

5 ANÁLISE DO MATERIAL QUANTO AO REFLUXO DURANTE A PRODUÇÃO

5.1

Introdução

Para a viabilidade econômica e financeira da exploração de campos de petróleo é necessário que os campos produzam o máximo no menor prazo possível. Para tornar possível essa “antecipação” da produção a indústria utiliza-se de técnicas de estimulação já amplamente discutidas no Capítulo 1.

Os materiais utilizados como propantes têm uma série de requisitos de ordem físico-química para que não interfiram de maneira prejudicial na produção. O principal requisito do propante é o de que ele mantenha o interior da fratura como um caminho preferencial ao fluxo, apresentando uma condutividade hidráulica significativamente maior que a condutividade hidráulica do reservatório.

Nesse capítulo, estuda-se, de maneira comparativa, a estabilidade de propantes com respeito ao fenômeno de retorno de propante durante a fase de produção do poço, fenômeno descrito na literatura como “*proppant flowback*”. Esse retorno pode variar de poucos grãos a vários quilos por dia, reduzindo assim a condutividade efetiva da fratura.

5.2

Objetivo

O objetivo do presente trabalho é o de apresentar um estudo comparativo de três propantes, verificando o seu desempenho quanto ao fenômeno de retorno de propante. O estudo é feito em dois cenários comuns para o Brasil: um campo em terra de baixa produtividade e um campo em mar de alta produtividade.

O desempenho dos propantes será comparado em termos de susceptibilidade à ocorrência do fenômeno, para diversas situações de tensões confinantes e viscosidade do óleo.

5.3

Metodologia

O retorno de propante ocorre quando as forças hidrodinâmicas prevalecem sobre as forças intergranulares. A literatura mostra que a produção do propante depende, dentre outros fatores, de: tipo e tamanho dos grãos, da tensão de fechamento da fratura e das forças hidrodinâmicas que atuam sobre os grãos (Milton-Taylor *et al.*, 1992; Barree e Mukherjee, 1995; Parker *et al.*, 1999).

5.3.1

Critério Stimlab

Para o estudo comparativo desse trabalho foi selecionada uma metodologia específica, desenvolvida pelo Stimlab, conforme definido em (Huaman, 2008).

Não faz parte do escopo desse trabalho a descrição do desenvolvimento do estudo. Em termos resumidos, o trabalho considerou modelos existentes e, através de um trabalho experimental, foi proposta uma expressão empírica. A expressão obtida estima a mínima velocidade de fluxo que torna o pacote de propante instável. Adicionalmente, para considerar os efeitos das tensões de confinamento na estabilidade, é acrescido um termo que leva em consideração esse efeito. Como a estabilidade é majorada de maneira linear com o aumento da tensão confinante, esse fator de correção deixa de ser válido para tensões de fechamento maiores que 7.000 psi (Asgian e Cundall, 1994; Sparlin e Hagen, 1995). Outro aspecto importante é que a correlação foi proposta para propantes cerâmicos, incluindo um fator de escala para diferentes tamanhos de grão. Entretanto, a correlação é válida para areias e amplamente utilizada para estimar o retorno de outros tipos de propantes com elevada esfericidade.

A formulação foi desenvolvida para uma condição específica, sendo determinada uma velocidade crítica de fluxo, a partir da qual ocorre a instabilidade do pacote de propante. Como essa velocidade foi calculada para uma condição específica de uma fratura sustentada por 8,4 camadas de propante de tamanho 20/40, essa é denominada velocidade crítica padrão ou velocidade crítica normalizada. Adicionalmente foi proposta uma equação de conversão da

velocidade crítica normalizada para a velocidade crítica nas condições de interesse. O equacionamento proposto é apresentado na sequência.

A velocidade crítica normalizada “ $V_{s,c}$ ”, em pés por segundo (ft/s), é obtida da seguinte correlação:

$$V_{s,c} = 21,17 \left[\frac{SG_p d_p^2}{C_p \mu} \right] C_o + C_1 \quad 5.1$$

Em que:

- d_p : indica o diâmetro médio da partícula em polegadas (in),
- C_p : concentração do propante em libra por pé ao quadrado (lb/ft²),
- μ : viscosidade do fluido em centipoise (cp),
- SG_p representa a densidade absoluta do propante,
- C_o : fator de coesão adimensional que varia de 1 a 3. Nas simulações específicas do projeto será utilizado 1, por não se considerar o uso de nenhuma resina especial,
- C_1 : fator de correção para a consideração do efeito da pressão de fechamento sobre o pacote de propante, conforme definido na sequência:

$$C_1 = 0,131 \left[\frac{P_{c,net}}{13W_r^{3.5}} \right]^3 \quad 5.2$$

onde:

- $P_{c,net}$: pressão de fechamento líquida (tensão de confinamento menos pressão de fluxo) em libra-força por polegada quadrada (psia);
- W_r : largura normalizada da fratura definido como o quociente entre a largura da fratura dividida pelo diâmetro médio do grão de propante.

Para a correção da velocidade crítica normalizada em velocidade crítica específica ou real, é utilizada a seguinte expressão:

$$V_c = V_{c,s} \left(\frac{8,4}{W_r} \right) \left(\frac{25,4d_p}{0,72} \right) \quad 5.3$$

A velocidade resultante é expressa em pés por segundo (ft/s), os demais parâmetros seguem as dimensões descritas anteriormente.

Para o cálculo da velocidade real na fratura, será utilizada a equação:

$$V_{real} = \left(\frac{Q}{A} \right) \quad 5.4$$

A área nesse caso é área aberta ao fluxo, ou seja, a área da fratura reduzida pela porosidade da amostra (porosidade multiplicada pela área da fratura).

5.3.2

Cenários de Estudo

Inicialmente, foram definidos dois cenários para o estudo comparativo: o Cenário 1 correspondendo a parâmetros comuns de poços em terra, com baixa produção em baixas profundidades e o Cenário 2, correspondendo a poços no mar, em que as vazões de produção e as tensões de confinamento são maiores em função da maior profundidade em que se encontram esses campos.

Em ambos os cenários, serão variadas a viscosidade do óleo e as tensões de confinamento, de modo a tornar possível a avaliação em diversas condições.

5.3.2.1

Cenário 1

Nesse cenário foram considerados os seguintes dados:

- Dados do fluido do reservatório:
 - Densidade: 0,95;
 - Viscosidade: 1 a 50 cp;
 - Vazão (c/ fratura): 30 m³/dia;
 - Pressão do reservatório: 700 psi;
 - Pressão de fluxo: 100 psi;
 - Raio de drenagem: 200 m;
 - Módulo de elasticidade: 1,0e+6 psi;
 - Coeficiente de Poisson: 0,25;
 - Tensão de confinamento horizontal mínima: 1.000 a 2.000 psi;

- Dados da fratura:

- Comprimento: 60 m;
- Altura: 20 m;
- Abertura: 10 mm.

5.3.2.2

Cenário 2

Nesse cenário foram considerados os seguintes dados:

- Dados do fluido do reservatório:
 - Densidade: 0,80;
 - Viscosidade: 1 a 50 cp;
 - Vazão (c/ fratura): 1.000 m³/dia;
 - Pressão do reservatório: 4.500 psi;
 - Pressão de fluxo: 3.000 psi;
 - Raio de drenagem: 800 m;
 - Módulo de elasticidade: 5,0e+6 psi;
 - Coeficiente de Poisson: 0,30;
 - Tensão de confinamento horizontal mínima: 3.000 a 5.000 psi;
- Dados da fratura:
 - Comprimento: 80 m;
 - Altura: 40 m;
 - Abertura: 5 mm.

5.4

Tipos de Propantes

Serão considerados três tipos de propantes:

- Esferas de Vidro resinadas com granulometria #20/40;
- Cerâmica CarboCeramics CarboProp com granulometria #20/40;
- Bauxita Saint Gobain Interprop com granulometria #20/40.

Destaca-se que os dados necessários para a análise foram obtidos de publicações das empresas para os propantes 2 e 3 e foram utilizados os dados

experimentais para o propante 1. Salientamos que todos os dados foram levantados segundo metodologia normatizada e com precisão adequada.

Assim, será avaliada a condição de retorno de propante para três tipos de amostra, considerando dois cenários, totalizando seis simulações.

5.4.1

Esferas de Vidro Resinadas

Os dados necessários para os cálculos são mostrados abaixo:

- Densidade absoluta: 2,41g/cm³;
- Densidade *bulk* sob confinamento: 1,46g/cm³;
- Porosidade: 39,4%;
- Diâmetro médio dos grãos: 0,63mm¹;
- Esfericidade: 0,9;
- Permeabilidade sob confinamento:

Pressão (psi)	Permeabilidade (D)
700	53,9
1.000	53,1
1.500	50,3
2.000	47,8
4.000	36,9
6.000	25,5
8.000	13,9

Tabela 5.1: Tabela com os valores de pressão aplicados e sua respectiva permeabilidade para as microesferas de vidro #20/40.

¹ Adotado o valor médio para a faixa de peneiras 20/40.

5.4.2

Cerâmica 20/40

Os dados necessários para os cálculos são reproduzidos abaixo do documento CARBOPROP data sheet obtido em www.carboceramics.com:

- Densidade absoluta: 3,27g/cm³;
- Densidade *bulk* sobre confinamento: 1,88g/cm³;
- Porosidade: 42,5%;
- Diâmetro médio dos grãos: 0,658mm;
- Esfericidade: 0,9;
- Permeabilidade sob confinamento:

Pressão (psi)	Permeabilidade (D)
2.000	385
4.000	345
6.000	290
8.000	250

Tabela 5.2: Tabela com os valores de pressão aplicados e sua respectiva permeabilidade para cerâmica #20/40.

5.4.3

Bauxita Sinterizada 20/40

Os dados necessários para os cálculos são reproduzidos abaixo do documento “*Summary of typical properties*”, August 2008” obtido em www.proppants-saintgobain.com:

- Densidade absoluta: 3,5g/cm³;
- Densidade *bulk* sobre confinamento: 2,04g/cm³;
- Porosidade: 41,7%;
- Diâmetro médio dos grãos: 0,662mm;
- Esfericidade: 0,9;
- Permeabilidade sob confinamento:

Pressão (psi)	Permeabilidade (D)
2.000	424
4.000	334
6.000	299
8.000	240

Tabela 5.3: Tabela com os valores de pressão aplicados e sua respectiva permeabilidade para bauxita sinterizada #20/40.

5.5

Resultados

Os resultados apresentados para as simulações são: velocidade crítica normalizada versus tensão confinante e viscosidade do óleo e velocidade crítica real versus tensão de confinamento e viscosidade do óleo.

5.5.1

Cenário 1

Para os dados utilizados nesse cenário, a pressão de fechamento tem um efeito negligenciável sobre a velocidade crítica, o que pode ser constatado pelo fato da abertura normalizada ter valor médio para os propantes de aproximadamente 15. Desse modo, a contribuição do termo C_1 é da ordem de 10^{-8} . Por esse motivo (valor muito baixo de C_1) as tabelas de resultados para esse cenário não apresentam alteração com relação à tensão de confinamento.

5.5.1.1

Esferas de vidro resinadas 20/40

Os resultados obtidos foram os seguintes:

$\mu(\text{cp})$	$\sigma\text{c}(\text{psi})$					
	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
1	0,0157	0,0157	0,0157	0,0157	0,0157	0,0157
2	0,0078	0,0078	0,0078	0,0078	0,0078	0,0078
5	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031
10	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
20	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
30	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
40	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
50	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003

Tabela 5.4: Velocidade crítica normalizada (ft/s).

$\mu(\text{cp})$	$\sigma\text{c}(\text{psi})$					
	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
1	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073
2	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036
5	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
10	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
20	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
30	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
40	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
50	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

Tabela 5.5: Velocidade crítica real (ft/s).

A velocidade de fluxo real para esse propante, nesse cenário, é de: 0,0145 ft/s. Apresentando os resultados em um gráfico, como o mostrado abaixo, com as velocidades críticas reais e com a linha da velocidade de fluxo real, é possível verificar que a velocidade de fluxo real é maior que a velocidade crítica real, indicando a ocorrência de retorno de propante.

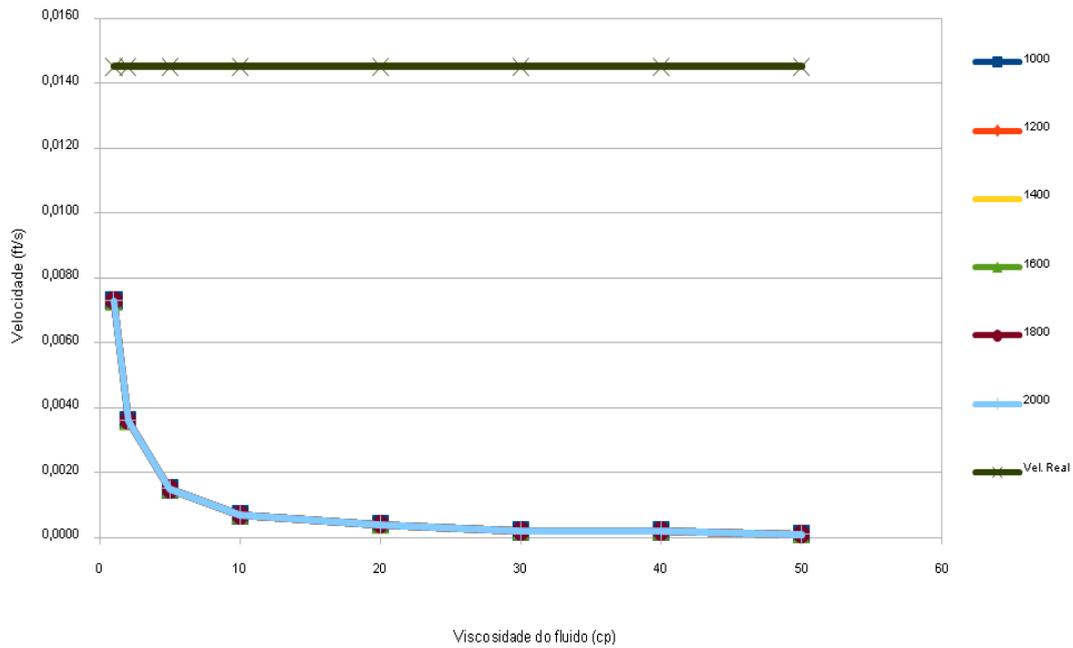


Figura 5.1: Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real.

Conforme mencionado no item 5.5.1 Cenário 1 e expresso pela equação 5.1, o efeito da tensão de confinamento é da ordem de 10^{-8} . Assim, o que ocorre é que todas as curvas têm os mesmos valores. Todas essas curvas estão representadas, entretanto estão sobrepostas. A mesma explicação também serve para os gráficos das figuras 5.2

5.5.1.2

Cerâmica 20/40

Os resultados obtidos foram os seguintes:

$\mu(\text{cp})$	$\sigma\text{c}(\text{psi})$					
	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
1	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232
2	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116
5	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046
10	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
20	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
30	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
40	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
50	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005

Tabela 5.6: Velocidade crítica normalizada (ft/s).

$\mu(\text{cp})$	$\sigma\text{c}(\text{psi})$					
	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
1	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117
2	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059
5	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
10	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
20	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
30	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
40	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
50	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Tabela 5.7: Velocidade crítica real (ft/s).

A velocidade de fluxo real para esse propante, nesse cenário, é de: 0,0134ft/s. Plotando-se um gráfico, como o mostrado abaixo, com as velocidades críticas reais e com a linha da velocidade de fluxo real, é possível verificar que a velocidade de fluxo é maior que a velocidade crítica, indicando a ocorrência de *proppant flowback*.

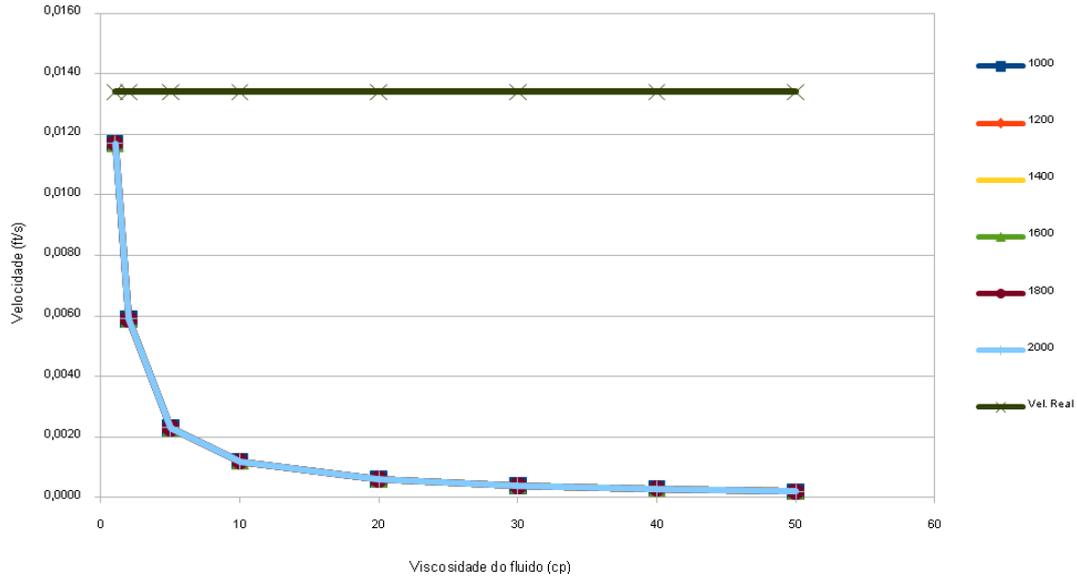


Figura 5.2: Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real.

5.5.1.3

Bauxita Sinterizada 20/40

Os resultados obtidos foram os seguintes:

	$\sigma_c(\text{psi})$					
$\mu(\text{cp})$	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
1	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232
2	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116
5	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046
10	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
20	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
30	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
40	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
50	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005

Tabela 5.8: Velocidade crítica normalizada (ft/s).

μ (cp)	σ_c (psi)					
	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
1	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117
2	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059
5	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
10	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
20	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
30	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
40	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
50	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Tabela 5.9: Velocidade crítica real (ft/s).

A velocidade de fluxo real para esse propante, nesse cenário, é de: 0,0137ft/s. Plotando-se um gráfico, como o mostrado abaixo, com as velocidades críticas reais e com a linha da velocidade de fluxo real, é possível verificar que a velocidade de fluxo é maior que a velocidade crítica, indicando a ocorrência de *proppant flowback*.

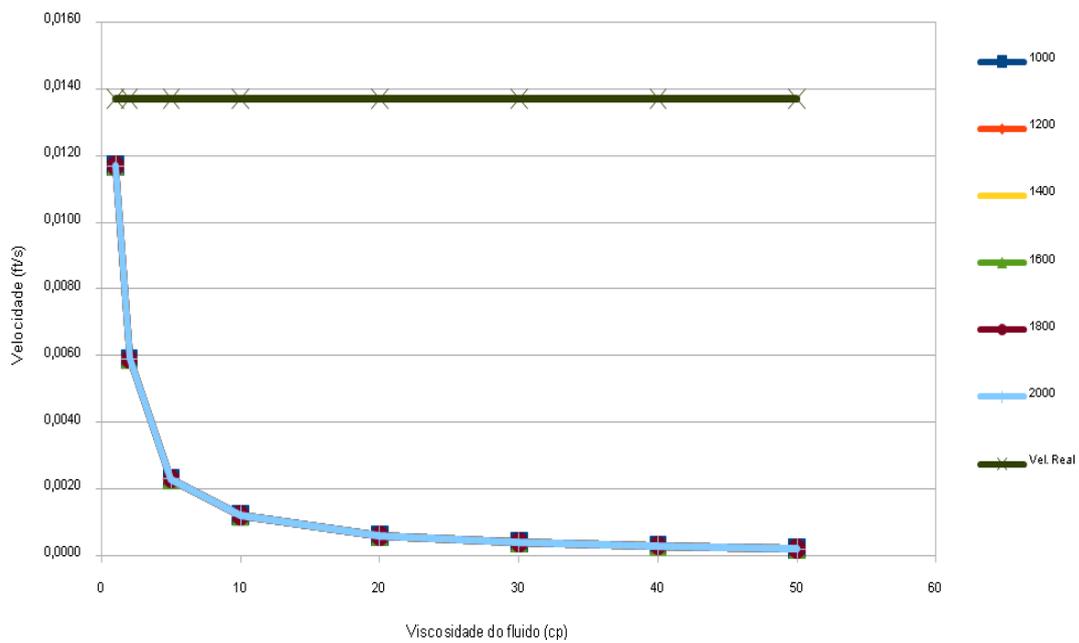


Figura 5.3: Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real.

Importante salientar que a velocidade crítica não é independente do valor da tensão de confinamento. O que ocorre, para esse cenário, é que a interferência é muito pequena.

Outro ponto importante a lembrar é que a velocidade real é calculada como sendo a vazão (dado de entrada) dividida pela área aberta ao fluxo (área da fratura considerando a porosidade dos grãos), conforme equação 5.4. Assim, a velocidade real é função apenas da conservação da massa.

5.5.2

Cenário 2

Para os dados utilizados nesse cenário, a pressão de fechamento passa a ter um efeito considerável sobre a velocidade crítica, pois o parâmetro C_1 agora passa a interferir nos valores, tendo, em função dos dados, um efeito preponderante. Ainda assim, nenhum dos propantes analisados apresentou-se estável nas condições prescritas.

Há de se salientar também que, com relação ao efeito da viscosidade, ele não é negligenciável pois muda a ordem de grandeza dos valores (Para $T_c = 4.000$, vai de 0,017 (~0,02) para 0,002).

5.5.2.1

Esferas de Vidro Resinadas 20/40

Os resultados obtidos foram os seguintes:

	$\sigma c(\text{psi})$				
$\mu(\text{cp})$	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
1	0,0165	0,0169	0,0174	0,0181	0,0190
2	0,0086	0,0091	0,0096	0,0103	0,0111
5	0,0039	0,0044	0,0049	0,0056	0,0064
10	0,0024	0,0028	0,0033	0,0040	0,0048
20	0,0016	0,0020	0,0025	0,0032	0,0040
30	0,0013	0,0017	0,0023	0,0029	0,0038
40	0,0012	0,0016	0,0021	0,0028	0,0036
50	0,0011	0,0015	0,0021	0,0027	0,0036

Tabela 5.10: Velocidade crítica normalizada (ft/s).

	$\sigma c(\text{psi})$				
$\mu(\text{cp})$	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
1	0,0153	0,0157	0,0162	0,0168	0,0175
2	0,0080	0,0084	0,0089	0,0095	0,0103
5	0,0036	0,0040	0,0045	0,0052	0,0059
10	0,0022	0,0026	0,0031	0,0037	0,0045
20	0,0015	0,0018	0,0023	0,0030	0,0037
30	0,0012	0,0016	0,0021	0,0027	0,0035
40	0,0011	0,0015	0,0020	0,0026	0,0034
50	0,0010	0,0014	0,0019	0,0025	0,0033

Tabela 5.11: Velocidade crítica real (ft/s).

A velocidade de fluxo real para esse propante, nesse cenário, é de: 0,4819ft/s. Plotando-se um gráfico, como o mostrado abaixo, com as velocidades críticas reais e com a linha da velocidade de fluxo real, é possível verificar que a velocidade de fluxo é maior que a velocidade crítica, indicando a ocorrência de *proppant flowback*.

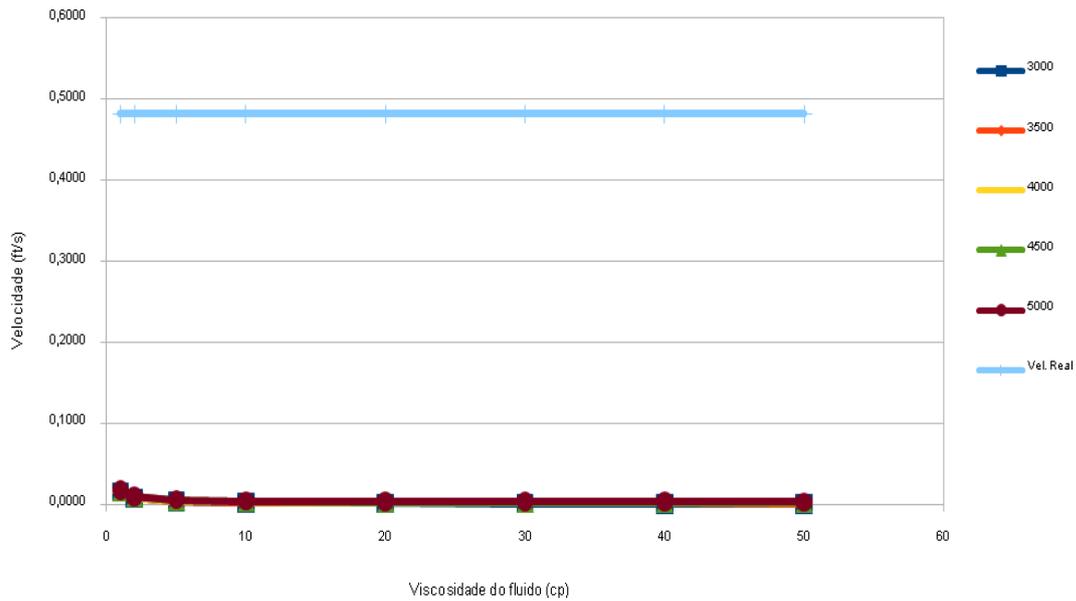


Figura 5.4: Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real.

Retirando-se a série relativa à velocidade real, pode-se verificar que as tensões de confinamento têm efeito considerável sobre a velocidade crítica real, bem como pode ser notada a sensível queda da velocidade crítica com o aumento da viscosidade, conforme mostrado na figura 5.5.

O objetivo do trabalho é justamente comparar as velocidades críticas dos diversos propantes. O fato de nenhum deles mostrar desempenho satisfatório apenas mostra que a fratura dimensionada não vai se manter estável, independente do propante selecionado. Ressalta-se que, em momento algum, foi objetivo deste estudo de análise de refluxo de propante, a avaliação da melhor solução (dimensionamento de produtividade, seleção de materiais e forma de operação) para estimulação de poços. Assim, qualquer conclusão a respeito do cenário não deve invalidar a principal conclusão de que o propante desenvolvido tem comportamento similar aos propantes existentes no mercado.

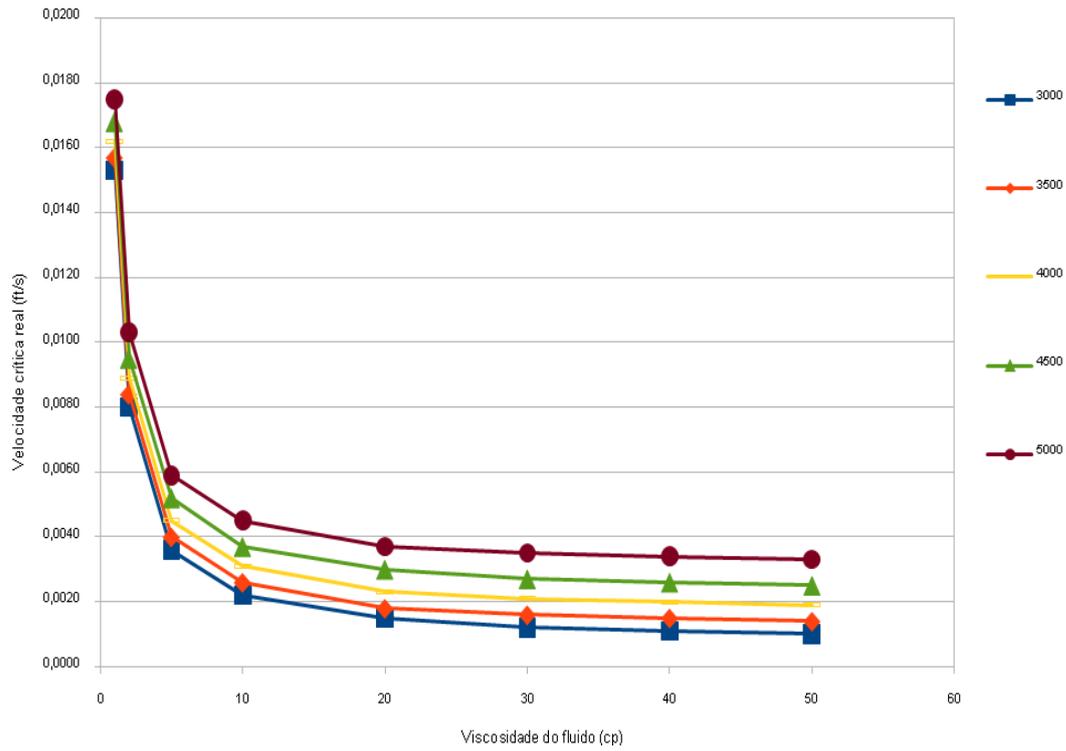


Figura 5.5: Velocidades críticas reais

5.5.2.2

Cerâmica 20/40

Os resultados obtidos foram os seguintes:

μ (cp)	σ_c (psi)				
	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
1	0,0261	0,0268	0,0276	0,0287	0,0300
2	0,0137	0,0143	0,0152	0,0163	0,0176
5	0,0062	0,0069	0,0077	0,0088	0,0101
10	0,0037	0,0044	0,0052	0,0063	0,0076
20	0,0025	0,0032	0,0040	0,0051	0,0064
30	0,0021	0,0027	0,0036	0,0047	0,0060
40	0,0019	0,0025	0,0034	0,0045	0,0058
50	0,0018	0,0024	0,0033	0,0043	0,0056

Tabela 5.12: Velocidade crítica normalizada (ft/s).

	$\sigma_c(\text{psi})$				
$\mu(\text{cp})$	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
1	0,0264	0,0271	0,0279	0,0290	0,0303
2	0,0138	0,0145	0,0153	0,0164	0,0178
5	0,0063	0,0070	0,0078	0,0089	0,0102
10	0,0038	0,0044	0,0053	0,0064	0,0077
20	0,0025	0,0032	0,0040	0,0051	0,0064
30	0,0021	0,0028	0,0036	0,0047	0,0060
40	0,0019	0,0026	0,0034	0,0045	0,0058
50	0,0018	0,0024	0,0033	0,0044	0,0057

Tabela 5.13: Velocidade crítica real (ft/s).

A velocidade de fluxo real para esse propante, nesse cenário, é de: 0,4468ft/s. Plotando-se um gráfico, como o mostrado abaixo, com as velocidades críticas reais e com a linha da velocidade de fluxo real, é possível verificar que a velocidade de fluxo é maior que a velocidade crítica, indicando a ocorrência de *proppant flowback*.

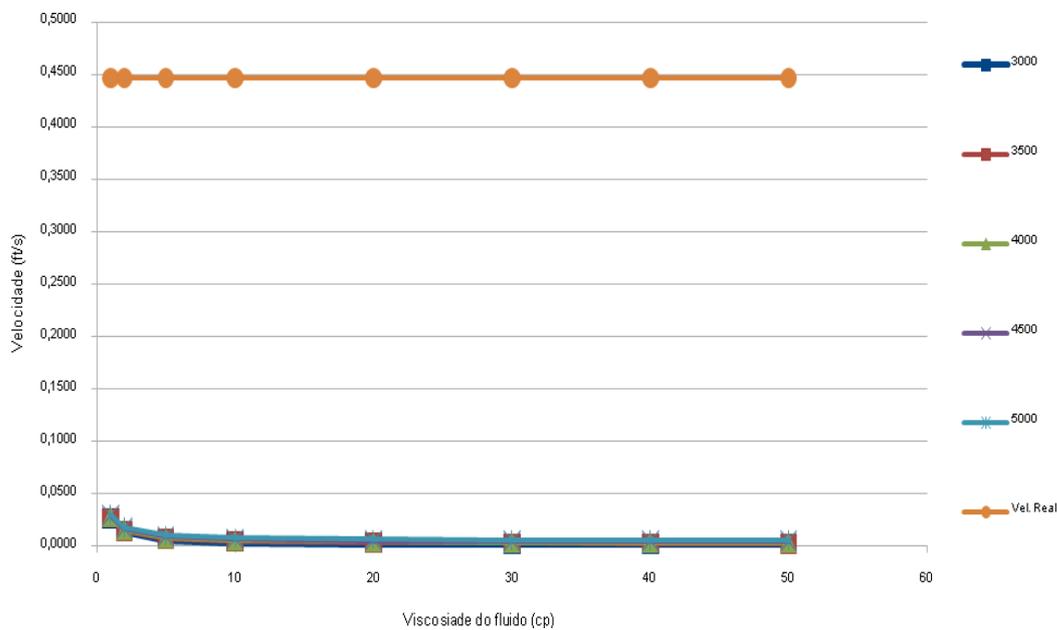


Figura 5.6: Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real.

Retirando-se a série relativa à velocidade real, pode-se verificar que as tensões de confinamento têm efeito considerável sobre a velocidade crítica real, bem como pode ser notada a sensível queda da velocidade crítica com o aumento da viscosidade, conforme mostrado na figura a seguir:

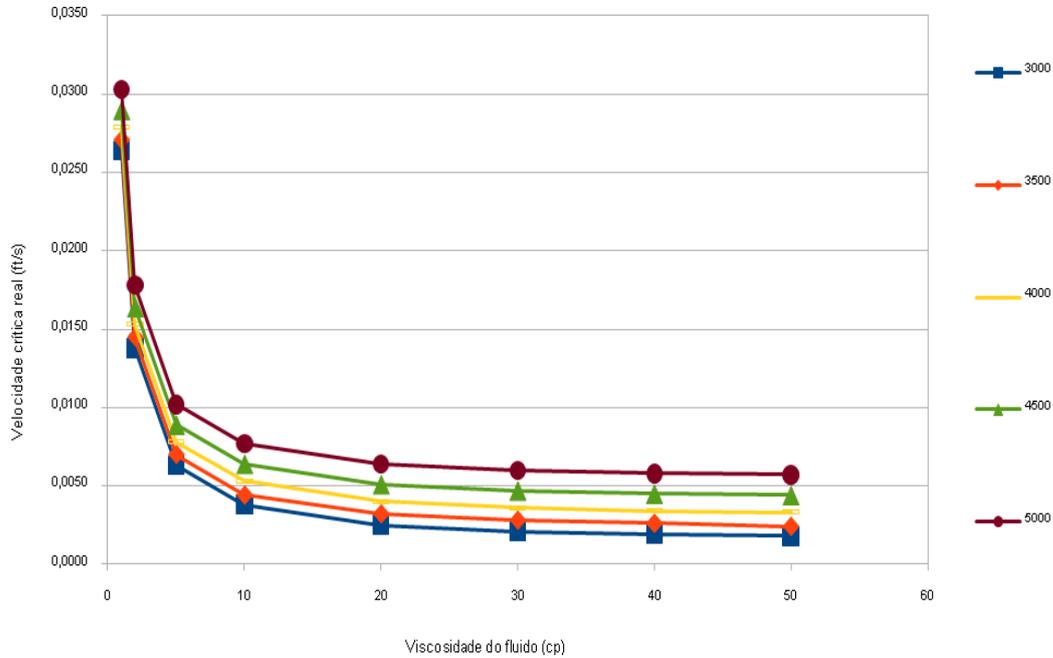


Figura 5.7: Velocidades críticas reais

5.5.2.3

Bauxita Sinterizada 20/40

Os resultados obtidos foram os seguintes:

	σ_c (psi)				
μ (cp)	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
1	0,0265	0,0272	0,0281	0,0292	0,0306
2	0,0139	0,0146	0,0155	0,0167	0,0181
5	0,0064	0,0071	0,0080	0,0091	0,0105
10	0,0039	0,0046	0,0055	0,0066	0,0080
20	0,0026	0,0033	0,0042	0,0053	0,0067
30	0,0022	0,0029	0,0038	0,0049	0,0063
40	0,0020	0,0027	0,0036	0,0047	0,0061
50	0,0018	0,0025	0,0034	0,0046	0,0060

Tabela 5.14: Velocidade crítica normalizada (ft/s).

	$\sigma_c(\text{psi})$				
$\mu(\text{cp})$	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
1	0,0271	0,0278	0,0287	0,0299	0,0313
2	0,0142	0,0150	0,0159	0,0170	0,0185
5	0,0065	0,0072	0,0082	0,0093	0,0107
10	0,0039	0,0047	0,0056	0,0067	0,0082
20	0,0027	0,0034	0,0043	0,0055	0,0069
30	0,0022	0,0029	0,0039	0,0050	0,0065
40	0,0020	0,0027	0,0037	0,0048	0,0062
50	0,0019	0,0026	0,0035	0,0047	0,0061

Tabela 5.15: Velocidade crítica real (ft/s).

A velocidade de fluxo real para esse propante, nesse cenário, é de: 0,4553ft/s. Plotando-se um gráfico, como o mostrado abaixo, com as velocidades críticas reais e com a linha da velocidade de fluxo real, é possível verificar que a velocidade de fluxo é maior que a velocidade crítica, indicando a ocorrência de *proppant flowback*.

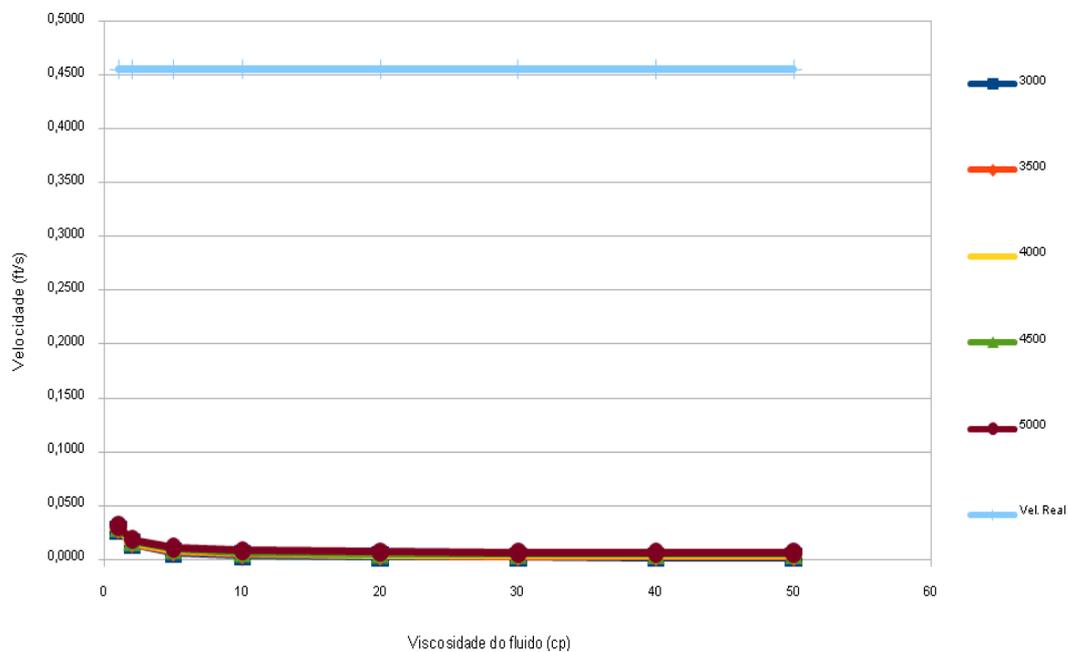


Figura 5.8: Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real.

Retirando-se a série relativa à velocidade real, pode-se verificar que as tensões de confinamento têm efeito considerável sobre a velocidade crítica real,

bem como pode ser notada a sensível queda da velocidade crítica com o aumento da viscosidade, conforme mostrado na figura abaixo:

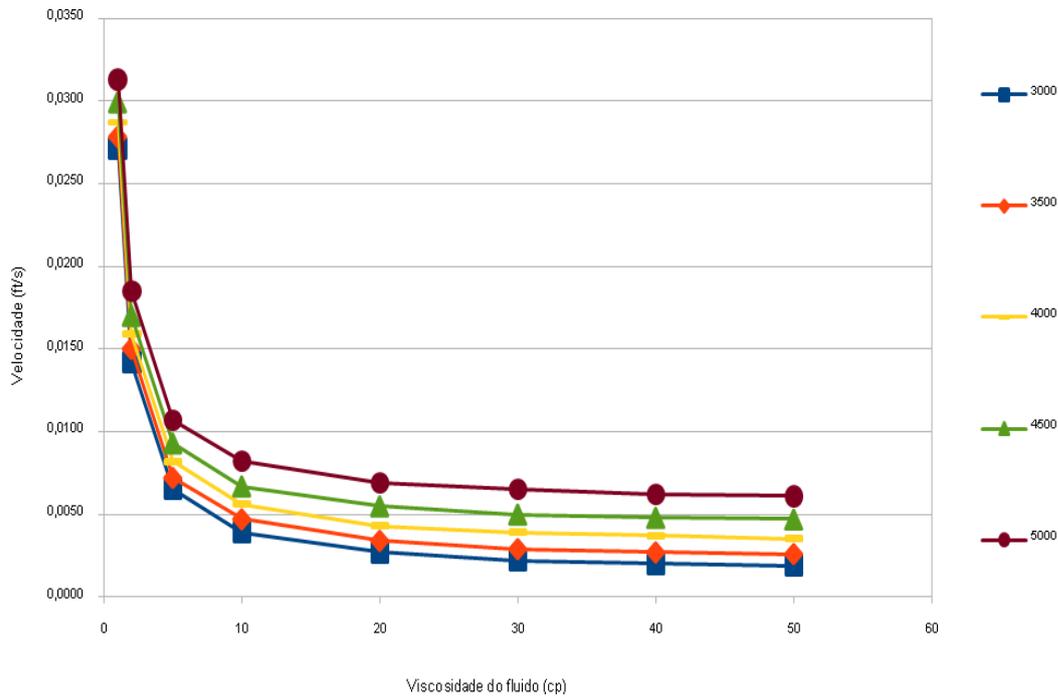


Figura 5.9: Velocidades críticas reais

5.6

Variantes do Cenário 2

A seqüência de projeto é: define-se uma produtividade para o poço; define-se a fratura mais econômica que atinge a produtividade alvo; estudam-se as soluções (tipos de propante e granularidade) possíveis; verifica-se a estabilidade da fratura. Assim, pode-se variar tanto o diâmetro médio dos grãos quanto a abertura da fratura. Entretanto, isto geraria um grande número de diferentes cenários a se simular. Portanto, como o objetivo do trabalho é o de comparar o desempenho de um propante em relação a outros produtos do mercado, procurou-se alterar parâmetros de um dos cenários de modo a se ter um cenário em que, pelo menos um dos propantes, apresentasse condições de estabilidade. O cenário escolhido para esse fim foi o Cenário 2 que apresenta condições de susceptibilidade aos parâmetros selecionados, viscosidade e tensão de confinamento.

Analisando-se as expressões do modelo selecionado, verifica-se que um parâmetro que influencia tanto a correção da velocidade crítica normalizada quanto a correção para a velocidade crítica específica é o parâmetro de abertura de fratura normalizada. Como a dimensão média dos grãos é fixa, optou-se por se reduzir a abertura da fratura. Foram simulados dois casos: um com abertura de fratura de 4 mm e outro com abertura de fratura de 3 mm. No caso da abertura de fratura de 3 mm, para tensões de confinamento mais elevadas o pacote de propante se torna estável para todos os propantes analisados. A figura abaixo mostra os resultados para o caso das esferas de vidro resinadas.

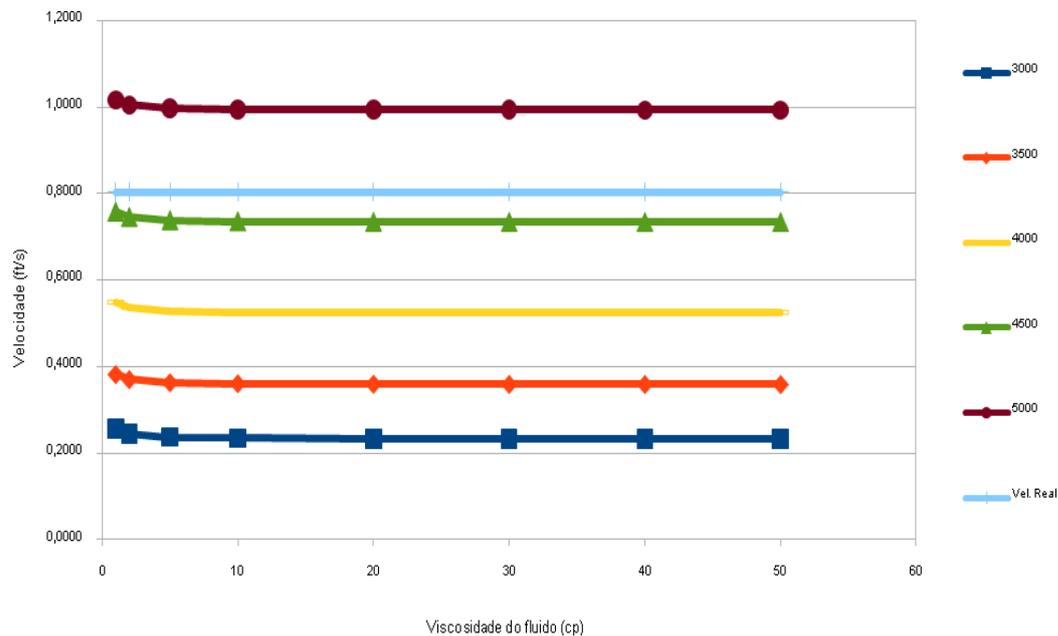


Figura 5.10: Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real para esferas de vidro resinadas para o Cenário 2 modificado – $W_f = 3$ mm

Apresentando os dados do gráfico anterior em termos de Velocidade real por velocidade crítica versus tensões confinantes, como mostrado no gráfico abaixo, pode-se verificar que, a velocidade real torna-se menor que a velocidade crítica para tensões de confinamento em torno de 4.600 psi.

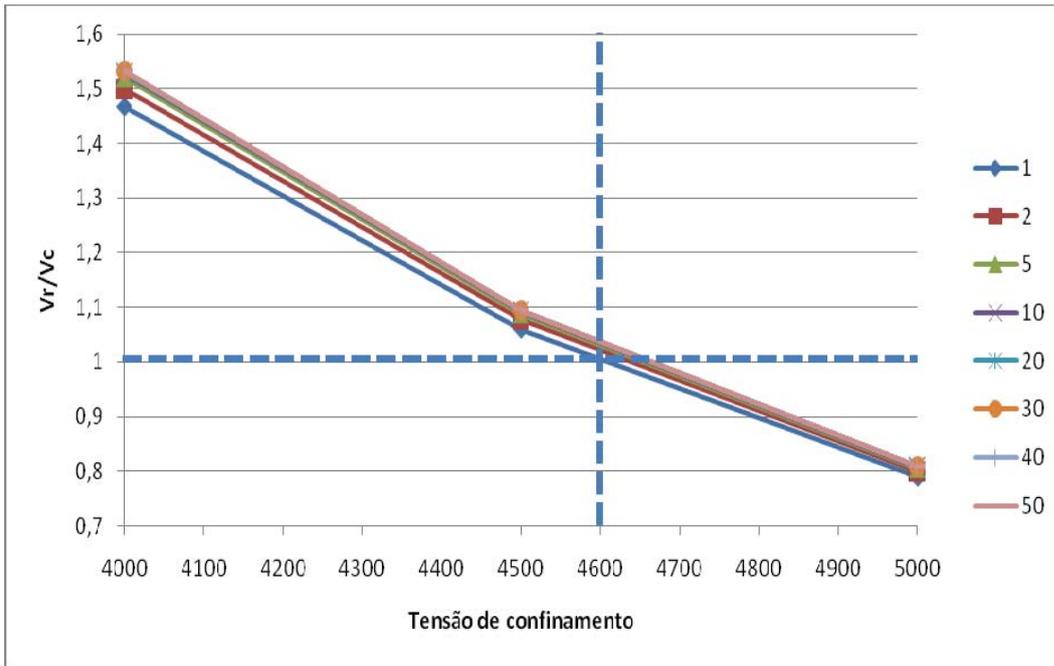


Figura 5.11: Velocidade de fluxo real / velocidade crítica real versus tensão de confinamento para esferas de vidro resinadas. As séries representam as diversas velocidades de fluido.

A figura abaixo mostra as velocidades críticas calculadas para o propante cerâmico para o Cenário 2 modificado, com abertura de fratura igual a 3 mm.

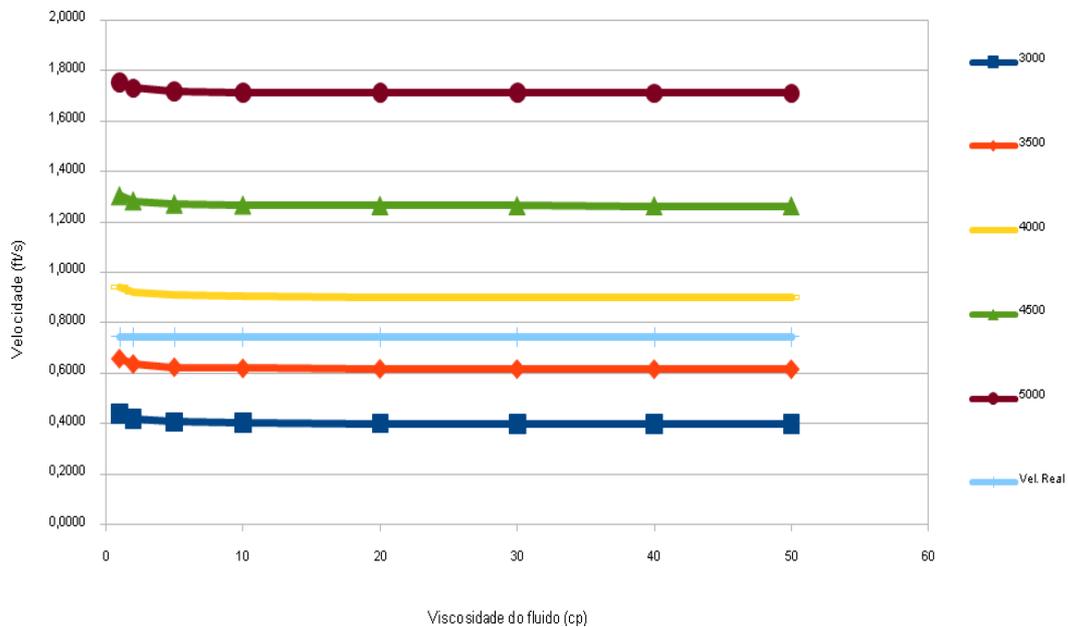


Figura 5.12: Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real do propante cerâmico para o Cenário 2 modificado – $W_f = 3 \text{ mm}$

No caso da cerâmica, pode-se verificar que, para tensões de confinamento entre 3.500 psi e 4.000 psi, o propante tem condição de estabilidade.

A figura abaixo mostra as velocidades críticas calculadas para o propante bauxita para o Cenário 2 modificado, com abertura de fratura igual a 3 mm.

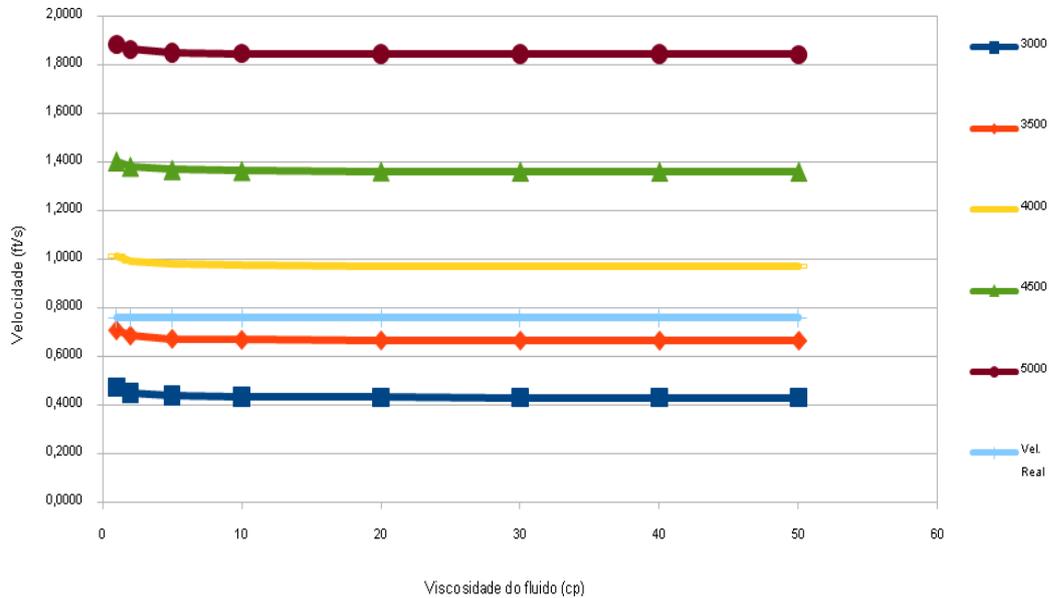


Figura 5.13: Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real do propante bauxita para o Cenário 2 modificado – $W_f = 3$ mm

No caso da bauxita, pode-se verificar que, para tensões de confinamento pouco acima de 3.500 psi, o propante tem condição de estabilidade.

O gráfico da figura 5.14 mostra, para a tensão de confinamento de 4.000 psi, variando-se a viscosidade do fluido, a relação entre a velocidade real de fluxo e a velocidade crítica. Nesse caso, os propantes comerciais já estão com a velocidade de fluxo real menor que a velocidade crítica (~20%), enquanto as esferas de vidro resinadas estão com a velocidade real maior que a velocidade crítica (~50%).

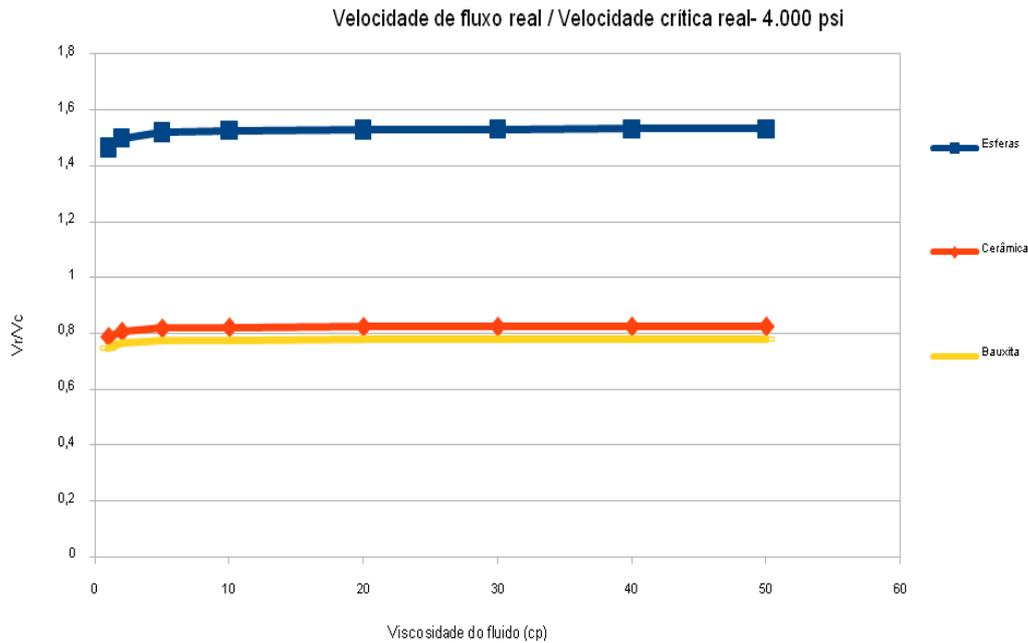


Figura 5.14: Comparação do desempenho dos propantes para o Cenário 2 modificado com $W_f = 3$ mm para tensão de confinamento de 4000 psi.

Destaca-se que, apesar da porosidade menor sob confinamento das esferas de vidro elevar a velocidade real de fluxo em pouco menos de 5%, a melhoria desse parâmetro, ou seja, uma menor perda de porosidade sob confinamento, não influenciaria muito os resultados, uma vez que, tomando as velocidades de fluxo da bauxita, a estabilidade das esferas de vidro ocorreria por volta de 4.500 psi. A explicação para isto está no fato de que a menor porosidade implica em menor área aberta ao fluxo. A menor área, para uma mesma vazão, implica em maior velocidade. O que está sendo dito é que, mesmo com a velocidade de fluxo de um propante comercial, o fato da velocidade crítica ser menor, implica que a estabilidade não ocorreria para a tensão de confinamento mostrada e sim para um tensão de 4.500 psi

5.7

Considerações Finais

Os três propantes selecionados para o estudo apresentaram um comportamento similar em termos de estabilidade. Nos casos selecionados inicialmente, todos os três apresentaram falta de estabilidade.

Levando os propantes para um caso hipotético, os três propantes mostraram que dentro da faixa de estudo eles poderiam se tornar estáveis. No caso dos propantes comerciais essa condição foi obtida em condições menos adversas que para as esferas de vidro.

A susceptibilidade ao retorno de propante das esferas de vidro, pelo modelo selecionado pode ser constatada pela análise do equacionamento e dos dados utilizados. Analisando as equações 1 a 4, pode-se verificar que um parâmetro de grande influência tanto na conversão da velocidade crítica normalizada para a velocidade crítica específica e também para o fator C_1 é o diâmetro médio dos grãos.

No caso das esferas de vidro, esse valor corresponde a uma distribuição linear entre as peneiras de malhas número 20 e 40 (0,63mm) enquanto nos propantes comerciais esse valor se aproxima da dimensão da malha da peneira número 20 (0,662 e 0,658). Esse fato pode indicar que uma mudança na composição granulométrica das esferas de vidro resinadas pode melhorar o seu desempenho em termos de retorno de propante.

O outro parâmetro que poderia ser alterado é a densidade absoluta das esferas de vidro resinadas, entretanto, o valor mais baixo é desejável, para evitar a ocorrência de decantação do propante durante a operação de fraturamento hidráulico.

Os resultados apresentados no estudo mostram que o problema de retorno de propante deve ser levado em consideração no desenvolvimento de um projeto de fraturamento hidráulico, uma vez que para dadas condições do campo, notadamente viscosidade do fluido e tensões de confinamento, as aberturas de fratura desejadas nem sempre mostrar-se-ão estáveis, ocorrendo o retorno de propante até que a abertura da fratura seja reduzida a uma dimensão em que o pacote de propante se estabilize, levando a uma menor condutividade de fratura efetiva que aquela projetada.