



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

JÉSSICA DE CASTRO SOUSA

**ANÁLISE DOS FATORES QUE AFETAM O FATOR DE PELÍCULA E A
PRODUTIVIDADE DE UM POÇO DE PETRÓLEO**

FORTALEZA

2017

JÉSSICA DE CASTRO SOUSA

ANÁLISE DOS FATORES QUE AFETAM O FATOR DE PELÍCULA E A
PRODUTIVIDADE DE UM POÇO DE PETRÓLEO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Petróleo.
Orientador: Prof. Dr. Vitor Moreira da Rocha Ponte.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S697a Sousa, Jéssica de Castro.

Análise dos fatores que afetam o fator de película e a produtividade de um poço de petróleo / Jéssica de Castro Sousa. – 2017.

65 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Petróleo, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Vitor Moreira da Rocha Ponte.

1. Fator de película. 2. Canhoneio. 3. Dano na formação. 4. Estimulação de poços. I. Título.

CDD 665.5092

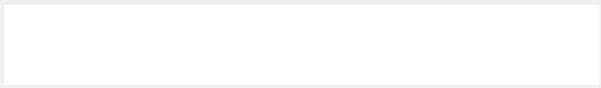
JÉSSICA DE CASTRO SOUSA

ANÁLISE DOS FATORES QUE AFETAM O FATOR DE PELÍCULA E A
PRODUTIVIDADE DE UM POÇO DE PETRÓLEO

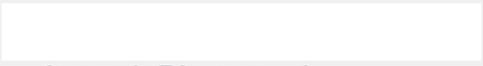
Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Petróleo do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Aprovado em: 6/11/2017.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Vitor Moreira da Rocha Ponte (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof. Me. Pedro Felipe Gadelha Silvino
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof. Me. Filipe Xavier Feitosa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais e minha família que foram a base para sustentar os meus sonhos e torná-los possíveis.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que sempre me apoiaram durante essa jornada e me deram todos os recursos necessários para que eu me dedicasse à minha graduação.

Aos meus avós que estavam sempre disponíveis a ajudar financeiramente quando necessário e prestar apoio nos momentos difíceis.

Aos meus professores que fizeram parte do meu processo de formação, que foram exigentes e compreensivos, e que serão sempre parte da futura profissional que serei.

Ao professor e orientador Vitor Ponte, pelos ensinamentos práticos nas aulas de reservatório e perfuração, pela assistência prestada à conclusão do presente estudo e por ter confiado que eu conseguiria.

Aos professores Pedro Felipe e Filipe Xavier pela disponibilidade de participar da minha banca e por toda a atenção.

Ao professor Bruno Prata, pela primeira oportunidade de bolsa na UFC e pelos ensinamentos e palavras sábias que nunca esquecerei e são de grande inspiração para meu futuro profissional.

Ao professor Célio Loureiro, pela oportunidade de estágio e ajuda à conclusão da minha graduação.

Aos colegas da turma de 2011, que não participaram diretamente deste trabalho, mas com certeza contribuíram no dia-a-dia para que eu chegasse até aqui e tivesse as melhores lembranças possíveis.

À CAPES, pela oportunidade de intercâmbio para os Estados Unidos, no qual tive a inspiração para o tema deste trabalho e pude desenvolver habilidades para realização do mesmo. Serei eternamente grata pela realização deste sonho.

Finalmente, à UFC. Passaram-se 6 anos, muitos professores, disciplinas, notas altas e baixas, e noites mal dormidas. Uma eterna relação de amor e ódio. Foi minha segunda casa por todo esse tempo e sinto que sempre será. Sentirei saudades.

“Inteligente é aquele que não se cansa de aprender.” (Sócrates)

RESUMO

Existem muitos fatores que afetam a produtividade de um poço de petróleo revestido e canhoneado. Esses fatores incluem tanto parâmetros de projeto, como as características do canhoneio selecionadas, quanto do reservatório. Esses efeitos são contabilizados por meio do fator de película total, o qual tem grande influência na vazão de produção de um poço de petróleo. Um modelo semi-analítico é utilizado para analisar a variação do fator de película e de seus subcomponentes quando os parâmetros de projeto e de reservatório são modificados. Por meio da simulação de diversos casos com parâmetros diferentes, analisou-se a variação do fator de película e os efeitos na produtividade do poço. Diante dos diversos resultados obtidos, os poços com maiores raios da região de formação danificada mostraram que é bastante difícil se conseguir fatores de película com valores perto de zero, sendo necessário aplicar métodos de estimulação de poços para que haja estimulação. Em outros casos, é possível fazer a estimulação do poço utilizando apenas o canhoneio com as características de projeto mais favoráveis.

Palavras-chave: Fator de película. Canhoneio. Estimulação de poços. Dano na formação.

ABSTRACT

There are many factors that can affect the productivity of a completed and perforated oil well. These factors include project variables, like the selected perforating parameters, as well as formation characteristics. These effects are accounted for the total skin factor, which has big influence on the production flow rate of a well. Computations were done using a commonly used semi-analytical model to analyze the variation of the total skin factor and its subcomponents when project and reservoir parameters are modified. To accomplish that, many study cases were simulated using realistic data to study the variation of the skin factor and the effects on the well productivity. The results obtained were compared and it can be observed that for wells with the greatest formation damage radius, it is very hard to reach a skin factor equal to zero or negative, indicating that is necessary to apply a stimulation method to increase the productivity in these cases. In other samples, stimulation can be done just using selected parameters for the perforation.

Keywords: Skin factor. Well perforation. Well stimulation. Formation damage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de completação de poço.....	18
Figura 2 – Variáveis do canhoneio de um poço.....	19
Figura 3 – Esquema de um reservatório com fluxo de fluido em regime permanente.....	21
Figura 4 – Esquema de um poço com região danificada.....	25
Figura 5 - Convergência do fluxo de fluido em um poço canhoneado.....	26
Figura 6 – Representação da região danificada ao redor do túnel do canhoneio..	31
Figura 7 – Representação da convergência do fluxo de fluido para um poço parcialmente completado.....	33
Figura 8 – Zona compactada ao redor do túnel do canhoneio.....	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Relação entre a vazão de produção de óleo e o fator de película do poço.....	23
Gráfico 2	– Análise do fator de película com a variação do volume do canhoneio quando o raio de dano é igual a 0,5 ft.....	40
Gráfico 3	– Análise do fator de película com a variação do volume do canhoneio quando o raio de dano é igual a 1 ft.....	41
Gráfico 4	– Análise do fator de película com a variação do volume do canhoneio quando o raio de dano é igual a 2 ft.....	42
Gráfico 5	– Análise do fator de película com a variação do volume do canhoneio quando o raio de dano é igual a 3 ft.....	43
Gráfico 6	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 0,5 ft.....	44
Gráfico 7	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 1 ft.....	45
Gráfico 8	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 2 ft.....	46
Gráfico 9	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 3 ft.....	47
Gráfico 10	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio para diferentes raios de dano.....	48
Gráfico 11	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 0,5 ft.....	50
Gráfico 12	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 1 ft.....	51
Gráfico 13	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 2 ft.....	52
Gráfico 14	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do	

	canhoneio quando o raio de dano é igual a 3 ft.....	53
Gráfico 15	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 0,5 ft.....	54
Gráfico 16	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 1 ft.....	55
Gráfico 17	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 2 ft.....	56
Gráfico 18	– Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 3 ft.....	57
Gráfico 19	– Análise do fator de película com a variação da anisotropia.....	58
Gráfico 20	– Análise do fator de película com a variação da permeabilidade da zona compactada.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dependência do parâmetro α_θ com o ângulo de fase.....	27
Tabela 2 – Variáveis c_1 e c_2 na equação (12).....	28
Tabela 3 – Coeficientes da correlação do fator de película vertical.....	29
Tabela 4 – Parâmetros do poço e da formação utilizados nos cálculos.....	35
Tabela 5 – Dados utilizados para análise do volume das perfurações do canhoneio.....	39
Tabela 6 – Dados utilizados para análise do raio de abertura dos jatos.....	49
Tabela 7 – Dados utilizados para análise do ângulo de fase.....	54
Tabela 8 – Dados utilizados para análise da anisotropia.....	58
Tabela 9 – Dados utilizados para análise da variação da permeabilidade da zona compactada.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

bbl	Barril
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de Fluidos Computacional)
cp	Centipoise
ft	<i>Feet</i> (pés)
md	Milidarcy
res	Reservatório
SPF	<i>Shots per foot</i> (Tiros por pé)
STB	<i>Stock Tank Barrel</i> (Barril nas condições de superfície)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área transversal ao fluxo
a	Variável referente à equação (15)
a_1	Variável referente à equação (15)
a_2	Variável referente à equação (15)
B	Fator-volume de formação
b	Variável referente à equação (16)
b_1	Variável referente à equação (16)
b_2	Variável referente à equação (16)
c_1	Variável referente à equação (12)
c_2	Variável referente à equação (12)
D	Deslocamento relativo da região canhoneada para o centro do reservatório
H	Proporção da zona aberta para fluxo, h_p/h_t
h_p	Espessura da região canhoneada
h_t	Espessura total do reservatório
J	Índice de produtividade
k	Permeabilidade
K_{cz}	Permeabilidade da zona compactada
k_d	Permeabilidade da região danificada
k_e	Permeabilidade do reservatório
k_H	Permeabilidade horizontal do reservatório
k_V	Permeabilidade vertical do reservatório
L	Comprimento
L_d	Comprimento da zona danificada
L_{perf}	Comprimento do túnel do canhoneio
L_{perf}'	Comprimento do túnel do canhoneio modificado
ΔP	Varição de pressão
ΔP_s	Varição de pressão do fator de película
P_e	Pressão externa do reservatório
P_{wf}	Pressão de fundo de poço
q	Vazão

R	Variável definida na equação (29)
r_{cz}	Raio da zona compactada
r_d	Raio da região danificada
r_e	Raio externo do reservatório
r_{perf}	Raio do túnel (perfuração) do canhoneio
r_{pD}	Raio adimensional do túnel (perfuração) do canhoneio
r_w	Raio do poço
r_w'	Raio do poço modificado
r_{wc}	Raio do poço corrigido
r_{wD}	Raio adimensional do poço
r_{we}	Raio efetivo do poço
S	Fator de película
S_{cz}	Fator de película da zona compactada
S_d	Fator de película mecânico ou de dano
S_H	Fator de película horizontal
S_V	Fator de película vertical
S_p	Fator de película de canhoneio ou perfuração
S_p'	Fator de película de canhoneio ou perfuração incluindo S_{cz}
S_{pp}	Fator de película de penetração parcial
S_t	Fator de película total
S_{wb}	Fator de película do poço
V	Volume
x	Variável
y	Espaço entre perfurações
y_D	Espaço adimensional entre perfurações
z_m	Distância entre o topo do reservatório e o meio do intervalo aberto
μ	Viscosidade
φ	Porosidade
θ	Ângulo de fase entre as perfurações
α_θ	Variável referente à equação (11)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	CONCEITOS BÁSICOS	17
2.1	Reservatório	17
2.1.1	<i>Porosidade</i>	17
2.1.2	<i>Permeabilidade</i>	17
2.2	Tipos de completação.....	18
2.3	Canhoneio do poço.....	19
3	INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE FATOR DE PELÍCULA.....	20
3.1	Fator de película total.....	20
3.2	Influência do fator de película na produtividade do poço.....	22
3.3	Tipos de fator de película.....	24
3.3.1	<i>Fator de película mecânico ou de dano (S_d)</i>	24
3.3.2	<i>Fator de película de perfuração ou canhoneio (S_p)</i>	25
3.3.3	<i>Fator de película da zona compactada (S_{cz})</i>	31
3.3.4	<i>Fator de película de penetração parcial (S_{pp})</i>	32
4	METODOLOGIA.....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1	Análise do volume das perfurações do canhoneio.....	38
5.2	Análise da profundidade dos jatos do canhoneio.....	43
5.3	Análise do raio das perfurações do canhoneio.....	48
5.4	Análise do ângulo de fase.....	53
5.5	Análise da anisotropia.....	57
5.6	Análise da zona compactada ao redor do canhoneio.....	59
6	CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Com a grande variabilidade do preço do petróleo nos últimos anos, torna-se cada vez mais importante avaliar a produtividade de um poço e sua eficiência. Existem diversas formas de melhorar a produtividade de um poço, que vão desde sua operação até a recuperação secundária e nesse caminho encontra-se sempre uma resistência chamada dano à formação.

O dano à formação é um problema que pode surgir em diversas fases da exploração de um poço, desde a sua perfuração até a produção de fluido. Os principais indicadores de um dano à formação são o fator de película, a razão de dano e o índice de produtividade (LIMA, 2010).

As causas do dano à formação podem ser por conta da geometria do poço, como uma pequena região de produção em relação à espessura do reservatório, e parâmetros do canhoneio realizado, ou também podem ser devido às características do reservatório, como o dano da formação por conta da diminuição da permeabilidade.

O termo fator de película foi introduzido por Van Everdingen e Hurst (1949) com o objetivo de caracterizar a região próxima ao poço com uma diferença de pressão que é proporcional ao seu valor.

O fator de película não tem nenhuma dimensão e representa a resistência à entrada de fluido no poço. Qualquer fenômeno que cause uma distorção ou dificulte o fluxo de fluido em direção ao poço resultará em um fator de película positivo. Um fator de película positivo tem o mesmo efeito da redução do raio do poço e um fator de película negativo tem o efeito contrário.

O presente trabalho tenta entender os efeitos desses fatores na produtividade de um poço por meio da análise do fator de película. São realizadas variações de parâmetro que afetam o fator de película, como o raio da região danificada, características do canhoneio e anisotropia da formação, de forma a identificar o impacto de cada um no fator de película total.

Em geral, para se conseguir um fator de película negativo, é necessário que sejam realizados procedimentos para aumentar a permeabilidade da formação. Neste trabalho, são mostrados também os casos em que é possível tornar o fator de película negativo sem a aplicação de métodos de estimulação de poços.

2 CONCEITOS BÁSICOS

2.1 Reservatório

Um reservatório de hidrocarbonetos consiste em um meio geológico poroso com uma capacidade limitada de armazenamento e com características de fluxo específicas e geralmente são compostos por rochas sedimentares, como os arenitos e calcários (ROSA, 2006).

Para que a completação e produção de um poço de petróleo seja feita de maneira efetiva, é necessário conhecer bem as características do reservatório, como suas heterogeneidades, discontinuidades e anisotropias, principalmente com a consolidação da utilização de poços inclinados e horizontais. Portanto, destacam-se a seguir as principais propriedades dos reservatórios.

2.1.1 Porosidade

A porosidade mede a capacidade de armazenamento de fluido em um reservatório. Ela é uma das propriedades mais importantes das rochas e é definida como sendo a relação entre o volume de espaço vazio e o volume total.

$$\varphi = \frac{V_{\text{vazio}}}{V_{\text{total}}} \quad (1)$$

Onde φ é a porosidade, V_{vazio} , é o volume dos espaços vazios e V_{total} é o volume total da rocha.

2.1.2 Permeabilidade

Permeabilidade é a propriedade que descreve a capacidade que a rocha possui de locomover fluido entre seus poros. A equação de maior aplicação que envolve o fluxo de fluidos em meios porosos é chamada Equação de Darcy e foi inicialmente desenvolvida por Darcy, em 1856, (ROSA, 2006):

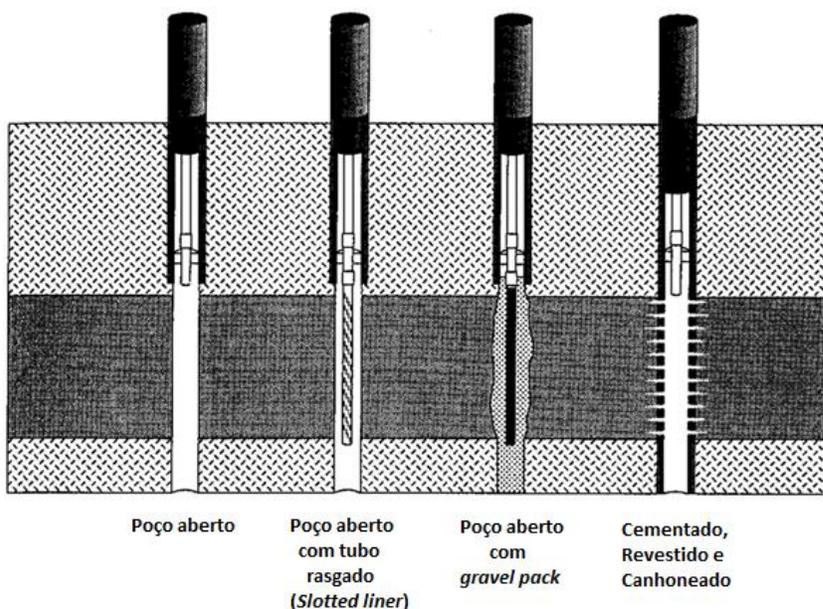
$$q = \frac{kA \cdot \Delta p}{\mu L} \quad (2)$$

Na qual k é a permeabilidade do meio poroso, cuja unidade de medida é o Darcy, q é a vazão de fluido, A é a área da seção transversal, Δp é o diferencial de pressão, μ é a viscosidade do fluido e L o comprimento do meio poroso.

2.2 Tipos de completação

Diferentes tipos de completação de poço podem ser necessários para controlar ou isolar a entrada de fluido, evitar cone de gás ou água e minimizar a produção de areia. A figura 1 a seguir mostra diferentes tipos de completação.

Figura 1 – Tipos de completação de poço



Fonte: Economides (1991).

Quando não há necessidade de um poço ser revestido ou cimentado, tem-se o caso de um poço aberto, no qual o revestimento das paredes é colocado apenas até a região acima da zona de interesse, antes de ela ser perfurada, como mostra na figura 1. A completação a poço aberto produz um padrão de fluxo local radial ao poço e normal à trajetória do poço.

Existem também completações parciais ou seletivas, nas quais se podem colocar tubos rasgados (*slotted liners*) ou *gravel packs*, por exemplo, para evitar produção de grãos finos que saem da formação e dar mais estabilidade para o fundo do poço (SCHLUMBERGER, 2016).

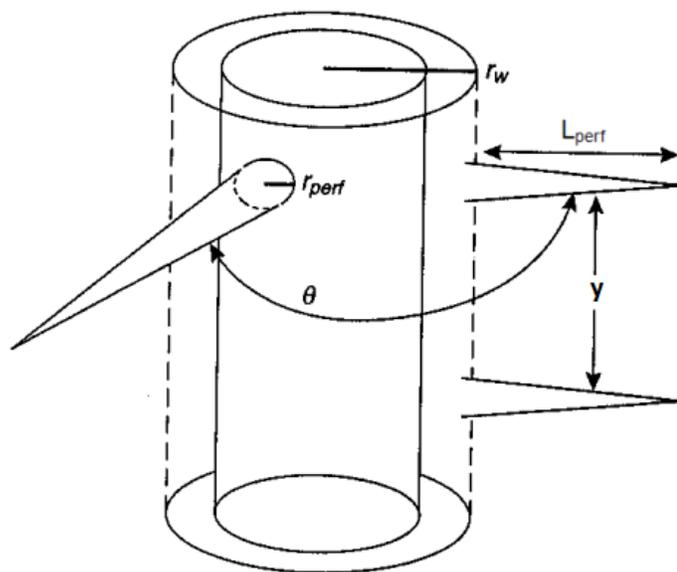
Por último, a figura mostra o caso em que o poço é cimentado e revestido e é feito o canhoneio para abrir passagem à entrada de fluido no poço. Uma completação desse tipo produz um padrão de fluxo distorcido ao redor do poço.

2.3 Canhoneio do poço

O canhoneio de um poço corresponde ao processo de perfurar o revestimento do poço, a região cimentada e a formação rochosa de forma a permitir que o fluido escoe para dentro do poço através dos túneis criados. São inseridos no poço explosivos que lançam jatos perpendiculares à parede do poço, abrindo passagem para a entrada de fluido.

A figura 2 mostra as principais variáveis do canhoneio de um poço: o raio de abertura do jato do canhoneio, r_{perf} , o comprimento do jato, L_{perf} , o ângulo de fase entre os jatos, θ , e a distância entre os jatos, y . A distância entre os jatos é inversamente proporcional à densidade de tiros, *SPF* (*shots per foot*).

Figura 2 – Variáveis do canhoneio de um poço



Fonte: Adaptado de Economides (1991).

3 INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE FATOR DE PELÍCULA

3.1 Fator de película total

Van Everdingen e Hurst (1949) observaram que, no estudo da queda de pressão no reservatório, não era realista assumir uma permeabilidade única para toda a região do reservatório. Segundo esses autores, a melhor forma de alinhar a teoria com o desempenho do poço seria assumir que a permeabilidade na região próxima ao poço é consideravelmente reduzida por conta das operações de perfuração, completação e/ou produção.

Van Everdingen e Hurst (1949) introduziram, então, o conceito de fator de película na análise das condições da região próxima ao poço. O fator de película equivale a uma queda de pressão adicional, dada pela equação (3), que pode ser adicionada à queda de pressão no reservatório.

$$\Delta P_s = \frac{q\mu}{2\pi \cdot kh} S \quad (3)$$

Onde ΔP_s é a variação de pressão referente ao fator de película, h é a espessura da zona produzida e S é o fator de película.

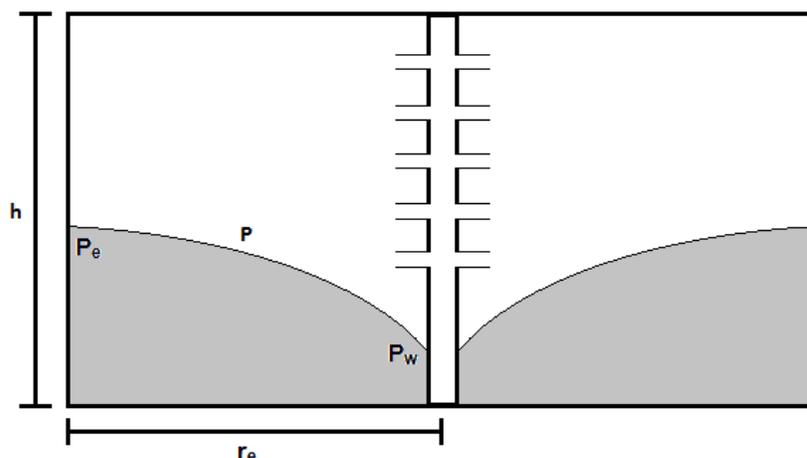
Para um reservatório que possui uma fronteira externa, r_e , com uma pressão constante, P_e , o poço opera em regime permanente e o fluxo radial pode ser representado pela equação (4) (ECONOMIDES, 1991).

$$P_e - P_{wf} = \frac{q\mu}{2\pi \cdot kh} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right) \quad (4)$$

Onde P_{wf} é a pressão de fundo de poço e r_w é o raio do poço.

A figura 3 mostra a queda de pressão que acontece no reservatório na região próxima ao poço. Quando o poço possui fator de película positivo, a queda de pressão do reservatório será maior, dificultando a produção de fluido.

Figura 3 – Esquema de um reservatório com fluxo de fluido em regime permanente



Fonte: Economides (1991).

Em um poço danificado, o reservatório drena para o poço com um raio efetivo menor, por conta do fator de película. Já para um poço estimulado, com fator de película negativo, o raio efetivo do poço de torna maior que o raio real.

Existem vários fatores que podem afetar a produtividade de um poço como características da formação, como a anisotropia, o dano na formação ao redor do poço causado pelas operações de perfuração e completação, o tipo de canhoneio realizado, a espessura da região aberta para fluxo de fluido, etc. Esses fatores são quantificados por meio do fator de película total, S_t , que é um parâmetro importante para simulação de reservatório e análise da produção do poço.

Vários autores sugerem que o fator de película total seja a soma dos subfatores, como Vrbik (1991), McLeod (1983) e Elshahawi-Gad (2001), sendo representado pela equação (5).

$$S_t = S_d + S_p + S_{cz} + S_{pp} + \dots \quad (5)$$

No entanto, a simples soma dos subfatores de película não é uma equação precisa, pois a interação entre o fator de película total e alguns dos seus componentes pode ser não-linear.

Um dos modelos disponíveis para o cálculo do fator de película é o modelo semi-analítico proposto por Karakas e Tariq (1991), no qual fator de película

total leva em consideração o fator de película horizontal, o fator de película vertical considerando a anisotropia da formação, o fator de película da região danificada ao redor do poço, entre outros.

3.2 Influência do fator de película na produtividade do poço

O índice de produtividade, J , de um poço é a taxa de produção dividida pela diferença de pressão, como mostra na equação (6) (ECONOMIDES, 1991).

$$J = \frac{q}{P_e - P_{wf}} = \frac{kh}{141,2B\mu[\ln(r_e/r_w) + S]} \quad (6)$$

Onde B é o fator-volume de formação.

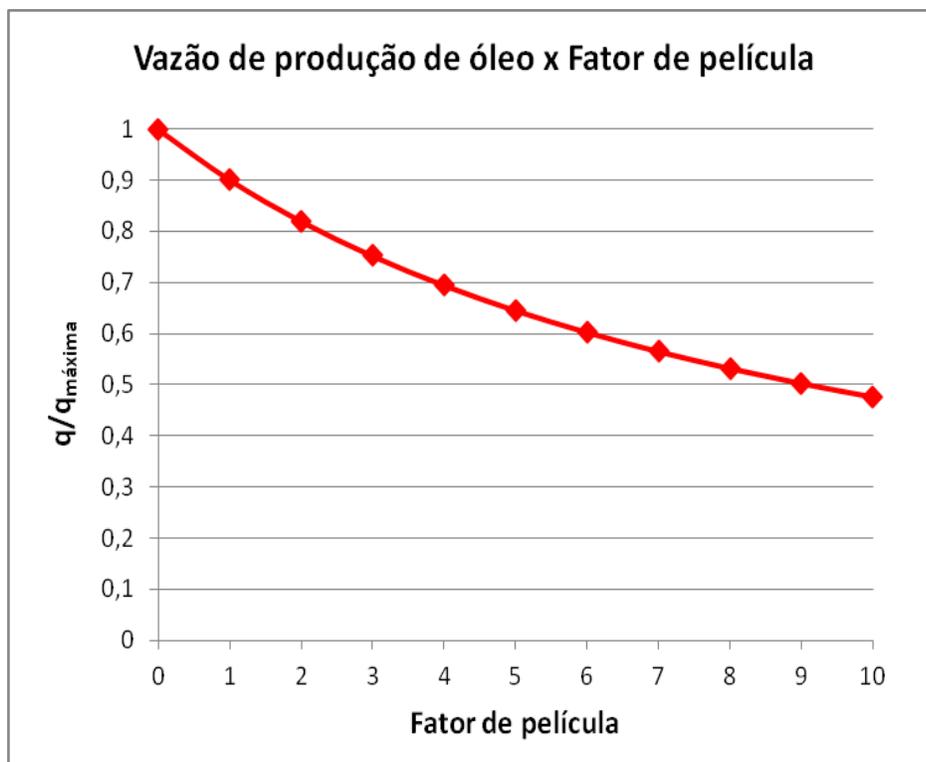
Um dos maiores propósitos da engenharia de produção é maximizar o índice de produtividade com uma boa relação custo-benefício, aumentando-se a vazão de fluido ou minimizando a queda de pressão no reservatório. Pode-se conseguir isso diminuindo o fator de película ou aplicando métodos de estimulação de poço, como o fraturamento hidráulico.

Para compreender o efeito do fator de película na produtividade de um poço, a vazão de produção de um poço com fator de película maior que zero é comparada com a de um poço aberto ideal sem dano. O cálculo é feito com base na equação (7) para poços com fluxo em regime permanente (ECONOMIDES, 1991).

$$q = \frac{kh(P_e - P_w)}{141,2B\mu[\ln(r_e/r_w) + S]} \quad (7)$$

Obtém-se como resultado o gráfico 1 a seguir.

Gráfico 1 – Relação entre a vazão de produção de óleo e o fator de película do poço



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico mostra que a vazão máxima ocorre quando o fator de película é igual a zero. Pode-se observar também que, com o aumento do fator de película de zero para 10, a vazão de produção diminui para um valor menor que 50% da vazão máxima.

3.3 Tipos de fator de película

3.3.1 Fator de película mecânico ou de dano (S_d)

Poços de óleo e gás podem ter uma redução da permeabilidade da formação ao redor do poço devido à invasão de fluido de perfuração, cimento, sólidos e fluidos de completação. Esse dano na formação causa uma queda adicional de pressão no reservatório e diminui a produtividade.

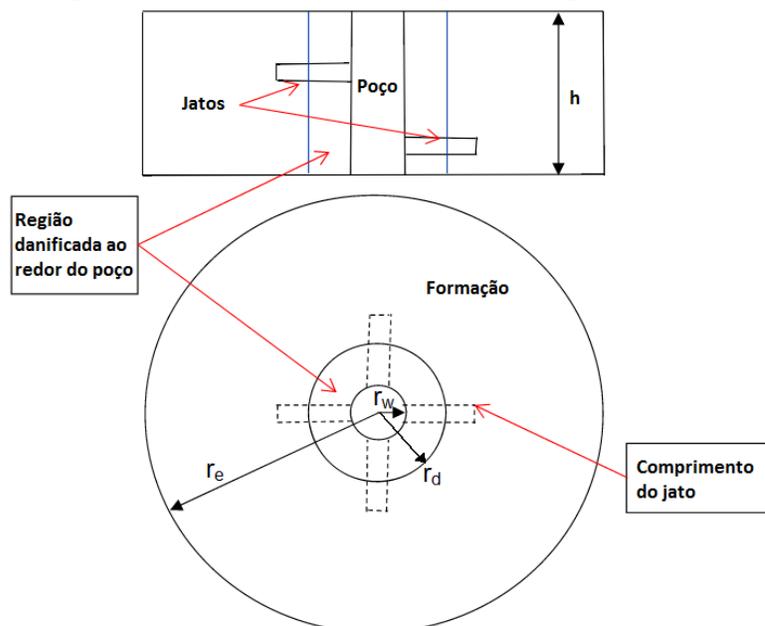
O fator de película mecânico proposto por Hawkins (1956), na equação (8), quantifica os efeitos dessa queda na permeabilidade e representa a zona danificada como um cilindro concêntrico ao redor do poço.

$$S_d = \left(\frac{k_e}{k_d} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_d}{r_w} \right) \quad (8)$$

Onde S_d é o fator de película de dano, k_e é a permeabilidade do reservatório, k_d é a permeabilidade da região danificada, r_d é o raio da zona danificada e r_w é o raio do poço.

A figura 4 a seguir representa o dano na formação com uma forma cilíndrica ao redor do poço. Nessa imagem, pode-se observar também que o jato do canhoneio pode atravessar duas regiões distintas: a região danificada e a formação sem dano.

Figura 4 – Esquema de um poço com região danificada



Fonte: Adaptado de Sun *et al.* (2011).

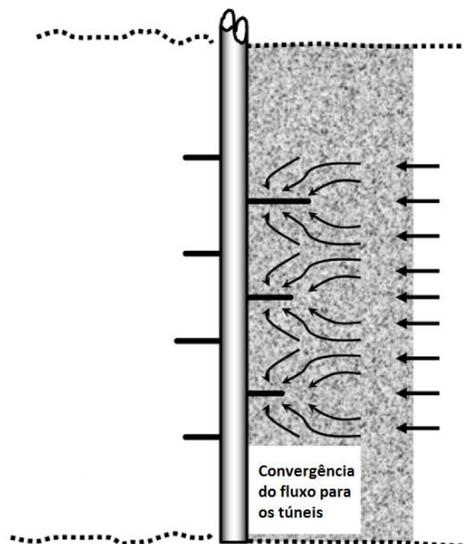
O fator de película mecânico, S_d , pode ser positivo, quando existe uma região danificada e a produtividade do poço cai, ou negativo, quando são realizados procedimentos de estimulação de poços, como acidificação ou fraturamento hidráulico.

3.3.2 Fator de película de perfuração ou canhoneio (S_p)

Devido ao complexo fluxo tridimensional dos fluidos em direção às perfurações feitas pelo canhoneio de um poço completado, a análise da produtividade do poço não é tão simples de ser feita analiticamente. Karakas e Tariq (1991) apresentam uma solução semi-analítica para o fator de película devido ao canhoneio.

Para poços completados, é necessário canhonear o poço para estabelecer uma conexão entre o poço e a formação. Essas perfurações distorcem o fluxo do fluido e criam uma convergência adicional próxima ao poço. A figura 5 mostra a convergência causada pelo canhoneio próximo aos túneis.

Figura 5 – Convergência do fluxo de fluido em um poço canhoneado



Fonte: Adaptado de Yildiz (2006).

Comparando com um poço aberto ideal, um poço revestido e canhoneado terá um aumento ou diminuição da queda de pressão, que será quantificado pelo fator de película de perfuração ou canhoneio, S_p .

Quanto mais profundo e aberto for o túnel criado pelo canhoneio, a área de comunicação entre o poço e a formação será maior do que a de um poço aberto ideal e a queda de pressão no reservatório será menor, aumentando a produtividade do poço.

O fator de película de canhoneio (ou perfuração), S_p , depende da densidade de tiros, do comprimento do jato, do raio de abertura do jato, do ângulo de fase, da anisotropia da formação e do raio do poço. Ele também pode ser positivo ou negativo, assim como o fator de película mecânico.

A seguir, têm-se as equações propostas por Karakas e Tariq (1991) e o procedimento passo-a-passo para o cálculo do fator de película de canhoneio.

Para calcular o fator de película horizontal, S_H , que quantifica o fluxo horizontal do fluido, utiliza-se a equação a seguir:

$$S_H = \ln(r_w/r_{we}) \quad (3)$$

O raio efetivo do poço, r_{we} , é dado por:

$$r_{we}(\theta) = \frac{1}{4}L_{perf} \quad \text{se } \theta = 0^\circ \quad (10)$$

$$r_{we}(\theta) = \alpha_\theta(r_w + L_{perf}) \quad \text{Para os outros casos} \quad (11)$$

O parâmetro α_θ pode ser encontrado na tabela 1.

Tabela 1 – Dependência do parâmetro α_θ com o ângulo de fase

Ângulo de fase da perfuração	α_θ
0	0,250
180	0,500
120	0,648
90	0,726
60	0,813
45	0,860

Fonte: Karakas e Tariq (1991)

Em alguns casos, o poço pode se tornar uma barreira para o fluxo de fluido. Quando o ângulo de fase é 0° , as perfurações do canhoneio estão todas na mesma direção e as linhas de pressão têm uma forma elíptica com centro na metade do comprimento dos jatos. Com isso, o poço torna-se uma resistência para a passagem de fluido e pode-se quantificar esse efeito por meio do fator de película do poço, S_{wb} .

$$S_{wb}(\theta) = c_1(\theta)\exp[c_2(\theta)r_{wD}] \quad (12)$$

Onde r_{wD} é o raio do poço adimensional e pode-se calculá-lo usando a equação (13).

$$r_{wD} = r_w / (L_{perf} + r_w) \quad (13)$$

As variáveis c_1 e c_2 podem ser encontradas na tabela 2 para diversos ângulos de fase.

Tabela 2 – Variáveis c_1 e c_2 na equação (12)

Ângulo de fase da perfuração	c_1	c_2
0	0,16	2,675
180	0,026	4,532
120	0,0066	5,320
90	0,0019	6,155
60	0,0003	7,509
45	0,000046	8,791

Fonte: Karakas e Tariq (1991)

Para calcular o fator de película vertical, S_v , que quantifica os efeitos da resistência ao fluxo vertical e da anisotropia da formação, tem-se a seguinte equação:

$$S_v = 10^a y_D^{b-1} r_{pD}^b \quad (14)$$

Onde

$$a = a_1 \log_{10} r_{pD} + a_2 \quad (15)$$

E

$$b = b_1 r_{pD} + b_2 \quad (16)$$

Onde y_D é o espaço adimensional entre os jatos e r_{pD} é o raio adimensional do túnel do canhoneio. Os valores de a_1 , a_2 , b_1 e b_2 são dados na tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes da correlação do fator de película vertical

Ângulo de fase da perfuração	a ₁	a ₂	b ₁	b ₂
0	- 2,091	0,0453	5,1313	1,8672
180	- 2,025	0,0943	3,0373	1,8115
120	- 2,018	0,0634	1,6136	1,7770
90	- 1,905	0,1038	1,5674	1,6935
60	- 1,898	0,1023	1,3654	1,6490
45	- 1,788	0,2398	1,1915	1,6392

Fonte: Karakas e Tariq (1991)

$$y_D = \left(\frac{y}{L_{\text{perf}}} \right) \sqrt{\frac{k_H}{k_v}} \quad (17)$$

$$r_{pD} = \left(\frac{r_{\text{perf}}}{2y} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{k_v}{k_H}} \right) \quad (18)$$

A equação (14) é válida para $y_D \leq 10$ e $r_{pD} \geq 0,01$.

Combinando esses fatores, o fator de película de perfuração é determinado então por:

$$S_p = S_H + S_v + S_{wb} \quad (19)$$

O fator de película de perfuração só leva em consideração a convergência de fluido ao redor das perfurações em um poço canhoneado ideal sem dano à formação e sem zona compactada ao redor das perfurações.

Para poços com canhoneio, um erro comum no cálculo do fator de película total é somar o fator de película de perfuração, S_p , com o fator de película de dano para poços abertos, S_d . O efeito de uma zona danificada em um poço com perfurações de canhoneio é um pouco mais complexo do que para um poço aberto. Karakas e Tariq (1991) apresentam uma solução para o fator de película de dano para poços com canhoneio dentro e fora da zona danificada.

Para adicionar os efeitos de uma zona danificada ao redor do poço quando os túneis do canhoneio são menores que o raio de dano, Karakas e Tariq (1991) propõem que o fator de película total seja:

$$S_t = \left(\frac{k_e}{k_d} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_d}{r_w} \right) + \left(\frac{k_e}{k_d} \right) S_p \quad (20)$$

Quando o comprimento dos túneis ultrapassa o raio de dano, deve-se modificar o raio do poço e o comprimento dos jatos para:

$$L_{perf}' = L_{perf} - [1 - (k_d/k_e)] L_d \quad (21)$$

$$r_w' = r_w + [1 - (k_d/k_e)] L_d \quad (22)$$

Onde L_{perf}' e r_w' são o comprimento do túnel modificado e o raio do poço modificado, respectivamente, e L_d é o comprimento da zona de dano.

Os valores de L_{perf}' e r_w' devem ser usados das equações 9 a 20. Nesse caso, o valor calculado pela equação 20, referente ao fator de película total, leva em consideração os efeitos tanto do canhoneio quanto do dano na formação.

O canhoneio produz uma queda de pressão adicional, que pode ser representada por um fator de película positivo. No entanto, pode ocorrer uma exceção quando os túneis são tão numerosos, tão profundos e tão largos que a área transversal ao fluxo é efetivamente aumentada. Nesse caso, a queda de pressão adicional é negativa e o fator de película negativo.

Sun *et al* (2011) investigaram a validade do modelo semi-analítico de Karakas e Tariq (1991) que é comumente utilizado na indústria comparando-o com um software de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), *ANSYS FLUENT* (*FLUENT* 6.3), que simula o fluxo da produção de um poço vertical com revestimento e canhoneado em uma formação com geometria tridimensional, calculando a vazão e o fator de película correspondente. Os autores focam em perfurações de 6 SPF e 60° de ângulo de fase e consideram três efeitos: dano causado pelas operações de perfuração e completação, dano devido ao canhoneio e anisotropia da formação. Os

resultados obtidos utilizando o software CFD mostram uma boa comparação com o modelo semi-analítico.

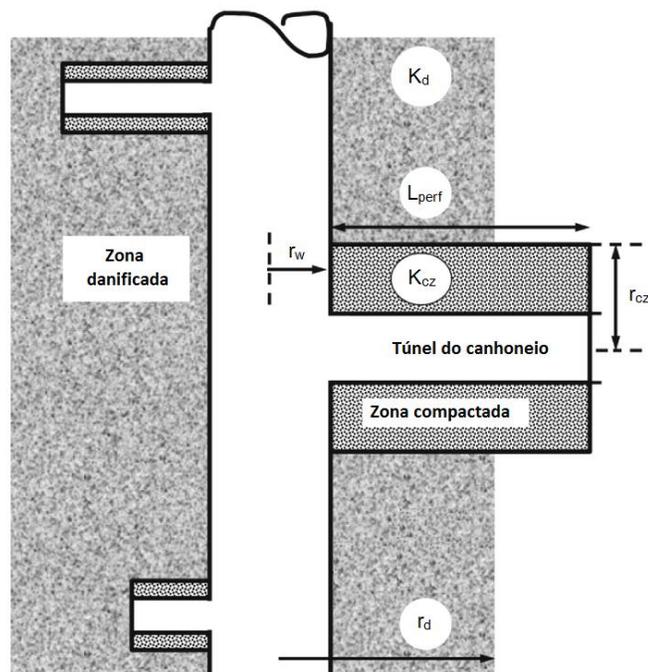
3.3.3 Fator de película da zona compactada (S_{cz})

No processo de canhoneio, a rocha ao redor do túnel criado é compactada e, com isso, sua permeabilidade é reduzida, causando um aumento na queda de pressão e diminuindo a produtividade do poço.

Esse acréscimo na queda de pressão é representado pelo fator de película da zona compactada (*crushed-zone skin factor*), representado pelo símbolo S_{cz} .

Na figura 6 tem-se a representação da rocha danificada ao redor do túnel criado pelo canhoneio, na qual a permeabilidade é menor que a da região danificada.

Figura 6 – Representação da região danificada ao redor do túnel do canhoneio



Fonte: Adaptado de Yildiz (2006).

O principal efeito de uma zona compactada é induzir uma resistência adicional ao fluxo vertical em direção aos túneis.

O principal efeito de uma zona comprimida (compactada) é formar uma resistência adicional ao fluxo vertical de fluido para as perfurações, quando se considera o fluxo tridimensional. Para o fluxo bidimensional, os efeitos de uma zona comprimida podem ser negligenciados (KARAKAS; TARIQ, 1991). Karakas e Tariq (1991) apresentam a seguinte expressão para o fator de película da zona compactada, S_{cz} :

$$S_{cz} = \frac{y}{L_{\text{perf}}} \left(\frac{k_e}{k_{cz}} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_{cz}}{r_{\text{perf}}} \right) \quad (23)$$

Onde y é o espaço entre as perfurações do canhoneio, r_{cz} é o raio da região compactada e k_{cz} é a permeabilidade da região compactada.

Para o modelo de Karakas e Tariq (1991), deve-se somar o fator de película da zona compactada ao fator de película de canhoneio, antes de calcular o fator de película total.

$$S_p' = S_p + S_{cz} \quad (24)$$

Onde S_p' é o fator de película de canhoneio modificado e deve substituir na equação (20) o fator de película de canhoneio, S_p , resultando em um fator de película total que também tem os efeitos da região compactada ao redor das perfurações.

3.3.4 Fator de película de penetração parcial (S_{pp})

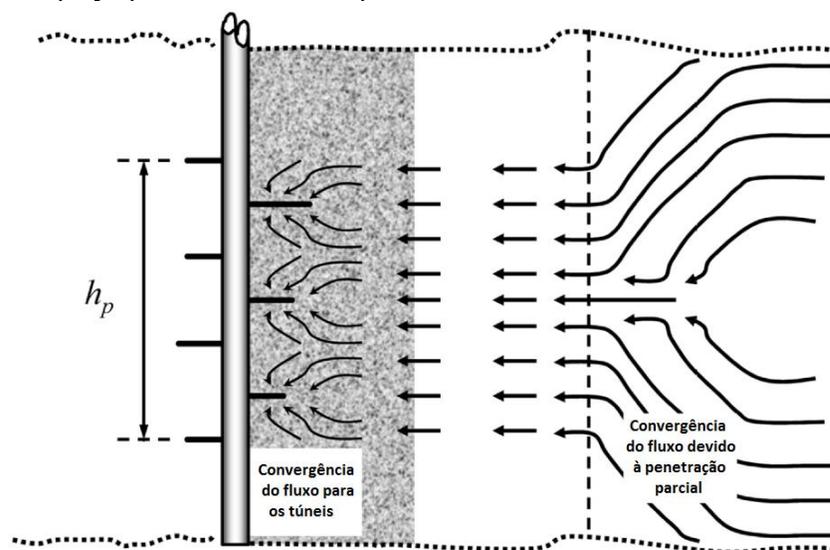
Em poços com penetração parcial, somente um segmento do poço é aberto para o fluxo de fluido. Eles também são chamados de poços de entrada restrita ou entrada limitada.

Quando o fluido se aproxima do poço, o fluxo é convergido para o segmento aberto e isso cria um fluxo bidimensional nessa região. Por conta disso, o fluido escoar a uma velocidade maior, o que aumenta a resistência à entrada de

fluido na região próxima ao poço e diminui a produtividade. Esse efeito é representado pelo fator de película de penetração parcial, S_{pp} .

Conforme se pode observar na figura 7, nesse momento, o fluido ainda não sente os efeitos das perfurações do canhoneio. Na imagem, a espessura do segmento aberto para a entrada de fluido é representada por h_p . Quanto menor for h_p em relação à espessura do reservatório, maior será a convergência de fluido e o fator de película de penetração parcial.

Figura 7 – Representação da convergência do fluxo de fluido para um poço parcialmente completado



Fonte: Adaptado de Yildiz (2006).

Os fatores que influenciam no fator de película de penetração parcial são a anisotropia da formação, a espessura e localização do intervalo aberto, o tamanho do poço, entre outros fatores.

Lee (1999) observou em seu estudo que para poços com entrada restrita, quanto mais centralizado o intervalo aberto do poço estiver do centro da camada do reservatório, menor será o fator de película.

Odeh (1980) propôs uma equação para o fator de película de penetração parcial, equação (25), como uma função da espessura do reservatório, h_t , do local do intervalo aberto, z_m , e do raio do poço. Segundo Odeh (1980), o fator de película de penetração parcial não depende do raio de drenagem do reservatório e é mais sensível à espessura do reservatório e à espessura relativa do intervalo aberto.

$$S_{pp} = 1,35 \left(\left(\frac{h_t}{h_p} - 1 \right)^{0,825} \left\{ \ln \left(h_t \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} + 7 \right) - \left[0,49 + 0,1 \cdot \ln \left(h_t \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} \right) \right] \cdot \ln(r_{wc}) - 1,95 \right\} \right) \quad (25)$$

Onde r_{wc} é o raio do poço corrigido e pode ser calculado pela equação (26).

$$r_{wc} = r_w e^{0,2126(z_m/h_t + 2,753)} \quad (26)$$

A variável z_m é a distância entre o topo do reservatório e o meio do intervalo aberto.

Vrbik (1991) avalia o fator de película de penetração parcial assumindo que a zona de produção consiste em uma camada homogênea, com porosidade e permeabilidade horizontal e vertical uniformes. Como resultado, obtém uma simples fórmula que alcança precisão suficiente para aplicações práticas, na qual o fator de película é uma função de três parâmetros: espessura relativa do intervalo aberto (H), desvio relativo do centro do intervalo aberto para o centro do reservatório (D) e uma relação entre raio do poço e permeabilidade do reservatório (R). Ele obtém, desta forma, a seguinte expressão para o fator de película:

$$S_{pp} = [(1 - H) / H] [1,2704 - \ln(R)] - \{f(0) - f(H) + f(1 - 2D) - [f(1 - 2D + H) / 2] - [f(1 - 2D - H) / 2]\} / H^2 \quad (27)$$

Onde

$$f(x) = x \ln(x) + (2 - x) \ln(2 - x) + R \ln[\sin^2(\pi x / 2) + 0,1053R^2] / \pi \quad (28)$$

E

$$R = r_w (k_v/k_H)^{1/2} / h_t \quad (29)$$

4 METODOLOGIA

Foi utilizado o modelo semi-analítico de Karakas e Tariq (1991) para analisar a variação do fator de película de um poço completado e canhoneado. Para isso, foram considerados 4 efeitos: o dano na formação devido à perfuração do poço, as características do canhoneio, a zona comprimida ao redor dos jatos do canhoneio e a anisotropia da formação.

Para maior simplificação do modelo, a análise a seguir apresenta as seguintes condições:

- Formação cilíndrica;
- Poço vertical;
- A queda de pressão dentro do jato do canhoneio é bastante pequena, então não é considerada;
- O poço é completamente canhoneado na região de interesse, logo não possui penetração parcial.

Para análise do modelo, foram utilizados alguns parâmetros de poço que são mais utilizados na indústria do petróleo e características de reservatórios comumente encontradas, como mostra na tabela a seguir:

Tabela 4 – Parâmetros do poço e da formação utilizados nos cálculos

Parâmetro	Valor
Raio do poço (ft)	0,328 (7 7/8)
Altura da zona canhoneada (ft)	1
Altura do reservatório (ft)	1
Razão de permeabilidade na zona danificada: k_e/k_d	10
Raio da zona danificada (ft)	0,5; 1; 2; 3
Anisotropia da formação: k_h/k_v	10
Razão de permeabilidade na zona compactada: k_e/k_{cz}	11
Raio da zona compactada (ft)	0,06

Fonte: Elaborado pelo autor.

A razão de permeabilidade entre a formação e a região danificada ao redor do poço devido às atividades de perfuração e completção tem uma magnitude de 10, o que significa que a permeabilidade da formação é dez vezes

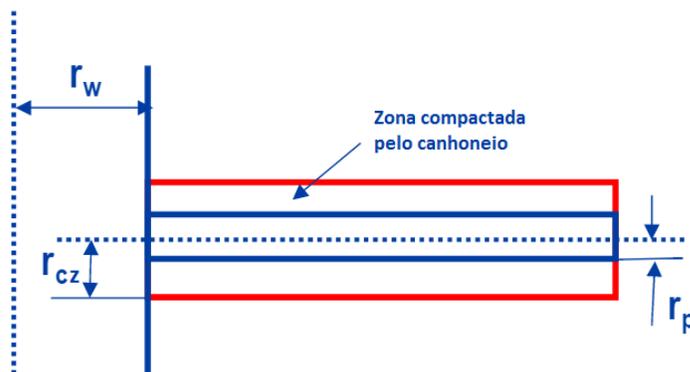
maior que a da região danificada. A permeabilidade horizontal do reservatório também foi considerada 10 vezes maior do que a vertical e a razão entre a permeabilidade da formação e da zona compactada ao redor dos jatos de canhoneio tem o valor de 11, ficando um pouco maior que a da zona danificada.

Para a maioria dos casos analisados, utilizaram-se quatro tamanhos de raio da zona danificada ao redor do poço: 1/2, 1, 2 e 3 pés (ft). Quanto maior for o raio da zona danificada, maior será o fator de película, pois a barreira à entrada de fluido no poço se torna maior.

Em relação ao canhoneio do poço, variou-se os seguintes parâmetros para analisar seus efeitos no fator de película total: o raio de abertura do jato, r_{perf} , o comprimento do jato, L_{perf} , e o ângulo de fase entre os jatos, θ .

O raio da zona compactada foi considerado cilíndrico ao redor do túnel do canhoneio, conforme mostra a figura 8, com raio constante r_{cz} .

Figura 8 – Zona compactada ao redor do túnel do canhoneio.



Fonte: Adaptado de Sun *et al.* (2011).

O comprimento do jato, L_{perf} , representa o comprimento que foi aberto na formação para passagem de fluido. Dependendo das características do poço, o comprimento do jato pode ultrapassar a zona com dano ao redor do poço. Karakas e Tariq (1991) consideram correlações diferentes para os dois casos, como descrito da equação (20) a (22), e ambos os casos foram analisados.

O ângulo de fase, representado por θ , é o ângulo formado entre os jatos. Quanto menor for o ângulo entre os jatos, o fluxo de fluido se dá de maneira mais radial no reservatório resultando em padrões de fluxo mais eficientes. Foi analisada também a interferência do ângulo de fase no fator de película total.

Nesse estudo, considerou-se que o reservatório é completamente canhoneado e não existe fator de película de penetração parcial, pois como o fluido não converge para uma determinada região aberta do poço, não há uma resistência maior ao fluxo de fluido.

Por fim, foram analisados os efeitos da variação da anisotropia da formação e da permeabilidade da zona compactada ao redor do túnel do canhoneio.

As simulações foram feitas em *Excel* utilizando a ferramenta de programação *Visual Basic* para gerar os diversos resultados.

O raio do jato, a penetração do jato e a densidade de tiros tiveram seus valores gerados aleatoriamente, com números de até quatro casas decimais, dentro do intervalo selecionado nas análises a seguir para gerar diferentes exemplos.

Para cada gráfico gerado, foram analisados 1000 exemplos utilizando esses parâmetros aleatórios combinados para o cálculo do fator de película total.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme discutido na seção anterior, foram realizadas simulações para poços verticais e com escoamento tridimensional para se calcular o fator de película total com diferentes fatores: raio de dano, raio dos jatos do canhoneio, profundidade dos jatos, ângulo de fase, anisotropia da formação, etc. A seguir, serão mostrados em detalhes os resultados obtidos utilizando o modelo semi-analítico para os cálculos do fator de película.

5.1 Análise do volume das perfurações do canhoneio

Os parâmetros de poço e reservatório mostrados anteriormente na tabela 4 foram aplicados no modelo semi-analítico de Karakas e Tariq (1991) e mais alguns parâmetros foram selecionados. O ângulo de fase para os 4 casos analisados a seguir foi de 60° , variou-se a penetração do jato de 1 a 5 ft e o raio do jato de 0,01 a 0,02 ft e também a densidade de tiros de 5 a 6 SPF.

O raio do jato, a penetração do jato e a densidade de tiros tiveram seus valores gerados aleatoriamente, com números de até quatro casas decimais, dentro do intervalo selecionado para gerar diferentes exemplos.

A tabela 5 resume os parâmetros que foram utilizados para o cálculo.

Tabela 5 – Dados utilizados para análise do volume das perfurações do canhoneio

Parâmetro	Valor
Raio do poço (ft)	0,328
Altura da zona canhoneada (ft)	1
Razão de permeabilidade na zona danificada: k_e/k_d	10
Raio da zona danificada (ft)	0,5; 1; 2; 3
Anisotropia da formação: k_h/k_v	10
Razão de permeabilidade na zona compactada: k_e/k_{zc}	11
Raio da zona compactada (ft)	0,06
Ângulo de fase	60°
Penetração do jato (ft)	1 a 5
Raio do jato (ft)	0,01 a 0,02
Densidade de tiros (SPF)	5 a 6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Calculou-se o volume das perfurações do canhoneio conforme é mostrado na equação 29 a seguir.

$$V_p = h_p \cdot n_{\text{tiros}} \cdot l_{\text{perf}} \cdot r_p^2 \cdot \pi \quad (30)$$

Foram gerados então quatro gráficos para mostrar a relação do volume do canhoneio com o fator de película total do poço. Cada gráfico representa um poço com raio da região danificada diferente.

Gráfico 2 – Análise do fator de película com a variação do volume do canhoneio quando o raio de dano é igual a 0,5 ft.

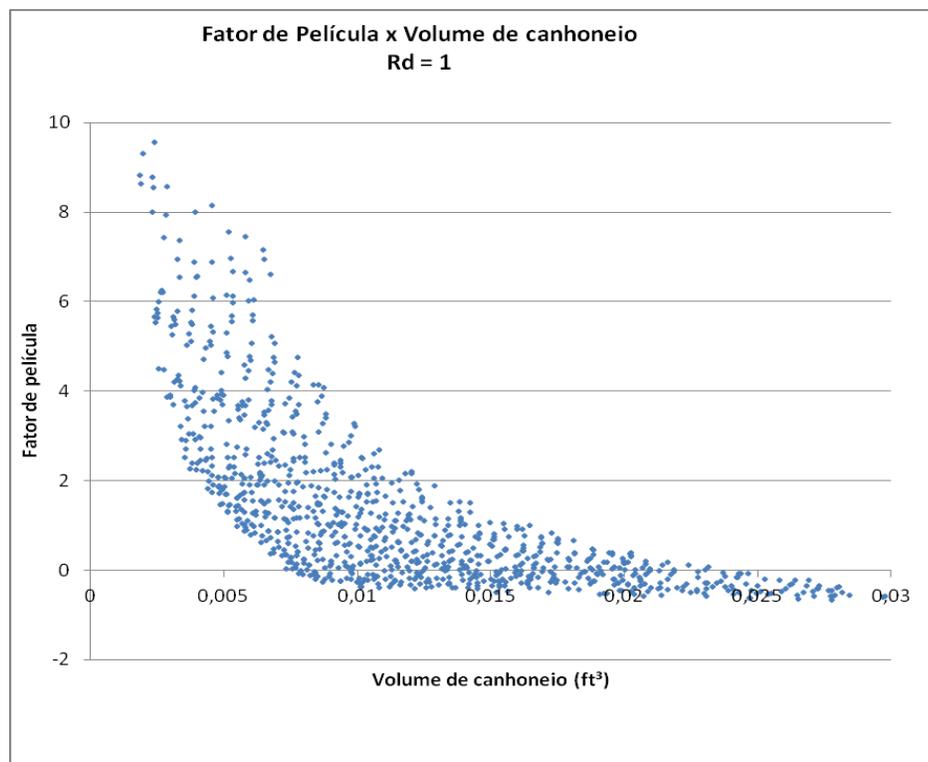


Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 2, o raio de dano da formação é o menor avaliado, sendo 0,5 ft. Pode-se observar que para os menores volumes de canhoneio obtidos, o fator de película chega a um máximo de 4. Como o raio da região danificada é bem pequeno, é esperado que a contribuição do fator de película mecânico seja pequena e, com isso, o fator de película total seja menor.

Para volumes maiores que 0,015 ft³, os fatores de película obtidos são todos negativos e a partir desse volume garante-se, então, que o poço será estimulado.

Gráfico 3 – Análise do fator de película com a variação do volume do canhoneio quando o raio de dano é igual a 1 ft.

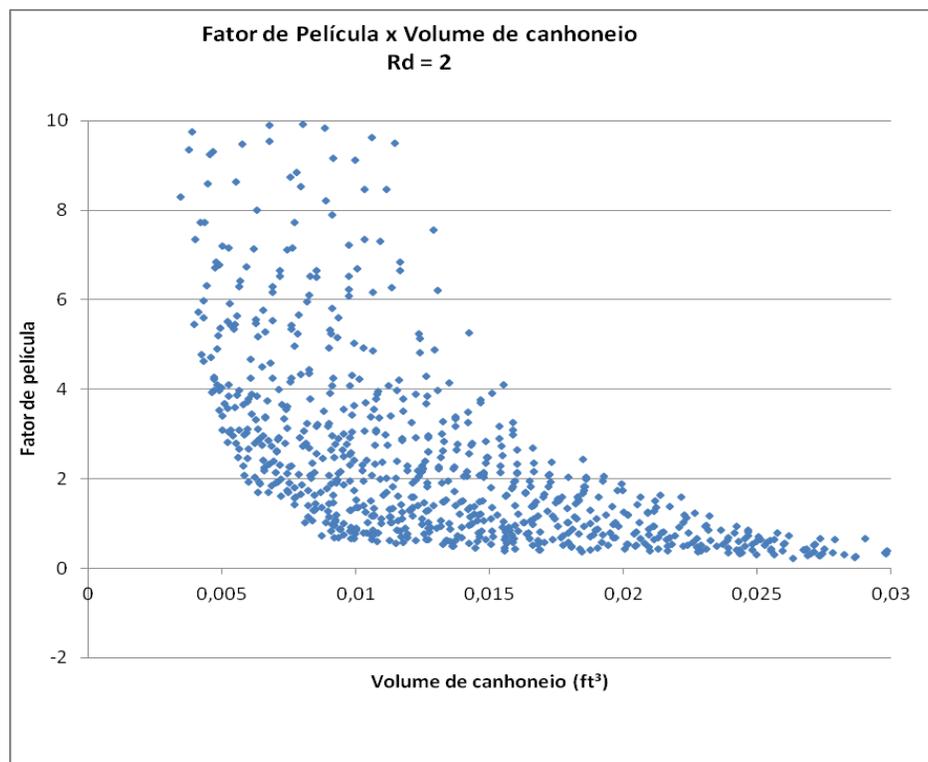


Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 3, foi analisado um poço com raio de dano igual a 1 ft. Com o aumento do raio de dano, espera-se que a resistência à entrada de fluido aumente. Nos resultados obtidos, observa-se que para volumes menores, o fator de película total pode chegar até quase 10, o que já seria um número bastante representativo para a produtividade do poço, conforme foi mostrado no gráfico 1.

Para volumes maiores, com as mesmas dimensões do gráfico 2, os fatores de película obtido são maiores. O custo da realização do canhoneio pode aumentar conforme o volume dos túneis criados aumenta, portanto um bom método para controlar esse custo é realizar a perfilagem do poço para identificar as zonas de melhor porosidade, saturação de óleo e pressão e concentrar o canhoneio nessas regiões.

Gráfico 4 – Análise do fator de película com a variação do volume do canhoneio quando o raio de dano é igual a 2 ft.

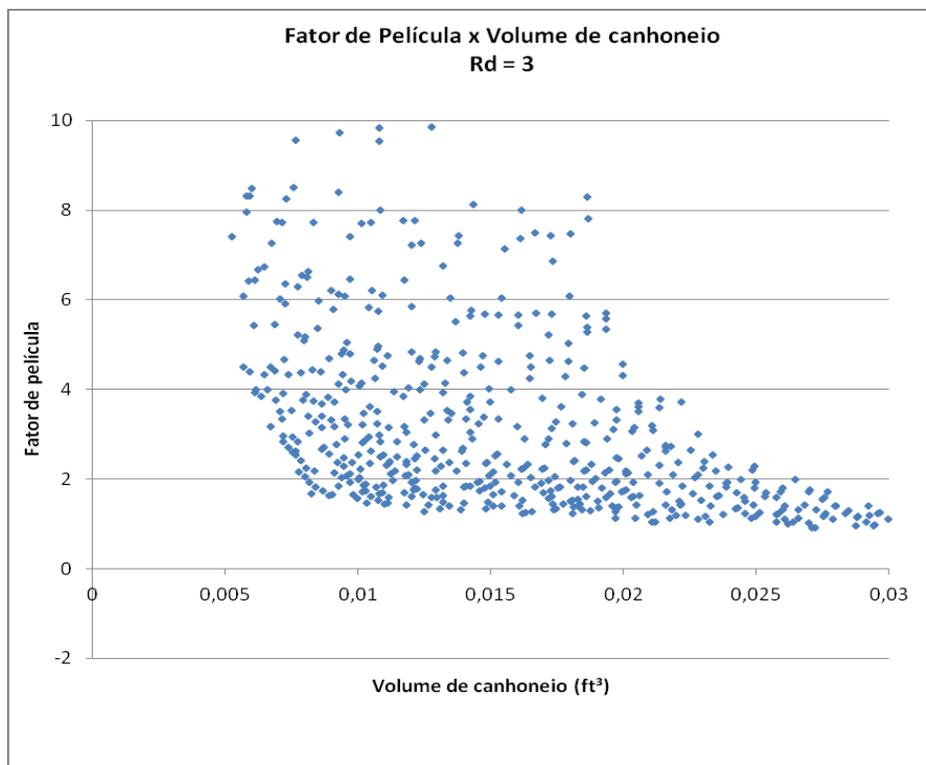


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos gráficos 4 e 5, foram analisados poços com raio de dano igual a 2 e 3 ft. Para esses raios maiores, observa-se que não é mais possível estimular o poço apenas utilizando o canhoneio, sendo necessário a aplicação de métodos de estimulação de poços como fraturamento hidráulico ou acidificação, a depender do poço.

Observa-se também que a dispersão dos dados aumenta bastante e que apenas com volumes a partir de 0,02 ft³ pode-se assegurar um fator de película pequeno.

Gráfico 5 – Análise do fator de película com a variação do volume do canhoneio quando o raio de dano é igual a 3 ft.



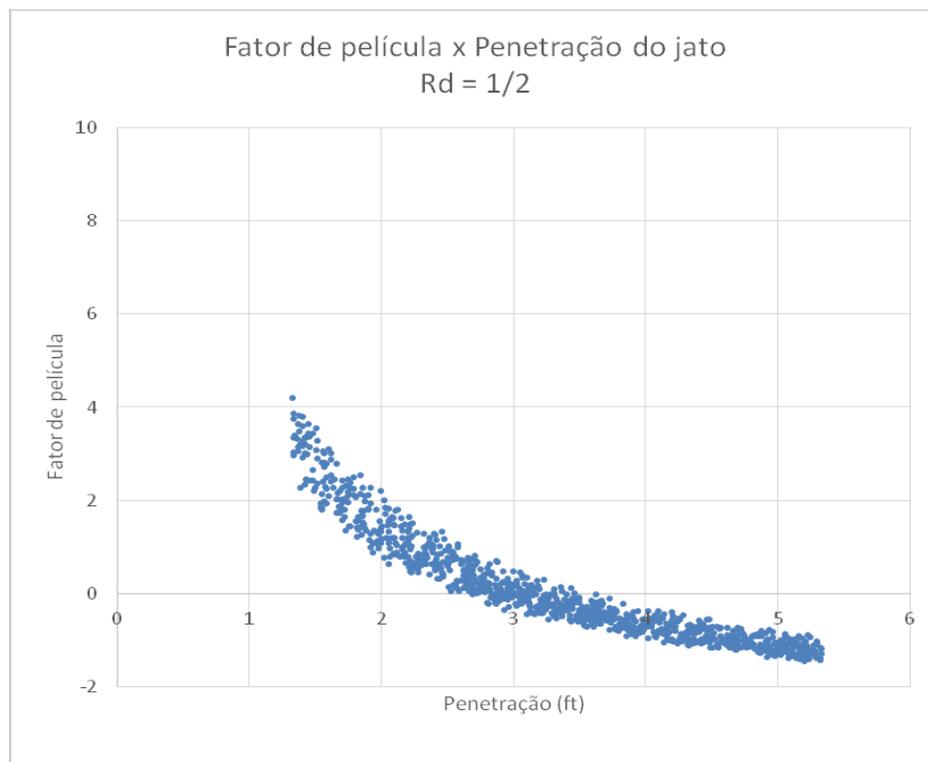
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Análise da profundidade dos jatos do canhoneio

Um parâmetro de projeto importante do canhoneio de um poço é o comprimento do jato, ou seja, até onde o jato consegue alcançar na rocha. Para poços com região danificada, o canhoneio do poço tem o papel de perfurar a região além do raio do dano, para permitir que o fluido escoe com uma resistência menor.

Os gráficos a seguir foram gerados utilizando os mesmos dados mostrados na tabela 5 para simulação. A diferença é que agora se analisou a influência do comprimento do jato para o fator de película.

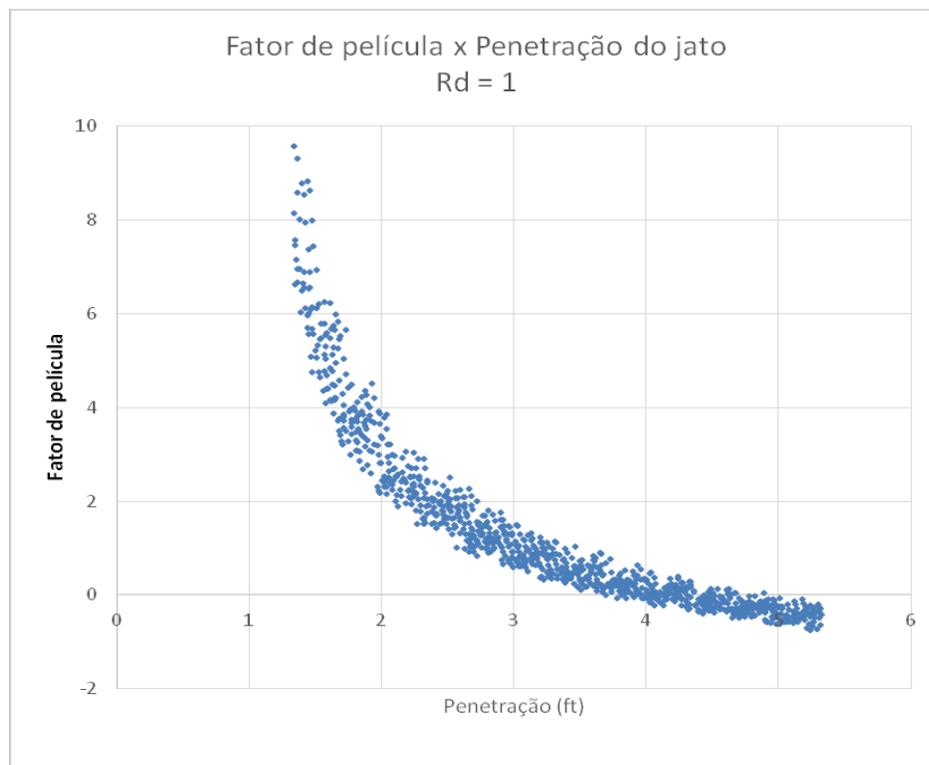
Gráfico 6 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 0,5 ft.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 6, a penetração do jato, representada pelo eixo horizontal, é o comprimento que vai desde o centro do poço até o limite perfurado pelo jato. Para um raio de dano igual a 0,5 ft, pode-se atingir valores máximos de 4 para o fator de película, conforme parâmetros utilizados da tabela 5. Consegue-se estimular o poço com fatores de película negativos até cerca de -1,5, mas para isso é necessário que a penetração do jato seja maior que 3 ft.

Gráfico 7 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 1 ft.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o gráfico 7, para um raio de dano igual a 1 ft, é necessário que a penetração do jato seja maior que 4 ft para que o poço seja estimulado apenas pela operação de canhoneio.

Como variou-se o comprimento do túnel de 1 a 5 ft, pode-se observar também que para penetrações de jato entre 1 e 2, a variação do fator de película é bem grande. A resistência à entrada de fluido aumenta bastante com pequenas penetrações de jato, pois o comprimento do jato ainda é bem próximo do raio de dano.

Gráfico 8 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 2 ft.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os gráficos 8 e 9, observa-se que não é possível estimular o poço usando túneis de canhoneio com comprimento máximo de 5 ft. Para obter fatores de película menores que zero, seria necessário que a penetração fosse maior que 5 ft, o que já começa a se tornar em condições difíceis de serem reproduzidas pelos equipamentos disponíveis na indústria. A solução para esse caso seria recorrer a métodos de estimulação de poços.

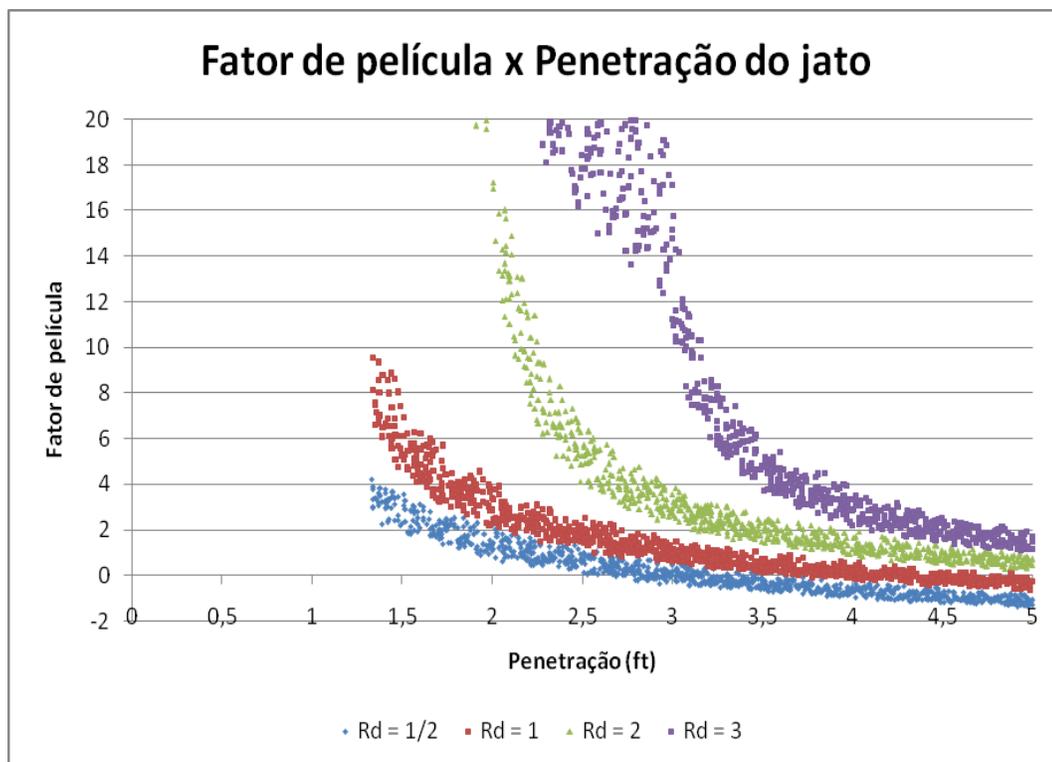
No gráfico 9 nota-se uma diferença na relação dos dados quando a penetração do jato atinge um comprimento de 3 ft, o mesmo raio da região danificada. Isso acontece pois a correlação proposta por Karakas e Tariq (1991) muda quando a penetração atinge o raio de dano. Conforme a penetração aumenta, a variação do fator de película torna-se cada vez menor, mostrando que um aumento significativo no comprimento da perfuração não resulta em grandes quedas do fator de película e pode ser que a relação custo-benefício não seja boa.

Gráfico 9 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 3 ft.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio para diferentes raios de dano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico 10 mostra a diferença do fator de película quando se tem os quatro diferentes raios de dano no poço. Quanto maior o raio da região danificada, maior será o comprimento da penetração necessário para se estimular o poço. Pode-se observar também os altos valores do fator de película quando os raios de dano são maiores que 2 ft e a penetração menor que 3 ft.

5.3 Análise do raio das perfurações do canhoneio

Os túneis criados pelo canhoneio foram classificados em dois tipos: túneis com comprimento menor, porém com raios de abertura grandes, e túneis com comprimento maior e raios de abertura pequenos.

Para os túneis com raio de abertura grande, foi utilizado um raio de 0,04 ft e variação de comprimento de 0,3 a 1 ft. No caso dos túneis de raio de abertura pequeno, utilizou-se os raios 0,01 ft e 0,02 ft e variação de comprimento de 1 a 5 ft.

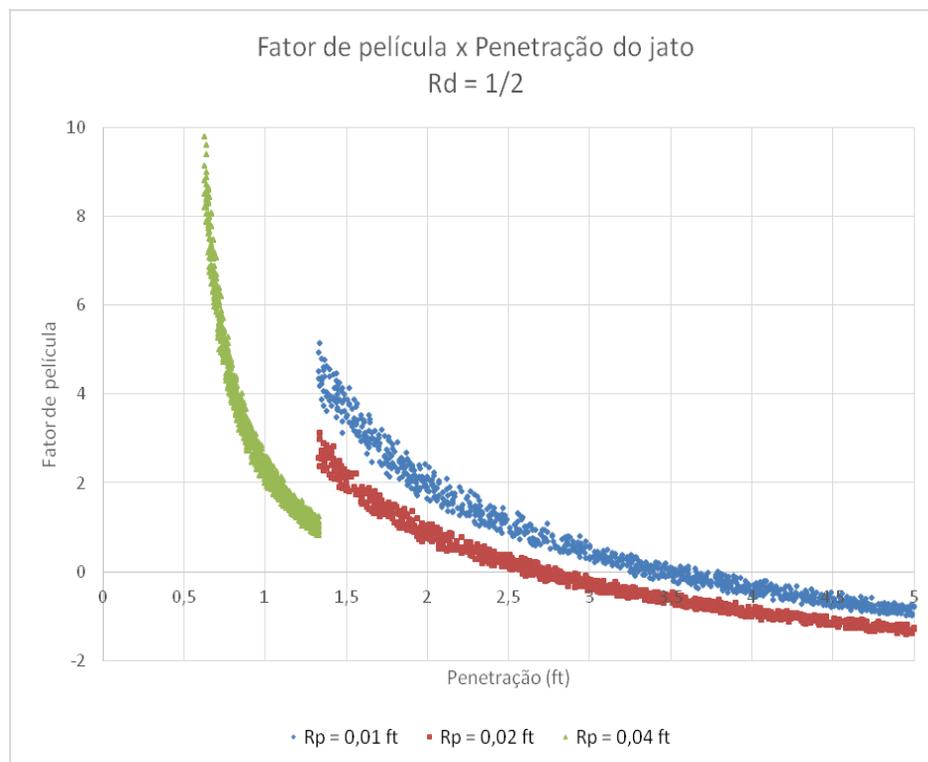
A tabela 6 mostra os parâmetros que foram utilizados para cálculo do fator de película total. Foram realizadas 1000 simulações para gerar cada gráfico e a variação dos dados foi feita de forma aleatória.

Tabela 6 – Dados utilizados para análise do raio de abertura dos jatos

Parâmetro	Valor
Raio do poço (ft)	0,328
Altura da zona canhoneada (ft)	1
Razão de permeabilidade na zona danificada: k_e/k_d	10
Raio da zona danificada (ft)	0,5; 1; 2; 3
Anisotropia da formação: k_h/k_v	10
Razão de permeabilidade na zona compactada: k_e/k_{zc}	11
Raio da zona compactada (ft)	0,06
Fase	60°
Penetração do jato (ft)	0,3-1; 1-5
Raio do jato (ft)	0,01; 0,02; 0,04
Densidade de tiros (SPF)	5 a 6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 11 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 0,5 ft

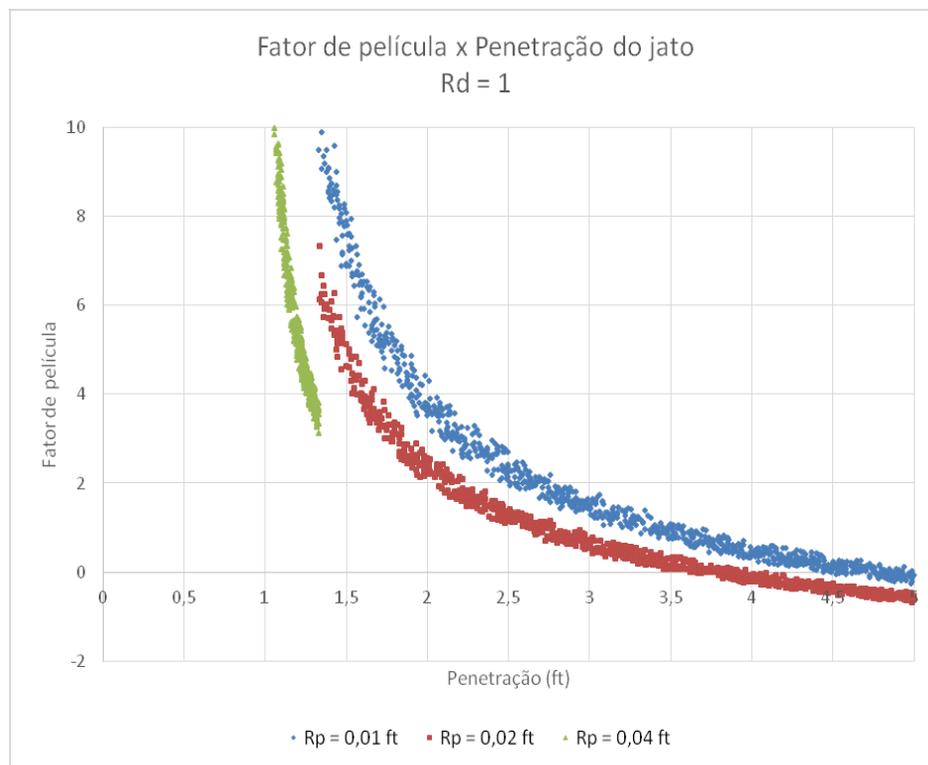


Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 11, pode-se observar que a estimulação do poço só é possível para os casos em que os túneis possuem raios de abertura menores e comprimentos maiores, quando o raio de dano é 0,5 ft.

De acordo com o gráfico 11, o melhor cenário é obtido quando o raio de abertura do jato é 0,02 ft, pois é necessário que a penetração do jato seja menor, cerca de 2,75 ft, para que se consiga zerar o fator de película.

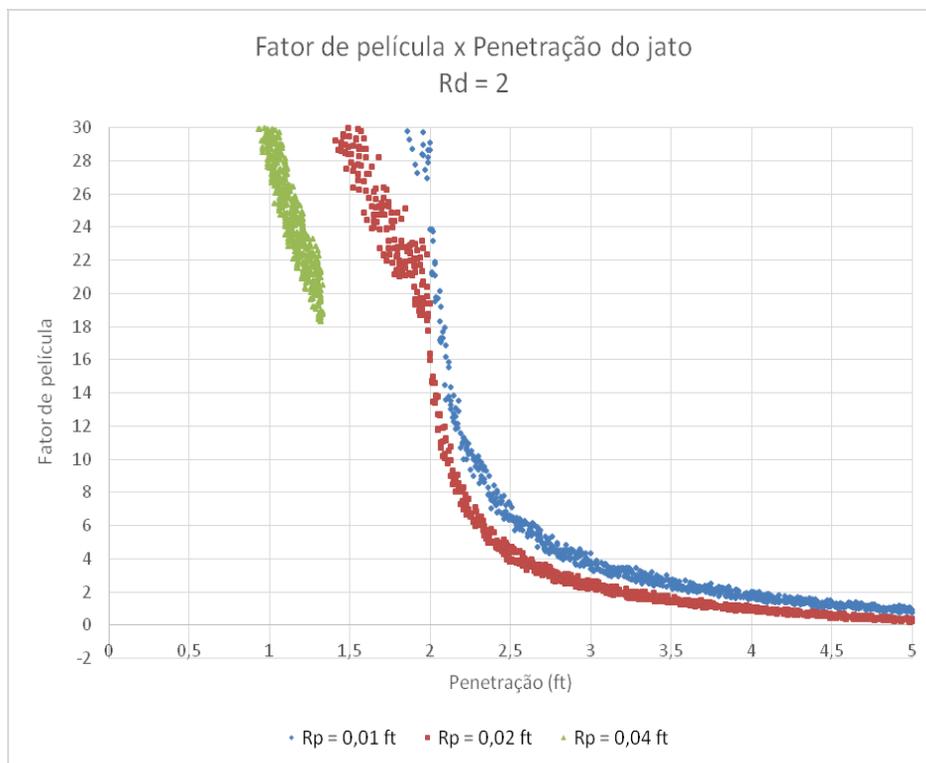
Gráfico 12 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 1 ft



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 12, o qual mostra um poço com raio da região danificada de 1 ft, a estimulação do poço só é possível com penetrações de jato a partir de cerca de 3,75 ft. Quando o raio de abertura do jato é de 0,01, quase não é possível se obter um fator de película negativo e para os túneis com raio de abertura de 0,04 ft, o fator de película fica cada vez mais distante de zero, pois eles não conseguem ultrapassar a região danificada.

Gráfico 13 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 2 ft

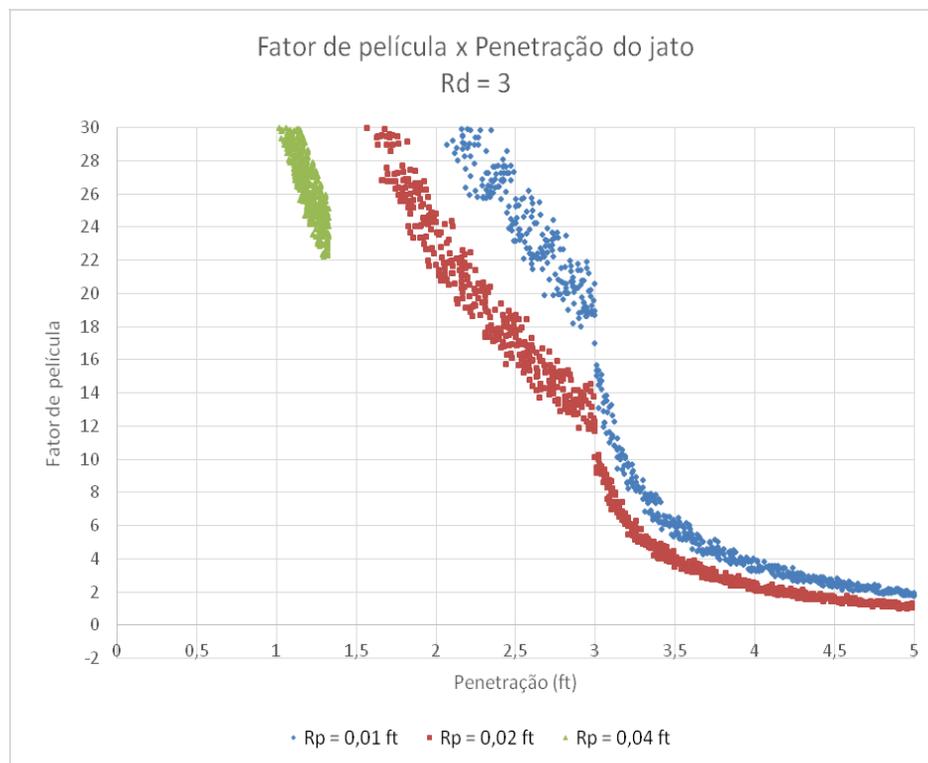


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos gráficos 13 e 14, pode-se observar que não é possível a estimulação do poço apenas com o canhoneio da zona de interesse. Quanto menor o comprimento do jato em relação ao raio de dano, os fatores de película ficam bem elevados, o que indica que é necessário que o comprimento do jato seja maior que o raio de dano para que se alcance resultados satisfatórios para a produtividade do poço.

Em ambos os gráficos 13 e 14 observa-se também a variação dos resultados quando o comprimento do túnel do canhoneio é igual ao raio de dano. Isso ocorre devido à mudança da correlação do fator de película proposto por Karakas e Tariq (1991).

Gráfico 14 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 3 ft



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Análise do ângulo de fase

Outro parâmetro que também influencia na produtividade do poço é o ângulo de fase do canhoneio, que seria o ângulo entre os jatos.

Karakas e Tariq (1991) observam que para ângulos de fase de 90° e 120° a distribuição de pressão no reservatório é mais radial do que para ângulos de 0° e 180° , nos quais ela é mais elíptica. Isso indica uma maior eficiência nos padrões de fluxo quando os ângulos de fase são menores.

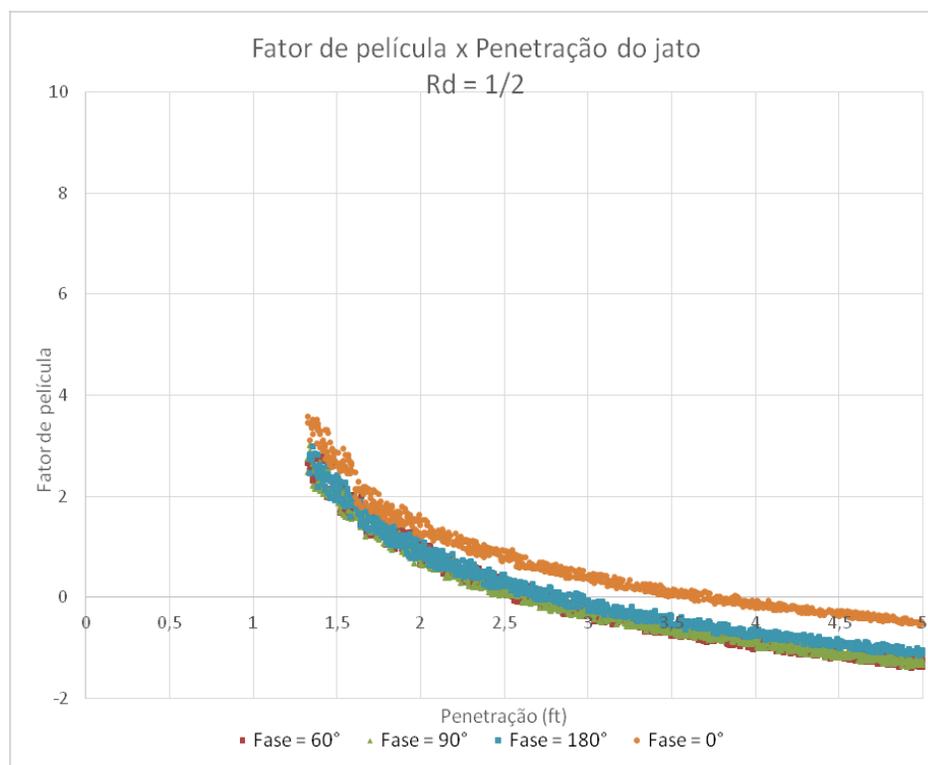
Foi analisada a influência de quatro ângulos no fator de película total: 60° , 90° , 180° e 0° . A tabela 7 resume os dados utilizados para simulação.

Tabela 7 – Dados utilizados para análise do ângulo de fase

Parâmetro	Valor
Raio do poço (ft)	0,328
Altura da zona canhoneada (ft)	1
Razão de permeabilidade na zona danificada: k_e/k_d	10
Raio da zona danificada (ft)	0,5; 1; 2; 3
Anisotropia da formação: k_h/k_v	10
Razão de permeabilidade na zona compactada: k_e/k_{zc}	11
Raio da zona compactada (ft)	0,06
Fase	60°; 90°; 180°; 0°
Penetração do jato (ft)	1 a 5
Raio do jato (ft)	0,02
Densidade de tiros (SPF)	5 a 6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 15 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 0,5 ft

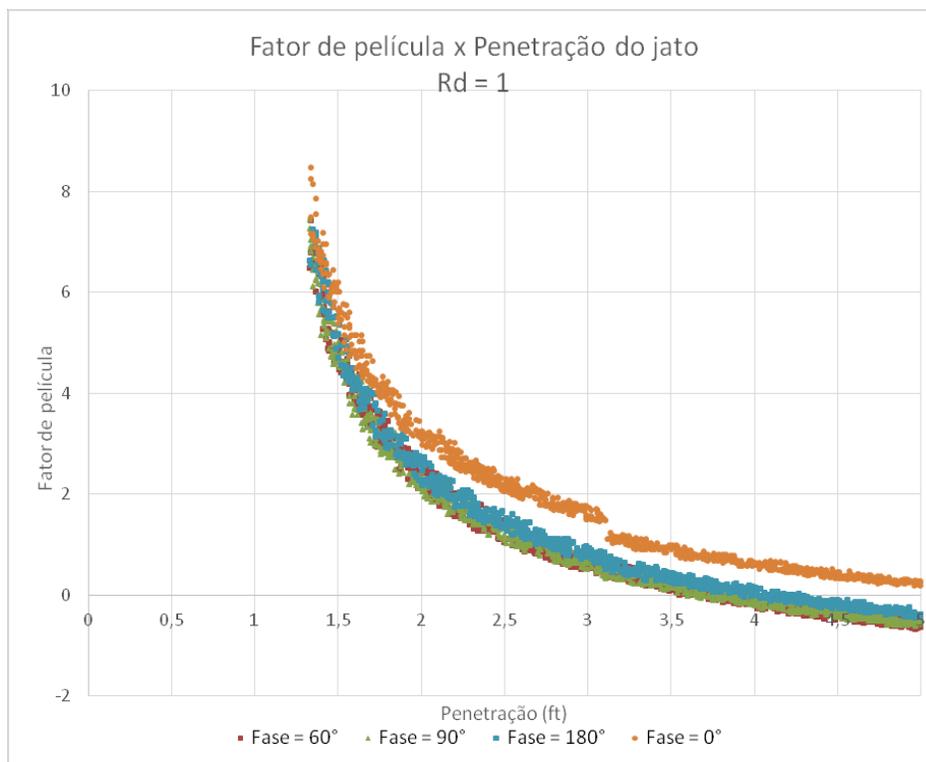


Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico 15 mostra os resultados para fatores de película obtidos quando o raio de dano é 0,5 ft. De acordo com o gráfico, para ângulos de fase 60°, 90° e 180°, os fatores de película são semelhantes, indicando que o padrão de fluxo não muda muito de um para o outro.

Quando o ângulo é 0°, todas as perfurações são direcionadas no mesmo sentido e a distribuição de pressão no reservatório se dá de forma elíptica com ponto central aproximadamente na metade do comprimento do jato. Com isso, o poço se torna uma barreira a passagem de fluido e distorce o fluxo, aumentando o fator de película, conforme pode-se observar no gráfico 15. Para que o poço seja estimulado nesse caso, é necessário que o comprimento do jato chegue a cerca de 4 ft. Já para os outros ângulos, é necessário apenas que o comprimento do jato varie apenas de 2,5 a 3 ft.

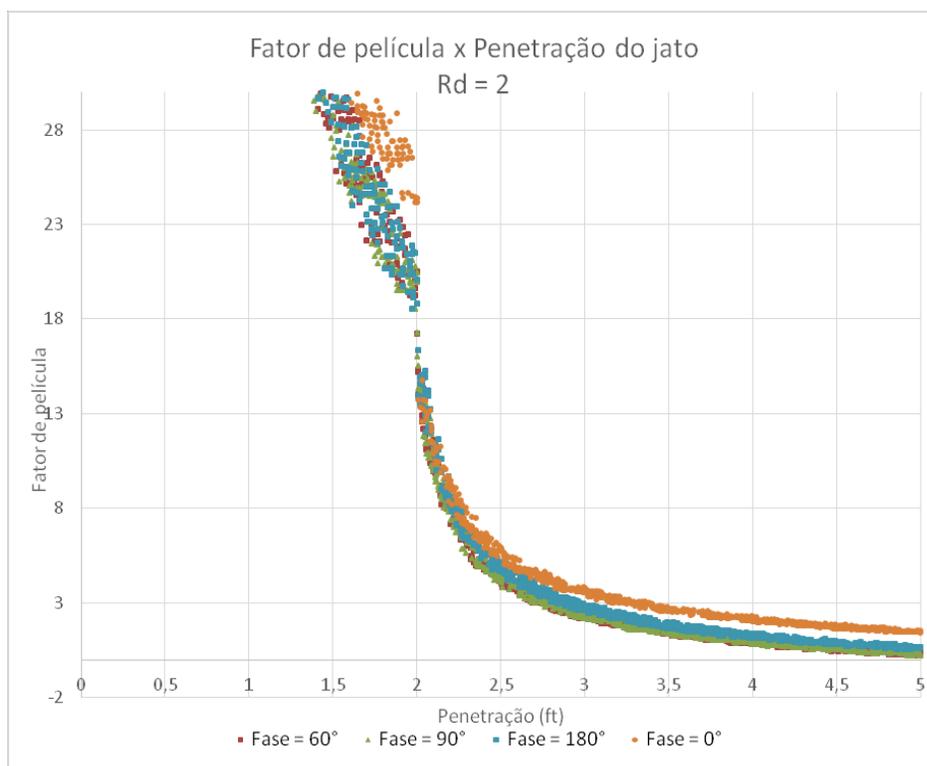
Gráfico 16 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 1 ft



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 16, o qual mostra um poço com raio de dano igual a 1 ft, nota-se que não é possível estimular o poço apenas com o canhoneio quando o ângulo de fase entre as perfurações é 0° . Para os outros casos, o comprimento do jato deve ser aproximadamente 4 ft para que se consiga zerar o fator de película.

Gráfico 17 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 2 ft



Fonte: Elaborado pelo autor.

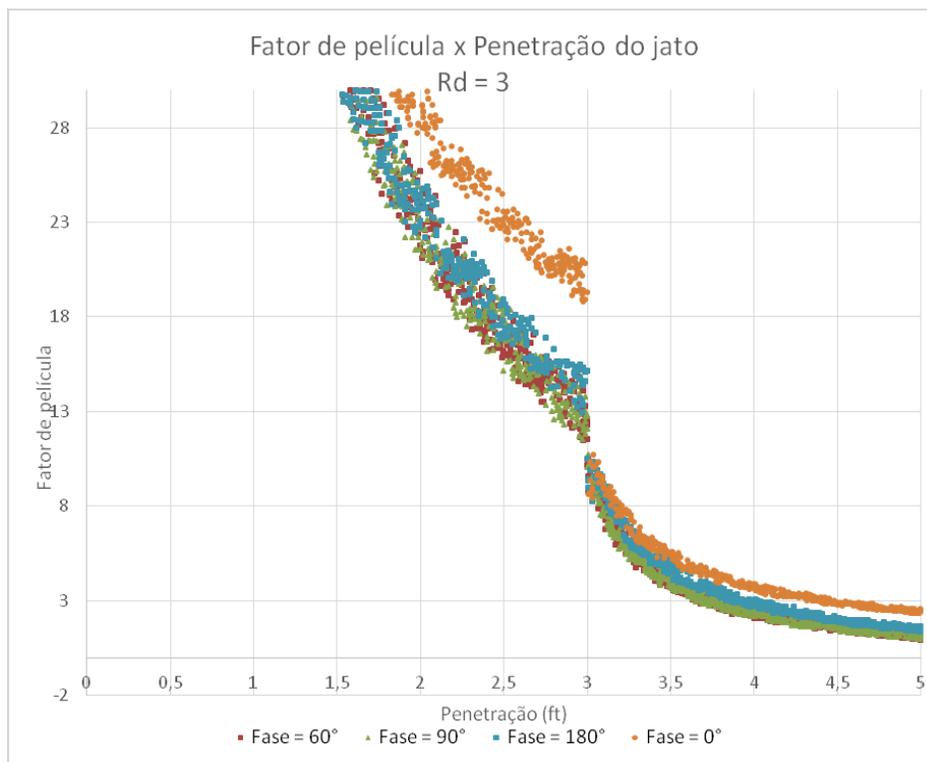
Nos gráficos 17 e 18, observa-se a incapacidade de estimular o poço apenas com o canhoneio com as condições utilizadas para raios de dano de 2 e 3 ft.

Pode-se observar também uma leve diferença nos resultados para o ângulo de 180° em relação aos ângulos 60° e 90° . Quando o ângulo é 180° , embora os jatos estejam direcionados em sentidos opostos, o padrão de fluxo de fluido para o poço ainda é elíptico e representa uma dificuldade a mais para a produtividade.

Em ambos os gráficos 17 e 18 observa-se também a variação dos resultados quando o comprimento do túnel do canhoneio é igual ao raio de dano. Isso ocorre devido à mudança da correlação do fator de película proposto por

Karakas e Tariq (1991).

Gráfico 18 – Análise do fator de película com a variação da profundidade do canhoneio quando o raio de dano é igual a 3 ft



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Análise da anisotropia

Outro fator que interfere no fator de película total é a anisotropia da formação. A anisotropia é a relação entre a permeabilidade horizontal da formação e a permeabilidade vertical. Para formações anisotrópicas, o fator de película vertical proposto por Karakas e Tariq (1991) aumenta significativamente e o fluxo do fluido em direção às perfurações se torna elíptico, diferentemente de uma formação isotrópica.

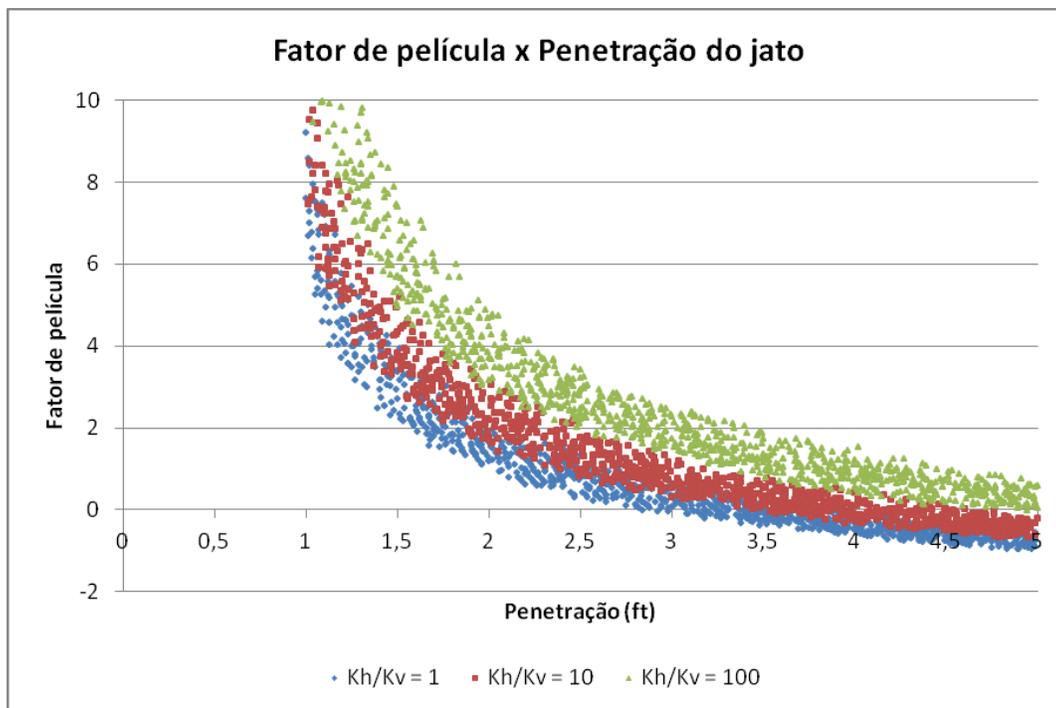
Foi analisado então os efeitos da anisotropia da formação para um poço com raio da zona danificada de 1 ft, conforme é mostrado no gráfico 19. A tabela 8 resume os dados que foram utilizados para simulação.

Tabela 8 – Dados utilizados para análise da anisotropia

Parâmetro	Valor
Raio do poço (ft)	0,328
Altura da zona canhoneada (ft)	1
Razão de permeabilidade na zona danificada: k_e/k_d	10
Raio da zona danificada (ft)	1
Anisotropia da formação: k_h/k_v	1; 10; 100
Razão de permeabilidade na zona compactada: k_e/k_{zc}	11
Raio da zona compactada (ft)	0,06
Fase	60°
Penetração do jato (ft)	1 a 5
Raio do jato (ft)	0,01 a 0,02
Densidade de tiros (SPF)	5 a 6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 19 – Análise do fator de película com a variação da anisotropia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se no gráfico 19 que quanto maior a anisotropia da formação, maior será o fator de película do poço para um mesmo comprimento de jato. Para anisotropia de 100, não é possível estimular o poço utilizando apenas o canhoneio com perfurações de até 5 ft. Nesse caso, o fluxo vertical praticamente não existe e o escoamento se torna bidimensional.

5.6 Análise da zona compactada ao redor do canhoneio

O fator de película da zona compactada ao redor das perfurações do canhoneio tem sua parcela de contribuição no fator de película total. Foi analisada então a influência da variação da permeabilidade dessa região e o resultado é apresentado no gráfico 20.

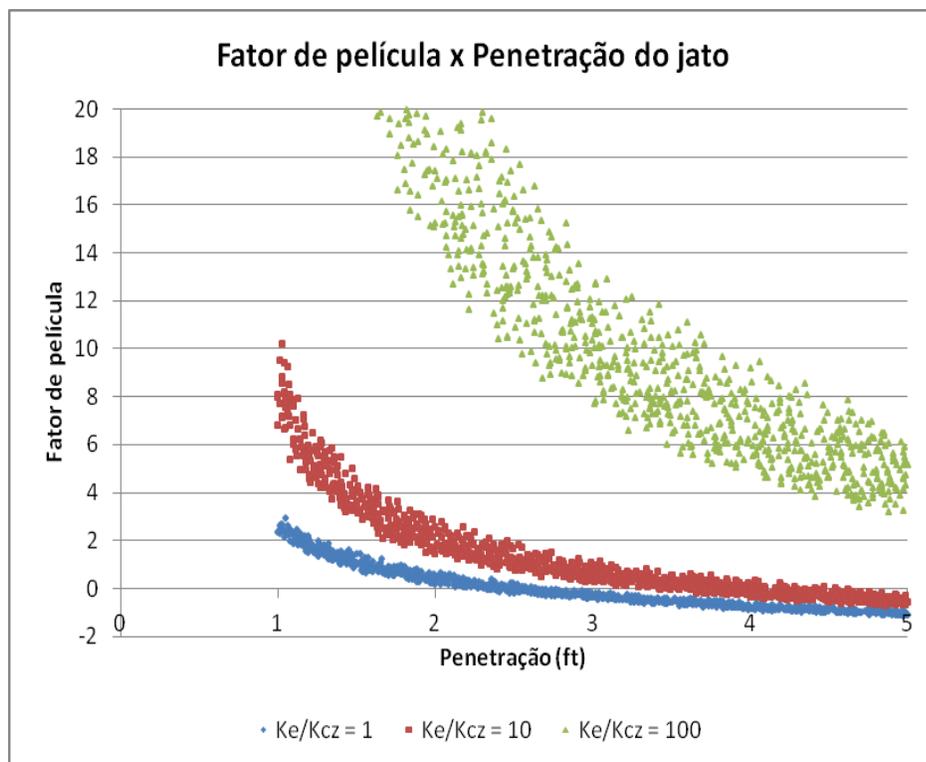
A tabela 9 mostra os dados que foram utilizados para as simulações.

Tabela 9 – Dados utilizados para análise da variação da permeabilidade da zona compactada

Parâmetro	Valor
Raio do poço (ft)	0,328
Altura da zona canhoneada (ft)	1
Razão de permeabilidade na zona danificada: k_e/k_d	10
Raio da zona danificada (ft)	1
Anisotropia da formação: k_h/k_v	10
Razão de permeabilidade na zona compactada: k_e/k_{zc}	1; 10; 100
Raio da zona compactada (ft)	0,06
Fase	60°
Penetração do jato (ft)	1 a 5
Raio do jato (ft)	0,01 a 0,02
Densidade de tiros (spf)	5 a 6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 20 – Análise do fator de película com a variação da permeabilidade da zona compactada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se no gráfico 20 uma grande diferença no fator de película total quando a permeabilidade da região ao redor do túnel do canhoneio é 100 vezes menor que a da formação. Isso mostra que, embora o raio dessa região seja bem pequeno em relação ao do poço, ele é suficiente para bloquear a passagem de fluido e fazer com que o canhoneio do poço seja ineficiente, prejudicando a produtividade do poço.

Para os casos em que a razão de permeabilidade é 1 e 10, pode-se verificar que é possível estimular um poço com essas características e conclui-se que é necessário se prestar uma devida atenção para essa região, pois os impactos na produtividade podem ser grandes.

6 CONCLUSÕES

A Engenharia de Completação é a parte da engenharia de petróleo que instala os equipamentos de poço para que se possam produzir os fluidos de maneira segura e eficiente, e permitir o monitoramento do poço para que a produção se mantenha produtiva com o passar dos anos. Esta é uma operação bastante crítica em termos de custos e depende de estudos de reservatório para que se tomem as melhores decisões.

As análises aqui realizadas utilizaram um modelo semi-analítico bastante aceito na indústria e conseguiu-se avaliar os efeitos de diferentes fatores no fator de película do poço, o qual tem influência sobre sua produtividade. Foi possível analisar tanto características de reservatório quanto do projeto de completção e concluir sobre quais parâmetros tem mais influência na produtividade.

O modelo implantado simplificou algumas condições para tornar os cálculos um pouco mais simples. Foram analisados poços verticais com reservatório tridimensional e anisotrópico. Fica-se então o desafio para outros estudos de estender a análise para poços inclinados e horizontais e verificar outros modelos disponíveis.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que o raio de dano tem grande influência no fator de película total obtido. Em alguns casos é possível se estimular o poço sem utilizar métodos de estimulação convencionais, como fraturamento hidráulico e acidificação, usando apenas bons parâmetros para o canhoneio do poço, mas para isso é necessário que o raio de dano seja pequeno. Para próximos estudos, fica a proposta de analisar maneiras de evitar que se tenha dano na formação aplicando melhores métodos de perfuração do poço e completção.

Assim sendo, o presente trabalho representa apenas uma pequena parte de toda análise que pode ser feita com relação ao dano na formação. O modelo utilizado mostra coerência dos resultados obtidos com as equações descritas e podem ser implantadas análises mais complexas em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ECONOMIDES, Michael J.; HILL, A. D.; EHLIG-ECONOMIDES, Christine. **Petroleum production systems**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1994.

ELSHAHAWI, H. M.; GAD, K. H. Estimation of Skin for High Deliverability Gas Well Tests. **SPE 68144**. In: SPE MIDDLE EAST OIL SHOW, Bahrain, 2001.

FUNDAMENTOS de engenharia de petróleo. 2ª. edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

HAWKINS, M. F. A Note on the Skin Effect. **Petroleum Transactions (AIME)**, Baton Rouge, v. 207, p. 356-357, 1956.

KARAKAS, M; TARIQ, S.M. Semianalytical productivity models for perforated completions. **SPE 18247**. In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, Houston, 1988.

LEE, Kun-Sang. A new method to calculate pseudoskin factor of a partially-penetrating well. **Journal of the Korean Society of Groundwater Environment**, v. 6, No. 1, p. 42-47, 1999.

LIMA, R. E. M. **Simulador de dano à formação, aplicado ao projeto e à execução da perfuração de poços de petróleo**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MCLEOD, H. O. Jr. The Effect of Perforating Conditions on Well Performance. **SPE 10649**. In: SPE FORMATION DAMAGE CONTROL SYMPOSIUM, Lafayette, 1982.

ODEH, A. S. An Equation for Calculating Skin Factor Due to Restricted Entry. **SPE 8879**. Journal of Petroleum Technology, p. 964-965, 1980.

ROSA, Adalberto José; CARVALHO, Renato de Souza; XAVIER, José Augusto Daniel. **Engenharia de reservatórios de petróleo**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2006.

SCHLUMBERGER. **Oilfield Glossary: gravel pack**. Disponível em: http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/g/gravel_pack.aspx. Acesso em: 29 de novembro de 2016.

SUN, D; LI, B; GLADKIKH, M; SATTI, R; EVANS, R. Comparison of skin factors for perforated completions calculated with computational fluid dynamics software and a semi-analytical model. **SPE 143663**. In: SPE EUROPEAN FORMATION DAMAGE CONFERENCE, Noordwijk, 2011.

VAN EVERDINGEN, A. F; Hurst, N. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoir. **Petroleum Transactions (AIME)**, v. 186, p. 305-324, 1949.

VRBIK, J. BROCK, U. A Simple Approximation to the Pseudoskin Factor Resulting From Restricted Entry. **SPE 21469**. SPE Formation Evaluation, p. 444-446, 1991.

YILDIZ, Turhan. Assessment of total skin factor in perforated Wells. **SPE 82249**. In: SPE EUROPEAN FORMATION DAMAGE CONFERENCE, The Hague, 2003.