5 ESTUDO DOS CENÁRIOS SELECIONADOS

Apresenta-se neste capítulo a aplicação do sistema PFP à análise da estabilidade do pacote granular no interior das fraturas em poços de petróleo estimulados por fraturamento hidráulico considerando quatro cenários distintos.

Além da análise da estabilidade do pacote de propante, foram realizados dois estudos. O primeiro estudo visou à determinação da geometria da fratura, ou seja, comprimento e largura, para a qual o propante se mantém estável no interior da fratura. Para tal, foram realizadas análises de estabilidade para uma série de pares de comprimento e largura de fratura, cujos resultados podem ser incorporados ao projeto de fraturamento hidráulico visando à obtenção de projetos ótimos. Tais projetos de fraturamento hidráulico ótimos fornecem uma geometria de fratura ótima, ou seja, comprimento e largura para as quais o refluxo de material de sustentação não ocorre, visto que é feita uma análise de estabilidade do propante através dos modelos para previsão do fenômeno. Atualmente os procedimentos de projeto de fraturamento hidráulico não consideram o refluxo de material de sustentação, de modo que esse fenômeno pode ocorrer, causando transtornos econômicos, operacionais, ambientais e de segurança, principalmente no que se refere à redução da produtividade do poço e da vida útil do mesmo.

O segundo estudo paramétrico teve como objetivo a análise da influência da geometria da fratura obtida na análise anterior sobre a produtividade do poço.

5.1. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍTICAS DOS CENÁRIOS

As características da formação, do poço, do fluido e da fratura relativas aos cenários estudados foram retiradas da dissertação de mestrado de Santos (2004). São elas:

 Características da formação: permeabilidade da formação, temperatura, espessura da zona de interesse (net pay zone), raio do reservatório, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade de Young, tensão mínima horizontal, pressão no fundo do poço, pressão estática;

- Características do poço: pressão no fundo do poço;
- 3. Característica do fluido da formação: grau de densidade API;
- Características da fratura: largura média da fratura, largura máxima da fratura, comprimento e altura da fratura, permeabilidade do pacote granular, concentração de propante, condutividade.

É importante destacar que a geometria da fratura referente a esses cenários foi obtida através do simulador de propagação de fratura MFRAC III - "*A Three Dimensional Hydraulic Fracturing Simulator*", ou seja, através de um modelo tridimensional (Santos, 2004).

As propriedades do material de sustentação foram determinadas através da consulta aos catálogos de alguns fornecedores (*Clearwater* e *Carboceramics*). Nos quatro cenários simulados, as fraturas foram consideradas sustentadas pelo propante bauxita de granulometria 12/20. Todas as características do propante necessárias à aplicação dos modelos de previsão de refluxo de material de sustentação são apresentadas na Tabela 5.1.

CARACTERÍSTICAS DO PROPANTE	SÍMBOLO	VALOR
Diâmetro médio	d _p	1,25 mm (0,0492 in)
Densidade	SGp	3,60
Massa específica	ρ_p	2,07 g/cm ³ (131 lb/ft ³)
Resistência máxima	S _{max}	15000 psi
Esfericidade	ф _р	0,9

Tabela 5.1 –	Características	do	propante
--------------	-----------------	----	----------

As demais características dos cenários necessárias à aplicação dos modelos de previsão de refluxo de propante foram determinadas através de expressões da literatura e são apresentadas a seguir.

5.1.1. Vazão de produção

A produtividade de um poço específico é previamente estabelecida no projeto de fraturamento hidráulico mediante um parâmetro denominado índice de produtividade, IP. Tal índice estabelece uma relação linear entre a vazão de produção do poço e a variação de pressão na fratura a partir da equação apresentada a seguir, definida para um regime de fluxo permanente.

$$Q_p = IP(P_e - P_f) \tag{5.1}$$

onde Q_p é a vazão de produção do poço, P_e é a pressão estática da fratura e P_f é a pressão do fluido no fundo poço.

5.1.2. Velocidade do fluido e gradiente hidráulico

A lei de Darcy permite a determinação da velocidade do fluido e do gradiente hidráulico mediante as respectivas equações:

$$v_f = \frac{Q_p}{\frac{W}{12} \times h_f}$$
(5.2)

$$\frac{dP}{dx} = 2,31 \times \left[\frac{Q_p \times \mu}{0,00633 \times k_p \times \left(\frac{W}{12} \times h_f\right)} \right]$$
(5.3)

onde v_f é a velocidade do fluido em ft/s, Q_p é a vazão de produção do poço em ft³/s na eq. (5.2) e em ft³/dia na eq. (5.3), determinada conforme o item anterior, W é a largura média da fratura em polegadas (in), h_f é a altura da fratura em pés (ft), dP/dx é o gradiente hidráulico em psi/ft, k_p é a permeabilidade do pacote de propante em milidarcy (md) e μ é a viscosidade do fluido em centipoises (cp).

5.1.3. Tensão efetiva sobre o propante

Como apresentado no capítulo 2, a tensão de fechamento é uma quantidade dependente da geometria da fratura, da tensão horizontal mínima (σ_{min}) e da pressão do fluido no fundo do poço (P_f) e tem seu valor determinado pela eq. (2.1).

$$P_{c,net} = \frac{W_{\max} \times G}{(1 - \nu) \times h_f} + \sigma_{\min} - P_f$$
 (eq. 2.1)

5.1.4. Massa específica do fluido

No capítulo 3, foi apresentada a eq. (3.1), que determina a densidade relativa de um fluido a partir do seu grau de densidade API. Obtendo-se o valor da densidade relativa é possível determinar o valor da massa específica do fluido através das próprias definições dessas propriedades.

$$\delta_0 = \frac{141,5}{131,5+\Delta}$$
 (eq. 3.1)

5.1.5. Viscosidade

Através do grau de densidade API e da temperatura do fluido é possível determinar a viscosidade, como foi visto na eq. (3.2) do capítulo 3.

$$Z = 3,0324 - 0,02023(\Delta)$$

$$Y = 10^{z}$$

$$X = Y(T^{-1,163})$$

$$\mu = 10^{x} - 1$$

(eq. 3.2)

5.2. APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS

Os cenários foram identificados como 1A, 1B, 2A e 2B. A geometria de poço adotada para os quatro cenários foi a mesma, ou seja, os poços foram

considerados verticais e com os mesmos diâmetros de coluna e revestimento (Santos, 2004).

Os cenários do tipo "1" representam uma formação de baixa permeabilidade, altas profundidades e, conseqüentemente, altas temperaturas. As características dos poços para esses cenários foram baseadas em poços

bombeados e possuem índice de produtividade, IP, igual a $\frac{2m^3 / dia}{kgf / cm^2}$.

Por outro lado, os cenários o tipo "2" representam uma formação de alta permeabilidade, baixas profundidades e, conseqüentemente, baixas temperaturas. Os poços para esses cenários têm características similares às de

poços surgentes e possuem índice de produtividade, IP, igual a $\frac{10m^3 / dia}{kgf / cm^2}$.

Tanto nos cenários "1" quanto nos cenários "2", as fraturas estudadas foram consideradas sustentadas pelo propante bauxita de granulometria 12/20.

Ressalta-se que as características de campo da formação, do poço, do fluido e da fratura foram baseadas em informações da dissertação de Santos (2004).

5.2.1. Cenário 1A

As características da formação, do poço, do fluido e da fratura referentes ao cenário 1A estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas (5.2), (5.3), (5.4) e (5.5).

Tabela 5.2 –	Características	da	formação.
--------------	-----------------	----	-----------

CARACTERÍSTICAS DA ROCHA	SÍMBOLO	VALOR
Permeabilidade	k	5 mD
Temperatura	Т	138ºC (280ºF)
Tensão de fechamento	P _{c,net}	52,91 MPa (7673,48 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 (5x10 ⁶ psi)
Módulo transversal	G	14989 MPa (2,17x10 ⁶ psi)
Tensão mínima horizontal	σ_{min}	62,05 MPa (9000 psi)

Tabela 5.3 - Características do poço.

CARACTERÍSTICAS DO POÇO	SÍMBOLO	VALOR
Pressão no fundo do poço	P _f	13,79 MPa (2000 psi)
Pressão estática	Pe	27,58 MPa (4000 psi)
Vazão de produção	Q _P	0,0033 m ³ /s (9936 ft ³ /dia)

Tabela 5.4 – Características do fluido.

CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO	SÍMBOLO	VALOR
API	API	40ºAPI
Viscosidade	μ	0,73 cp
Massa específica	ρf	825,1 kg/cm ³ (51,51 lb/ft ³)
Velocidade do fluido	V	0,0103 m/s (0,0337 ft/s)
Gradiente hidráulico na fratura	dP/dx	3,41 psi/ft

Tabela 5.5 - 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 _p	2,28 x 10⁵ mD
Concentração de propante	Cp	9,54 kg/m ² (1,95 lb/ft ²)
Condutividade	C _d	1346,3 mD.m (4417 mD.ft)

5.2.2. Cenário 1B

As características da formação referentes ao cenário 1B estão apresentadas na Tabela 5.6, as do poço estão apresentadas na Tabela 5.7, as características do fluido, na Tabela 5.8 e as características da fratura, na Tabela 5.9.

CARACTERÍSTICAS DA ROCHA	SÍMBOLO	VALOR
Permeabilidade	k	5 mD
Temperatura	Т	138ºC (280ºF)
Tensão de fechamento	P _{c,net}	52,71 MPa (7645,40 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 (5x10 ⁶ psi)
Módulo transversal	G	14989 MPa (2,17x10 ⁶ psi)
Tensão horizontal	σ_{H}	62,05 MPa (9000 psi)

Tabela 5.7 - Características do poço.

CARACTERÍSTICAS DO POÇO	SÍMBOLO	VALOR
Pressão no fundo do poço	P _f	13,79 MPa (2000 psi)
Pressão estática	Pe	27,58 MPa (4000 psi)
Vazão de produção	Q _P	0,0033 m³/s (9936 ft³/dia)

Tabela 5.8 - Características do fluido.

CARACTERÍSTICASDO FLUIDO	SÍMBOLO	VALOR
API	API	40ºAPI
Viscosidade	μ	0,73 cp
Massa específica	ρ_{f}	825,1 kg/cm ³ (51,51 lb/ft ³)
Velocidade na fratura	V	0,0173 m/s(0,0567 ft/s)
Gradiente hidráulico na fratura	dP/dx	5,70 psi/ft

Tabela 5.9 - Características da fratura.

CARACTERÍSTICAS DA FRATURA	SÍMBOLO	VALOR
Largura média	W	4,62 mm (0,18 in)
Largura normalizada	W _r	3,66
Largura Máxima da fratura	W _{max}	10,38 mm (0,41 in)
Comprimento da fratura	L	148,72m (487,94 ft)
Altura da fratura	h _f	41,19 m (135,15 ft)
Permeabilidade do pacote granular	k _p	2,29 x 10⁵ mD
Concentração de propante	Cp	8,79 kg/m² (1,80 lb/ft²)
Condutividade	C _d	1198 mD.m (3930 mD.ft)

5.2.3. Cenário 2A

As características da formação referentes ao cenário 2A estão apresentadas na Tabela 5.10, as do poço, na Tabela 5.11, as características do fluido, na Tabela 5.12 e as características da fratura, na Tabela 5.14.

CARACTERÍSTICAS DA ROCHA	SÍMBOLO	VALOR
Permeabilidade	k	100 mD
Temperatura	Т	93ºC (200ºF)
Tensão de fechamento	P _{c,net}	36,10 MPa (5236,04 psi)
Espessura da zona de interesse	hp	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 (5x10 ⁶ psi)
Módulo transversal	G	14989 MPa (2,17x10 ⁶ psi)
Tensão horizontal	σ _H	34,47 MPa (5000 psi)

Tabela 5.10 – Características da formação.

Tabela 5.11 - Características do poço.

CARACTERÍSTICAS DO POÇO	SÍMBOLO	VALOR
Pressão no fundo do poço	P _f	12,4 MPa (1800 psi)
Pressão estática	Pe	24,1 MPa (3500psi)
Vazão de produção	Q _P	0,0138 m³/s (42163 ft³/dia)

Tabela 5.12 - Características do fluido.

CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO	SÍMBOLO	VALOR
API	API	40ºAPI
Viscosidade	μ	1,25 cp
Massa específica	ρf	825,1 kg/cm ³ (51,51 lb/ft ³)
Velocidade na fratura	V	0,0311 m/s (0,1021 ft/s)
Gradiente hidráulico na fratura	dP/dx	10,32 psi/ft

CARACTERÍSTICAS DA FRATURA	SÍMBOLO	VALOR
Largura média	W	14,13 mm (0,56 in)
Largura normalizada	W _r	11,38
Largura máxima da fratura	W _{max}	24,57 mm (0,98 in)
Comprimento da fratura	L	48,74 m (159,92 ft)
Altura da fratura	h _f	31,22 m (102,40 ft)
Permeabilidade do pacote granular	k _p	3,90 x 10⁵ mD
Concentração de propante	Cp	14,18 kg/m ² (2,90 lb/ft ²)
Condutividade	C _d	3403 mD.m (11166 mD.ft)

5.2.4. Cenário 2B

As características da formação estão apresentadas na Tabela 5.14, as do poço, na Tabela 5.15, as características do fluido, na Tabela 5.16 e as características da fratura, na Tabela 5.17.

Tabela 5.14 - Características da formação.

CARACTERÍSTICAS DA ROCHA	SÍMBOLO	VALOR
Permeabilidade	k	100 mD
Temperatura	Т	93ºC (200ºF)
Tensão de fechamento	Р	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 (5x10 ⁶ psi)
Módulo transversal	G	14987 MPa (2,2x10 ⁶ psi)
Tensão horizontal	σ _H	34,47 MPa (5000 psi)

Tabela 5.15 – Características do poço.

CARACTERÍSTICAS DO POÇO	SÍMBOLO	VALOR
Pressão no fundo do poço	P _f	12,4 MPa (1800 psi)
Pressão estática	P _e	24,1 MPa (3500psi)
Vazão de produção	Q _P	0,0138 m³/s (42163 ft³/dia)

Tabela 5.16 – Características d	o fluido.
---------------------------------	-----------

CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO	SÍMBOLO	VALOR
API	API	40ºAPI
Viscosidade	μ	1,25 cp
Massa específica	ρf	825,0 kg/cm ³ (51,5 lb/ft ³)
Velocidade na fratura	V	0,0322 m/s (0,1057 ft/s)
Gradiente hidráulico na fratura	dP/dx	10,68 psi/ft

Tabela 5.17 – Características da fratura.

CARACTERÍSTICAS DA FRATURA	SÍMBOLO	VALOR
Largura média	w	15,07 mm (0,59 in)
Largura normalizada	W _r	12,00
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 _p	3,90 x 10 ⁵ mD
Concentração de propante	Cp	15,04 kg/m ² (3,08 lb/ft ²)
Condutividade	C _d	3572 mD.m (11719 mD.ft)

5.3. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS CENÁRIOS

A ferramenta computacional PFP System apresentada no capítulo 4 foi utilizada para a determinação dos valores das variáveis críticas para cada cenário descrito anteriormente, de acordo com os modelos de previsão de refluxo de propante selecionados. A partir desses valores de variáveis críticas, foram determinadas razões de estabilidade (Vr/Vc), ou seja, a relação entre o valor da variável de controle real e o valor crítico da mesma. Por exemplo, no modelo de Correlação Stimlab, a variável de controle é a velocidade do fluido. Portanto, se determinou uma razão de estabilidade através da razão entre a velocidade real do fluido no interior da fratura e a velocidade crítica determinada pelo sistema PFP. Se a razão de estabilidade for maior que um, o critério prevê que o pacote granular não permanece estável no interior da fratura e o fenômeno de refluxo de propante ocorre.

Todos os modelos de previsão do refluxo do material de sustentação descritos no capítulo 3 foram estudados na análise de estabilidade do propante e

os respectivos resultados estão apresentados nas Tabelas (5.18) a (5.21), de acordo com os cenários descritos anteriormente.

CENÁRIO 1A								
MODELOS	VARIÁVEL DE CONTROLE	VALOR REAL (Vr)		VALOR REAL (Vr) VALOR CRÍTICO (Vc)		Vr/Vc	SITUA- ÇÃO	
Stimlab	Velocidade (V _c)	0,034	ft/s	7,34	ft/s	0,005	estável	
Semimecânico	gradiente hidráulico (dP/dx)	3,410	psi/ft	2,72	psi/ft	1,254	instável	
Cunha Livre	largura normalizada (W _r)	4,880		4,310		1,132	instável	
Potência	d/W	0,205		8,422		0,024	estável	
Bi-potência	largura normalizada (W _r)	4,880		0,000001		488000 0	instável	
Velocidade	Velocidade (v _f)	0,034	ft/s	0,020	ft/s	1,685	instável	

Tabela 5.18 – Resultados da análise de estabilidade para o cenário 1A.

Tabela 5.19 – Resultados da análise de estabilidade para o cenário 1B.

CENÁRIO 1B								
MODELOS	VARIÁVEL DE CONTROLE	VALOR REAL (Vr)		VALOR CRÍTICO (Vc)		Vr/Vc	SITUA- ÇÃO	
Stimlab	Velocidade (V _c)	0,025	ft/s	141,382	ft/s	0,000	estável	
Semimecânico	gradiente hidráulico (dP/dx)	2,503	psi/ft	6,886	psi/ft	0,363	estável	
Cunha Livre	largura normalizada (W _r)	3,660		2,206		1,659	instável	
Potência	d/W	0,273		9,576		0,029	estável	
Bi-potência	largura normalizada (W _r)	3,660		0,000001		3660000	instável	
Velocidade	Velocidade (v _f)	0,025	ft/s	0,020	ft/s	1,245	instável	

CENÁRIO 2A								
MODELOS	VARIÁVEL DE CONTROLE	VALOR REAL (Vr)		VALOR CRÍTICO (Vc)		VALOR VALOR REAL CRÍTICO Vr/Vc (Vr) (Vc)		SITUA- ÇÃO
Stimlab	Velocidade (V _c)	0,102	ft/s	0,140	ft/s	0,729	estável	
Semimecânico	gradiente hidráulico (dP/dx)	10,320	psi/ft	0,556	psi/ft	18,561	instável	
Cunha Livre	largura normalizada (W _r)	11,380		-8,391		1,356	instável	
Potência	d/W	0,088		45,770		0,002	estável	
Bi-potência	largura normalizada (W _r)	11,380		0,000001		11380000	instável	
Velocidade	Velocidade (v _f)	0,102	ft/s	0,013	ft/s	8,103	instável	

Tabela 5.20 – Resultados da análise de estabilidade para o cenário 2A.

Tabela 5.21 - Resultados da análise de estabilidade para o cenário 2B.

CENÁRIO 2B									
MODELOS	VARIÁVEL DE CONTROLE	VALOR REAL (Vr)		VALOR CRÍTICO (Vc)		Vr/Vc	SITUA- ÇÃO		
Stimlab	Velocidade (V _c)	0,061	ft/s	0,124	ft/s	0,488	estável		
Semimecânico	gradiente hidráulico (dP/dx)	6,120	psi/ft	0,553	psi/ft	11,067	instável		
Cunha Livre	largura normalizada (W _r)	12,000		-9,636		1,245	instável		
Potência	d/W	0,083		55,389		0,002	estável		
Bi-potência	largura normalizada (W _r)	11,380		0,000001		11380000	instável		
Velocidade	Velocidade (v _f)	0,061	ft/s	0,013	ft/s	4,802	instável		

Analisando os resultados das tabelas apresentadas, as seguintes observações podem ser feitas:

 o modelo de Bi-potência, cuja variável de controle é a largura normalizada, apresentou valores críticos extremamente pequenos para os quatro cenários (ordem de grandeza menor que 10⁻⁵). Conseqüentemente, a razão de estabilidade se tornou muito elevada, indicando que para todos os cenários haverá refluxo de propante. Portanto, o modelo de Bi-potência não é adequado para a previsão de refluxo de propante nos cenários estudados;

- 2. o modelo de Potência, cuja variável de controle é o inverso da largura normalizada, apresentou valores críticos elevados, na ordem de 1000 vezes maior que os valores simulados nos cenários. Tais valores não são reproduzíveis em situações de campo, e, portanto, o modelo de Potência também é inadequado para a previsão de refluxo de propante nos cenários estudados. O modelo de Potência Modificado também foi analisado para todos os cenários, expressando resultados muito semelhantes aos do modelo de Potência original. Por isso, são apresentados apenas os resultados deste último;
- 3. o modelo de Cunha Livre, cuja variável de controle é a largura normalizada máxima da fratura, apresentou valores críticos negativos para os cenários do tipo "2". Isso pode ser explicado pela expressão polinomial que fornece o valor da largura normalizada máxima, representada no capítulo 3 pela eq. (3.7). Nesse caso, deve ser considerado o módulo da largura normalizada para a determinação da razão de estabilidade do propante através do modelo de Cunha Livre, visto que a ordem de grandeza dos valores críticos é compatível com a dos valores apresentados pelos cenários;
- 4. o modelo de Correlação Stimlab, cuja variável de controle é a velocidade do fluido, apresentou valores críticos significativamente superiores aos valores reais para os cenários do tipo "1". Para os cenários do tipo "2", a ordem de grandeza dos valores críticos apresentados são mais compatíveis com os valores reais dos cenários. Portanto, o modelo de Correlação Stimlab, embora seja recomendado por Cachay (2004), não é aplicável aos cenários do tipo "1", visto que os valores de velocidade crítica apresentados são irreais em situações de campo.
- o modelo de Velocidade Mínima de Fluidificação, cuja variável de controle é a velocidade do fluido, também apresentou valores críticos comparáveis aos valores reais para todos os cenários, indicando que para todos eles o fenômeno de refluxo de propante ocorre;
- finalmente, o modelo Semimecânico, cuja variável de controle é o gradiente hidráulico, apresentou valores críticos comparáveis aos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410779/CA

valores reais, mas resultados distintos para os cenários. Para o cenário 1B, o modelo indicou que o material de sustentação é estável no interior da fratura, enquanto que, para os demais cenários, o modelo indicou que o refluxo de propante ocorre.

Ressalta-se que a maioria dos modelos é empírica. Uma vez que a reprodução em laboratório de situações de campo referentes ao fraturamento hidráulico é extremamente difícil, em algumas situações os resultados experimentais não expressam a realidade. Além disso, os modelos teóricos também apresentam limitações em suas formulações. O modelo de Velocidade Mínima de Fluidificação não considera fatores relevantes ao fenômeno de refluxo de propante, como tensão de fechamento, largura normalizada da fratura e gradiente hidráulico. O modelo Semimecânico, por sua vez, fornece um limite superior para gradiente hidráulico sem, no entanto, considerar fatores que expressem a situação de fluxo atuante na fratura, tais como velocidade real do fluxo ou vazão de produção.

5.4. ESTUDO PARAMÉRICO PARA A DETERMINAÇÃO DE UMA GEOMETRIA ÓTIMA

Para a determinação de uma geometria ótima, ou seja, valores de comprimento e largura de fratura para os quais o material de sustentação é estável no interior da fratura, foi selecionado o modelo Semimecânico. Tal escolha é respaldada pelo fato desse modelo ser o mais recente e ser o mais abrangente em termos dos parâmetros que influenciam o fenômeno, apesar das limitações apresentadas. A largura de fratura foi parametrizada em relação ao comprimento da fratura, mediante a seguinte equação:

$$W = 3 \times \left[\frac{(1-\nu) \times Q_T \times \mu \times L}{G}\right]^{1/4}$$
(5.4)

onde, W é a largura média da fratura em metros (m), v é o coeficiente de Poisson, Q_T é a vazão de tratamento para uma asa da fratura em m³/s, μ é a viscosidade do fluido em centipoises (cp), L é o comprimento da fratura em metros (m) e G é o módulo transversal em N/m². O valor da vazão de tratamento é de 0,053 m³/s, de acordo com Santos (2004). Portanto, a vazão de

tratamento, Q_T , relativa a uma asa da fratura é de 0,0265 m³/s para os quatro cenários estudados. Cabe ressaltar que este valor foi mantido constante na análise paramétrica.

Para a série de valores de largura obtida para cada cenário, foram feitas as previsões de refluxo de propante até o valor para o qual o fenômeno não foi verificado. Esse ponto caracteriza a geometria ótima de cada cenário, mantida a vazão de tratamento constante, e os resultados podem ser observados nas Tabelas (5.22) a (5.25). A seqüência de operações dessa análise foi baseada na metodologia desenvolvida por Canon et al. (2003) para incorporar um critério de estabilidade no projeto de fraturamento hidráulico e está representada, esquematicamente, na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Esquema da metodologia do estudo paramétrico.

Tabela 5.22 -	Determinação	da geometria	ótima para o	o cenário 1A.
	3	0		

Cenário 1A								
Largura da fratura (mm)	Velocidade (ft/s)	Gradiente hidráulico (psi/ft)	VALOR CRÍTICO (psi/ft)	Vr/Vc	SITUAÇÃO			
10,73	0,02	1,93	0,91	2,12	instável			
9,71	0,02	2,14	0,97	2,23	instável			
8,16	0,03	2,54	1,20	2,16	instável			
6,87	0,03	3,02	1,81	1,73	instável			
5,77	0,04	3,59	3,18	1,19	instável			
5,46	0,04	3,80	3,85	0,99	estável			

Cenário 1B								
Largura da fratura (mm)	Velocidade (ft/s)	Gradiente hidráulico (psi/ft)	VALOR CRÍTICO (psi/ft)	Vr/Vc	SITUAÇÃO			
10,72	0,02	2,44	0,91	2,7	instável			
9,71	0,03	2,70	0,96	2,8	instável			
8,16	0,03	3,21	1,20	2,7	instável			
6,87	0,04	3,81	1,81	2,1	instável			
5,77	0,04	4,54	3,20	1,4	instável			
5,46	0,05	4,80	3,88	1,2	instável			
5,16	0,05	5,07	4,72	1,1	instável			
4,81	0,05	5,45	6,01	0,9	estável			

Tabela 5.23 – Determinação da geometria ótima para o cenário 1B.

Tabela 24 – Determinação da geometria ótima para o cenário 2A.

Cenário 2A								
Largura da fratura (mm)	Velocidade (ft/s)	Gradiente hidráulico (psi/ft)	VALOR CRÍTICO (psi/ft)	Vr/Vc	SITUAÇÃO			
9,28	0,16	15,82	0,86	18,4	instável			
8,22	0,18	17,86	1,28	14,0	instável			
6,91	0,21	21,24	2,70	7,9	instável			
6,25	0,23	23,50	4,26	5,5	instável			
5,25	0,28	27,95	9,03	3,1	instável			
4,42	0,33	33,24	17,37	1,9	instável			
4,18	0,35	35,15	21,06	1,7	instável			
3,51	0,41	41,80	36,20	1,2	instável			
2,95	0,49	49,70	57,15	0,9	estável			

Tabela 5.25 – Determinação da geometria ótima para o cenário 2B.

Cenário 2B								
Largura da fratura (mm)	Velocidade (ft/s)	Gradiente hidráulico (psi/ft)	VALOR CRÍTICO (psi/ft)	Vr/ Vc	SITUAÇÃO			
9,36	0,17	17,09	0,81	21,1	instável			
8,22	0,19	19,48	1,21	16,1	instável			
6,91	0,23	23,16	2,49	9,3	instável			
6,25	0,25	25,63	3,89	6,6	instável			
5,25	0,30	30,48	8,17	3,7	instável			
4,42	0,36	36,25	15,67	2,3	instável			
4,18	0,38	38,33	19,00	2,0	instável			
3,51	0,45	45,58	32,60	1,4	instável			
2,95	0,54	54,20	51,40	1,1	instável			

Os valores de velocidade de fluido e gradiente de pressão variam com a largura da fratura e, por isso, estão apresentados nas tabelas.

Observa-se da primeira linha das tabelas que o valor para o comprimento da fratura corresponde aos valores de projeto retirados de Santos (2004), enquanto que os valores da largura da fratura não são mantidos os mesmos. Isto ocorre porque nas Tabelas (5.22) a (5.25) o modelo de fratura adotado é o PKN, que é bidimensional, enquanto que os cenários foram simulados com o programa MFRAC III - "*A Three Dimensional Hydraulic Fracturing Simulator*" baseado em um modelo tridimensional.

Os cenários estudados apresentaram resultados distintos em relação a essa análise paramétrica. Para a obtenção da estabilidade do pacote granular, é necessária uma redução no valor da largura de fratura de 9,6% para o cenário 1A e de 68,2% para o cenário 2A.

Por outro lado, o cenário 2B não apresentou uma configuração estável para o propante, nem mesmo para um valor de largura da fratura igual a 2,95 mm. Como esse valor já é relativamente baixo não foram analisados valores inferiores.

Uma situação interessante é a do cenário 1B, que na análise de estabilidade, mediante o modelo Semimecânico, indicou que o pacote granular é estável no interior da fratura. No estudo paramétrico em questão, o pacote granular se mostrou estável para uma largura de fratura muito próxima à determinada no cenário original (4,81mm em relação a 4,62mm).

Na análise dos resultados apresentados, também foram observadas reduções muito acentuadas no valor do comprimento da fratura para a obtenção de um pacote granular estável no interior da fratura, sendo mantida a vazão de tratamento determinada no projeto de fraturamento de Santos (2004). A princípio isso pode ser preocupante; no entanto, o comprimento da fratura não influencia na estabilidade do pacote e, por isso, não é parâmetro nos modelos de previsão de refluxo de propante. Todavia, de acordo com a eq. (5.3), o valor do comprimento de fratura poderia ter sido mantido constante e a parametrização da largura feita em relação à vazão de tratamento, que nos estudos realizados foi mantida constante.

A redução da geometria da fratura para que não ocorra a produção do material de sustentação são bastante elevadas e contribui significativamente para a redução da condutividade e da produtividade a curto prazo. Ou seja, para uma mesma vazão de tratamento e optando-se pela alteração da geometria da fratura, haverá uma redução da condutividade da fratura e isso afetará a produtividade do poço nos anos iniciais. No entanto, essa perda de produtividade provavelmente será compensada pela constância da condutividade da fratura ao longo dos anos, visto que o fenômeno de refluxo de propante não ocorre. Dessa forma, a vida útil do poço é maior se comparada a dos poços onde há refluxo de propante.

5.5. ESTUDO DA PRODUTIVIDADE DA FRATURA PARA UMA GEOMETRIA ÓTIMA

Durante um projeto de fraturamento hidráulico, o comprimento e a condutividade da fratura constituem os fatores mais importantes porque influenciam diretamente na produtividade do poço. A condutividade criada por um tratamento é avaliada por um coeficiente adimensional de condutividade Fcd, apresentado na eq. (5.4), que por considerar uma condutividade finita, pode ser aplicado a quaisquer situações.

$$Fcd = \frac{k_p \times W}{k \times x_f}$$
(5.5)

onde k_p é a permeabilidade do pacote granular em milidarcy (md), W é a largura média da fratura em pés (ft), k é a permeabilidade da formação em milidarcy (md) e x_f é a metade do comprimento da fratura em pés (ft).

Segundo Valkó et al. (2002), baseado na formalução de Cinco-Ley, a produtividade de um poço pode ser estimada pela seguinte equação:

$$J = \frac{1}{\ln\left(\frac{0.472 \times r_e}{x_f}\right) + f}$$
(5.6)

onde, J é a produtividade do poço, r_e é o raio do reservatório em pés (ft) e x_f é a metade do comprimento da fratura em pés (ft). A Figura 5.2 representa esquematicamente tais dimensões.



Figura 5.2 – Esquema do reservatório e da fratura para determinação da produtividade.

O termo f é uma função do logaritmo neperiano do coeficiente de condutividade Fcd, apresentada na eq. (5.6).

$$f = \frac{1,65 - 0,328 \times \ln(Fcd) + 0,116 \times (\ln(Fcd))^2}{1 + 0,18 \times \ln(Fcd) + 0,06 \times (\ln(Fcd))^2 + 0,005 \times (\ln(Fcd))^3}$$
(5.7)

A partir desses parâmetros de produtividade, foi desenvolvido um estudo baseado no valor da largura da fratura obtido no estudo paramétrico anterior e os resultados estão apresentados nas Tabelas (5.26) a (5.29).

Observa-se que os valores de comprimento da fratura correspondem aos valores originais dos cenários simulados. Ou seja, manteve-se constante o comprimento da fratura, enquanto que o valor da largura da fratura foi alterado para aquele que fornece uma configuração estável do pacote granular. Dessa forma, é possível comparar a produtividade inicial do poço para um cenário onde ocorre refluxo de propante e a produtividade de um poço onde tal fenômeno não é observado.

Tabela 5.26 – Estudo da produtividade para o cenário 1A.

Cenário 1A								
Comprimento da fratura (m)	Largura da fratura (mm)	Raio do reservatório (m)	Razão de Estabilidade	Fcd	In (Fcd)	f	Índice de produtividade	
149,26	6,04	400	1,32	3,69	1,31	1,05	0,505	
149,26	5,46	400	0,99	3,34	3,91	0,73	0,497	

Tabela 5.27 – Estudo da produtividade para o cenário 1B.

Cenário 1B							
Comprimento da fratura (m)	Largura da fratura (mm)	Raio do reservatório (m)	Razão de Estabilidade	Fcd	Ln (Fcd)	f	Índice de produtividade
148,72	4,62	400	0,38	2,85	1,05	1,14	0,483
148,72	4,81	400	0,93	2,96	4,30	0,73	0,486

Cenário 2A								
Comprimento da fratura (m)	Largura da fratura (mm)	Raio do reservatório (m)	Razão de Estabilidade	Fcd	In (Fcd)	F	Índice de produtividade	
48,74	14,13	400	18,40	2,26	0,82	1,23	0,305	
48,74	2,95	400	0,90	0,47	3,14	0,76	0,236	

Tabela 5.28 – Estudo da produtividade para o cenário 2A.

Tabela 5.29 – Estudo da produtividade para o cenário 2B.

Cenário 2B								
Comprimento da fratura (m)	Largura da fratura (mm)	Raio do reservatório (m)	Razão de Estabilidade	Fcd	In (Fcd)	f	Índice de produtividade	
50,55	15,07	400	21,1	2,33	0,84	1,22	0,310	
50,55	2,95	400	1,1	0,46	3,83	0,74	0,237	

Analisando as tabelas apresentadas, é verificado que para os cenários do tipo "1", não houve alteração na produtividade do poço quando a largura da fratura é reduzida para a obtenção da estabilidade do pacote granular. Todavia, para os cenários do tipo "2", a redução na produtividade do poço para que o fenômeno de refluxo não seja observado foi significativa. No caso do cenário 2A, a redução de produtividade do poço foi de 22,6% para uma redução de 79,1% na largura da fratura. Para o cenário 2B, a redução da produtividade do poço foi de 23,5% para uma redução de 80,4% na largura de fratura. Ressalta-se, porém, que para o cenário 2B não foi possível a determinação de uma largura da fratura para a qual o pacote granular se mantém estável.

Como comprimento da fratura foi mantido e a largura da fratura, modificada, a vazão de tratamento deve ser alterada para a obtenção da nova geometria e da respectiva produtividade. Obviamente, isso afeta o projeto de fraturamento hidráulico inicial em termos de volume de propante injetado, concentração de propante, etc. Além disso, para tal modificação, o valor da vazão de tratamento também deve estar em uma faixa de valores tecnicamente praticáveis.

Evidentemente, um estudo mais aprofundado sobre a produtividade, especialmente a longo prazo, é necessário para que uma decisão seja tomada em relação à escolha da geometria da fratura. Sabe-se que a curto prazo a produtividade do poço é significativamente reduzida. No entanto, todos os contratempos e prejuízos com a produção de material de sustentação podem ser evitados e essa queda de produtividade pode vir a ser compensada com uma maior vida útil do poço.