

## 5

# MODELAGEM NUMÉRICA E RESULTADOS DO ENSAIO DE *LEAK-OFF*

### 5.1.

#### Introdução

Este trabalho mostra os resultados da simulação do ensaio de *Leak-Off* em um poço de petróleo, através de uma abordagem de elementos finitos utilizando os recursos de um programa de elementos finitos (Abaqus). O objetivo principal deste trabalho é calcular a pressão de *Leak-Off* por meio da curva de pressão vs. tempo, usando um critério no qual a pressão de *Leak-Off* é atingida quando a tensão tangencial efetiva é nula.

O ensaio de *Leak-Off* é realizado com o objetivo de encontrar o gradiente de fratura de determinada formação. Os resultados de um ensaio de *Leak-Off* também permitem avaliar o peso máximo equivalente da lama que deve ser aplicado ao poço durante as operações de perfuração (Jetjongjit, 2009).

Atualmente, não existe um procedimento padrão de campo para os ensaios de *Leak-Off*. Portanto, para obter um peso de lama e pressão de fratura confiável é necessário um procedimento adequado do ensaio de *Leak-Off*. O procedimento a seguir é baseado em métodos recomendados por Kunze & Steiger (1992).

O procedimento proposto para realizar um ensaio de *Leak-Off* é o seguinte, após o revestimento é cimentado e o cimento esteja consolidado:

- Perfurar 3.0-6.0 metros (10.0-20.0 pés) numa nova formação. A profundidade da formação perfurada varia para cada empresa de serviços.
- Puxar a coluna de perfuração de 0.9-1.22 metros (3-4 pés), a partir do fundo do poço.
- Fechar a válvula que controla a vedação (BOP).
- Bombear o fluido de perfuração no fundo do poço a uma taxa lenta e constante, normalmente 0.04-0.16 m<sup>3</sup>/min (0.25-1.5 barril/min).

- Continuar o bombeamento até que a taxa de pressão aumente lentamente ou a curva de pressão vs. tempo (ou volume), comece a se desviar de uma linha reta, o qual é uma indicação de colapso da formação.
- Depois que a formação é quebrada, parar a bomba.
- Monitorar a redução de pressão por 10.0 minutos.

O primeiro ponto de desvio do comportamento de linha reta é geralmente conhecido como ponto de *Leak-Off* ou Pressão de *Leak-Off* e é tomado como uma estimativa da tensão mínima principal (Heger & Spoerker, 2011).

## 5.2. Simulação Numérica do Ensaio de *Leak-Off*

Neste tópico mostram-se as considerações para realizar a simulação numérica do ensaio de *Leak-Off*. No primeiro caso (rocha permeável), usamos um modelo poroelástico que está incluído no programa e considera o fluxo de fluido monofásico em meios porosos. O segundo caso (rocha de sal) foi analisado utilizando uma lei de fluência (*creep*) freqüentemente empregada nos centros de pesquisa da Petrobras. Essa lei foi implementada através de uma subrotina que permite a introdução de novas leis de fluência no programa. Nos dois casos, o problema é transiente, ou seja, o problema é dependente do tempo.

Durante um ensaio de *Leak-Off*, o fluido é injetado para o poço a uma determinada taxa. No entanto, a taxa de penetração de fluidos na formação não é conhecida e a pressão aplicada no poço é medida durante o ensaio (Frydman & Fontoura, 2003). A taxa real de penetração de fluidos e pressão na parede do poço é dependente de vários aspectos, tais como:

- 1) Variação volumétrica do poço.
- 2) Compressibilidade do fluido.
- 3) Penetração de fluidos na formação rochosa.

A aplicação das condições de contorno apropriadas na parede do poço é difícil, devido aos fatores que foram descritos anteriormente. Frydman & Fontoura (2003) apresentaram uma solução para superar essa dificuldade através de elementos virtuais que são utilizados no interior do poço, como é mostrado na Figura 5.1. Os nós dos elementos virtuais que não fazem parte da parede do poço tem deslocamento prescrito nulo.

O material virtual tem propriedades especiais, como segue:

- Baixo módulo de elasticidade é usado para o material virtual com o objetivo de não alterar a rigidez do poço.
- Alta permeabilidade é adotada para que o fluxo de fluido possa atravessar o material virtual livremente.
- Alta porosidade é utilizada para uma correta distribuição da compressibilidade do fluido no interior do material virtual.

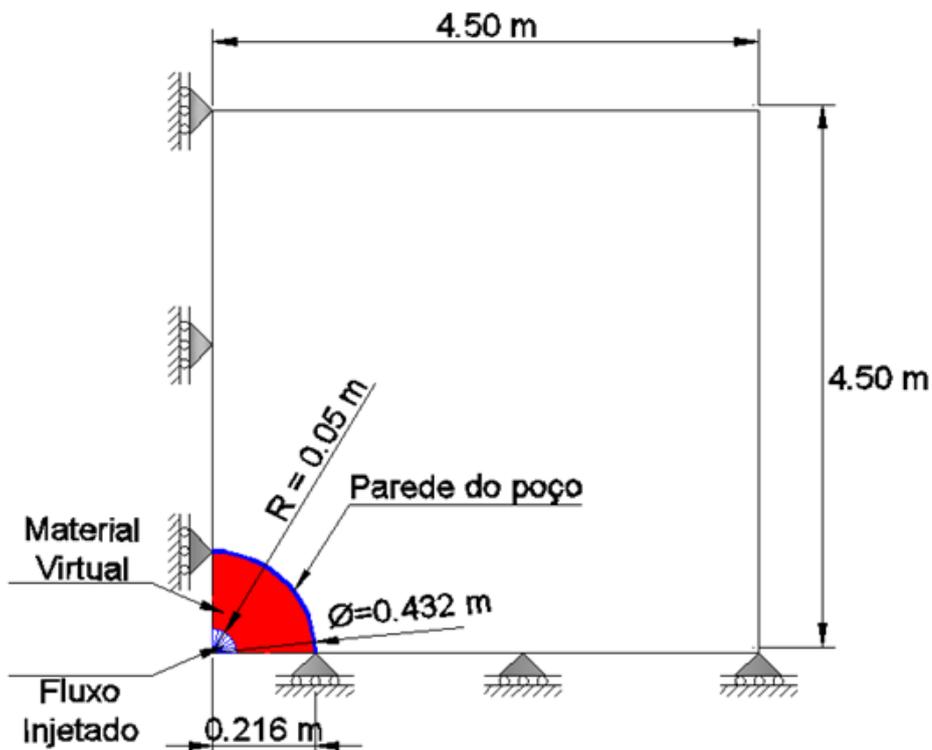


Figura 5.1: Geometria do modelo, parede do poço e localização onde o fluido é injetado no material virtual - Modificada. (Inoue & Fontoura, 2010).

### 5.3. Descrição do Problema

Um trecho vertical de 25m de comprimento é pressurizado, mas só é analisada uma seção horizontal nesse trecho. Para este estudo, a seção horizontal analisada é o fundo do poço (linha vermelha). Na Figura 5.2 se mostra a representação de uma seção horizontal qualquer.

No primeiro caso, foi estudada uma formação rochosa com o comportamento poroelástico e no segundo caso uma rocha de sal com comportamento de fluência.

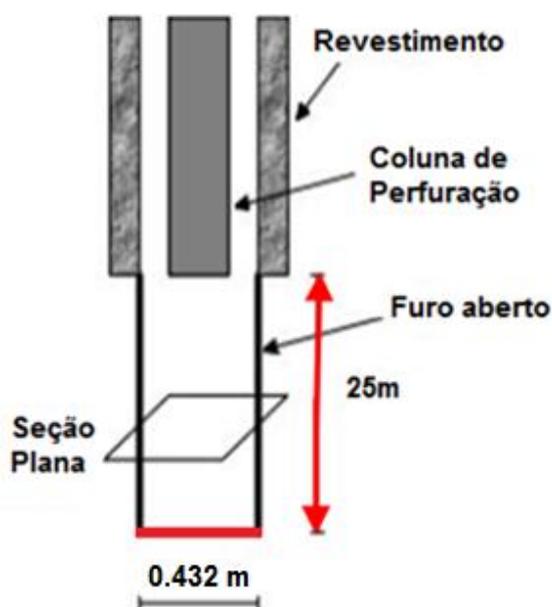


Figura 5.2: Seção horizontal de um poço vertical - Modificada (Frydman, 2003).

### 5.4. Passos Para a Análise

Considerando que a direção da perfuração é no sentido vertical e que a seção horizontal é pequena quando comparada com o comprimento vertical do poço, o problema pode ser analisado usando a análise de deformação plana. A simulação numérica do ensaio de *Leak-Off* foi realizada em três etapas:

- 1) Equilíbrio.
- 2) Perfuração.
- 3) Pressurização.

### 5.4.1. Etapa de Equilíbrio

Este passo é necessário para determinar as condições iniciais corretas do problema. A análise começa aplicando as tensões iniciais *in situ* e a distribuição de pressão de poros inicial que não produz deslocamento, deformação ou variação na pressão de poros. Um deslocamento nulo é prescrito nos nós na parede do poço. Na Figura 5.3 é possível observar todas as condições de contorno prescritas nesta etapa.

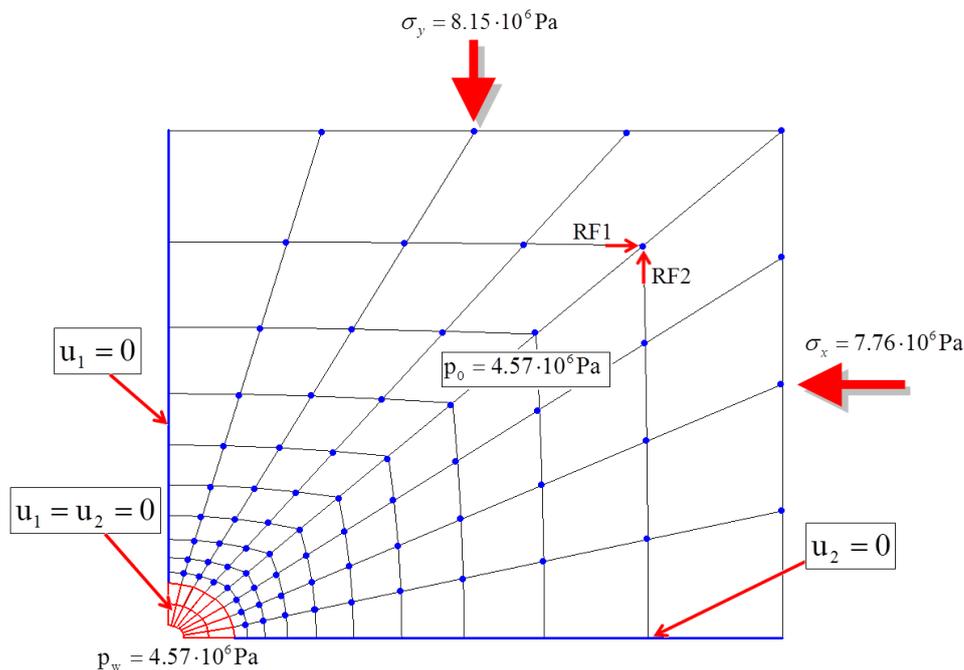


Figura 5.3: Condições iniciais do problema - etapa de equilíbrio.

### 5.4.2. Etapa de Perfuração

Nesta etapa, o deslocamento nulo prescrito é removido da parede do poço para simular a perfuração, o que resultou no fechamento do poço devido ao estado de tensões de compressão aplicadas no modelo. Instantaneamente, as condições de contorno de pressão de fluido são aplicadas nos nós dos elementos virtuais para simular o peso da lama (condição hidrostática). Posteriormente, o equilíbrio entre a pressão do peso da lama e a pressão da formação é alcançado, permitindo o fluxo de fluido do poço para a formação.

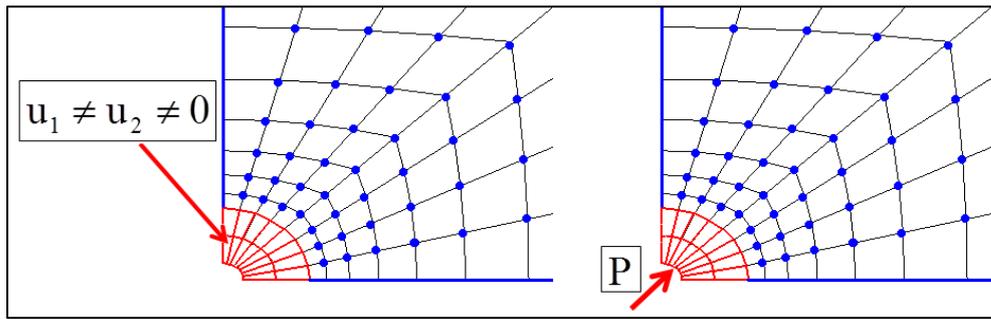


Figura 5.4: Zoom da parede do poço - etapa de perfuração.

### 5.4.3. Etapa de Pressurização

Ataindo o equilíbrio na etapa de perfuração, as condições de contorno da pressão de fluido são removidas dos nós dos elementos virtuais e uma taxa de bombeamento constante é aplicada, como é mostrado na Figura 5.5.

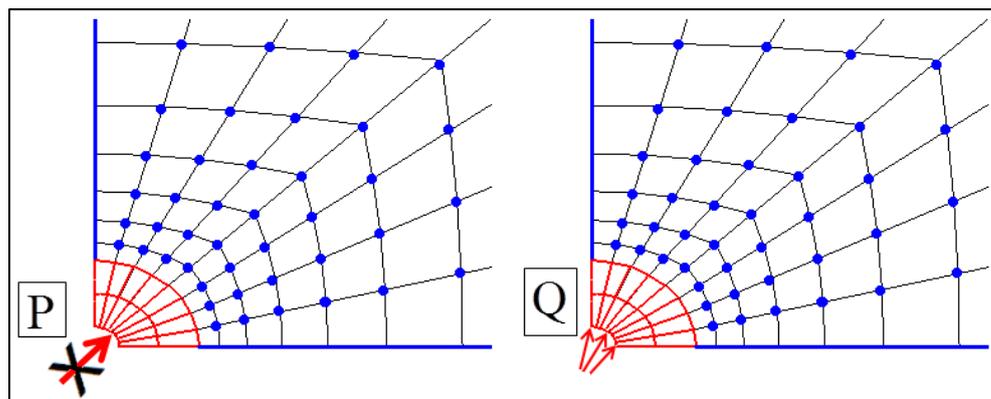


Figura 5.5: Zoom da parede do poço - etapa de perfuração.

### 5.4.4. Validação do Uso do Programa Abaqus

Para realizar a validação da resposta elástica do programa Abaqus, foram utilizadas as formulações elásticas de Kirsch (1898). Considerou-se contanto que não ocorressem deformações ao longo do eixo do poço, isto é, adotou-se a hipótese de estado plano de deformação. Sendo assim, para este caso da validação do Abaqus, foi só utilizada a solução elástica de análise do

programa e os elementos analisados são aqueles localizados na parede do poço para um ângulo de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , ou seja, os elementos mostrados na Figura 5.6.

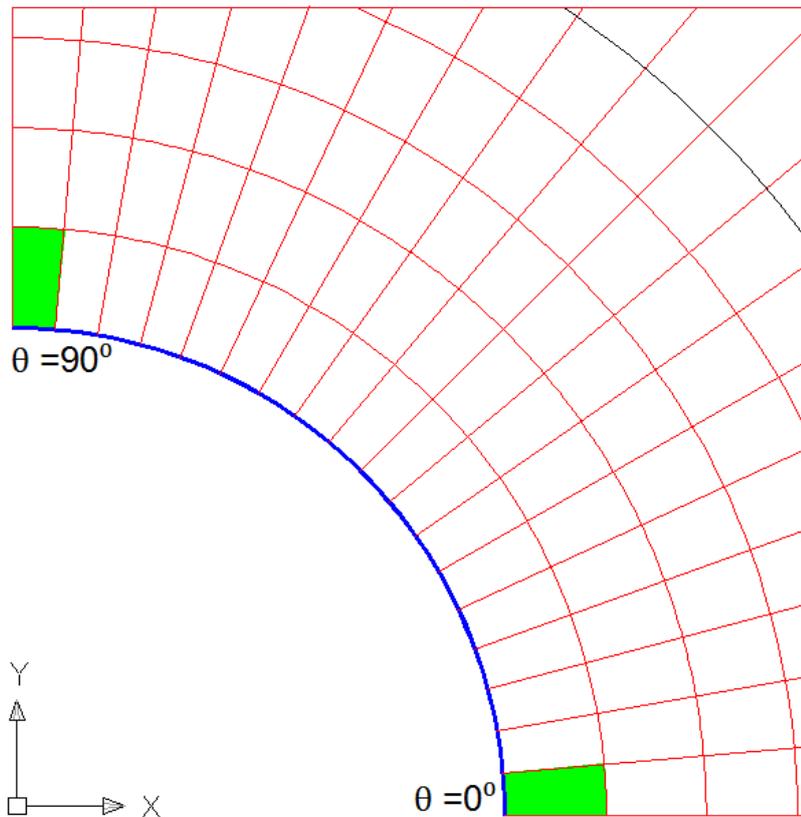


Figura 5.6: Elementos usados para a validação do Abaqus com a solução de Kirsch.

Kirsch (1898) considerou uma placa com um furo passante de raio ' $r$ ' a qual estava submetida a um estado de tensões e propôs uma solução para a distribuição do estado de tensões ao longo da placa em termos de tensão radial e tangencial, respectivamente (Goodman, 1989):

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right)\cos(2\theta) \quad (5.1)$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) \quad (5.2)$$

Onde:

- $\sigma_r$ : Tensão normal efetiva na direção radial.
- $\sigma_\theta$ : Tensão normal efetiva na direção tangencial.
- $\sigma_x$ : Tensão “*in situ*” na direção x.
- $\sigma_y$ : Tensão “*in situ*” na direção y.
- $a$ : Raio do poço.
- $r$ : Distância a partir do eixo do poço.
- $\theta$ : Ângulo medido no sentido anti-horário do plano x-y a partir do eixo 'x'.

Uma simulação foi realizada para verificar a variação das tensões radiais e tangenciais, sem considerar o peso de lama. A Figura 5.7, mostra os resultados.

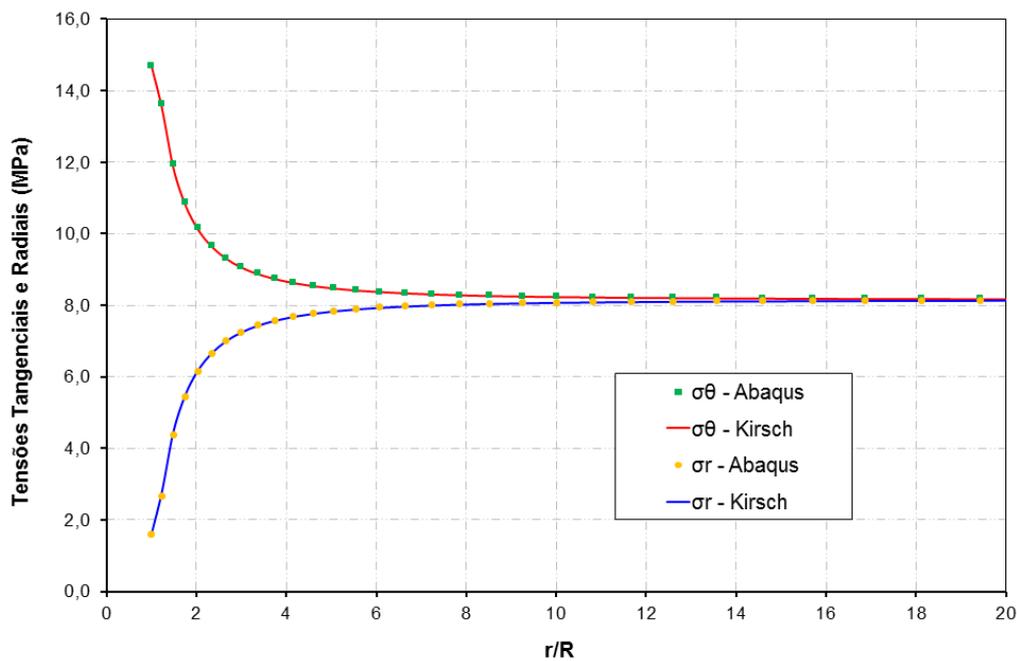


Figura 5.7: Variação das tensões tangenciais e radiais (Kirsch vs. Abaqus) para a análise elástica.

Neste caso a simulação foi realizada com um estado isotrópico de tensões,  $\sigma_x = \sigma_y = 8.15$  MPa, e o peso da lama não foi considerado.

Na Figura 5.7 pode-se observar que os valores das tensões tangenciais e radiais coincidem com os valores obtidos do Abaqus. Depois das validações das equações de Kirsch com o programa (Abaqus), este programa pode ser usado para realizar a modelagem numérica do ensaio de *Leak-Off*.

## 5.5.

### Caso 1: Rocha Permeável

Neste tópico, são descritas as hipóteses consideradas e os cálculos realizados, para realizar as simulações no programa (Abaqus) usando um modelo poroelástico.

Para realizar o cálculo das tensões *in situ*, se consideraram todas as camadas do material como isotrópicas. A primeira camada corresponde a lamina de água com seu respectivo peso específico e espessura. A segunda camada, chamada de “outros estratos” representa as camadas localizadas acima da rocha permeável. Por último, a camada da rocha permeável, com seu respectivo peso específico e espessura. Na Tabela 5.1 é mostrado o cálculo da tensão vertical de sobrecarga  $\sigma_z$ .

Tabela 5.1: Tensão de sobrecarga  $\sigma_z$  (Rocha Permeável)

Tipo de Material	Profundidade	Peso Específico	Tensão $\sigma_z$
Lâmina de água	0-150 m	10000 N/m <sup>3</sup>	1.50 MPa
Outros estratos	150 – 250 m	20280 N/m <sup>3</sup>	2.03 MPa
Rocha Permeável	250 – 460 m	22000 N/m <sup>3</sup>	4.62 MPa
Total de $\sigma_z$ na profundidade de estudo (460m) - Permeável			<b>8.15 MPa</b>

Finalmente, se tem o valor da tensão de sobrecarga para a profundidade de estudo. A tensão total na direção X foi assumida 5% menor do que a tensão vertical, com um valor igual a  $\sigma_x = 7.76$  MPa, e as tensões  $\sigma_z = \sigma_y = 8.15$  MPa.

A pressão da lama neste trabalho foi calculada para uma profundidade de 460 m, e é igual a  $p_w = 5.48$  MPa, e a pressão de poros na formação foi de  $p_o = 4.57$  MPa, estes valores foram calculados com base no trabalho de Frydman & Fontoura (2003).

Em seguida, as tensões *in situ* são mostradas na Figura 5.8 e foram calculadas conforme apresentado na Tabela 5.1. Finalmente, na Tabela 5.2, são mostradas as propriedades do fluido de pressurização usado nesta simulação.

Tabela 5.2: Propriedades do fluido de pressurização (Rocha Permeável)

Propriedades	Valores
Viscosidade Dinâmica	1.0030 x 10 <sup>-3</sup> N.s/m <sup>2</sup>
Densidade	1000 kg/m <sup>3</sup>
Modulo Bulk do Fluido	2.50 x 10 <sup>9</sup> Pa

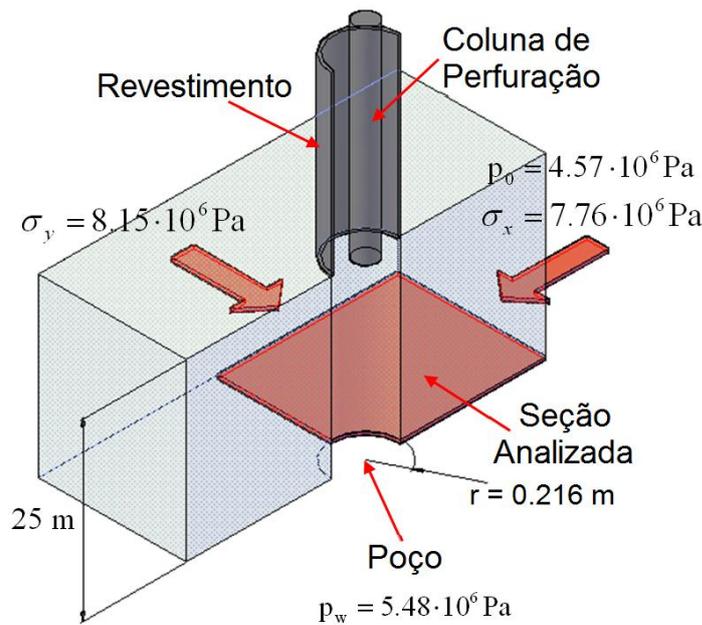


Figura 5.8: Visualização em 3D do modelo da rocha permeável – Modificada. (Inoue & Fontoura, 2010).

Na figura 5.8 é apresentado um esquema geral do problema, onde são mostradas as tensões *in situ*, raio do poço, pressão da lama, pressão de poros, etc.

### 5.5.1. Malha de Elementos Finitos (*Mesh*)

Uma malha de elementos finitos em 2D foi gerada, composta por 512 elementos e 561 nós. Os elementos são do tipo CPE4P (4 nós bilinear com deslocamento e pressão). Esta malha tem a principal característica de discretizar  $\frac{1}{4}$  das dimensões do problema conforme mostrado na Figura 5.9. Nesta figura também são mostradas as considerações adotadas para o tamanho da malha.

Um maior refinamento da malha foi realizado próximo à parede do poço, onde são esperadas as maiores variações de tensões, deformações e deslocamentos. Este refinamento foi diminuindo à medida que se afasta do raio do poço, onde são esperadas menores variações de tensões, deformações e deslocamentos.

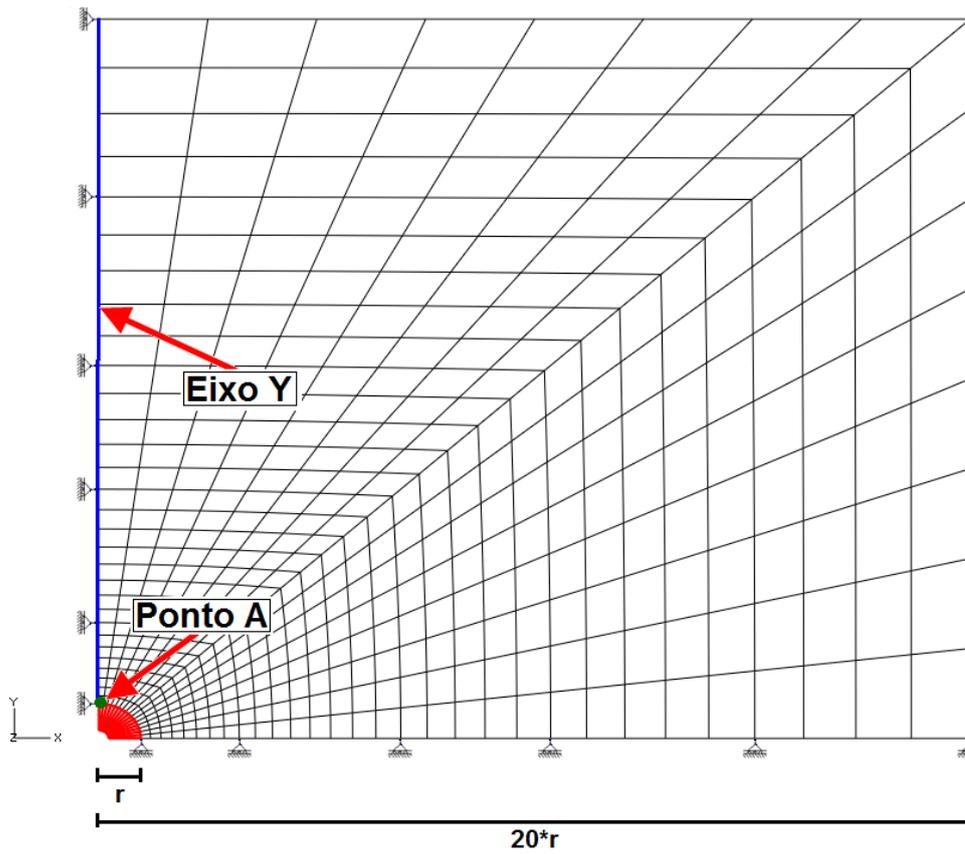


Figura 5.9: Representação de um quarto da malha do poço em 2D.

O tamanho da malha foi considerado 20 vezes o raio do poço. Sabe-se que o raio do poço é igual a 0.216 m, multiplicando 20 vezes o raio do poço ( $20 \cdot r$ ) o resultado é igual a 4.50 m. Desta forma, as dimensões da malha são de 4.50 m x 4.50 m. Foi escolhido  $20 \cdot r$ , porque nesta distância as tensões induzidas pela perfuração são as mesmas que as tensões *in situ*, isso foi verificado na Figura 5.7, quando se validou o uso do programa (Abaqus).

## 5.5.2. Análise Poroelástica

### 5.5.2.1. Introdução

Para realizar esta análise, foi utilizado um modelo poroelástico. Este modelo permite avaliar o efeito conjunto hidro-mecânico nas tensões em todo o poço, em especial, os efeitos transientes.

Os parâmetros elásticos como: módulo de Young ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), junto com algumas propriedades da rocha são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Propriedades da rocha permeável.

Propriedades	Valores
Módulo de Young	$8.274 \times 10^9$ Pa
Coeficiente de Poisson	0.17
Permeabilidade	$2.27 \times 10^{-2}$ mDarcy
Porosidade inicial	0.25
Resistência à Tração	$2.0 \times 10^5$ Pa

Para todas as simulações a rocha foi considerada incompressível, aliás, as simulações foram realizadas levando em conta o coeficiente de condutividade hidráulica e não a permeabilidade absoluta. Porque, no programa só é possível incluir o valor do coeficiente de condutividade hidráulica e o índice de vazios para representar a permeabilidade. As propriedades da rocha permeável apresentadas na tabela 5.3 foram obtidas do trabalho de Frydman & Fontoura (2003).

A seguir se mostram os resultados nas diferentes etapas da simulação, iniciando pela etapa de perfuração e finalizando na etapa de pressurização.

### 5.5.2.2. Etapa de Perfuração

Os resultados da pressão de poros e variação do deslocamento ao longo do eixo Y (o eixo Y é mostrado na Figura 5.9) com o tempo, durante a etapa de perfuração são mostrados nas Figuras 5.10 e 5.11, respectivamente.

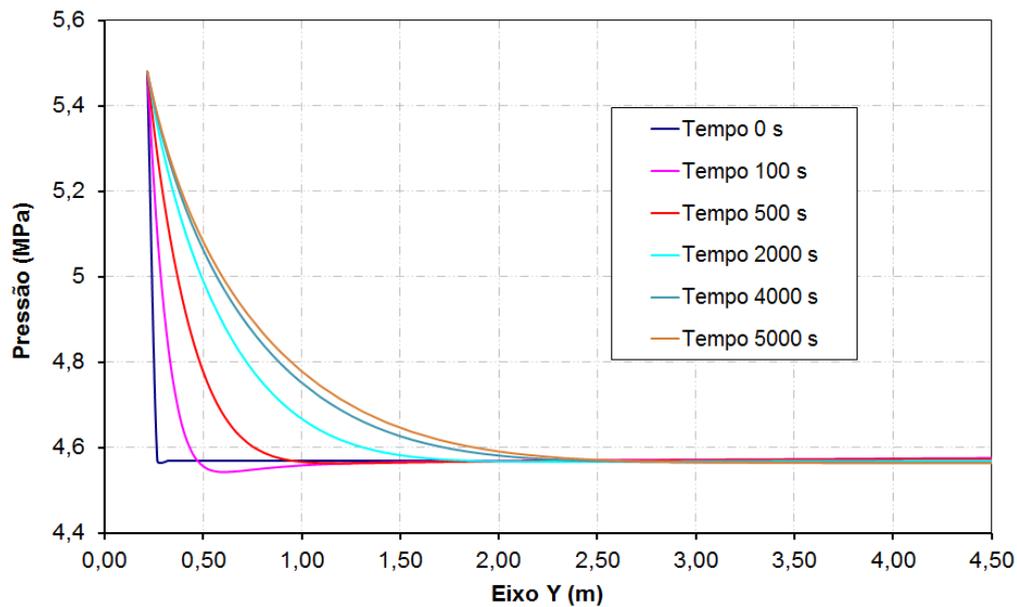


Figura 5.10: Variação da pressão de poros com o tempo, ao longo do eixo Y.

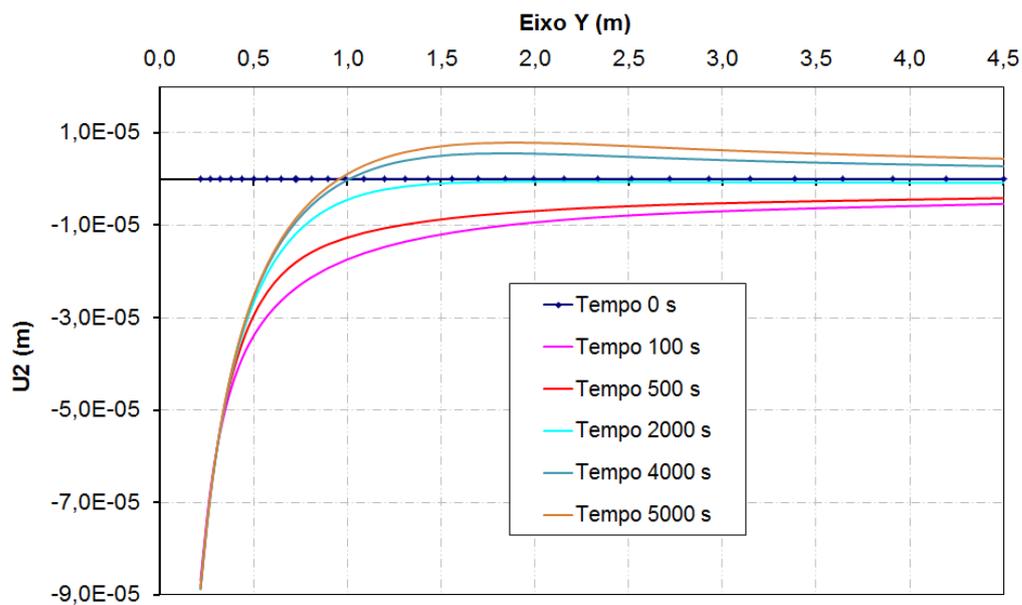


Figura 5.11: Variação do deslocamento com o tempo, ao longo do eixo Y.

Na Figura 5.10 é possível observar o equilíbrio entre a pressão do peso da lama e a pressão de poros na formação, neste caso há fluxo de fluidos do poço para a formação.

Analisando a Figura 5.11, a aplicação do fluido de perfuração na formação, resulta em um campo de deslocamentos que se movimenta para fora do poço, isto é, afastando-se da parede do poço.

Os valores negativos de deslocamento indicam fechamento do poço, enquanto os valores positivos indicam abertura. Neste processo há uma zona limite onde o poço, não está fechando nem abrindo.

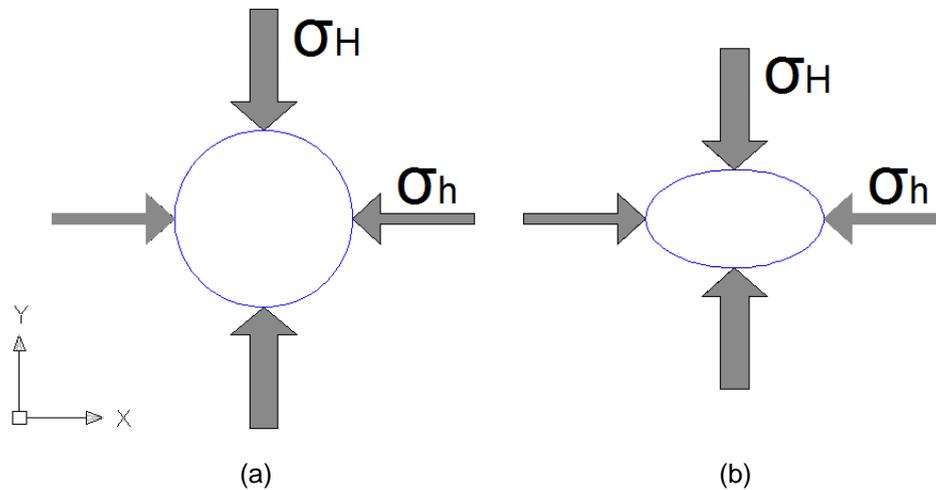


Figura 5.12: (a) Estado de tensão para um tempo,  $t=0$  s, e (b) Estado de tensão para um tempo,  $t > 0$  s.

Devido ao estado de tensões na direção  $\theta = 90^\circ$ , como mostrado na Figura 5.12, há um aumento do volume poroso que produz uma diminuição na pressão de poros. Neste caso a Figura 5.10 apresenta esse comportamento para um tempo de 100 s.

### 5.5.2.3. Etapa de Pressurização

Esta etapa foi simulada considerando três taxas de bombeamento constantes de 0.25, 1.0 e 10.0 gpm. As Figuras 5.13 e 5.14 mostram a variação da pressão do fluido e do deslocamento no ponto A (parede do poço, como mostrado na Figura 5.9) para as três taxas de bombeamento respectivamente. A etapa da pressurização começa no tempo de 5.000 s e finaliza no tempo de 10.000 s, o tempo total de simulação foi de 5.000 s (83 min).

O fluido de pressurização é igual ao fluido presente na formação, esta hipótese foi usada em todas as simulações para a rocha permeável. Para este caso o fluido de pressurização é água do mar.

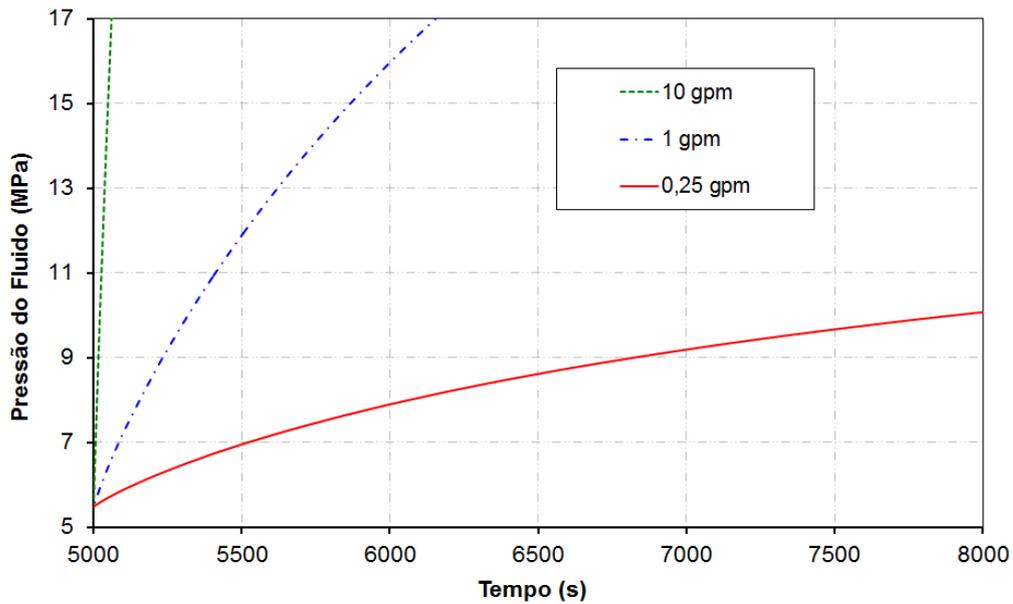


Figura 5.13: Variação da pressão do fluido no ponto A considerando três taxas de bombeamento.

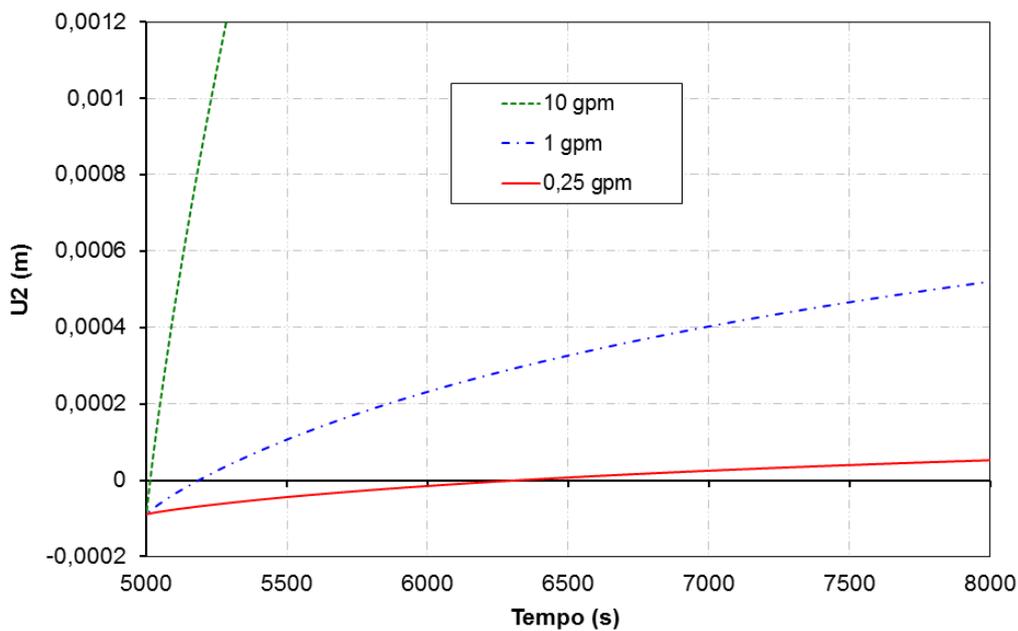


Figura 5.14: Variação do deslocamento no ponto A considerando três taxas de bombeamento.

Na Figura 5.13, a alta taxa de bombeamento (10.0 gpm) aumenta a pressão de poros na parede do poço mais rapidamente do que a baixa taxa de bombeamento (0.25 gpm), o que resulta em um aumento lento da pressão do

fluido. O mesmo comportamento pode ser visto na Figura 5.14 para o deslocamento na parede do poço.

Para altas taxas de bombeamento os gráficos de pressão e deslocamento na parede do poço apresentam um comportamento linear, enquanto que para baixas taxas de bombeamento as curvas apresentam uma tendência não linear. Para futuras pesquisas é preciso realizar uma análise não linear com uma lei que possa representar adequadamente esse comportamento.

Finalmente, foi calculada graficamente a pressão de *Leak-Off*. Usando uma hipótese que considera que a pressão de *Leak-Off* é atingida quando a tensão tangencial efetiva é igual a zero. Este critério foi usado em todas as simulações realizadas.

As Figuras 5.15, 5.16 e 5.17, mostram a pressão de *Leak-Off* para as diferentes taxas de bombeamento 10.0, 1.0 e 0.25 gpm, respectivamente. Nas figuras são plotadas as curvas de pressão de fluido e tensão tangencial efetiva ao longo do tempo. A curva para calcular a pressão de *Leak-Off* é analisada até o ponto onde a tensão tangencial atinge um valor nulo.

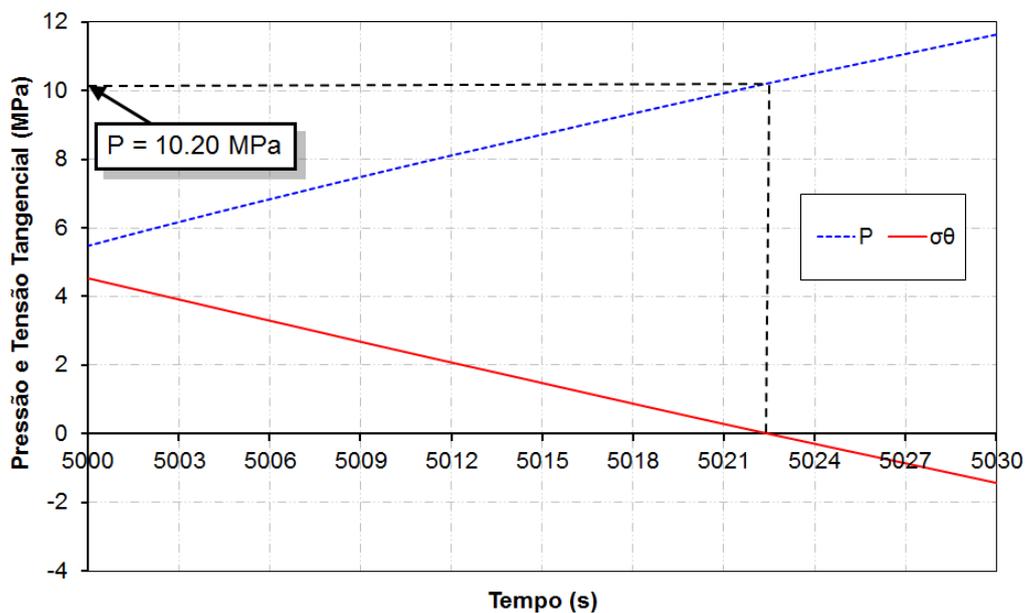


Figura 5.15: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 10.0 gpm.

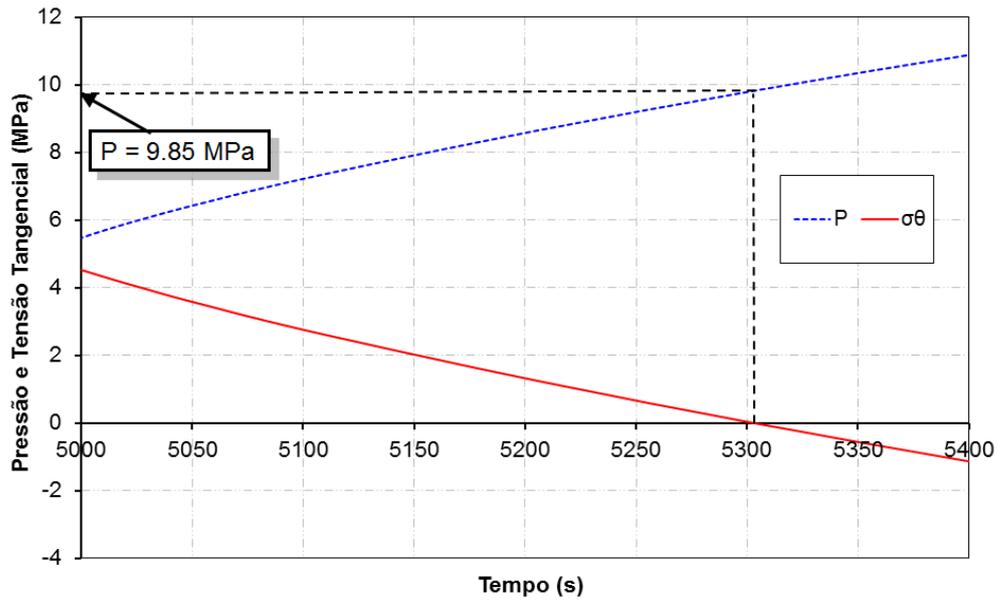


Figura 5.16: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 1.0 gpm.

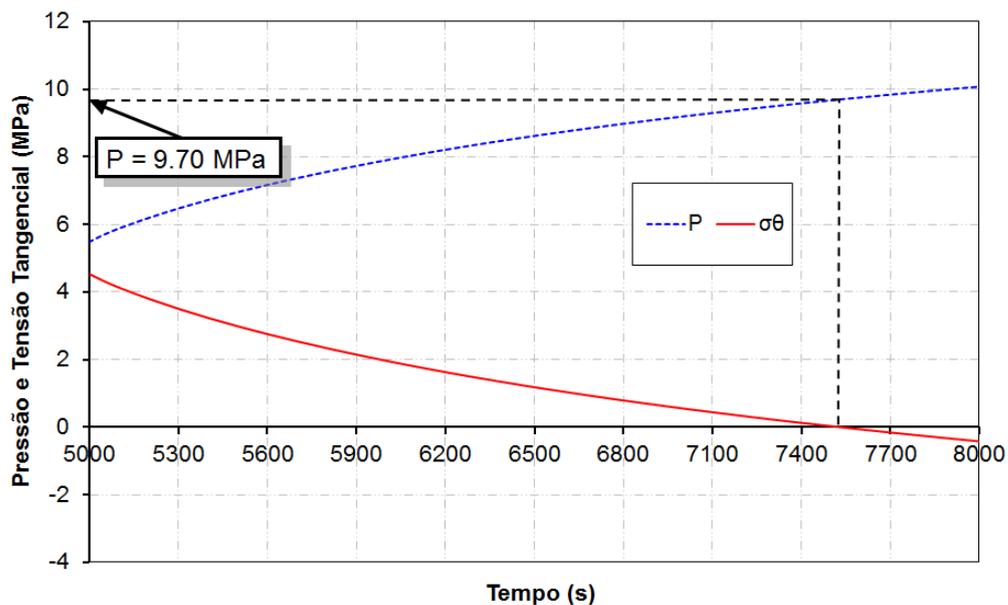


Figura 5.17: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 0.25 gpm.

Nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 é possível observar uma linearidade na pressão de fluido e tensão tangencial efetiva para altas taxas de bombeamento, e uma não linearidade na medida em que a taxa de bombeamento diminui.

À medida que a taxa de bombeamento é maior, o tempo para atingir a pressão de *Leak-Off* é menor.

### **5.5.3. Análise Poroelástica com Influência de Variação da Permeabilidade**

#### **5.5.3.1. Introdução**

Para realizar esta análise, foi utilizado um modelo poroelástico incluindo a variação da permeabilidade. Este modelo permite avaliar o efeito conjunto hidromecânico nas tensões em todo o poço, em especial, os efeitos transientes.

Neste caso a variação da permeabilidade foi simulada em função da porosidade e do diâmetro dos grãos por meio da equação de Carman-Kozeny (Eq. 3.7). Os parâmetros elásticos e as propriedades da rocha são os mesmos apresentados na Tabela 5.3.

Para esta análise, as simulações foram realizadas levando em conta o coeficiente de condutividade hidráulica e não a permeabilidade absoluta.

A continuação se mostram os resultados nas diferentes etapas da simulação, iniciando pela etapa de perfuração e finalizando na etapa de pressurização.

#### **5.5.3.2. Etapa de Perfuração**

Os resultados da pressão de poros e variação do deslocamento ao longo do eixo Y (ver Figura 5.9) com o tempo, durante a etapa de perfuração são mostrados nas Figuras 5.18 e 5.19, respectivamente.

Na análise poroelástica considerando a permeabilidade constante foi observado que a porosidade variou entre 0.25 e 0.27 (ver Figura 3.8), essa faixa de variação foi considerada para implementar a variação da permeabilidade por meio da formulação de Carman-Kozeny para grãos esféricos uniformes (Eq. 3.7).

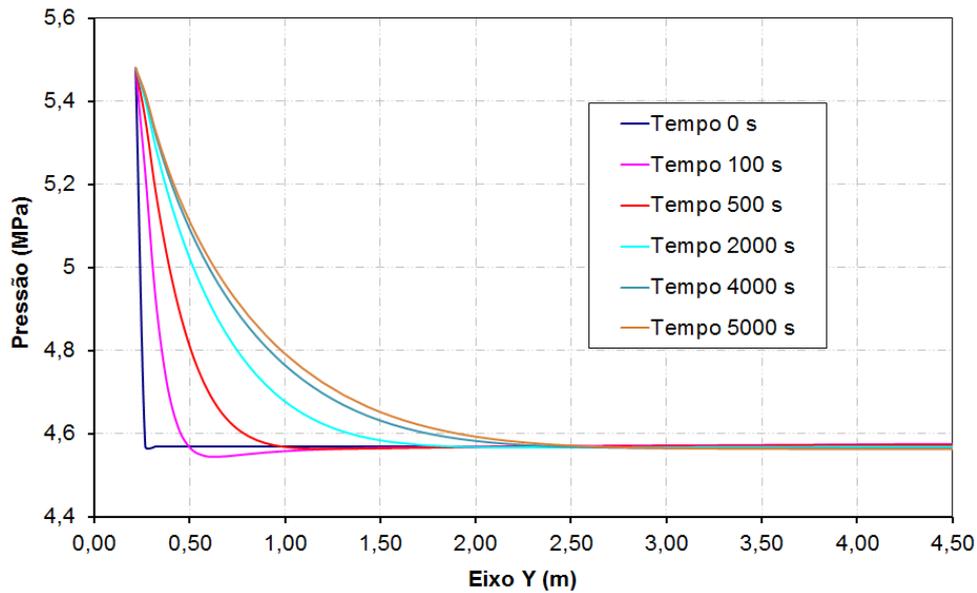


Figura 5.18: Variação da pressão de poros com o tempo, ao longo do eixo Y.

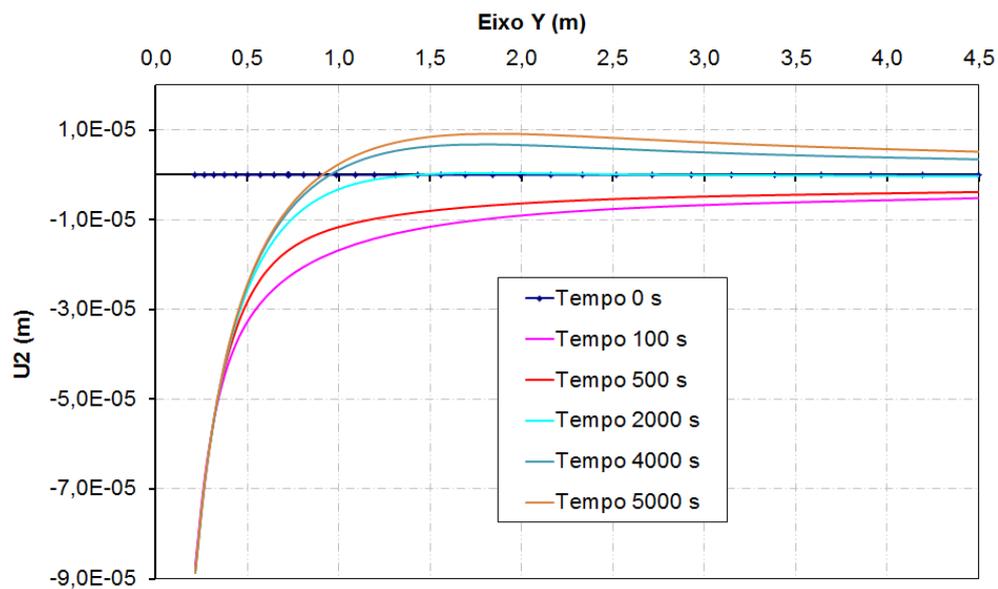


Figura 5.19: Variação do deslocamento com o tempo, ao longo do eixo Y.

Analisando as Figuras 5.18 e 5.19, é possível observar que a variação da permeabilidade teve pouca influência nos gráficos de variação da pressão de poros e do deslocamento na parede do poço.

Analisando a Figura 5.19, os valores negativos de deslocamento indicam fechamento do poço enquanto os valores positivos indicam abertura. Neste processo há uma zona limite onde o poço, não está fechando nem abrindo.

### 5.5.3.3. Etapa de Pressurização

Esta etapa foi simulada considerando três taxas de bombeamento constantes de 0.25, 1.0 e 10.0 gpm. As Figuras 5.20 e 5.21 mostram a variação da pressão do fluido e do deslocamento no ponto A (parede do poço, como mostrado na Figura 5.9) para as três taxas de bombeamento, respectivamente. As mesmas hipóteses da análise poroelástica, foram consideradas.

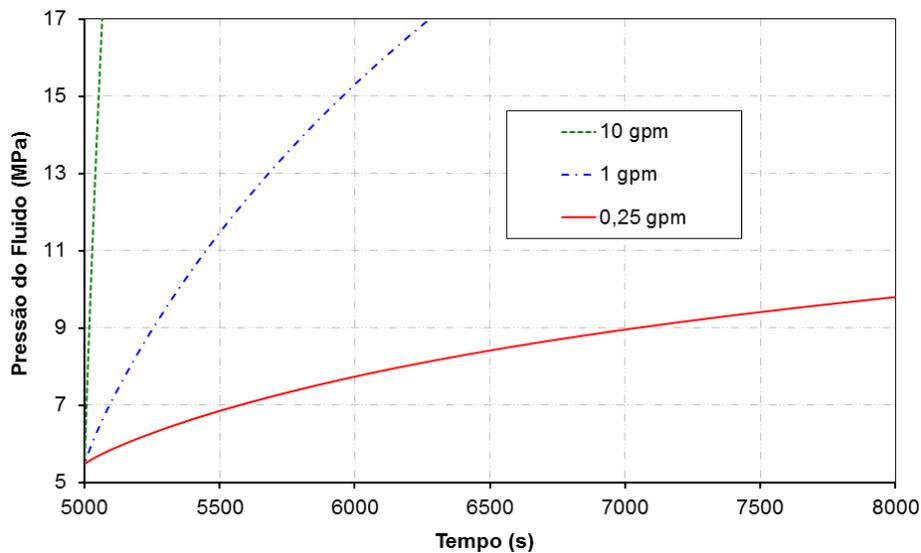


Figura 5.20: Variação da pressão do fluido no ponto A considerando três taxas de bombeamento.

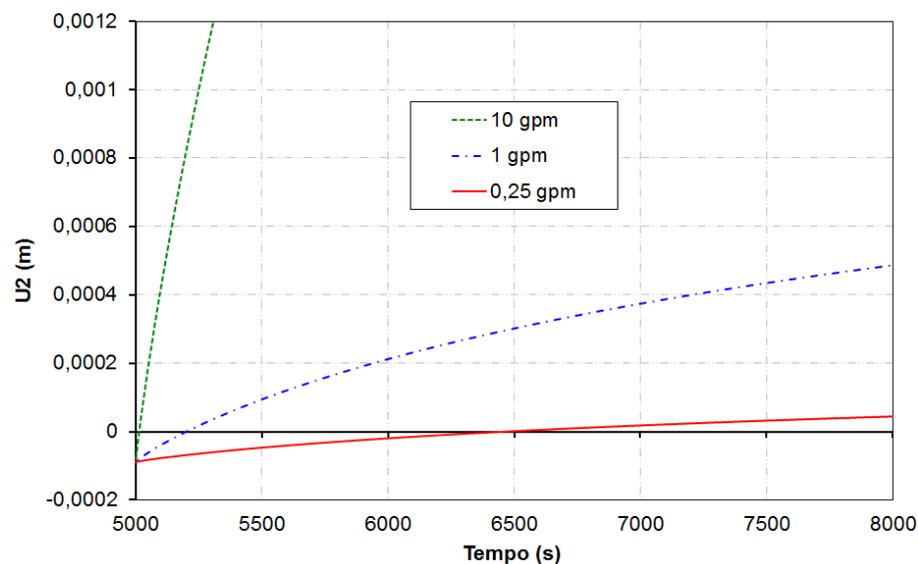


Figura 5.21: Variação do deslocamento no ponto A considerando três taxas de bombeamento.

Na Figura 5.20, a alta taxa de bombeamento (10.0 gpm) aumenta a pressão de poros na parede do poço mais rapidamente do que a baixa taxa de bombeamento (0.25 gpm), o que resulta em um aumento lento da pressão do fluido. O mesmo comportamento pode ser visto na Figura 5.21 para o deslocamento na parede do poço.

Para altas taxas de bombeamento os gráficos de pressão e deslocamento na parede do poço apresentam um comportamento linear, enquanto que para baixas taxas de bombeamento as curvas apresentam uma tendência não linear.

Finalmente, foi calculada graficamente a pressão de *Leak-Off*. Usando uma hipótese que considera que a pressão de *Leak-Off* é atingida quando a tensão tangencial efetiva é igual a zero.

As Figuras 5.22, 5.23 e 5.24, mostram a pressão de *Leak-Off* com a influência da variação da permeabilidade, para as diferentes taxas de bombeamento 10.0, 1.0 e 0.25 gpm, respectivamente. A análise da curva para calcular a pressão de *Leak-Off* é considerada até o ponto onde a tensão tangencial atinge um valor nulo.

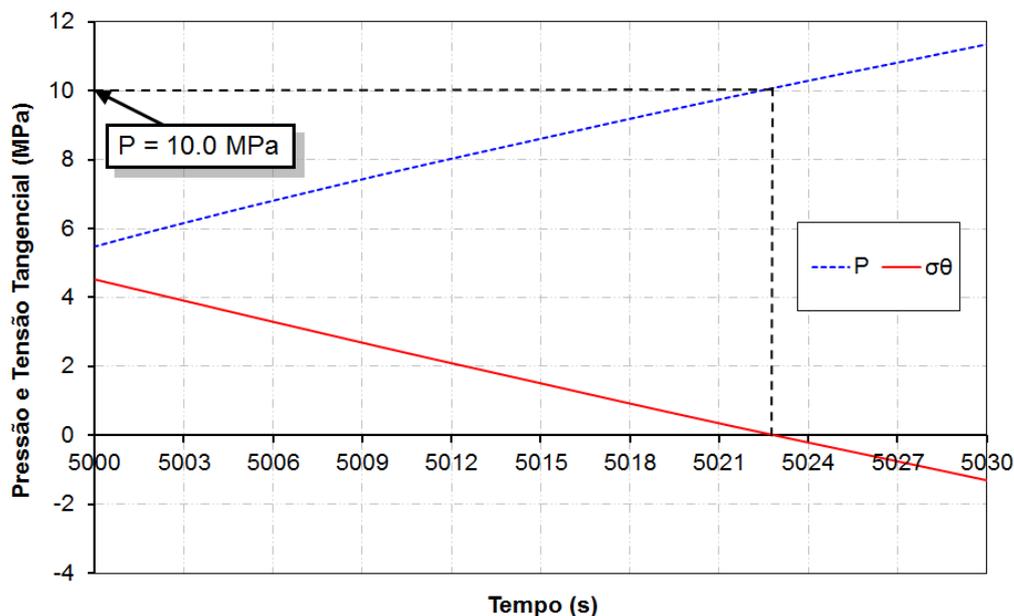


Figura 5.22: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 10.0 gpm.

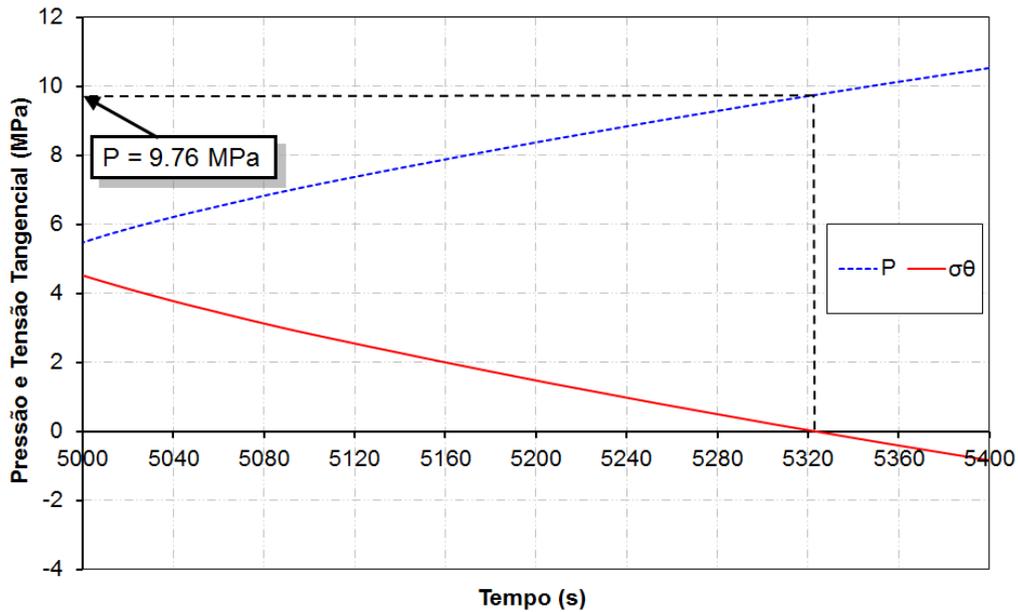


Figura 5.23: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 1.0 gpm.

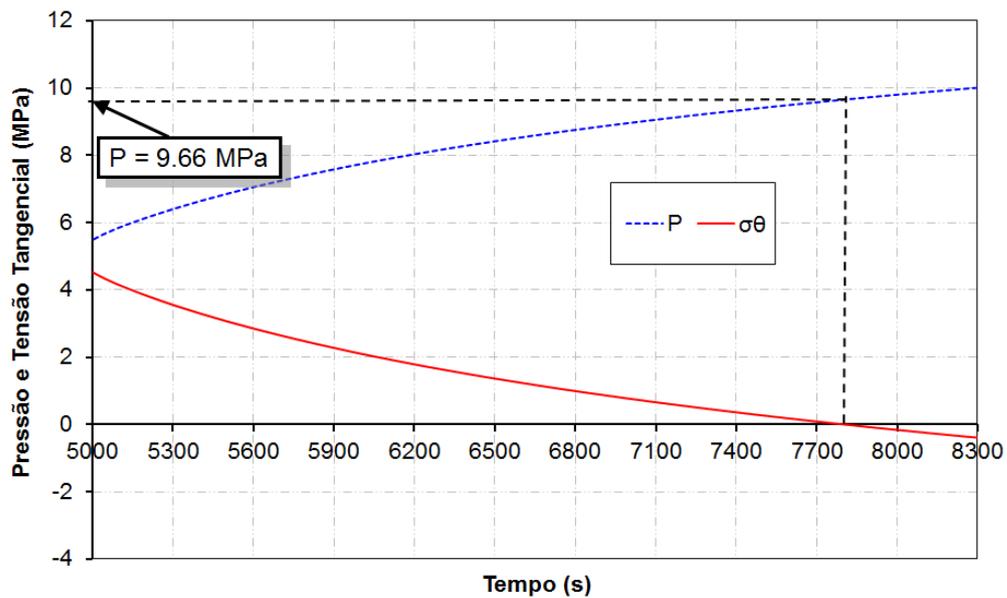


Figura 5.24: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 0.25 gpm.

Nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 é possível observar uma linearidade na pressão de fluido e tensão tangencial efetiva para altas taxas de bombeamento, e uma não linearidade na medida em que a taxa de bombeamento diminui.

À medida que a taxa de bombeamento é maior, o tempo para atingir a pressão de *Leak-Off* é menor.

Comparando as simulações realizadas com e sem a consideração da variação da permeabilidade, observou-se uma redução na pressão de *Leak-Off* de 2.0%, 0.9% e 0.4% para as taxas de bombeamento de 10.0 gpm, 1.0 gpm e 0.25 gpm respectivamente. Portanto, pode-se concluir que à medida que a taxa de bombeamento diminuiu, a pressão de *Leak-Off* também apresenta uma redução. Na Tabela 5.4 apresenta-se um resumo dos resultados de cada um dos casos analisados quando a permeabilidade é variável e constante.

Tabela 5.4: Comparação da pressão de *Leak-Off* considerando a variação da permeabilidade.

Taxa de Bombeamento (gpm)	Permeabilidade	Pressão de <i>Leak-Off</i> (MPa)	Diferenças (%)
10.0	Constante	10.20	-----
	Variável	10.0	2.0
1.0	Constante	9.85	-----
	Variável	9.76	0.9
0.25	Constante	9.70	-----
	Variável	9.66	0.4

Na coluna que se refere às diferenças, os valores apresentados na Tabela 5.4 foram calculados tomando como referência a permeabilidade constante, ou seja, a pressão de *Leak-Off* calculada usando a permeabilidade variável para uma taxa de bombeamento de 10.0 gpm é 2.0% menor do que quando a permeabilidade é considerada constante. Neste caso o fluido de pressurização utilizado foi água do mar.

## 5.5.4. Análise Poroelástica com Influência do Fluido de Pressurização

### 5.5.4.1. Introdução

Para realizar esta análise, foi utilizado um modelo poroelástico levando em conta a influência do fluido de pressurização. Este modelo permite avaliar o efeito conjunto hidro-mecânico nas tensões em todo o poço, em especial, os efeitos transientes.

Sabe-se que o fluxo é monofásico (o fluido de pressurização é igual ao fluido presente na formação). É importante destacar que as simulações foram realizadas, levando em conta o coeficiente de condutividade hidráulica e não a permeabilidade absoluta.

Neste caso foram utilizados três fluidos de perfuração a base de água. A Tabela 5.5 mostra as propriedades.

Tabela 5.5: Propriedades dos fluidos de pressurização.

# Fluido	Viscosidade Dinâmica	Densidade	Modulo Bulk do Fluido
A	$2.0 \times 10^{-2} \text{ N.s/m}^2$	$1440 \text{ kg/m}^3$	$2.0 \times 10^9 \text{ Pa}$
B	$1.0 \times 10^{-2} \text{ N.s/m}^2$	$1260 \text{ kg/m}^3$	$2.0 \times 10^9 \text{ Pa}$
C	$0.5 \times 10^{-2} \text{ N.s/m}^2$	$1140 \text{ kg/m}^3$	$2.0 \times 10^9 \text{ Pa}$

O mesmo valor do Módulo bulk para todos os fluidos foi considerado. Nesta análise, a equação (3.9) foi utilizada para calcular os coeficientes de condutividade hidráulica para cada tipo de fluido.

### 5.5.4.2. Etapa de Perfuração

Os resultados da influência do fluido de perfuração na pressão de poros e variação do deslocamento ao longo do eixo Y (ver Figura 5.9) com o tempo, durante a etapa de perfuração são mostrados nas Figuras 5.25 e 5.26, respectivamente. Neste caso foi analisado primeiramente o Fluido A, e conseqüentemente os fluidos B e C.

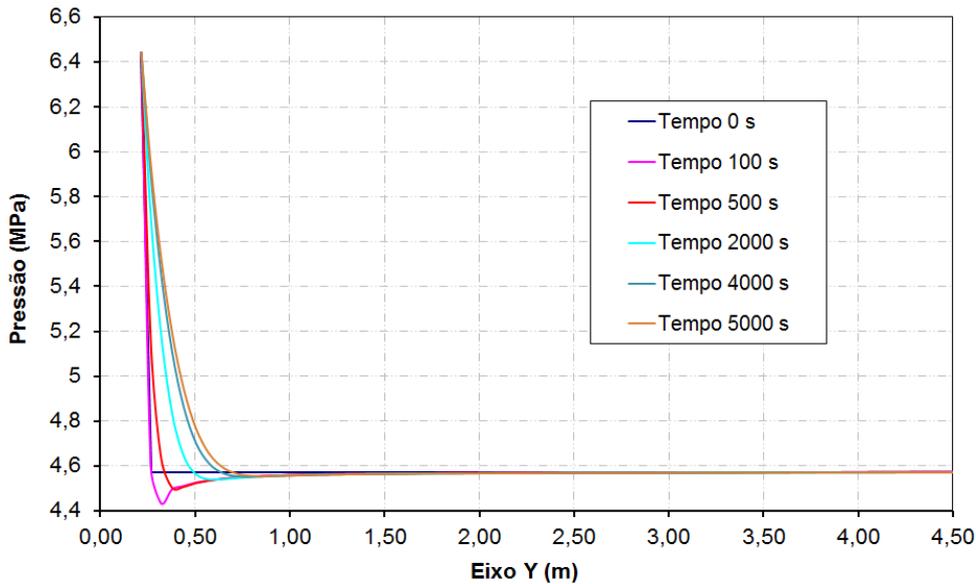


Figura 5.25: Variação da pressão de poros com o tempo, ao longo do eixo Y (Fluido A).

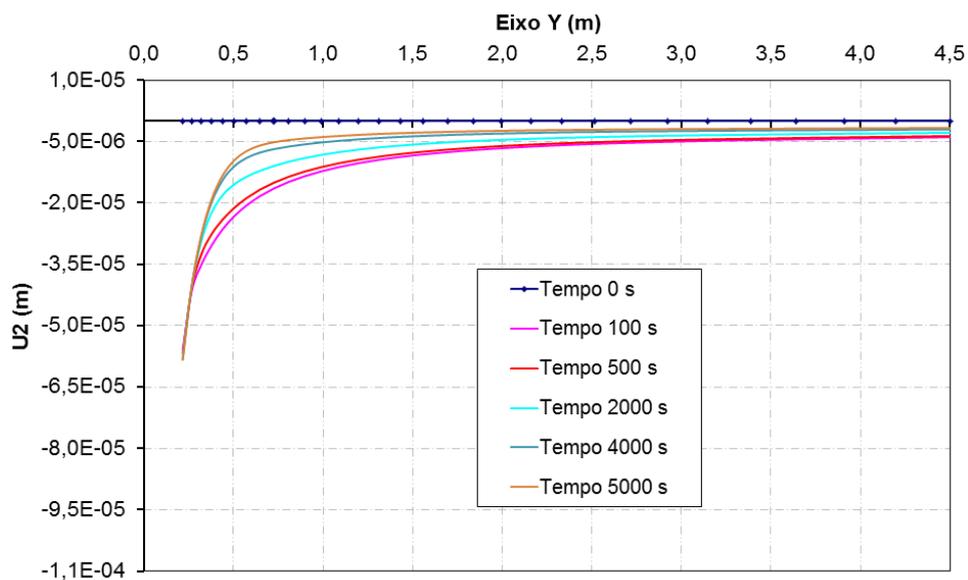


Figura 5.26: Variação do deslocamento com o tempo, ao longo do eixo Y (Fluido A).

Na Figura 5.25, é possível notar que há pouca entrada de fluido de pressurização na formação, isto é devido a que houve uma diminuição no coeficiente de permeabilidade, já que o fluido utilizado nesta simulação é 20 vezes mais viscoso do que a água do mar (fluido usado na análise poroelástica).

Analisando a Figura 5.26, o poço sempre tem deslocamentos negativos, porque neste caso o fluido de perfuração tem uma viscosidade maior e não consegue penetrar facilmente na formação.

As Figuras 5.27 e 5.28 mostram a variação da pressão de poros e deslocamento na parede do poço, usando o Fluido B.

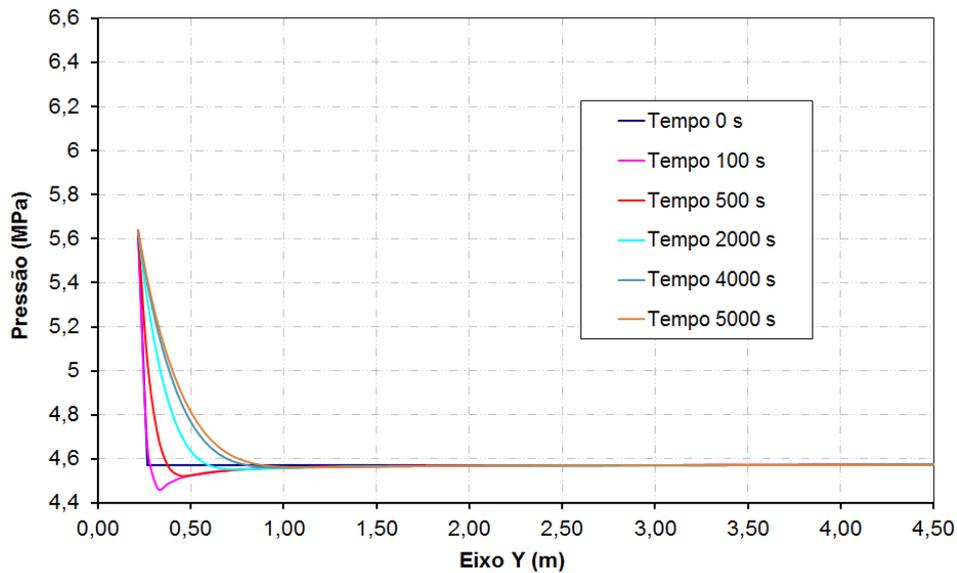


Figura 5.27: Variação da pressão de poros com o tempo, ao longo do eixo Y (Fluido B).

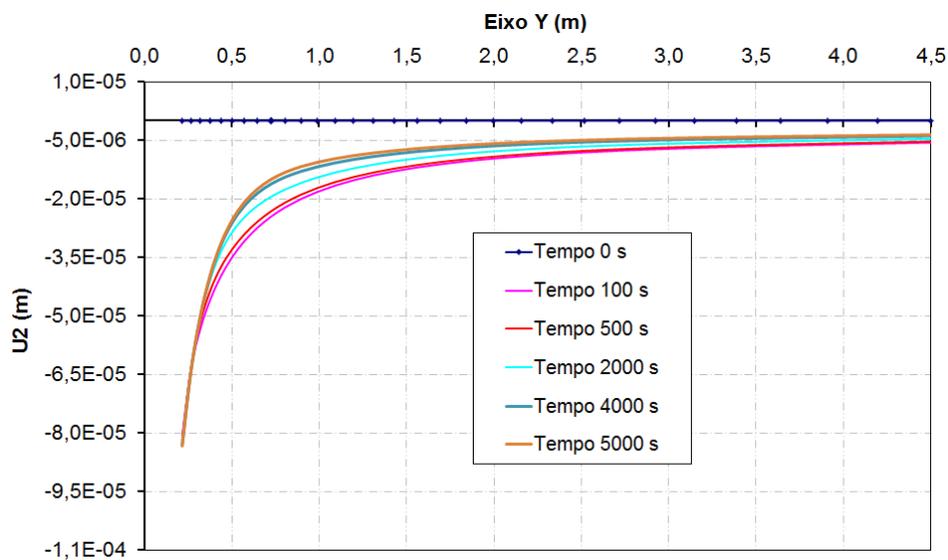


Figura 5.28: Variação do deslocamento com o tempo, ao longo do eixo Y (Fluido B).

Na Figura 5.27, também é possível observar que há pouca entrada de fluido de pressurização na formação, isto é devido a que houve uma diminuição no coeficiente de permeabilidade, já que o fluido utilizado nesta simulação é 10 vezes mais viscoso do que a água do mar (fluido usado na análise poroelástica).

Analisando a Figura 5.28, o poço sempre tem deslocamentos negativos, além disso, os deslocamentos são maiores do que para o Fluido A, isto se deve a que o Fluido B é menos denso.

As Figuras 5.27 e 5.28 mostram a variação da pressão de poros e deslocamento na parede do poço, usando o Fluido C.

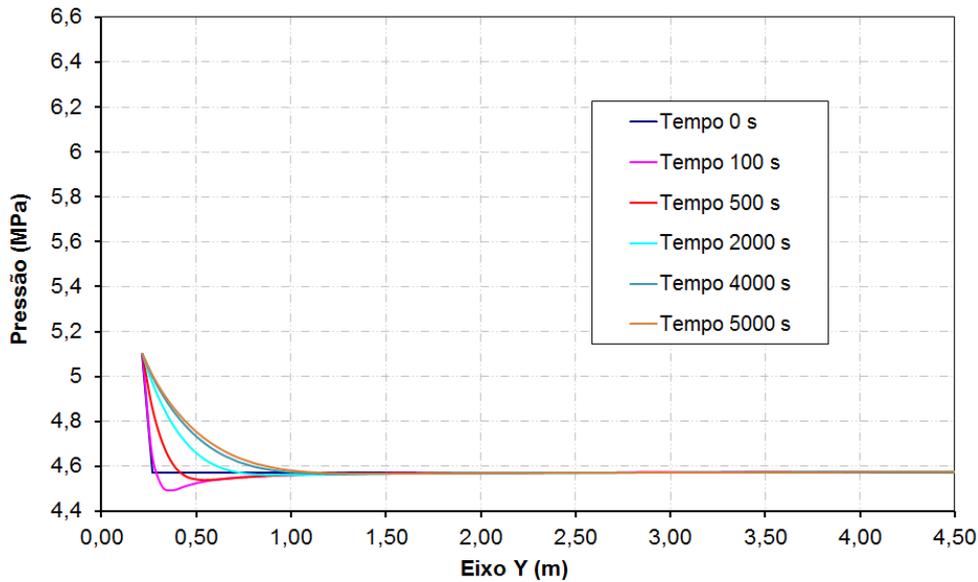


Figura 5.29: Variação da pressão de poros com o tempo, ao longo do eixo Y (Fluido C).

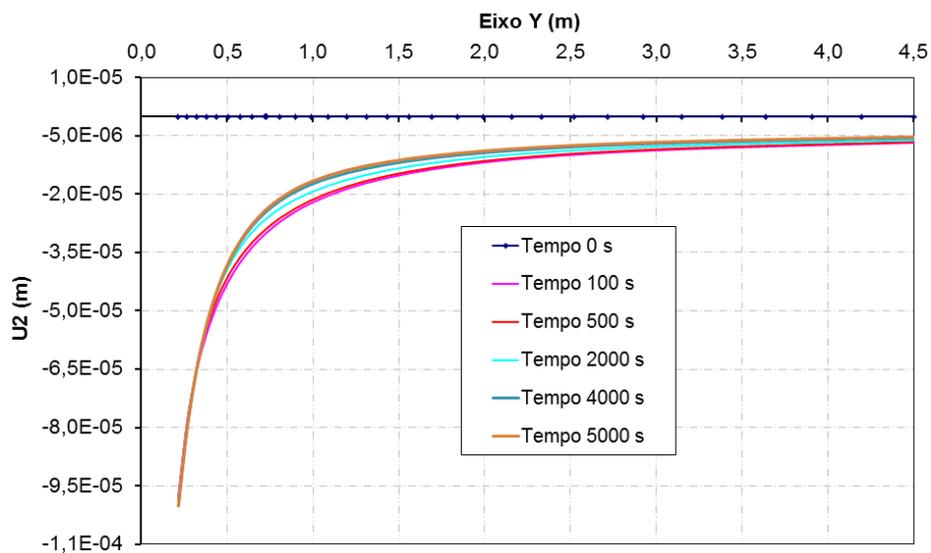


Figura 5.30: Variação do deslocamento com o tempo, ao longo do eixo Y (Fluido C).

Na Figura 5.29, também é observado que há pouca entrada de fluido de pressurização na formação, mas neste caso é onde ha mais penetração de fluido em relação aos casos anteriores, devido a que a viscosidade deste fluido é a menor dos três fluidos utilizados (5 vezes maior do que a água do mar).

Analisando a Figura 5.30, o poço sempre tem deslocamentos negativos e os deslocamentos estão mais próximos um dos outros, isto se deve à diferença de pressão ( $p_w - p_0$ ), que neste caso é menor do que para os fluidos A e B. Além disso, os deslocamentos para o Fluido C são os maiores, devido a que este fluido tem o menor valor de densidade dos três fluidos.

Para todos os gráficos de pressão (Figuras 5.25, 5.27 e 5.29), há um aumento do volume poroso, já que o fluido utilizado nestas simulações é mais compressível.

### 5.5.4.3. Etapa de Pressurização

Os resultados da influência do fluido de pressurização, sobre a pressão do fluido e a variação do deslocamento no ponto A (parede do poço, ver Figura 5.9) na fase de pressurização são mostrados nas Figuras 5.31 e 5.32, respectivamente para as diferentes taxas de bombeamento e para os diferentes fluidos.

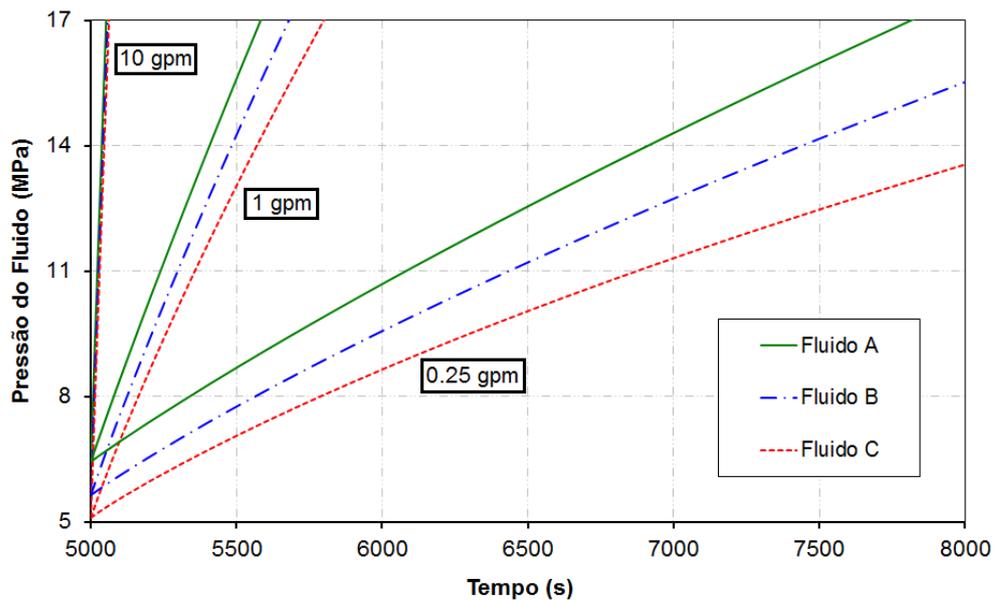


Figura 5.31: Variação da pressão do fluido no ponto A, para três taxas de bombeamento e três fluidos de pressurização (Fluidos A, B e C).

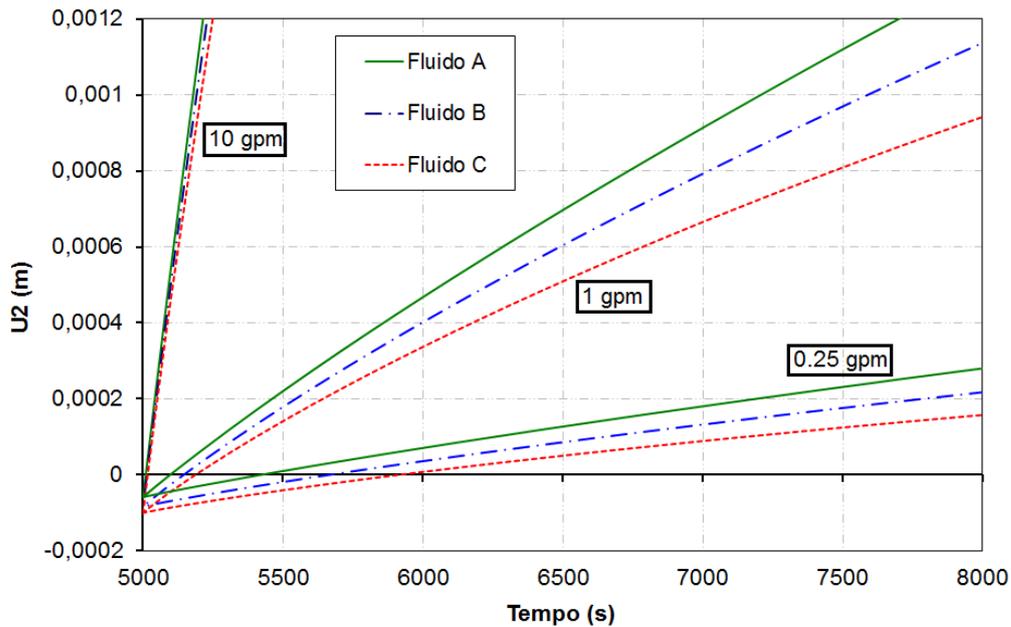


Figura 5.32: Variação do deslocamento no ponto A, para três taxas de bombeamento e três fluidos de pressurização (Fluidos A, B e C).

Na Figura 5.31, a alta taxa de bombeamento (10.0 gpm) aumenta a pressão de poros na parede do poço mais rapidamente do que a baixa taxa de bombeamento (0.25 gpm), o que resulta em um aumento lento da pressão do fluido. Também é possível observar que para o Fluido A, as pressões são maiores em relação aos outros fluidos (B e C), já que este fluido é mais viscoso.

O mesmo comportamento pode ser visto na Figura 5.32 para o deslocamento na parede do poço. Para todas as taxas de bombeamento os gráficos de pressão e deslocamento da parede do poço apresentam um comportamento linear. Analisando a Figura 5.32 observa-se que os maiores deslocamentos ocorrem para o fluido com maior viscosidade (Fluido A).

Finalmente, a pressão de *Leak-Off* foi calculada graficamente usando o critério descrito anteriormente.

As Figuras 5.33, 5.34 e 5.35, mostram a pressão de *Leak-Off* para as diferentes taxas de bombeamento 10.0, 1.0 e 0.25 gpm e para os diferentes fluidos de pressurização, respectivamente.

A continuação se mostram as figuras 5.33, 5.34 e 5.35 para os fluidos A, B e C, com uma taxa de bombeamento de 10.0 gpm. Nessas figuras são plotadas as curvas de pressão de fluido e tensão tangencial efetiva ao longo do tempo.

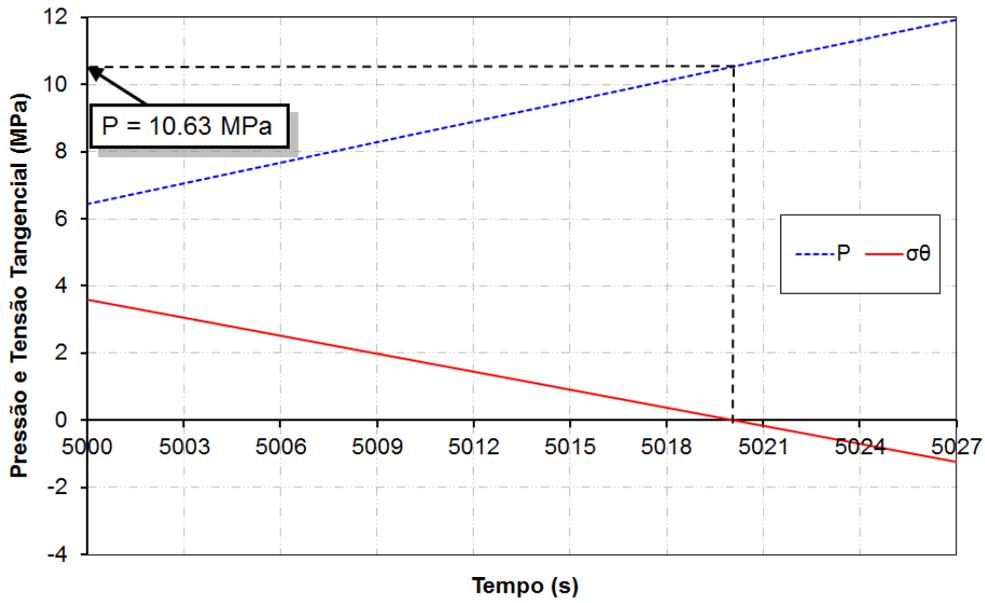


Figura 5.33: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 10.0 gpm (Fluido A).

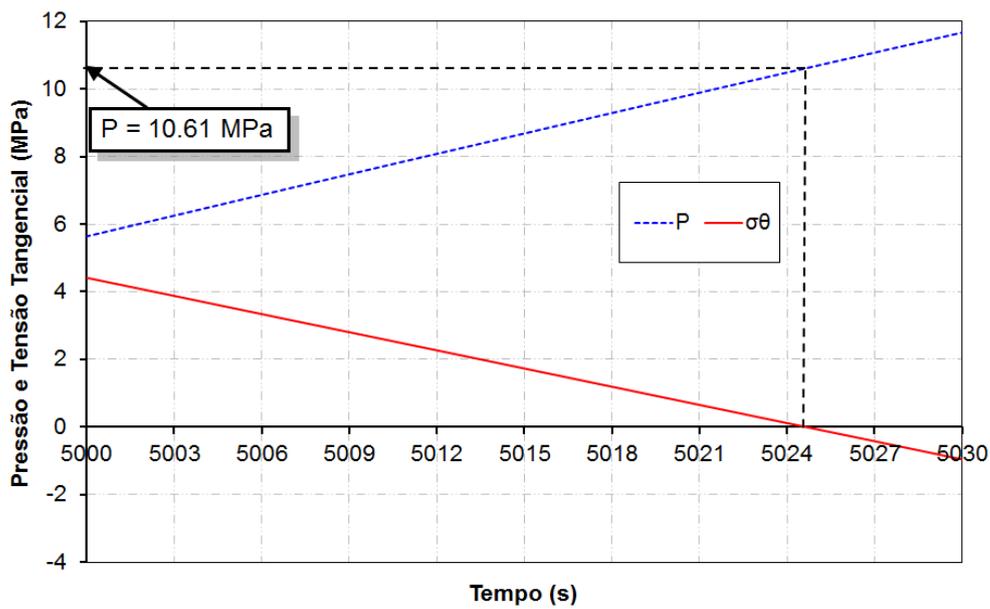


Figura 5.34: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 10.0 gpm (Fluido B).

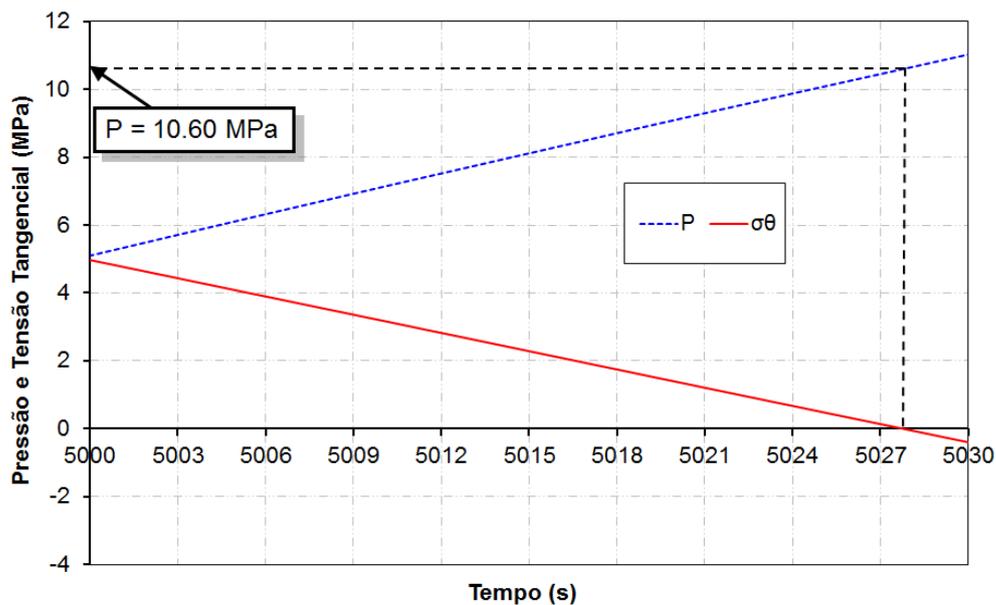


Figura 5.35: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 10.0 gpm (Fluido C).

Nas Figuras 5.33, 5.34 e 5.35 é possível observar uma linearidade na pressão de fluido e na tensão tangencial efetiva para todas as taxas de bombeamento.

Comparando as simulações realizadas com diferentes lamas base água (Fluido A, B e C) e água do mar, observou-se um aumento na pressão de *Leak-Off* de 4.2%, 4.1% e 3.9% para uma taxa de bombeamento de 10.0 gpm. A propriedade do fluido que tem maior influência na variação das tensões e pressões é a viscosidade.

A seguir se mostram as figuras 5.36, 5.37 e 5.38 para os fluidos A, B e C, com uma taxa de bombeamento de 1.0 gpm. Nessas figuras são plotadas as curvas de pressão de fluido e tensão tangencial efetiva ao longo do tempo.

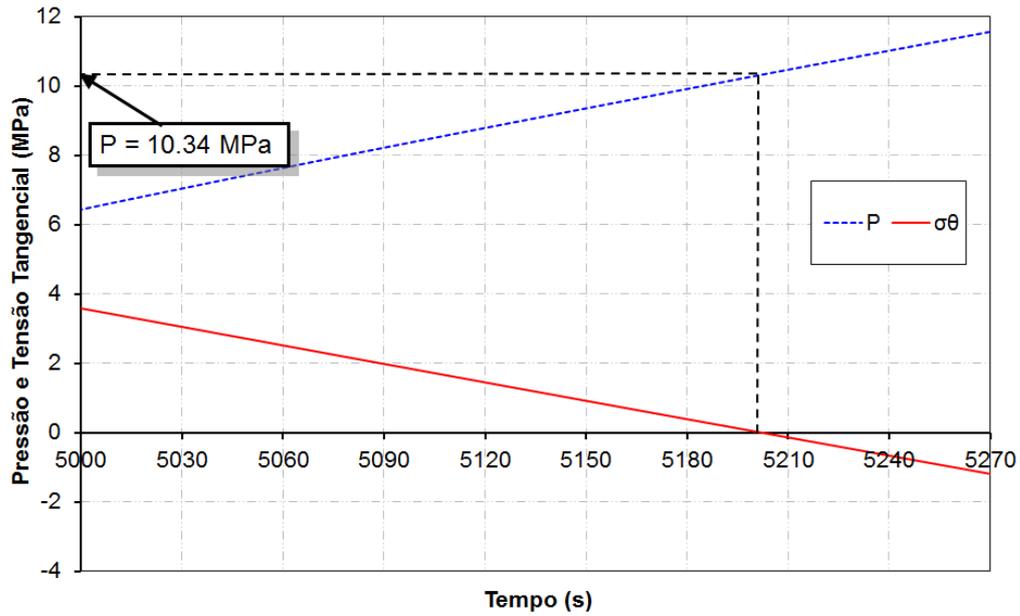


Figura 5.36: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 1.0 gpm (Fluido A).

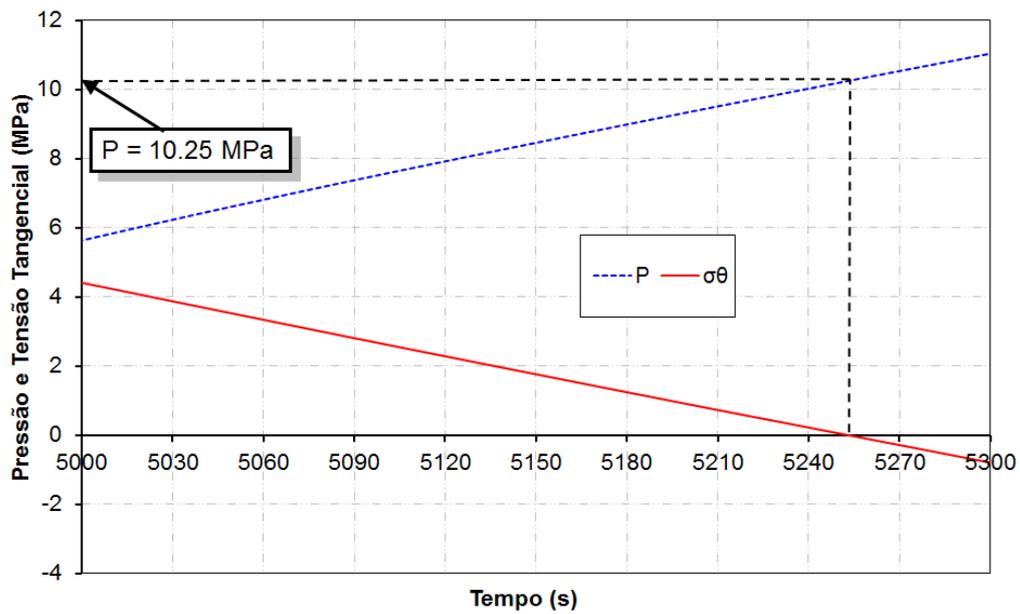


Figura 5.37: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 1.0 gpm (Fluido B).

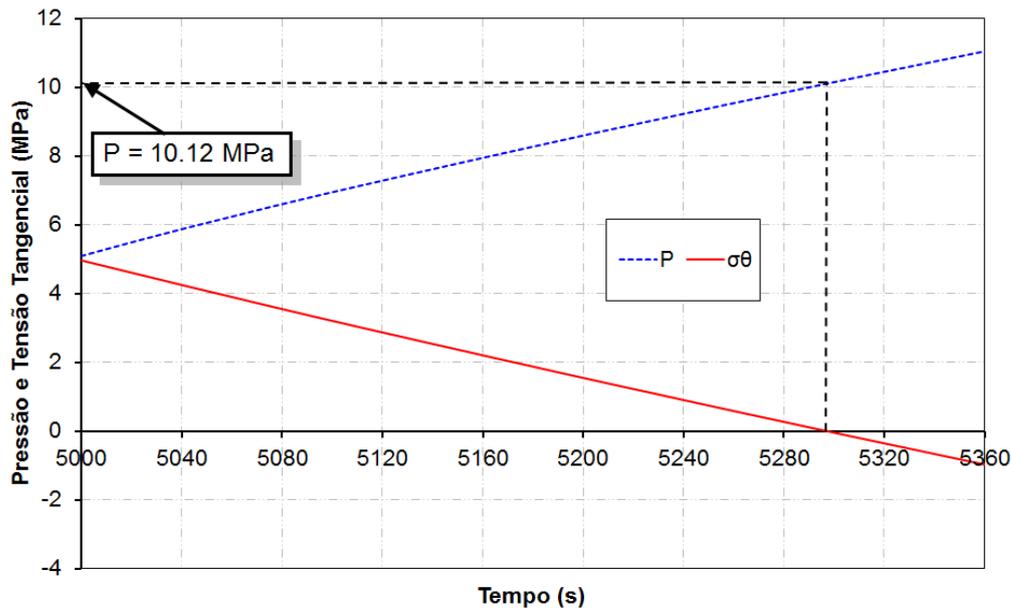


Figura 5.38: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 1.0 gpm (Fluido C).

Nas Figuras 5.36, 5.37 e 5.38 é possível observar uma linearidade na pressão de fluido e tensão tangencial efetiva para todas as taxas de bombeamento.

Comparando as simulações realizadas com diferentes lamas base água (Fluido A, B e C) e água do mar, observou-se um aumento na pressão de *Leak-Off* de 5.0%, 4.1% e 2.75% para uma taxa de bombeamento de 1.0 gpm.

A seguir se mostram as figuras 5.39, 5.40 e 5.41 para os fluidos A, B e C, com uma taxa de bombeamento de 0.25 gpm. Nessas figuras são plotadas as curvas de pressão de fluido e tensão tangencial efetiva ao longo do tempo.

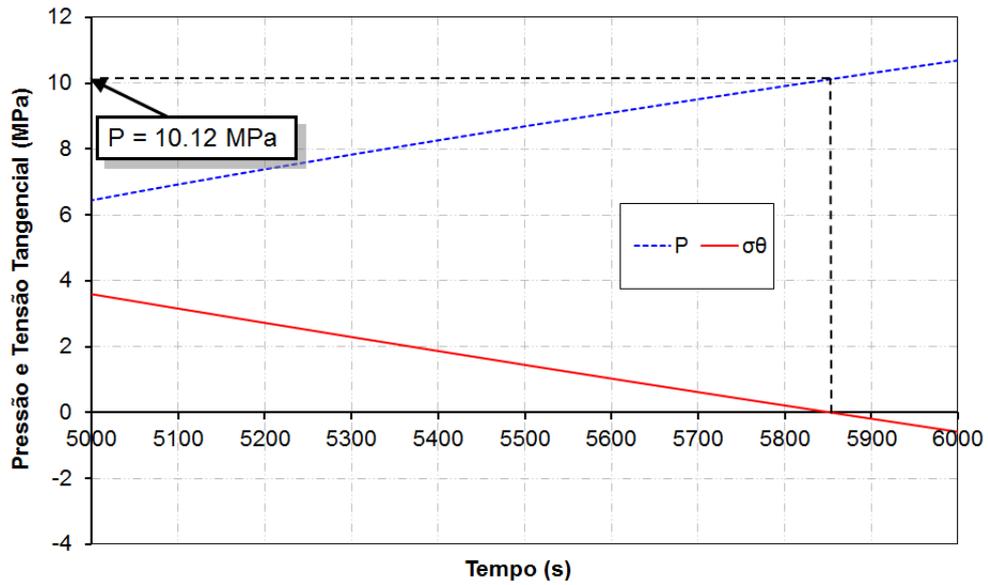


Figura 5.39: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 0.25 gpm (Fluido A).

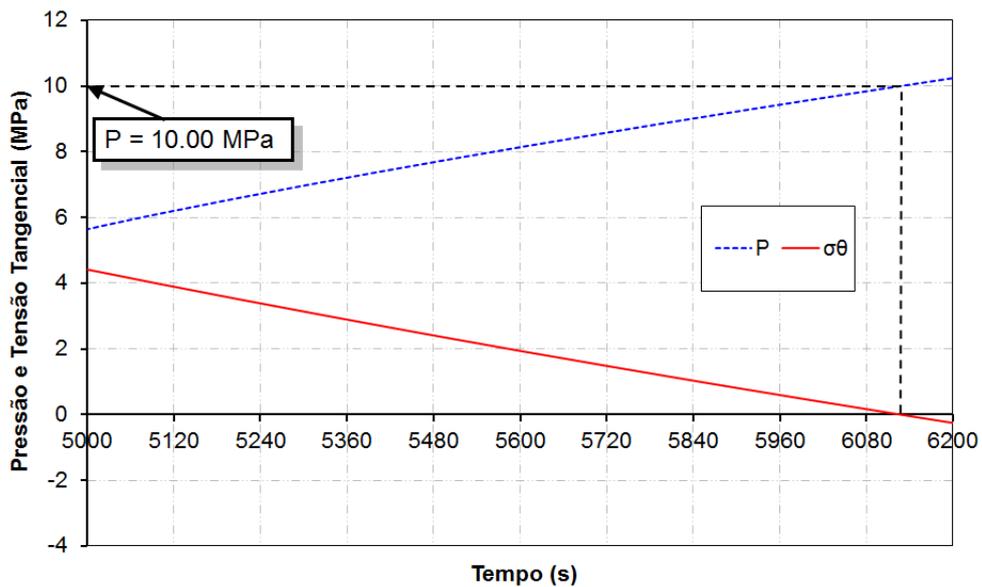


Figura 5.40: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 0.25 gpm (Fluido B).

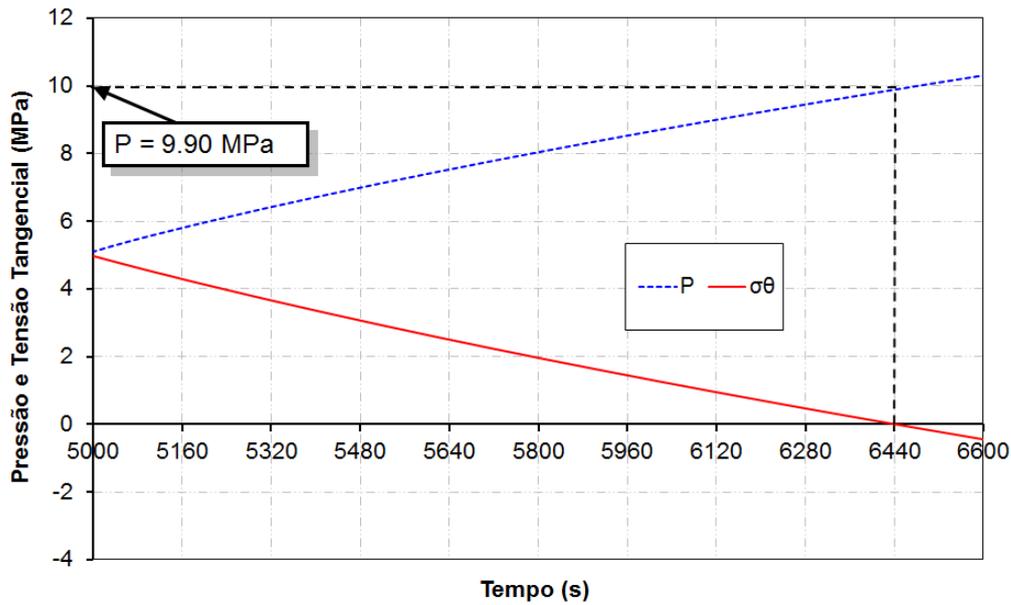


Figura 5.41: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 0.25 gpm (Fluido C).

Nas Figuras 5.39, 5.40 e 5.41 é possível notar uma linearidade na pressão de fluido e tensão tangencial efetiva para todas as taxas de bombeamento.

Comparando as simulações realizadas com diferentes lamas base água (Fluido A, B e C) e água do mar, observou-se um aumento na pressão de *Leak-Off* de 4.3%, 3.0% e 2.1% para uma taxa de bombeamento de 0.25 gpm. Portanto, pode-se concluir que à medida que a taxa de bombeamento diminuiu, a pressão de *Leak-Off* também apresenta uma redução.

Finalmente, na Figura 5.42 se mostra uma comparação das pressões e tensões tangenciais efetivas para os fluidos A, B e C, com uma taxa de bombeamento de 10.0 gpm.

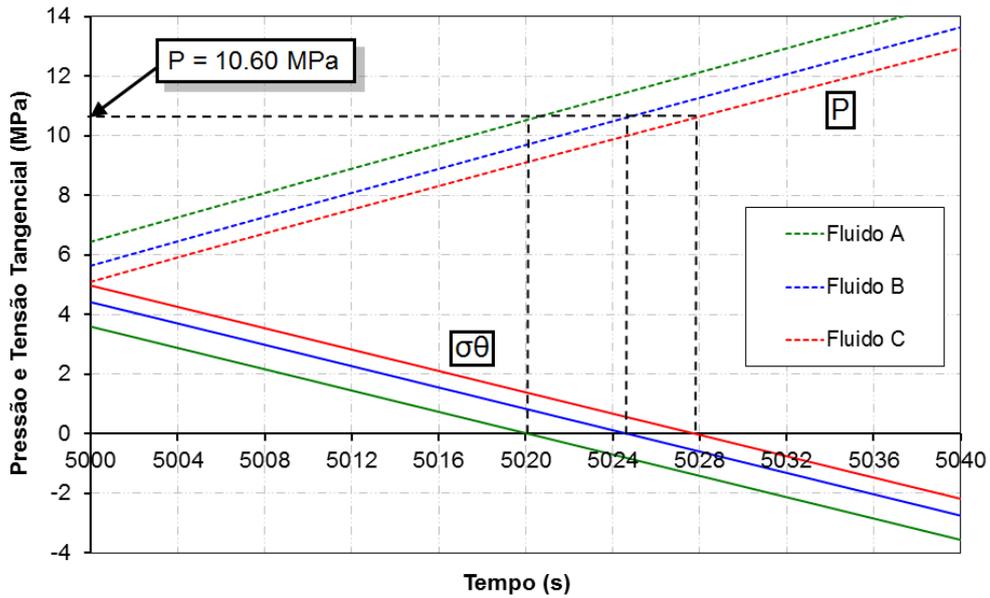


Figura 5.42: Comparação da pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 10.0 gpm e três fluidos de pressurização (Fluidos A, B e C).

Da Figura 5.42 é possível observar uma linearidade na pressão de fluido e tensão tangencial efetiva para todos os fluidos. Para o fluido mais viscoso e mais denso (Fluido A) a pressão de *Leak-Off* é atingida primeiramente do que para o fluido menos viscoso e menos denso (Fluido C).

O valor da pressão de *Leak-Off* é da ordem de 10.60 MPa (+/- 0.03 MPa) e não difere muito de um fluido para outro. Em relação a essas pequenas variações, pode-se argumentar que para altas taxas de bombeamento a viscosidade do fluido não interfere muito nos valores de pressão de *Leak-Off*.

Na Tabela 5.6 apresenta-se um resumo dos resultados de cada um dos casos analisados usando diferentes fluidos de pressurização.

Tabela 5.6: Comparação da pressão de *Leak-Off* usando vários fluidos de pressurização.

Taxa de Bombeamento (gpm)	Tipo de Fluido	Pressão de <i>Leak-Off</i> (MPa)	Diferenças (%)
10.0	Água do mar	10.20	-----
	A	10.63	4.2
	B	10.61	4.1
	C	10.60	3.9
1.0	Água do mar	9.85	-----
	A	10.34	5.0
	B	10.25	4.1
	C	10.12	2.75
0.25	Água do mar	9.70	-----
	A	10.12	4.3
	B	10.00	3.1
	C	9.90	2.1

As diferenças nos valores da pressão de *Leak-Off* são calculadas tomando como referência o fluido da análise poroelástica (água do mar), ou seja, a pressão de *Leak-Off* calculada usando o Fluido A com uma taxa de bombeamento de 10.0 gpm é 4.20% maior do que quando é utilizado um fluido como água do mar.

## 5.6.

### Caso 2: Rocha de Sal

Neste tópico, são descritas as hipóteses consideradas e os cálculos realizados, para realizar as simulações no programa (Abaqus) implementando um modelo com fluência.

Para realizar o cálculo das tensões *in situ*, se consideraram todas as camadas do material como isotrópicas. A primeira camada corresponde a lamina de água com seu respectivo peso específico e espessura. A segunda camada, chamada de “outros estratos” representa as camadas localizadas acima da rocha de sal. Por último, a camada da rocha de sal, com seu respectivo peso específico e espessura. Na Tabela 5.7 é mostrado o cálculo da tensão vertical de sobrecarga  $\sigma_z$ .

Tabela 5.7: Tensão de sobrecarga  $\sigma_z$  (Rocha de Sal)

Tipo de Material	Profundidade	Peso Específico	Tensão $\sigma_z$
Lâmina de água	0-150 m	10000 N/m <sup>3</sup>	1.5 MPa
Outros estratos	150 – 250 m	2200 N/m <sup>3</sup>	2.2 MPa
Rocha de Sal	250 – 460 m	2160 N/m <sup>3</sup>	4.45 MPa
Total de $\sigma_z$ na profundidade de estudo (460m) - Sal			<b>8.15 MPa</b>

Finalmente, se tem o valor da tensão de sobrecarga para a profundidade de estudo. Todas as tensões totais são consideradas iguais, com um valor igual a  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 8.15$  MPa.

A pressão da lama hidrostática neste trabalho foi calculada para uma profundidade de 460 m, e é igual a  $p_w = 5.48$  MPa. Em seguida, as tensões *in situ* são mostradas na Figura 5.43 e foram calculadas conforme apresentado na Tabela 5.5. Finalmente, na Tabela 5.8, são mostradas as propriedades do fluido de pressurização usado nesta simulação.

Tabela 5.8: Propriedades do fluido de pressurização (Rocha de Sal).

Propriedades	Valores
Viscosidade Dinâmica	$1.0030 \times 10.0^{-3}$ N.s/m <sup>2</sup>
Densidade	1000 kg/m <sup>3</sup>
Modulo Bulk do Fluido	$2.50 \times 10.0^9$ Pa

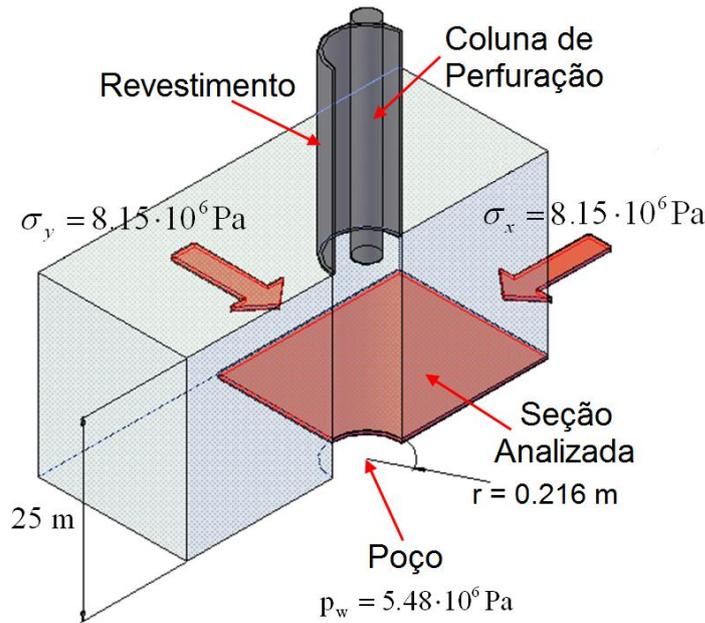


Figura 5.44: Visualização em 3D do modelo da rocha de sal – Modificada. (Inoue e Fontoura, 2010).

Na Figura 5.44, é apresentado um esquema geral do problema, onde são mostradas as tensões *in situ*, raio do poço, pressão da lama, pressão de poros, etc.

No programa é possível usar três leis de fluência (*creep*), lei de potência de endurecimento por deformação, lei de potência de endurecimento no tempo, e a lei do seno hiperbólico. Neste trabalho, foi introduzida uma nova lei de fluência com duplo mecanismo de deformação utilizando uma subrotina de FORTRAN (subrotina CREEP) no programa Abaqus. A subrotina CREEP recebe a tensão equivalente de Von Mises ( $q = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{S}:\mathbf{S})}$ , onde  $\mathbf{S}$  é o tensor das tensões desviadoras), mas o modelo de duplo mecanismo de deformação usa uma tensão efetiva ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ). Por isso, foi necessário utilizar a subrotina USDFLD e a rotina utilitária GETVRM para o cálculo da tensão efetiva que é utilizada na subrotina de fluência (CREEP).

### **5.6.1. Malha de Elementos Finitos (*Mesh*)**

A malha de elementos finitos adotada para esta análise é a mesma que foi usada na análise anterior (Figura 5.10). Neste caso a malha é composta por 480 elementos do tipo CPE4R para representar a rocha de sal, e 32 elementos do tipo CPE4P, para representar o material fictício. A diferença no tipo de elementos radica em que o elemento do tipo CPE4P, permite calcular deslocamento e pressão, e o elemento do tipo CPE4R permite calcular deslocamento, mas não permite calcular pressão.

Portanto, neste caso, não há simulação de fluxo de fluidos na formação, só apenas no material fictício.

### **5.6.2. Passos Para a Análise**

Novamente, foi considerada a perfuração vertical e o problema foi analisado utilizando a condição de deformação plana. Neste caso, a simulação numérica também foi realizada em três etapas. As etapas 1 e 3 (equilíbrio, perfuração e pressurização) são as mesmas da análise anterior, porém na etapa de perfuração, não é necessário atingir o equilíbrio entre a pressão do peso da lama e a pressão da formação, já que não há fluxo de fluido para a formação. No entanto, as condições de contorno de pressão de poros são aplicadas nos nós dos elementos virtuais para simular o peso da lama (condição hidrostática).

Na etapa de perfuração, será mostrada a influência dos elementos virtuais no fechamento na parede do poço.

### 5.6.3. Análise com Comportamento de Fluência

#### 5.6.3.1. Introdução

Para realizar esta análise, foi utilizado um modelo que considera a fluência. Este modelo tem duas componentes: uma elástica e uma componente de fluência, esta última foi introduzida por meio de uma subrotina no programa (Abaqus). Os parâmetros elásticos como: módulo de Young ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), junto com algumas propriedades da rocha são mostrados na Tabela 5.9. Nesta análise a rocha de sal é considerada impermeável.

Tabela 5.9: Propriedades da rocha de sal (Halita)

Propriedades	Valores
Módulo de Young	$2.04 \times 10^{10}$ Pa
Coefficiente de Poisson	0.36
Coesão	$3.0 \times 10^6$ Pa
Ângulo de Atrito	$43^\circ$

O peso de lama usado nesta simulação foi  $p_w = 5.48$  MPa, e os valores dos parâmetros usados na lei de fluência são (Costa *et al.*, 2005):

$$\sigma_0 = 9.91 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_0 = 1.88 \cdot 10^{-6}$$

$$n = 3.36 \text{ quando } \sigma_{ef} < \sigma_0$$

$$n = 7.55 \text{ quando } \sigma_{ef} \geq \sigma_0$$

$$T = 321 \text{ K (48}^\circ\text{C)}$$

$$T_0 = 359 \text{ K (86}^\circ\text{C)}$$

A continuação se mostram os resultados nas diferentes etapas da simulação, iniciando pela etapa de perfuração e finalizando na etapa de pressurização.

### 5.6.3.2. Etapa de perfuração

Os resultados do fechamento do poço usando elementos virtuais na etapa de perfuração foram verificados com um exemplo. Foram simulados dois casos, um sem condições de contorno de pressão prescritas (com e sem elementos virtuais) e outro com pressão prescrita (com e sem elementos virtuais), mostrados nas Figuras 5.45 e 5.46, respectivamente.

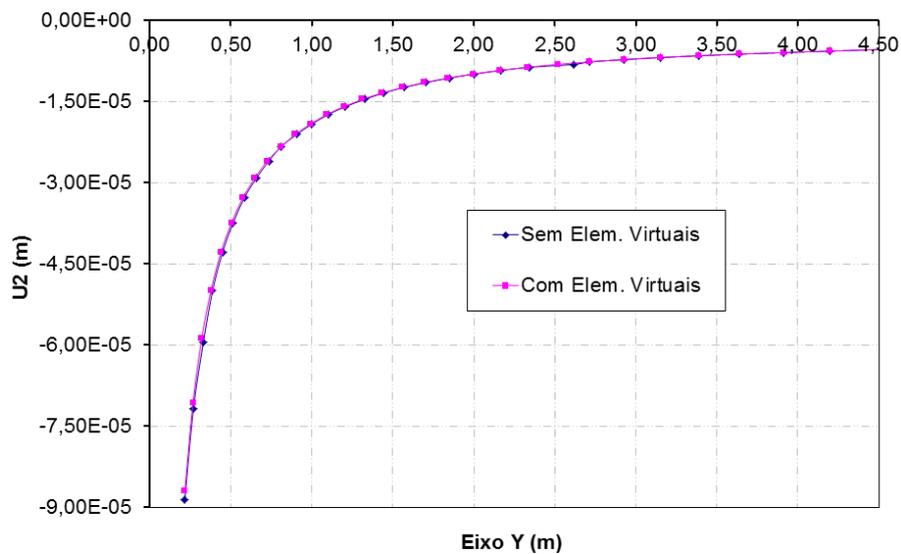


Figura 5.45: Comparação entre as malhas com e sem elementos virtuais, e sem pressão prescrita (sem lama).

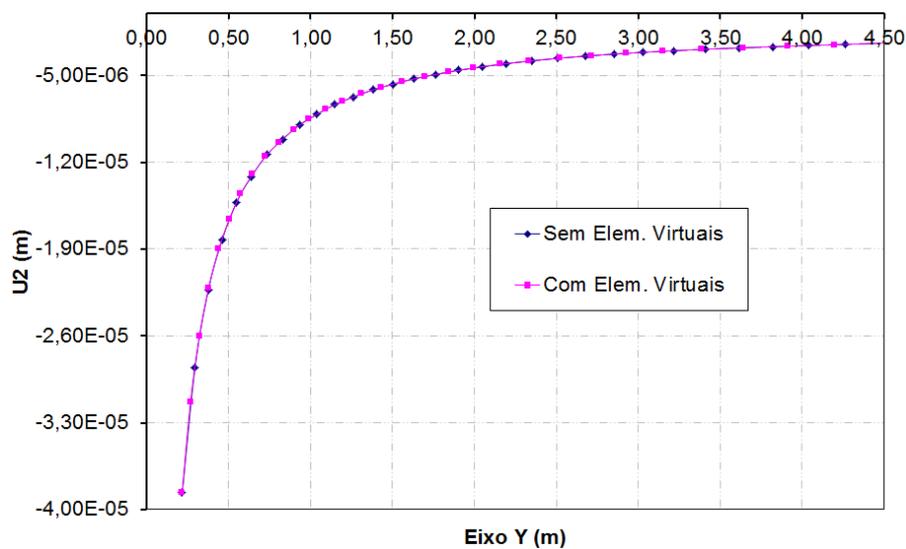


Figura 5.46: Comparação entre as malhas com e sem elementos virtuais, e com pressão prescrita (com lama).

Com as Figuras 5.45 e 5.46, verificamos que os elementos virtuais não restringem o fechamento da parede do poço, porque os elementos ao redor da parede do poço tem baixa rigidez. Os nós dos elementos virtuais têm deslocamento prescrito nulo, com o objetivo de não produzir um excesso de poro pressão devido à variação do estado de tensões.

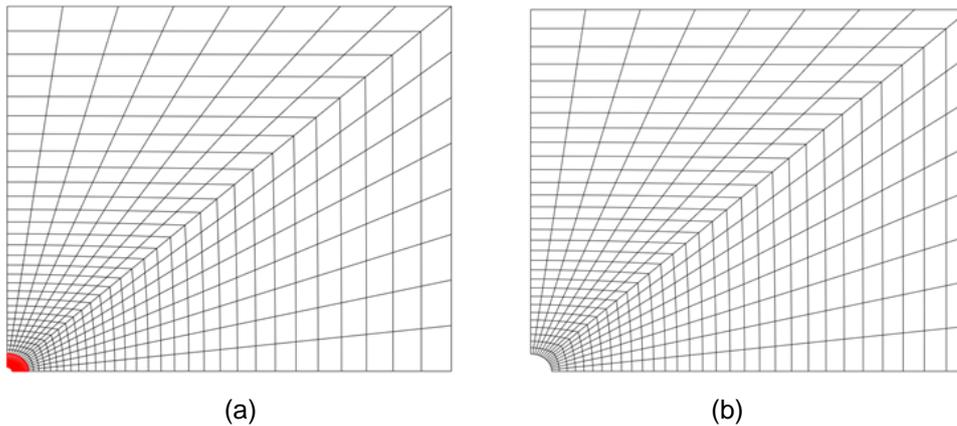


Figura 5.47: (a) Malha com elementos virtuais e (b) Malha sem elementos virtuais.

Na Figura 5.47 (a) e (b) mostram-se as malhas com e sem os elementos virtuais, respectivamente. O domínio do problema nos dois casos tem o mesmo tamanho, a diferença radica nas malhas.

### 5.6.3.3. Etapa de Pressurização

Esta etapa foi simulada considerando três taxas de bombeamento constantes de 0.25, 1.0 e 10.0 gpm, é importante ressaltar que o modelo constitutivo tem duas componentes: uma elástica e uma de fluência.

As Figuras 5.48 e 5.49 mostram a variação da pressão do fluido e do deslocamento no ponto A (parede do poço, como mostrado na Figura 5.10) para as três taxas de bombeamento, respectivamente. A etapa da pressurização começa no tempo de 5.000 s e finaliza no tempo de 10.000 s, o tempo total de simulação foi de 5.000 s (83 min).

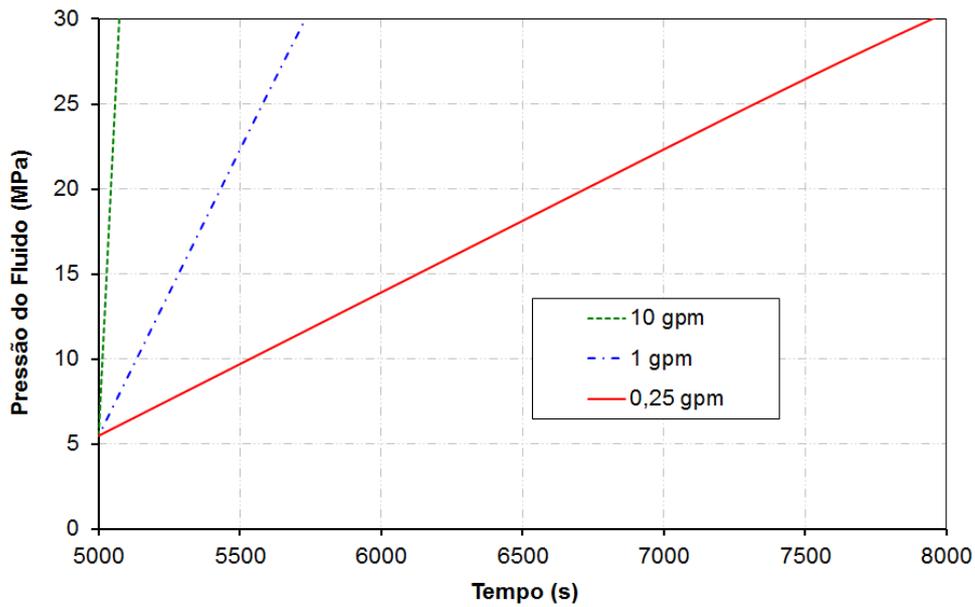


Figura 5.48: Variação da pressão do fluido no ponto A considerando três taxas de bombeamento.

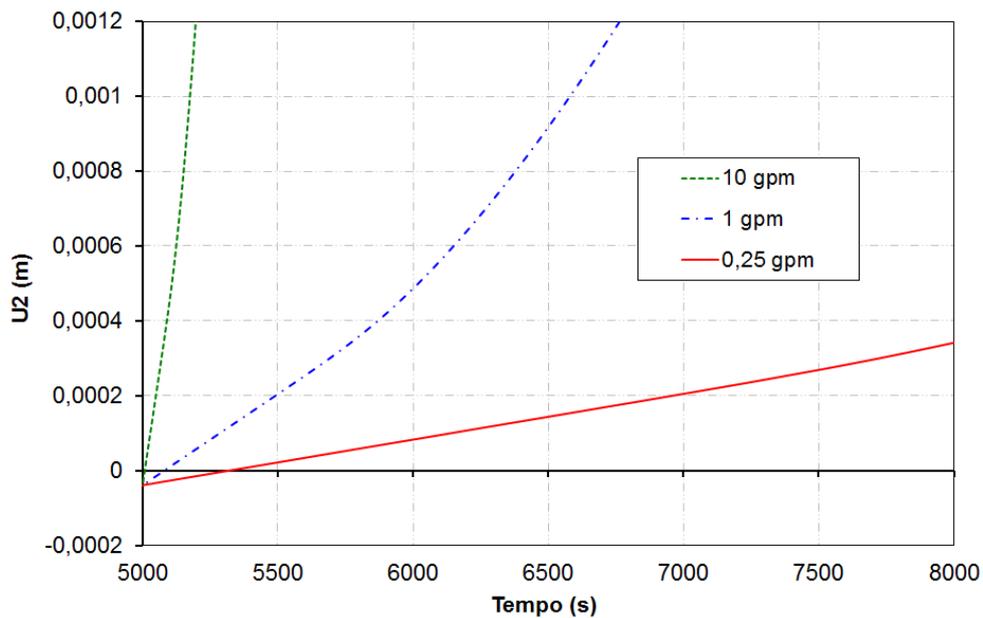


Figura 5.49: Variação do deslocamento no ponto A considerando três taxas de bombeamento.

Na Figura 5.48, a alta taxa de bombeamento (10.0 gpm) aumenta a pressão de poros na parede do poço mais rapidamente do que a baixa taxa de bombeamento (0.25 gpm), o que resulta em um aumento lento da pressão do fluido. O mesmo comportamento pode ser visto na Figura 5.49 para o deslocamento na parede do poço.

Para altas taxas de bombeamento os gráficos de pressão e deslocamento na parede do poço apresentam um comportamento linear, enquanto a taxa de bombeamento diminui o comportamento é mais ou menos linear.

As Figuras 5.15, 5.16 e 5.17, mostram a pressão de *Leak-Off* para as diferentes taxas de bombeamento 10.0, 1.0 e 0.25 gpm, respectivamente. Nas figuras são plotadas as curvas de pressão de fluido e tensão tangencial efetiva ao longo do tempo.

A continuação se mostram várias figuras considerando um modelo com fluência e outro com comportamento elástico, com as três taxas de bombeamento constante. A curva para calcular a pressão de *Leak-Off* é analisada até o ponto onde a tensão tangencial atinge um valor nulo.

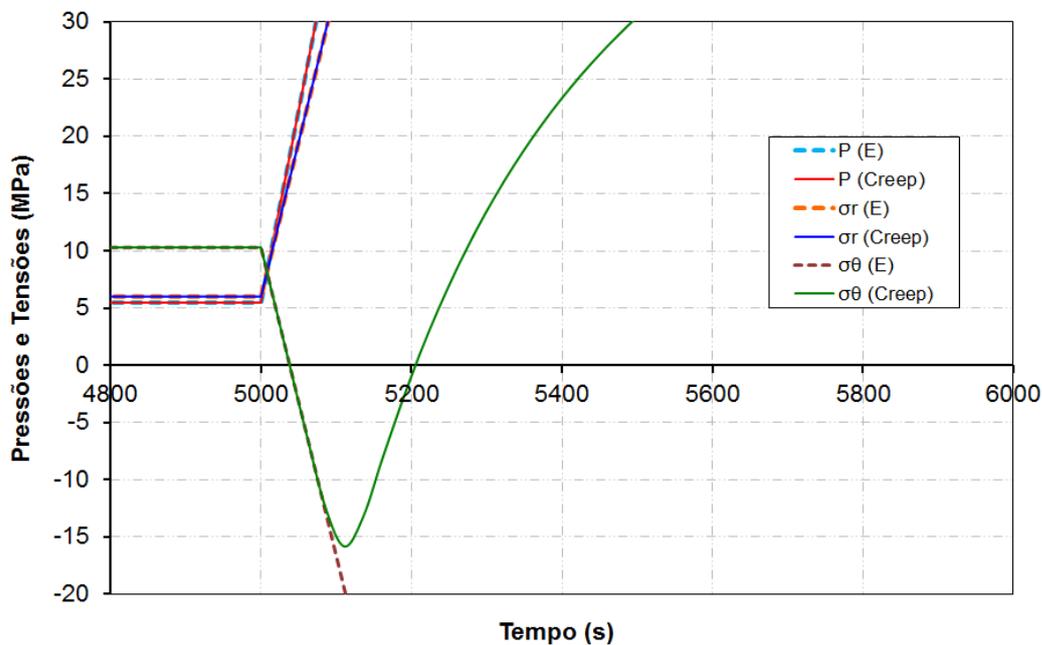


Figura 5.50: Variação das tensões e pressão de fluido ao longo do tempo, considerando uma taxa de bombeamento constante de 10.0 gpm.

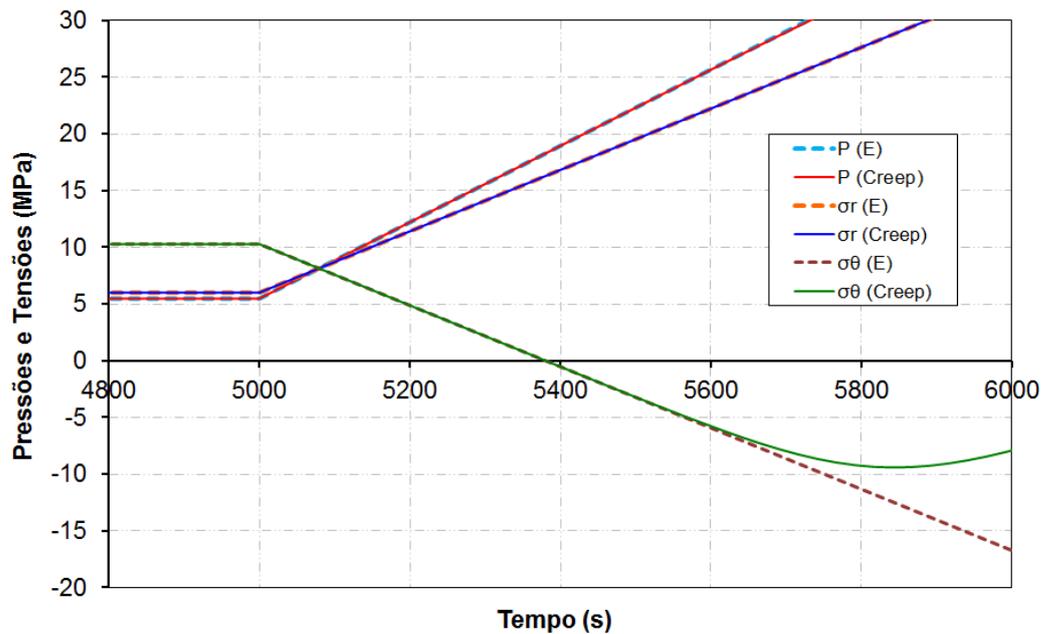


Figura 5.51: Variação das tensões e pressão de fluido ao longo do tempo, considerando uma taxa de bombeamento constante de 1.0 gpm.

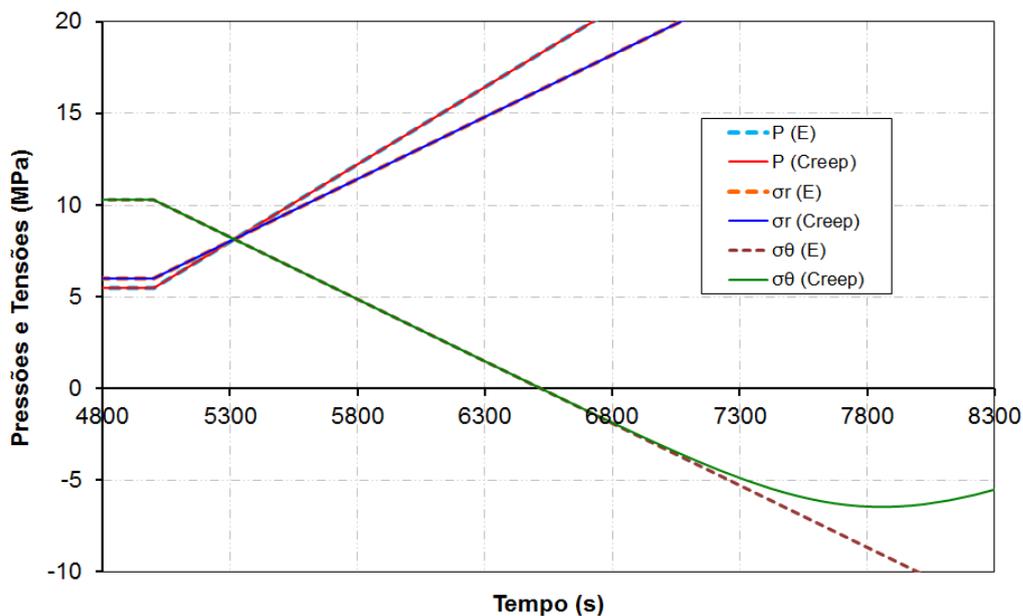


Figura 5.52: Variação das tensões e pressão de fluido ao longo do tempo, considerando uma taxa de bombeamento constante de 0.25 gpm.

As Figuras 5.50, 5.51 e 5.52 mostram a variação da pressão do fluido, tensão radial efetiva e tensão tangencial efetiva ao longo do tempo, considerando as duas componentes do modelo constitutivo e as três taxas de bombeamento constante. As curvas obtidas da simulação usando a lei de

fluência mostram um comportamento não linear, enquanto que as curvas obtidas com a lei elástica mostram um comportamento linear.

Finalmente, foi calculada a pressão de *Leak-Off*, a qual é obtida graficamente, quando a tensão tangencial efetiva é igual a zero, nesse caso a pressão é considerada igual à pressão de *Leak-Off*. Este critério foi o mesmo utilizado para a rocha permeável.

Para as Figuras 5.53, 5.55 e 5.57, é considerado que a formação rochosa tem um comportamento de fluência e para as Figuras 5.54, 5.56 e 5.58, é considerado que a formação rochosa tem um comportamento elástico.

A continuação, a sequência das figuras corresponde às taxas de bombeamento de 10.0 gpm, 1.0 gpm e 0.25 gpm, respectivamente.

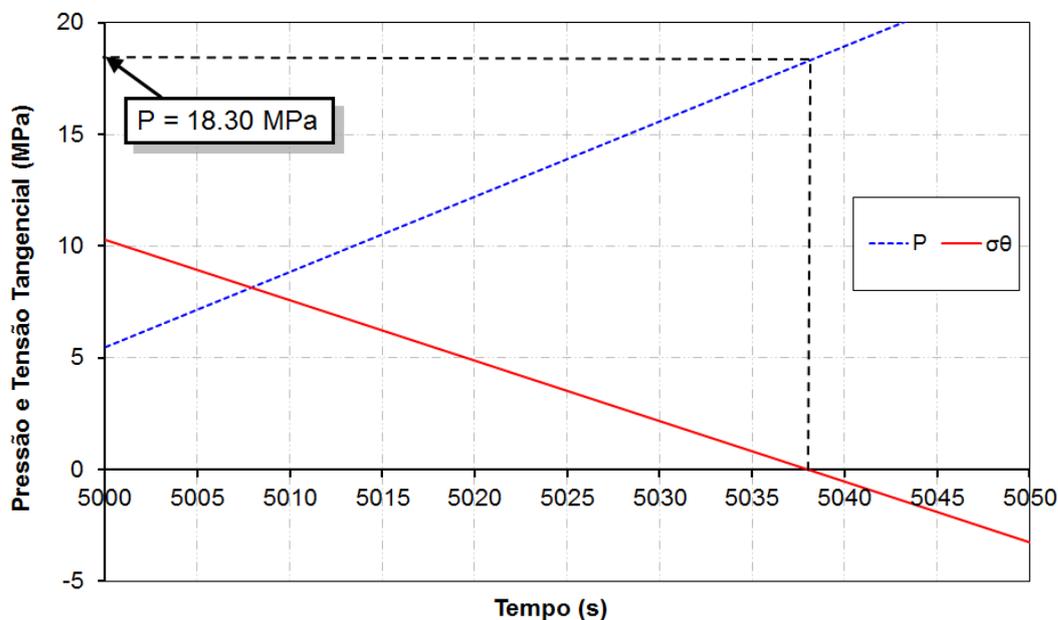


Figura 5.53: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 10.0 gpm.

Os resultados, das figuras seguintes correspondem a uma taxa de bombeamento de 1.0 gpm.

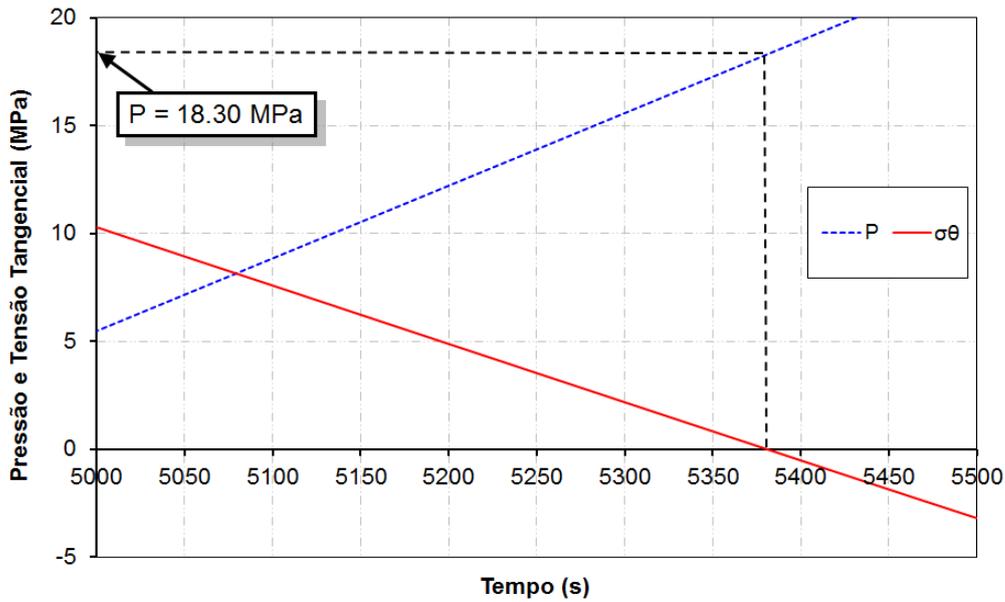


Figura 5.54: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 1.0 gpm.

Os resultados, das figuras seguintes correspondem a uma taxa de bombeamento de 0.25 gpm.

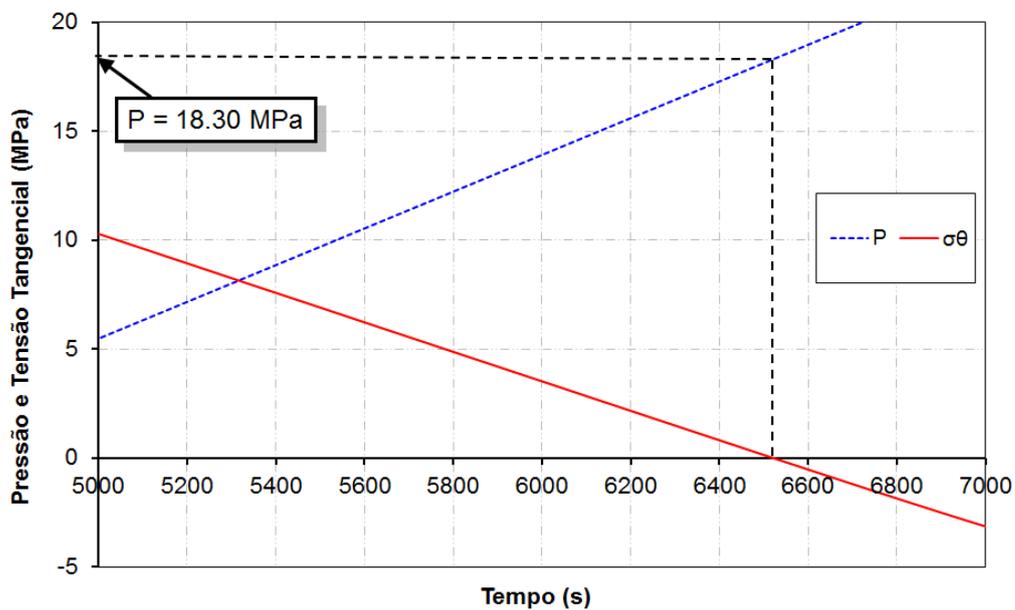


Figura 5.55: Pressão de *Leak-Off* para uma taxa de bombeamento constante de 0.25 gpm.

Analisando desde a Figura 5.53 até 5.55, observa-se que o valor da pressão de *Leak-Off* é independente da taxa de bombeamento. Esta taxa neste

caso só afeta o tempo para atingir a pressão de *Leak-Off*, porém, pode-se argumentar que para altas taxas de bombeamento a pressão de *Leak-Off* será atingida mais rapidamente do que quando são utilizadas baixas taxas de bombeamento.

Usando uma lei de fluência um valor nulo da tensão tangencial efetiva é atingido no mesmo tempo quando é usada uma lei elástica.