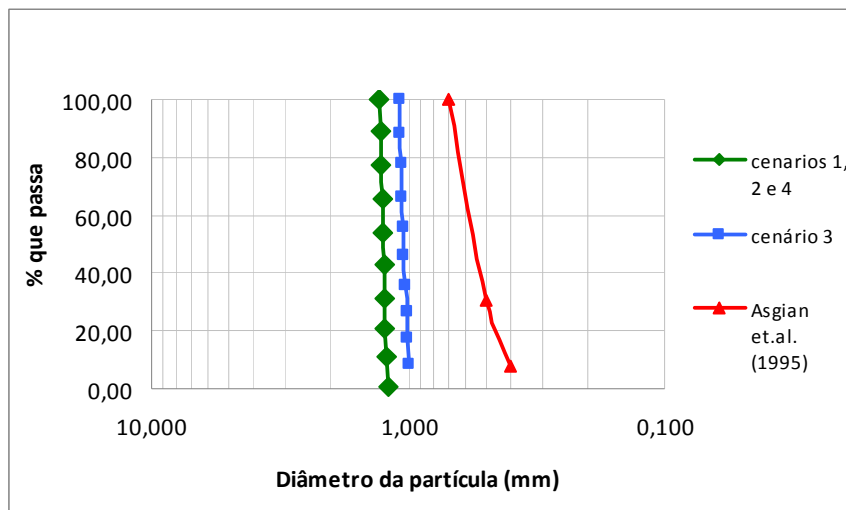


Figura 4.23 – Granulometrias usadas na presente dissertação (cenários 1,2,3 e 4) e no trabalho de Asgian et al (1995).

² Em ambos os programas, o fluido não é discretizado mas sua ação representada pela aplicação de uma força de arraste sobre os grãos de propante