

4

MODELAGEM DA FLUÊNCIA EM EVAPORITOS UTILIZANDO A ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO PLANA

Neste capítulo, são descritas as modelagens computacionais realizadas no Abaqus utilizando a análise de deformação plana para prever o comportamento elástico e, sobretudo, o provocado pela fluência do sal até o instante que este corpo salino for isolado pelo revestimento.

No início do capítulo estão explicados os pontos relevantes para a criação da malha e do modelo propriamente dito, abordando as condições de contorno e os parâmetros utilizados nas formulações. É feita também uma validação do programa Abaqus com o emprego das equações elásticas de Kirsch e Bradley. Por fim, estão apresentados e discutidos os resultados das simulações numéricas, em que se analisam os deslocamentos, deformações e tensões na parede do poço e na sua vizinhança.

Utilizou-se o programa de elementos finitos Abaqus para todas as modelagens de fluência, tanto na versão “*time hardening*” como na versão “*strain hardening*”, ambas já explicitadas nos itens 3.5.1 e 3.5.2, respectivamente.

4.1. Estudo de Caso

Simulou-se o caso da perfuração de um poço de petróleo de 0,31m ($12\frac{1}{4}$ ”) de diâmetro numa seção em 2D (duas dimensões) situada na camada de sal. A profundidade de estudo foi de 6000m abaixo do nível do mar, em que foram consideradas algumas características, apresentadas na Tabela 4-1 com base na estratigrafia típica da Bacia de Santos. A motivação deste estudo de caso se deu pela recente confirmação da descoberta de reservatório de alta produtividade de petróleo leve numa camada “pré-sal”.

Para repassar as tensões à seção do poço na simulação numérica, as camadas superiores foram definidas em três regiões. A primeira é a lâmina de água com seu respectivo peso específico e espessura de 2000m. Para efeito de cálculo, utilizou-se em todas as simulações o peso específico de 8,5 lb/gal (1018,52 kg/m³) para a água do mar, que foi extraído dos exemplos do livro de

Rocha & Azevedo (2007). Segundo os autores, as massas específicas da água do mar variam entre 1000 e 1040 kg/m³.

Tabela 4-1: Estratigrafia do estudo de caso.

Tipo de material	Peso Específico	Profundidade
Lâmina de água	8,5 lb/gal = 1018,52 kg/m ³	0 m a -2000 m
Outros estratos	1 psi/ft = 2306,66 kg/m ³	-2000 m a -4000 m
Estrato de sal	2160 kg/m ³	-4000 m a -6500 m

A segunda região, denominada de “outros estratos”, representa as camadas localizadas acima da camada de sal. Foi calculado o repasse de tensões de 2000m de “outros estratos” para o corpo salino. Para tanto, foi considerada uma densidade média de 1 (psi/ft), valor que é aceito como o ideal para simular o gradiente de sobrecarga destes “outros estratos” na indústria de petróleo.

Por último, o estrato de sal de 2500m com seu respectivo peso específico. Segundo diversos estudos, a variação da densidade do sal com a profundidade é bastante pequena na região do Golfo do México. De acordo com a literatura, a massa específica do sal varia entre 2150 e 2200 Kg/m³ (Medeiros, 1999). Adotou-se, em todos os cálculos, o valor de massa específica de 2160 Kg/m³ (Mackay et al, 2007). Vale ressaltar que a profundidade de estudo nesta análise de deformação plana é de 6000m.

Para estudar o comportamento do poço de sal nessa profundidade de estudo, esta simulação se baseia no estado de deformação plana, em que a malha foi construída em 2D. As tensões e os deslocamentos foram analisados sem e com fluido de perfuração. O estrato de sal foi modelado, sendo considerado o comportamento de fluência (“*creep*”). Para realizar essa experiência, foi utilizado o método dos elementos finitos por meio do programa Abaqus.

4.2. Dados da Malha

Foi construída uma malha de elementos finitos em 2D, composta por 234 elementos e 248 nós para simular o comportamento de fluência no poço de sal por uma análise de deformação plana. Esta malha tem a principal característica de discretizar ¼ das dimensões totais do problema conforme Figura 4-1, que

apresenta uma representação esquemática da seção analisada. Nesta figura, no caso da análise de deformação plana, considera-se que as dimensões não cotadas no desenho são infinitas de acordo com as indicações das setas para cima e para baixo.

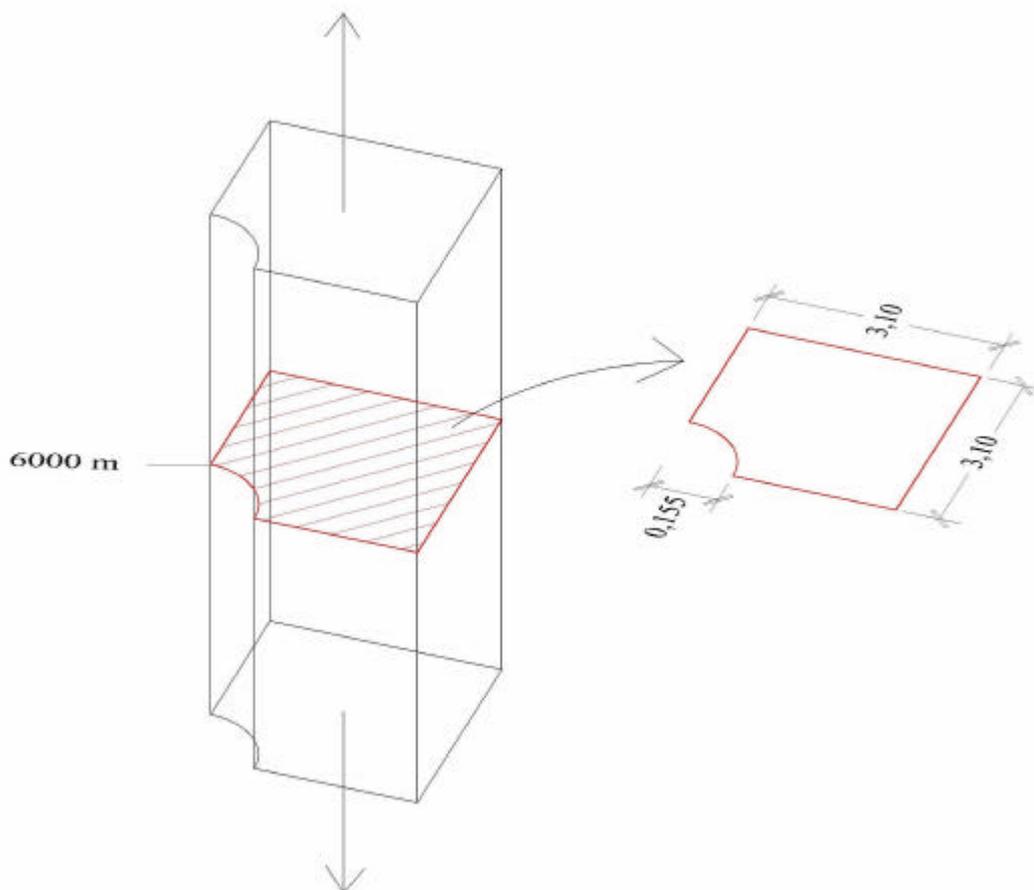


Figura 4-1: Representação esquemática da seção analisada em vermelho (sem escala).

Adotou-se o tamanho da malha igual a 20 vezes o raio do poço. Uma vez que o raio é igual a 0,155m ($6 \frac{1}{8}$ "), $20 \cdot r$ é igual a 3,10 m. Sendo assim, as dimensões da malha utilizada são de 3,10m x 3,10m. Na Figura 4-2a é apresentada a malha de elementos finitos para a simulação da perfuração do poço, na qual os elementos azuis representam o corpo salino. Na Figura 4-2b pode ser visto o "zoom" da figura anterior com o objetivo de mostrar o tipo de elemento que foi usado no poço, representado pela cor branca.

O motivo pelo qual se adotou 20 vezes o raio é que nesta distância as tensões induzidas pela perfuração são as mesmas que as tensões "in situ". Tal fato foi verificado por meio de simulações de validação do programa Abaqus e serão apresentadas posteriormente na Figura 4-5 e na Figura 4-6.

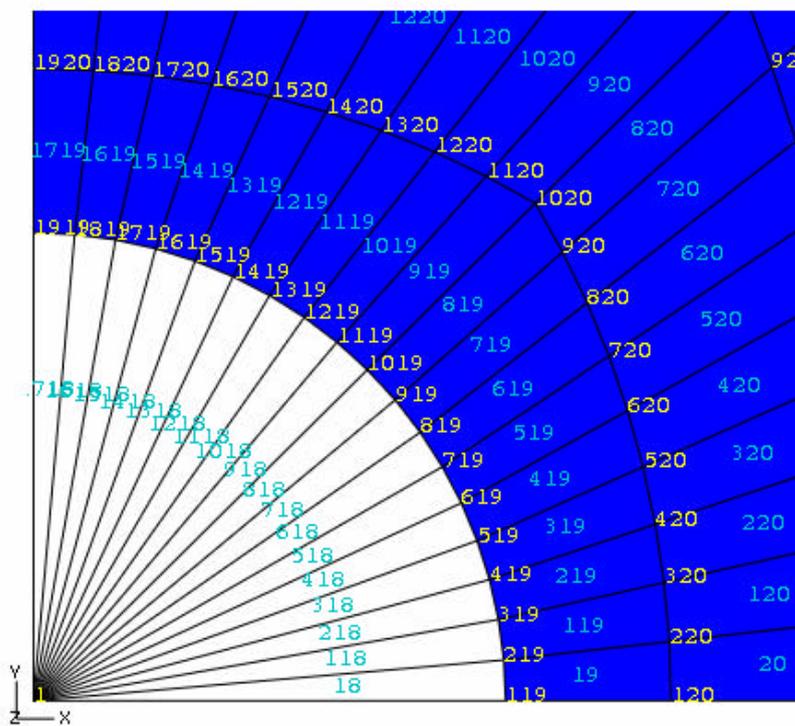
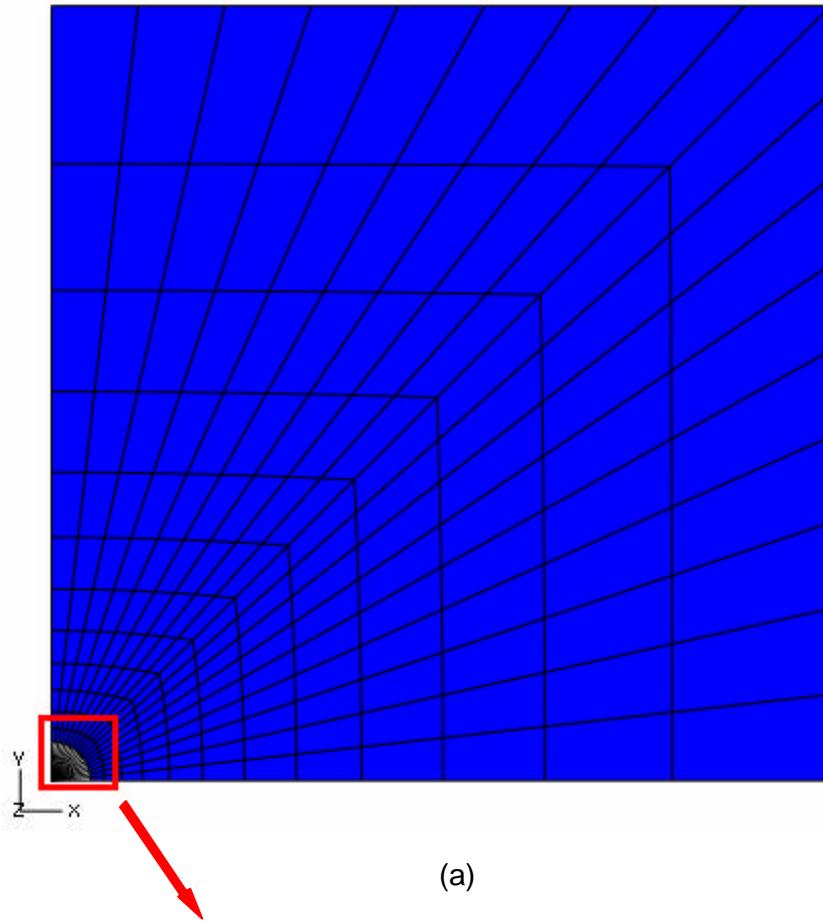


Figura 4-2: Malha de Elementos Finitos utilizada na simulação numérica (a) vista geral de toda a malha (b) “zoom” da malha na região do poço.

Pode-se observar que foram utilizados dois tipos de elementos finitos para simular o estrato de sal, totalizando 234 elementos. Na zona a perfurar (ou seja, do centro do poço até o perímetro do poço), foram utilizados 18 elementos finitos triangulares lineares de 3 nós (elementos brancos), intitulados de CPE3 no Abaqus. Foi escolhido este elemento por causa das seguintes características:

C: “continuum stress/displacement” – meio contínuo em análises de tensão/deslocamento;

PE: “plane strain” – deformação plana;

3: número de nós.

Por outro lado, no resto da malha foram utilizados 216 elementos quadriláteros bilineares de 4 nós (elementos azuis), denominados de CPE4. Esses dois tipos de elementos utilizados na análise de deformação plana podem ser visualizados na Figura 4-3. Nesta figura também podem ser observados os pontos de integração, que estão representados dentro dos elementos por “x”. Como os elementos triangulares são removidos para simular a escavação, todos os cálculos são feitos para os elementos quadriláteros.

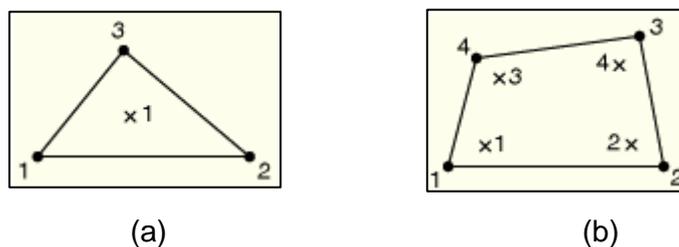


Figura 4-3: (a) elemento de 3 nós. (b) elemento de 4 nós.

Foi feito um maior refinamento na malha próxima ao perímetro do poço (ver Figura 4-2a), onde são esperadas as maiores variações de tensões, deformações e deslocamentos. Este grau de refinamento diminui à medida que se afasta do raio do poço, onde são esperados menores variações de tensões, deformações e deslocamentos.

Ainda na Figura 4-2, os eixos estão representados pelas letras x, y e z que são iguais aos sentidos 1, 2 e 3 da Figura 4-4, respectivamente. Na Figura 4-4 podem ser observadas também as condições de contorno. Nos nós do extremo esquerdo e da parte inferior da malha, foram impedidos os deslocamentos nas direções 1 e 2, respectivamente, para simular a reciprocidade do poço de sal assim como da malha como um todo. Também podem ser observadas, nesta

figura, as tensões de sobrecarga atuantes no modelo para simular as tensões “in situ”, como está explicitado no item subsequente.

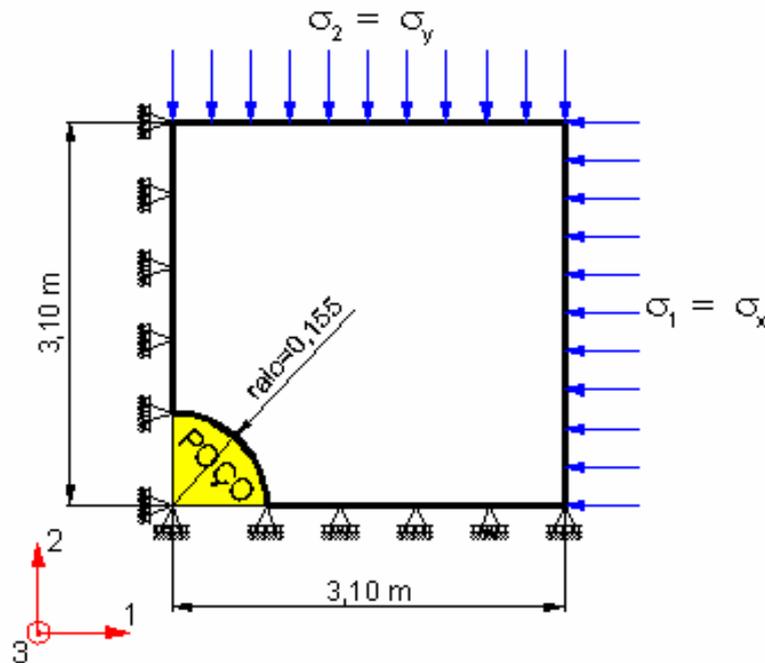


Figura 4-4: Representação esquemática das condições de contorno (sem escala).

4.3. Tensões de Sobrecarga

Para o cálculo das tensões in situ, considerou-se o caso isotrópico do material. A Tabela 4-2 mostra os valores do cálculo de tensões até a profundidade de estudo de 6000m abaixo do nível do mar, já que é a profundidade considerada nas simulações deste capítulo. As tensões “in situ” nas direções 1 e 2 aplicadas à seção de estudo têm o mesmo valor que a tensão vertical s_z , apresentada na Tabela 4-2. Isto porque foi idealizado um caso isotrópico de tensões; então, as tensões nas direções 1, 2 e 3 numa determinada profundidade seriam iguais ($s_x = s_y = s_z$).

Tabela 4-2: Tensão de sobrecarga (σ_z) na direção 3.

Tipo de material	Profundidade	Peso Específico	Tensão (s_z)
Lâmina de água	0 m a -2000 m	1018,52 kg/m ³	19,98 MPa
Outros estratos	-2000 m a -4000 m	2306,66 kg/m ³	45,24 MPa
Estrato de sal	-4000 m a -6000 m	2160 kg/m ³	42,36 MPa
Total de σ_z na profundidade de estudo (6000 m) =			107,58 MPa

4.4. Parâmetros utilizados

A simulação do *creep* no Abaqus possui duas fases: a fase elástica e fase de fluência. Os parâmetros elásticos e as constantes empíricas na fase de fluência são definidos a seguir.

4.4.1. Parâmetros elásticos

Os parâmetros elásticos utilizados nas modelagens foram extraídos de ensaios realizados em amostras de sal da mineração de Taquari Vassouras no Estado de Sergipe, constituído somente de halita, uma das premissas desta simulação:

$$E = 2,04 \text{ E}+07 \text{ KPa};$$

$$\nu = 0,36.$$

Estes valores de Módulo de Young ou Módulo de Elasticidade (E) e de Coeficiente de Poisson (ν) também foram utilizados em diversos estudos relacionados à fluência em evaporitos, tais como Costa (1984, 1997, 2005), Gravina (1997), Medeiros (1999) e Poiate (2006).

Como o sal tem comportamento isotrópico, estas propriedades elásticas são definidas por um único Módulo de Young e Coeficiente de Poisson, válidos para todos os elementos deste modelo em qualquer direção.

4.4.2. Constantes empíricas

Como citado anteriormente, o sal tem o comportamento de fluência, ou “*creep*”. Para simular este comportamento, utilizou-se o modelo “*Power-law model*” do Abaqus, apresentado no subitem 3.5.

Resgatando as duas formulações do Abaqus apresentadas nos itens 3.5.1 e 3.5.2, na versão “*time hardening*” (3.40) e na versão “*strain hardening*” (3.42), respectivamente, têm-se três constantes que precisam ser definidas: A, n e m.

$$\dot{\epsilon}^f = A \tilde{q}^n t^m \quad (3.40)$$

$$\dot{\epsilon}^f = \left(A \tilde{q}^n \left[(m+1) \epsilon^{cr} \right]^m \right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (3.42)$$

As definições dos valores destas constantes foram feitas a partir dos parâmetros determinados por Bradshaw & Macclain, em 1971, para o projeto de Salt Vault, uma mina de sal na cidade de Lyons, Kansas, Estados Unidos, no qual foi utilizada também uma lei de fluência potencial para o regime transiente (Medeiros, 1999):

$$\dot{\epsilon}^f = 1,3 \cdot 10^{-37} T^{9,5} \cdot q^{3,0} \cdot t^{0,3}, \quad (4.1)$$

em que:

T é a temperatura em K;

q é a tensão equivalente em psi;

t é o tempo em horas.

Segundo o estudo acerca de Evaporitos na Bacia de Campos elaborado por Oliveira et al (1985), o gradiente geotérmico médio é de 23,6 °C/Km. As simulações numéricas foram feitas a uma profundidade de 4000 metros abaixo do fundo do mar. Sendo assim, a temperatura nesta profundidade pode ser obtida da seguinte forma:

$$T = 23,6 \frac{^{\circ}C}{Km} \cdot 4Km = 94,4^{\circ}C = 367,55K$$

Substituindo a temperatura encontrada a 4 km de profundidade na equação 4.1, tem-se:

$$\dot{\epsilon}^f = 3,051 \cdot 10^{-13} \cdot q^{3,0} \cdot t^{0,3} \quad (4.2)$$

A equação 4.2 pode ser reescrita, considerando o tempo em segundos e a tensão em Pascal da seguinte forma:

$$\dot{\epsilon}^f = 7,979 \cdot 10^{-26} \cdot q^{3,0} \cdot t^{0,3} \quad (4.3)$$

Derivando a equação 4.3 em função do tempo para se obter a taxa de deformação de fluência, tem-se:

$$\dot{\epsilon}^f = 2,3937 \cdot 10^{-26} \cdot q^{3,0} \cdot t^{-0,7} \quad (4.4)$$

Comparando a equação 4.4 com a 3.40, puderam-se obter as constantes empíricas que serão utilizadas nas simulações numéricas no Abaqus:

$A = 2,3937 \text{ E } -26$;

$n = 3,0$;

$m = -0,7$.

4.5. Etapas

A simulação foi dividida em três etapas ou “*steps*”. Antes da primeira etapa, nas condições iniciais, aplica-se o estado de tensão. O primeiro *step* se refere ao uso da função *geostático* do Abaqus, que é equivalente a uma força externa. Utiliza-se este artifício para que haja um equilíbrio entre o estado de tensão e a força externa. Foi empregado o valor de 107,58MPa, obtido a partir do cálculo da tensão vertical calculada na Tabela 4-2.

O segundo “*step*” é a desativação dos elementos triangulares que compõem o poço para simular justamente a perfuração do poço. Neste mesmo *step* são simuladas a resposta elástica e a introdução das pressões provocadas pelo peso do fluido de perfuração na parede do poço. Na Tabela 4-3 apresentam-se os valores equivalentes de tensões na profundidade de estudo para cada peso de fluido de perfuração.

Tabela 4-3: Pressões provocadas pelo fluido de perfuração para a profundidade de estudo de 6000 m (19685 ft).

Peso do fluido de perfuração	Pressão do fluido de perfuração
9 ppg = 0,47 psi/ft	9252 psi = 63,79 MPa
9,5 ppg = 0,49 psi/ft	9646 psi = 66,50 MPa
10 ppg = 0,52 psi/ft	10236 psi = 70,57 MPa
10,5 ppg = 0,54 psi/ft	10630 psi = 73,29 MPa
11 ppg = 0,57 psi/ft	11220 psi = 77,36 MPa
11,5 ppg = 0,60 psi/ft	11811 psi = 81,43 MPa
12 ppg = 0,62 psi/ft	12205 psi = 84,15 MPa
12,5 ppg = 0,65 psi/ft	12795 psi = 88,21 MPa
13 ppg = 0,67 psi/ft	13189 psi = 90,93 MPa

No terceiro “*step*” finalmente se ativa a fase do “*creep*”. Nesta etapa, foi considerado um tempo de estudo de 30 dias para todas as simulações. Isto significa que se pode analisar o comportamento do evaporito desde a escavação até o 30º dia. Adotou-se este prazo, pois o presente trabalho tem como finalidade prever o comportamento de um poço de petróleo em uma zona de sal até o instante em que o corpo de sal for isolado por meio da descida do revestimento. Normalmente a escala de tempo para esta fase é de alguns dias,

nunca além de um mês. Além disso, é de se esperar que neste período de tempo a fluência primária domine o processo que é denominado *power-law model* ou modelo constitutivo empírico potencial de fluência primária no Abaqus. Foram realizadas simulações tanto para as versões “*time hardening*” quanto “*strain hardening*”.

Depois de realizar todos esses três “*steps*” e obter os resultados para um peso de fluido de perfuração, realizou-se este procedimento novamente para os outros casos nos quais foram levados em consideração diferentes pesos de fluido de perfuração. Em outras palavras, foram feitas nove simulações para a versão “*time hardening*” e nove para a versão “*strain hardening*”, com a alteração dos pesos dos fluidos de perfuração de 9 a 13 ppg, variando a cada 0,5 ppg. Portanto, na análise de deformação plana, foram feitas 18 simulações.

4.6. Validação do uso do Programa Abaqus

Para realizar a validação da resposta elástica do programa Abaqus, foram utilizadas as formulações elásticas de Kirsch (1898) e Bradley (1979). 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 ao longo do eixo 1, ou seja, os elementos da parte inferior da Figura 4-2.

4.6.1. Solução proposta por Kirsch e resultados obtidos do Abaqus

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):

$$s_r = \left(\frac{s_x + s_y}{2} \right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(\frac{s_x - s_y}{2} \right) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos(2q) \quad (4.5)$$

$$s_q = \left(\frac{s_x + s_y}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(\frac{s_x - s_y}{2} \right) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos(2q), \quad (4.6)$$

em que:

s_r é a tensão normal efetiva na direção radial;

s_q é a tensão normal efetiva na direção tangencial;

s_x é a tensão “*in situ*” na direção x;

s_y é a tensão “*in situ*” na direção y;

a é o raio do poço;

r é a distância a partir do eixo do poço;

q é o ângulo medido no sentido anti-horário do plano x-y a partir do eixo 'x'.

A formulação em questão não contempla o peso de fluido de perfuração.

Por isso, realizou-se uma simulação no Abaqus considerando esta situação e comparou-se com os resultados das equações de Kirsch, como apresentado na Figura 4-5.

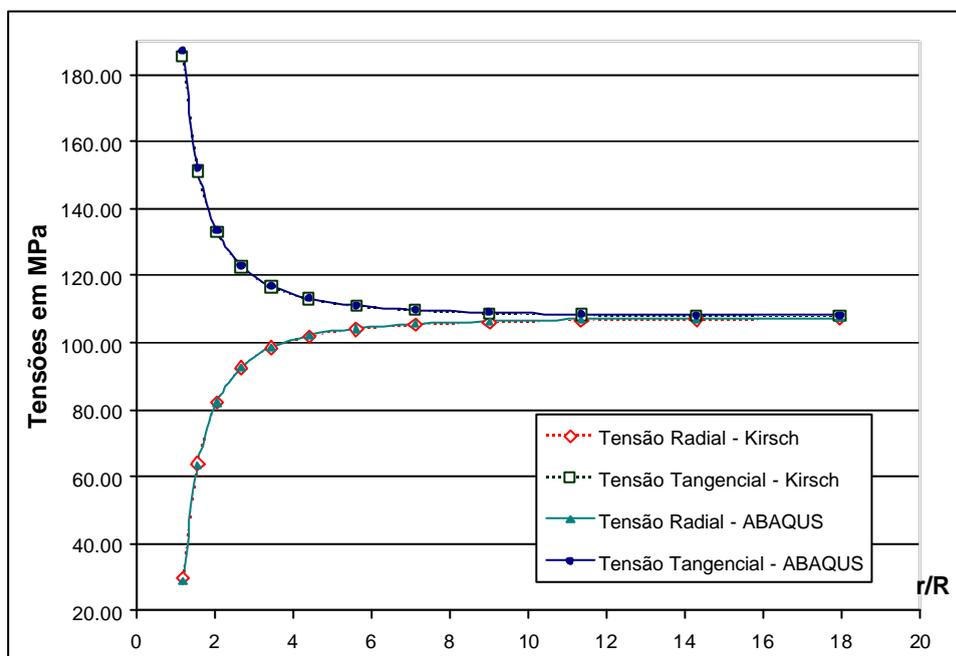


Figura 4-5: Kirsch (1898) vs. Abaqus – Solução Elástica da análise.

4.6.2.

Solução proposta por Bradley e resultados obtidos do Abaqus

Considerando o mesmo problema de uma placa com um furo passante de raio ‘r’ a qual está submetida a um estado de tensões, Bradley (1979) complementou a formulação de Kirsch (1898). A solução para a distribuição do estado de tensões ao longo da placa proposta por Bradley também contempla uma pressão interna no furo que, no caso da simulação feita no Abaqus, corresponde à pressão gerada pelo peso do fluido de perfuração. Para este

exemplo, foi utilizado um peso de fluido de 11 ppg, que corresponde a 77,36MPa, conforme Tabela 4-3.

Em seguida, têm-se as equações de Bradley utilizadas em termos de tensão radial e tangencial, respectivamente (Fjaer et al, 1996):

$$s_r = \left(\frac{s_x + s_y}{2} \right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(\frac{s_x - s_y}{2} \right) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos(2q) + t_{xy} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \sin(2q) + p_w \frac{a^2}{r^2} \quad (4.7)$$

$$s_q = \left(\frac{s_x + s_y}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(\frac{s_x - s_y}{2} \right) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos(2q) - t_{xy} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin(2q) - p_w \frac{a^2}{r^2}, \quad (4.8)$$

em que:

s_r é a tensão normal efetiva na direção radial;

s_q é a tensão normal efetiva na direção tangencial;

s_x é a tensão in situ na direção x;

s_y é a tensão in situ na direção y;

a é o raio do poço;

r é a distância a partir do eixo do poço;

q é o ângulo medido no sentido anti-horário do plano x-y a partir do eixo 'x';

p_w é a pressão provocada pelo peso de fluido de perfuração.

A Figura 4-6 apresenta os resultados do Abaqus versus os resultados das equações de Bradley (1979):

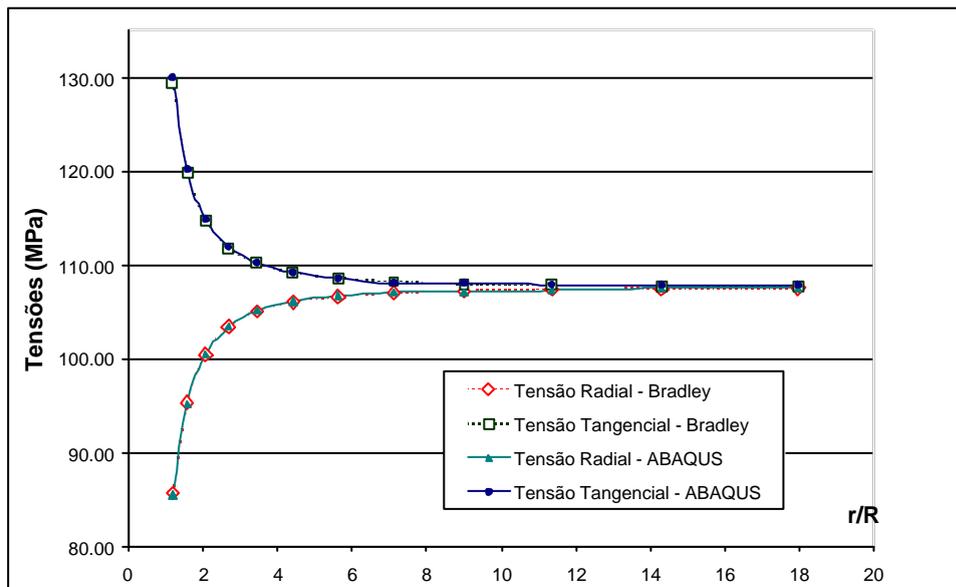


Figura 4-6: Bradley (1979) versus Abaqus – Solução Elástica de análise.

Pode-se observar que os valores das tensões radiais e tangenciais coincidem com os do Abaqus tanto na Figura 4-5 quanto na Figura 4-6, correspondente às formulações de Kirsch e de Bradley, respectivamente. Nestes gráficos, r é igual à posição do centro do elemento ao longo do eixo 1 e R é o raio do poço. Os pontos de cálculo (“centroid”) têm um ângulo de $2,5^\circ$ em relação ao eixo 1.

Após as validações das equações de Kirsch e Bradley com os resultados extraídos da fase elástica do Abaqus, acredita-se que tal programa está habilitado para continuar o estudo de simulação numérica em elementos finitos.

4.7.

Resultados e Análises das simulações numéricas utilizando a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido

O Abaqus possui diversas formas de gerar os resultados dos problemas. A formatação padrão (“default”) de apresentação das soluções é visualmente bem apresentada por causa da escala de cores. Por outro lado, a análise dos resultados apresentados desta forma não é muito prática. Sendo assim, alguns desses resultados “default” foram colocados no Apêndice B para familiarização com o software e para melhor visualização da propagação dos efeitos geomecânicos da perfuração no corpo de sal.

Os resultados serão apresentados, comentados e discutidos de forma gráfica para facilitar sua análise e serão divididos em três blocos: deslocamentos, deformações e tensões.

4.7.1.

Deslocamentos

Primeiramente, foi feita uma análise dos deslocamentos radiais na parede do poço após a simulação da perfuração utilizando a solução elástica instantânea e a fluência a partir deste instante até um período de 30 dias. As medições foram feitas no nó 119 (ver Figura 4-2b) para os diversos pesos fluidos de perfuração, do 9 ao 13 ppg, variando em 0,5 ppg.

Analisando a Figura 4-7, quando se faz a modelagem com maiores pesos de fluido de perfuração, os deslocamentos na parede do poço são menores. Isto acontece porque para maiores pesos de fluido ocorre uma menor diferença entre as tensões horizontais “*in situ*” e o peso do de fluido de perfuração, o que ocasiona menores deslocamentos na parede do poço.

Na Figura 4-8 podem ser visualizadas as mesmas curvas da Figura 4-7. Todavia, com um enfoque nos deslocamentos radiais na parede do poço no primeiro dia após a perfuração e também considerando a solução elástica e a fluência. Após análise destas duas figuras, percebe-se que os deslocamentos mais significativos acontecem no primeiro dia após a perfuração, independente do peso de fluido utilizado na modelagem.

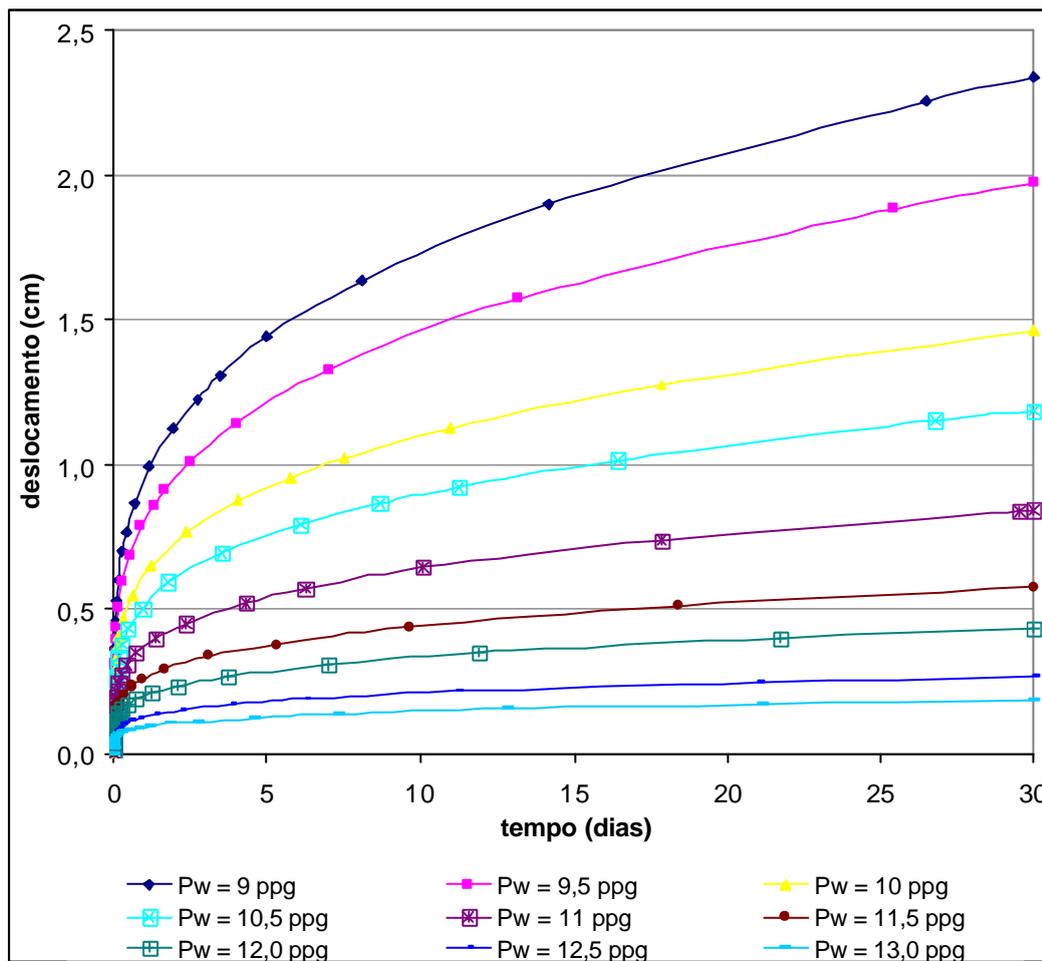


Figura 4-7: Fechamento do poço ao longo do tempo (30 dias) para diferentes fluidos de perfuração.

No gráfico apresentado na Figura 4-9, pode ser observado o deslocamento radial na parede do poço (abscissa) pelos diversos pesos de fluidos de perfuração (ordenada). Cada curva representa um instante no tempo. A primeira curva da esquerda apresenta a resposta da solução elástica instantânea provocada pela escavação. A segunda e terceira curva correspondem aos deslocamentos considerando a solução elástica mais os deslocamentos provocados pela fluência em 1 dia e em 30 dias, respectivamente.

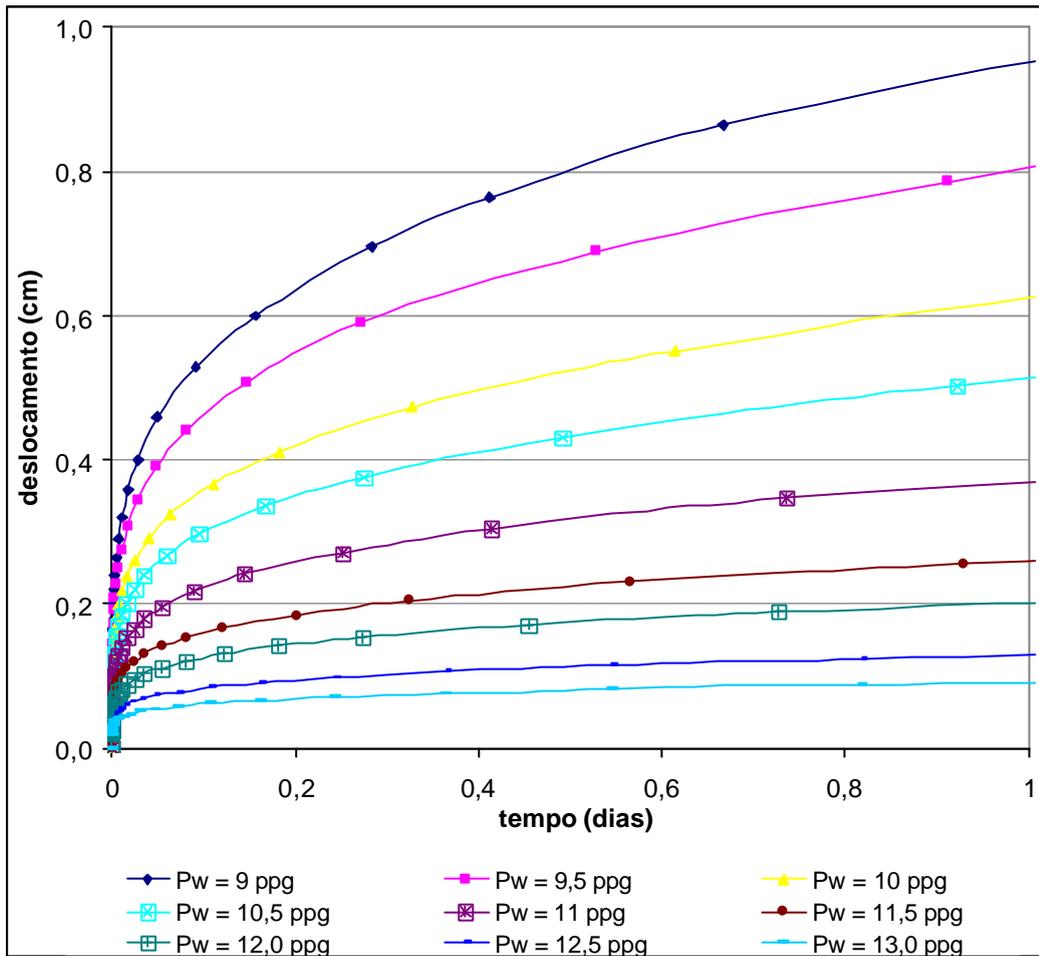


Figura 4-8: Fechamento do poço ao longo do tempo (1° dia) para diferentes fluidos de perfuração.

Utilizando os parâmetros descritos no início deste capítulo, pode-se constatar pelos resultados da Figura 4-9 que os deslocamentos gerados pela relação constitutiva elástica do sal são muito pequenos quando comparados com os deslocamentos causados pela fluência. Nos casos práticos, os parâmetros têm de ser bem definidos, pois vão influenciar diretamente os resultados, sejam superestimando ou subestimando os valores de deslocamentos na parede do poço. Vale destacar também que os deslocamentos nos primeiros instantes após a perfuração do poço são maiores que os demais. Pelo gráfico, para $P_w=11$ ppg, o deslocamento causado pela solução elástica mais a fluência de 1 dia foi de 0,37 cm e para 30 dias foi de 0,84cm.

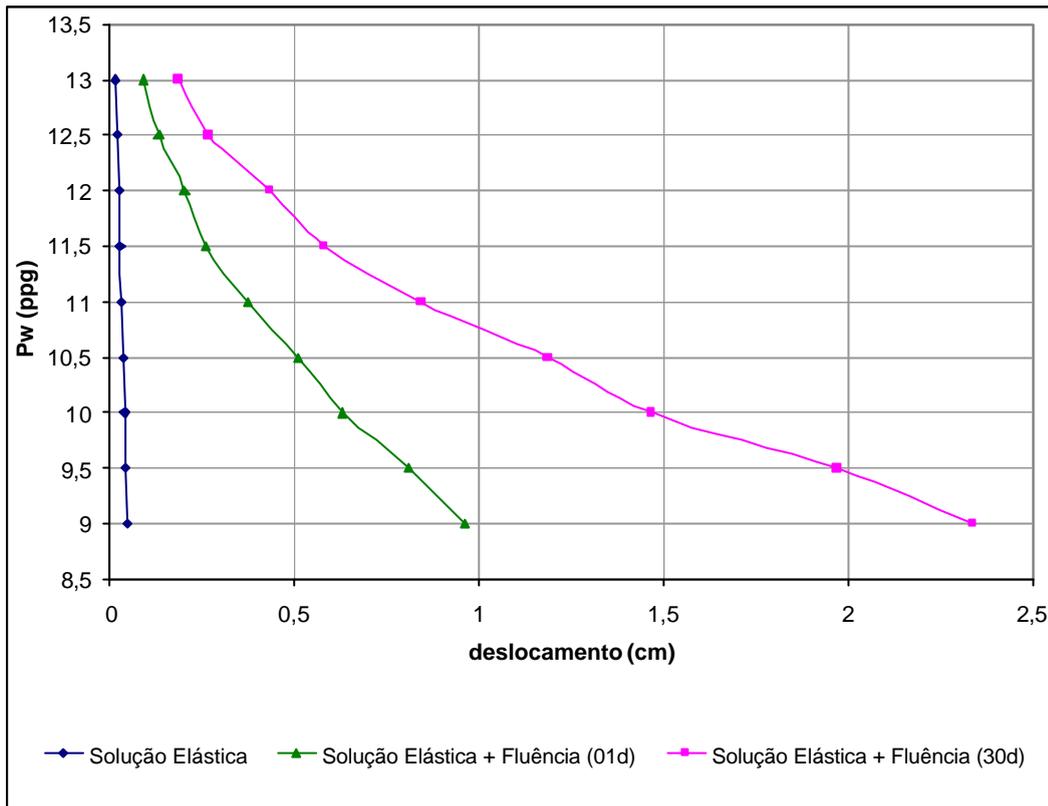


Figura 4-9: Fechamento do poço considerando a solução elástica e a fluência em 1 dia e em 30 dias para diversos pesos de fluido de perfuração.

A Figura 4-11, a Figura 4-12 e a Figura 4-13 apresentam os comportamentos dos deslocamentos radiais do evaporito desde a parede do poço ($r/R = 1$) até uma distância equivalente a 20 vezes o raio do poço ($r/R = 20$) para os pesos de fluido de perfuração de 9, 11 e 13 ppq, respectivamente. O eixo das abscissas está representado por r/R , em que 'R' é o raio do poço e 'r' é o afastamento em relação ao eixo do poço, como mostra a representação esquemática da Figura 4-10. Por exemplo, quando ' $r/R=1$ ', significa que o ponto analisado é na parede do poço. Para ' $r/R=2$ ', o ponto estará distante duas vezes do raio do poço a partir do seu eixo, ou seja, a uma distância de um raio a partir da parede do poço e assim sucessivamente. Todos os deslocamentos horizontais foram calculados ao longo do eixo 1 (ver Figura 4-2).

Observando a Figura 4-11, a Figura 4-12 e a Figura 4-13, percebe-se que os deslocamentos na parede do poço são maiores e decrescem à medida que se afastam dele, independentemente do peso de fluido de perfuração utilizado na simulação. Apesar de a forma desses três gráficos serem semelhantes, o que os diferencia é a escala do eixo 'y'. No caso da Figura 4-11, a escala do eixo das ordenadas chega a 2,5 cm, pois foi simulado para um peso de fluido de

perfuração de 9 ppg. Todavia, para a Figura 4-13, a escala é somente de 0,2 cm, influenciada pelo peso de fluido de perfuração de 13 ppg.

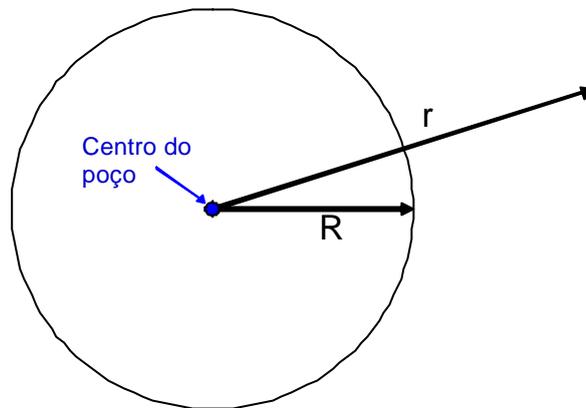


Figura 4-10: Representação esquemática do afastamento em relação ao eixo do poço (r).

Vale destacar também que os deslocamentos significativos acontecem somente até um afastamento de três a quatro vezes o raio do poço. Por exemplo, analisando a solução elástica mais 1 dia de fluência para o fluido de 11 ppg, o deslocamento na parede do poço foi de 0,37 cm e para um afastamento de quatro vezes o raio do poço ($r/R = 4$) foi de 0,08 cm. Isto acontece porque na parede do poço ocorre uma maior perturbação nas tensões que estavam constantes antes de escavação. À medida que o ponto de análise está mais afastado do poço, ocorrem menores perturbações de tensões e, assim, menores deslocamentos por fluência.

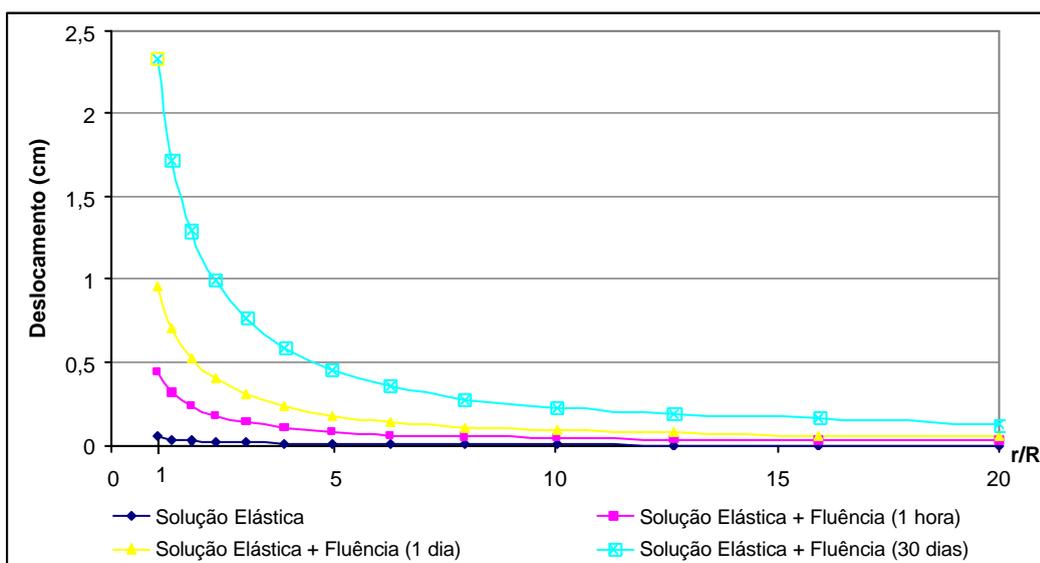


Figura 4-11: Deslocamento radial ao redor do poço para um peso de fluido de 9 ppg.

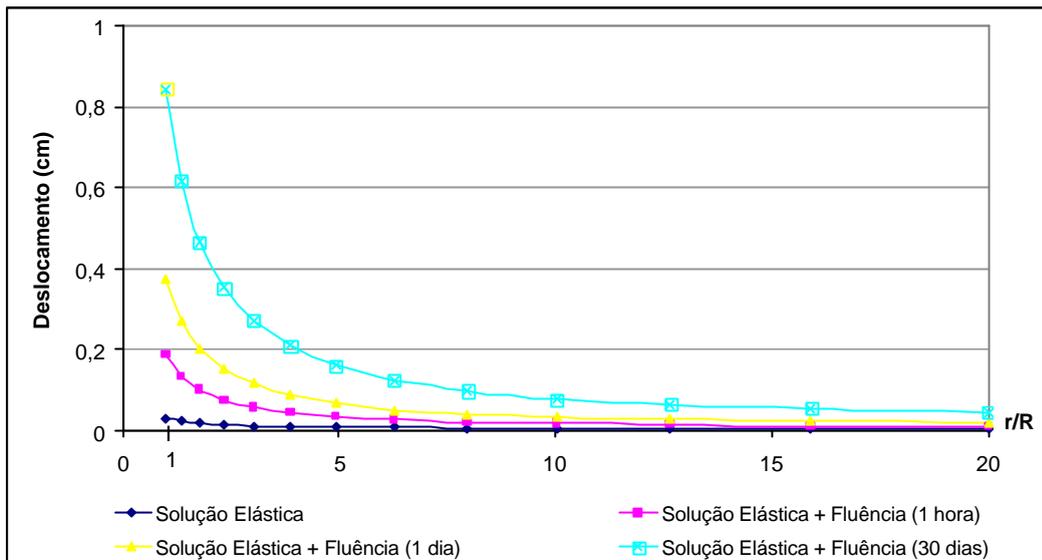


Figura 4-12: Deslocamento radial ao redor do poço para um peso de fluido de 11 ppg.

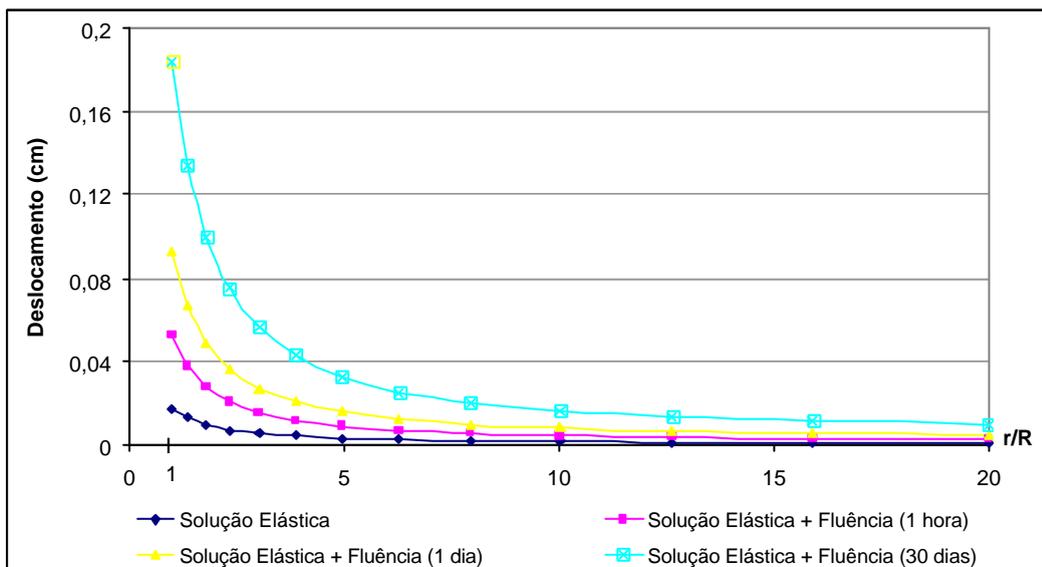


Figura 4-13: Deslocamento radial ao redor do poço para um peso de fluido de 13 ppg.

Os quatro gráficos apresentados a partir da Figura 4-14 até a Figura 4-17 mostram os deslocamentos radiais em relação ao afastamento do eixo do poço, em que cada figura representa um instante no tempo. A Figura 4-14 contempla somente os resultados considerando a solução elástica instantânea. Por outro lado, a Figura 4-15, a Figura 4-16 e a Figura 4-17 apresentam os deslocamentos considerando a solução elástica instantânea e a fluência de uma hora, um dia e um mês, respectivamente. Cada um desses gráficos possui três curvas, uma para cada peso de fluido de perfuração utilizado, que foi de 9ppg, 11ppg e

13ppg. É importante observar que, apesar de estes quatro gráficos terem formatos parecidos, os valores da escala no eixo das ordenadas variam acentuadamente. Por exemplo, na Figura 4-14 o valor máximo da escala em 'y' é de 0,05 cm e na Figura 4-15 é de 0,5 cm. Daí a importância da consideração da fluência, principalmente nos primeiros instantes ao se estudar os deslocamentos de poços quando perfurados em corpos salinos.

Observa-se ainda nos quatro gráficos (Figura 4-14 à Figura 4-17) que os deslocamentos radiais no sentido do poço em todos os instantes (elástico instantâneo, uma hora, um dia, um mês), independente do peso de fluido estudado, correspondem a aproximadamente 10 % do valor total do deslocamento na parede do poço no respectivo instante no afastamento igual a 10 vezes o raio ($r/R = 10$). Isto significa que à medida que são analisados pontos mais afastados do poço as diferenças de tensões são menores, o que gera pequenos deslocamentos horizontais. Em outras palavras, tais deslocamentos são menores que 10% do deslocamento radial provocado na parede do poço caso sejam analisados pontos afastados a mais de 10 vezes o raio do poço.

Ao analisar a Figura 4-14 e a Figura 4-15, observa-se que o deslocamento provocado pela solução elástica instantânea (0,045 cm), para um peso de fluido de 9ppg, representa somente pouco mais de 10 % do deslocamento após uma hora da perfuração do poço (0,438 cm) caso seja analisado na parede do poço ($r/R=1$). No entanto, para 13 ppg, o deslocamento elástico (0,017 cm) pode corresponder a pouco mais de 30 % do deslocamento total após uma hora (0,053 cm) também na parede do poço. Pode-se concluir que, para o fluido de 9 ppg, os deslocamentos devidos à fluência são mais representativos em virtude da maior diferença de tensões entre as tensões "in situ" e as pressões geradas pelo fluido de perfuração quando comparados com a perfuração com um peso de fluido de 13ppg. De qualquer forma, a consideração da fluência é imprescindível para estimativas de deslocamentos em poços perfurados em zonas salinas com qualquer peso de fluido de perfuração.

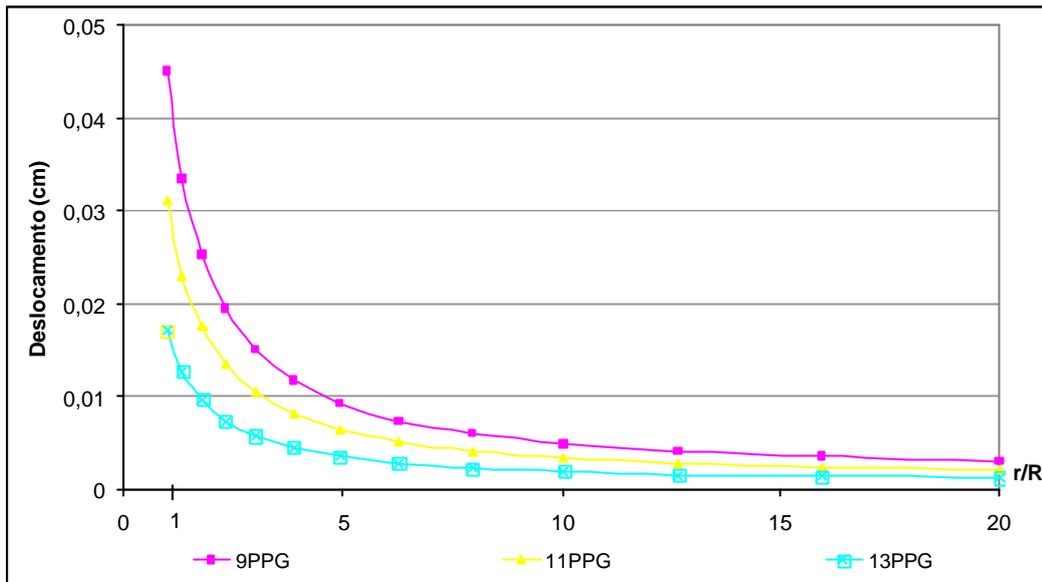


Figura 4-14: Deslocamento radial ao redor do poço considerando somente a solução elástica.

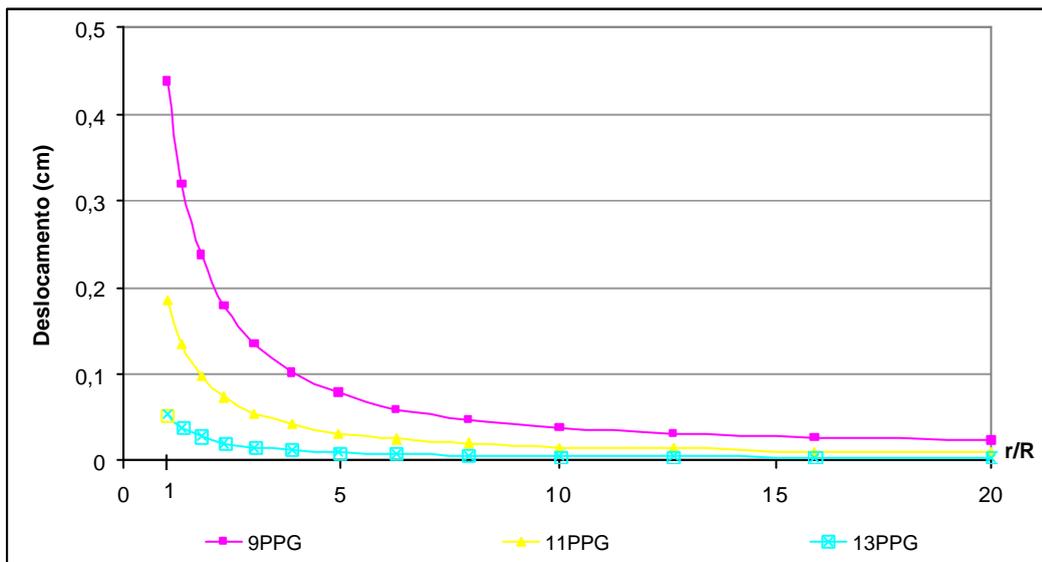


Figura 4-15: Deslocamento radial ao redor do poço considerando a solução elástica mais a fluência em uma hora.

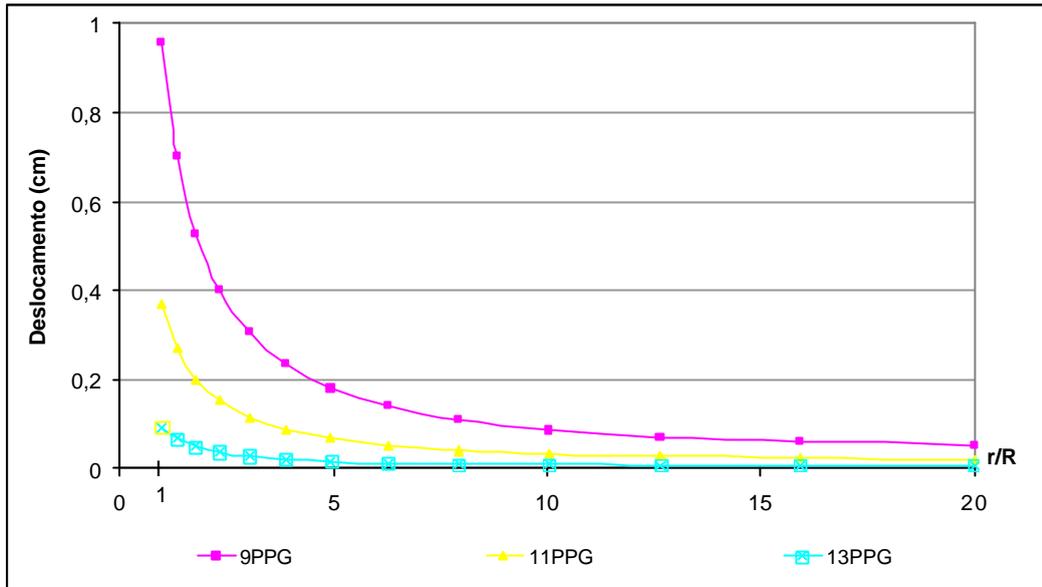


Figura 4-16: Deslocamento radial ao redor do poço considerando a solução elástica mais a fluência em um dia.

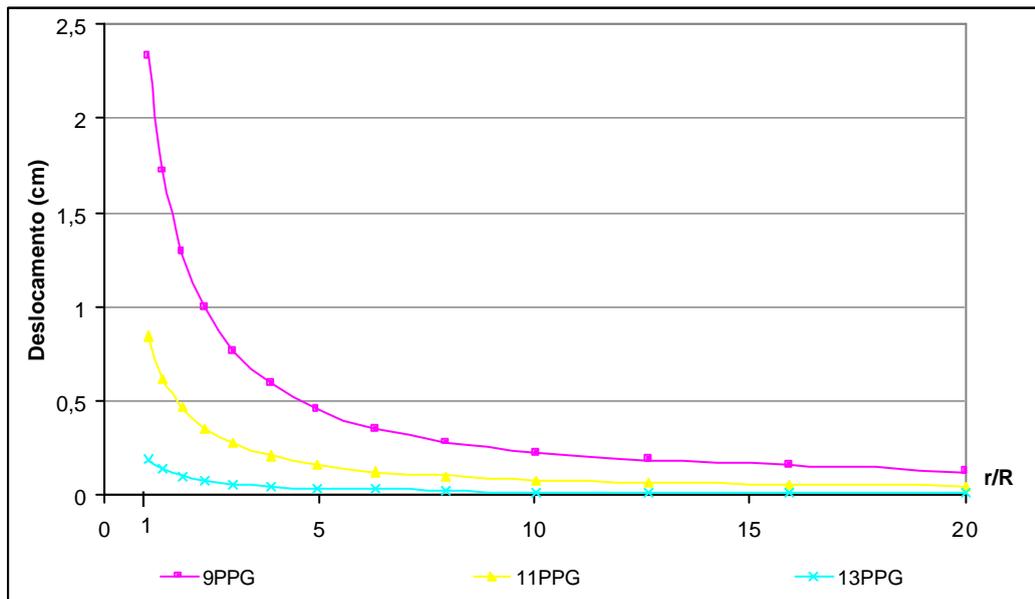


Figura 4-17: Deslocamento radial ao redor do poço considerando a solução elástica mais a fluência em um mês.

4.7.2. Deformações

Na Figura 4-18 e na Figura 4-19, estão apresentadas as deformações radiais na parede do poço ao longo do tempo considerando a solução elástica e a fluência. Na Figura 4-18 está sendo respeitado um período de fluência de um mês e na Figura 4-19, um período de um dia. Vale destacar novamente que todos esses cálculos de deformações foram feitos no nó 119 no sentido 1, como pode ser observado na Figura 4-2b.

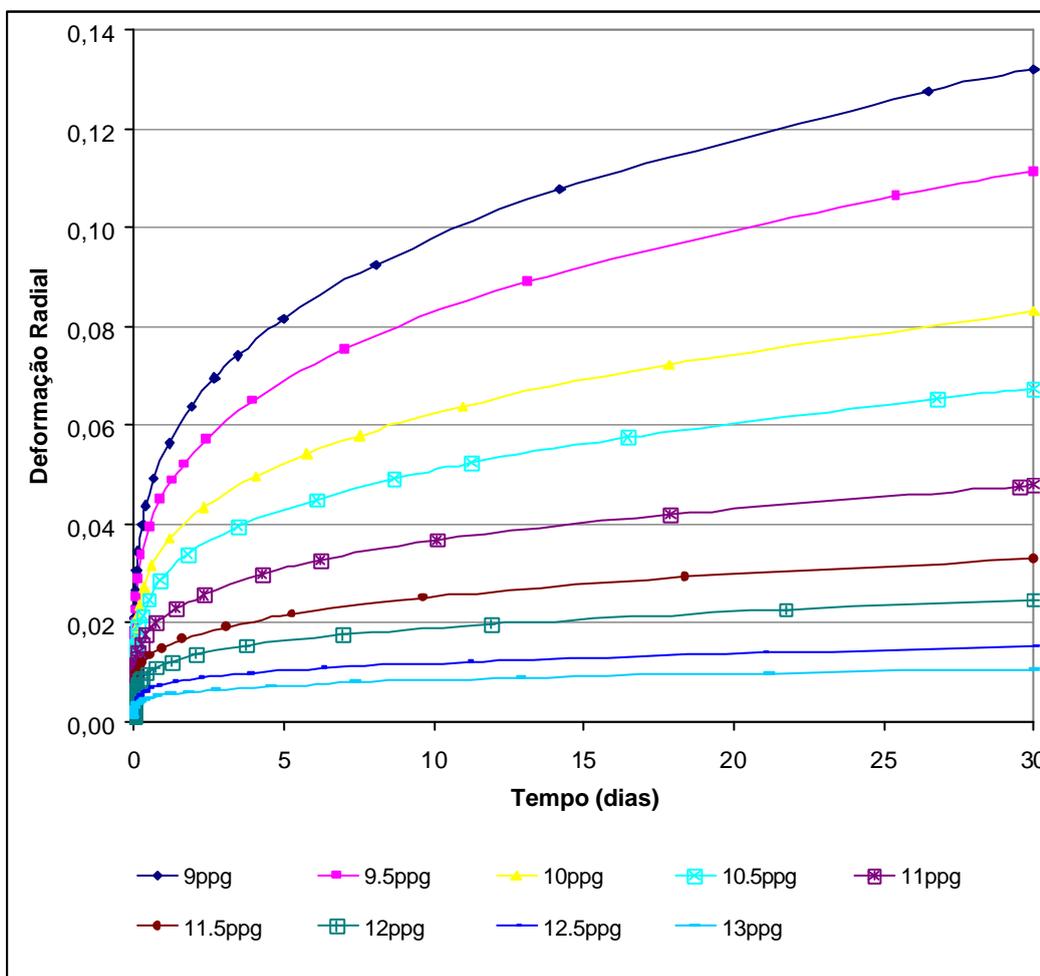


Figura 4-18: Deformações horizontais na parede de poço para diversos fluidos de perfuração em um mês.

Nas simulações numéricas com maiores pesos de fluido de perfuração observam-se menores deformações radiais num tempo específico tanto para pequenos intervalos de tempo quanto para um período de 30 dias. Maiores pesos de fluidos de perfuração impactam fortemente em menores deformações,

pois ocorre uma menor diferença de pressões geradas pelo peso do fluido de perfuração e pelas tensões “*in situ*”. Um exemplo disso são as deformações em 30 dias de 4,79% e 2,48% para pesos de fluido de 11 e 12 ppg, respectivamente.

Vale a pena destacar também a diferença de deformações de quase 3% para pequenas alterações de pesos de fluidos de perfuração de 9,5 (11,15%) e 10 ppg (8,31%) nas análises de 30 dias.

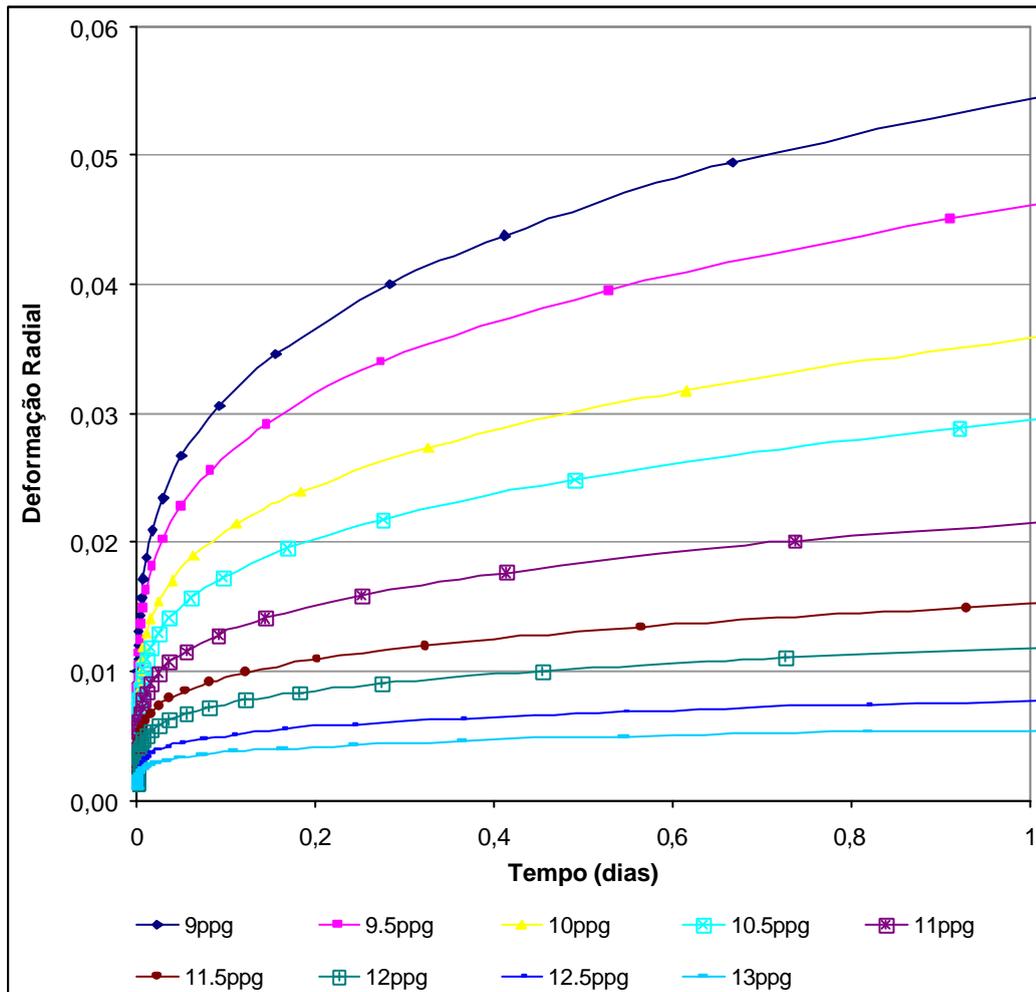


Figura 4-19: Deformações horizontais na parede de poço para diversos fluidos de perfuração no 1° dia.

A Figura 4-19 e Figura 4-20 são importantes para mostrar que a fluência é mais acentuada no primeiro dia após a perfuração do poço em relação aos demais. Para um peso de fluido de 10 ppg a deformação, considerando a solução elástica mais a fluência em um dia, foi de 3,6% e em 30 dias foi de 8,3%.

Além disso, na Figura 4-20 observa-se que as deformações elásticas instantâneas são desprezíveis quando comparadas com as deformações por fluência no sal para períodos superiores a um dia, principalmente para baixos valores de peso de fluidos de perfuração, em que as deformações por fluência são muito elevadas chegando a mais de 4% em 1 dia e mais de 10% em 30 dias, para fluido de 9 e 9,5 ppg. Logicamente, essas deformações por fluência dependem diretamente da lei de fluência e dos parâmetros adotados na modelagem. Uma alteração nos valores das constantes empíricas, por exemplo, resultaria em diferentes deformações quando se confronta com o resultado apresentado na Figura 4-20, tanto para mais quanto para menos.

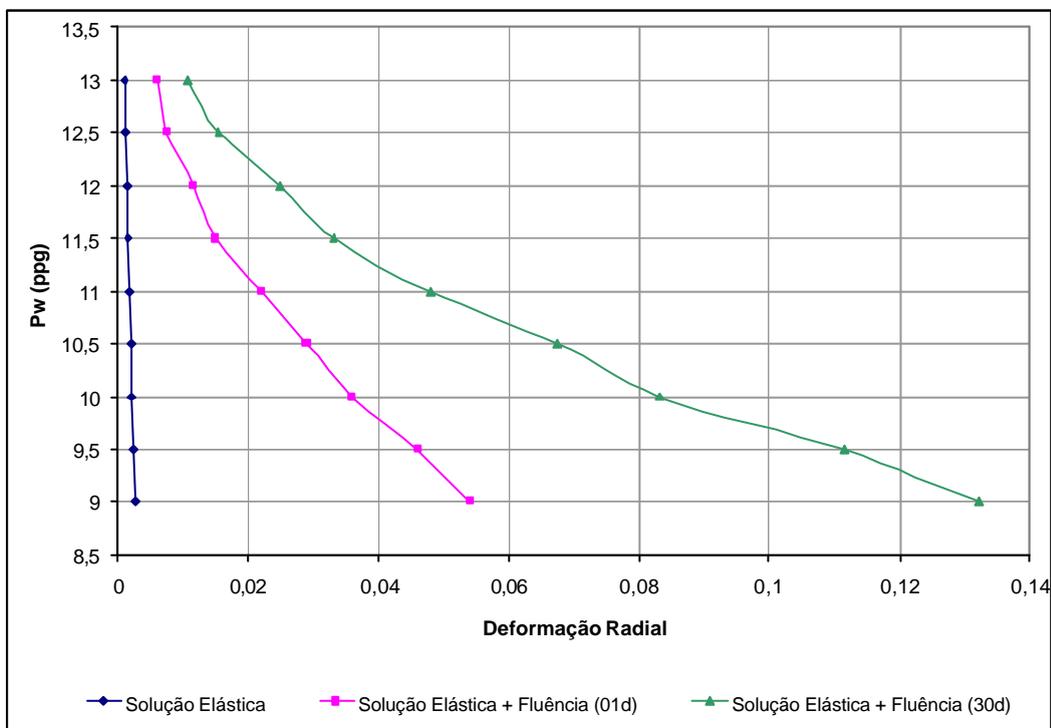


Figura 4-20: Deformação horizontal considerando a solução elástica e a fluência em 1 dia e em 30 dias para diversos pesos de fluido de perfuração.

Na Figura 4-21 e na Figura 4-22, estão apresentadas as taxas de deformações ($\dot{\epsilon}$), em seg^{-1} ao longo do tempo. Na Figura 4-21 a escala no eixo das ordenadas varia de 0 a $5,0\text{E}-07\text{s}^{-1}$ e na Figura 4-22 foi feito um “zoom”, em que se analisou as taxas de deformações de 0 a $1,0\text{E}-07\text{s}^{-1}$ com o objetivo de melhor visualização do comportamento das curvas para os diversos fluidos de perfuração.

Pôde-se observar nos gráficos da Figura 4-21 e da Figura 4-22 que a taxa de deformação ou a velocidade de deformação decresce com o tempo,

principalmente nos primeiros dias. Isso pode ser explicado pelo fato de a fluência estar ligada diretamente com as diferenças de tensões, que são maiores no momento da escavação. Com o tempo, as diferenças entre as tensões diminuem e a velocidade de deformação também tende a cair, justamente o que se observa nas curvas do gráfico.

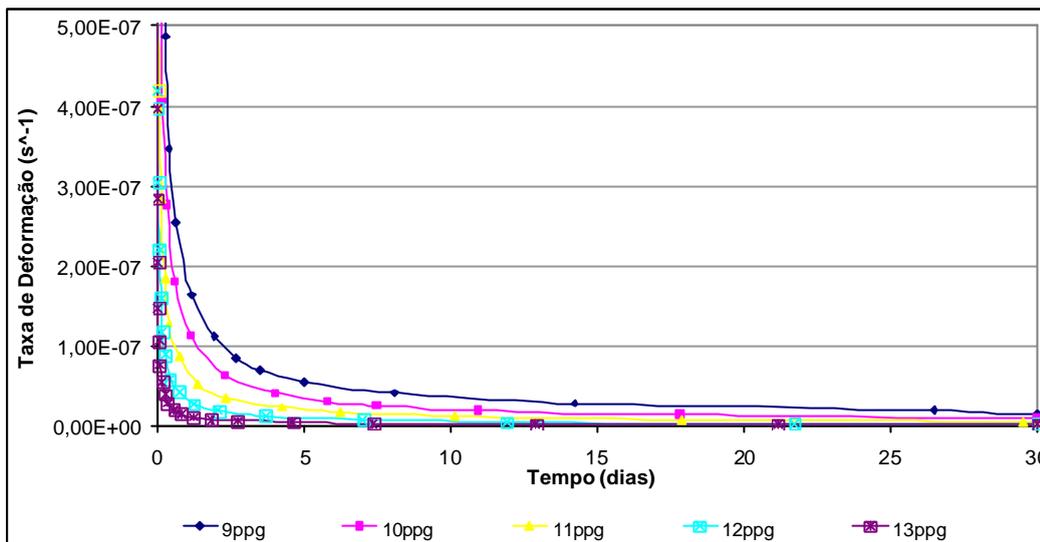


Figura 4-21: Taxa de deformação (0 a 5,00 E-07 s⁻¹) ao longo do tempo na parede do poço.

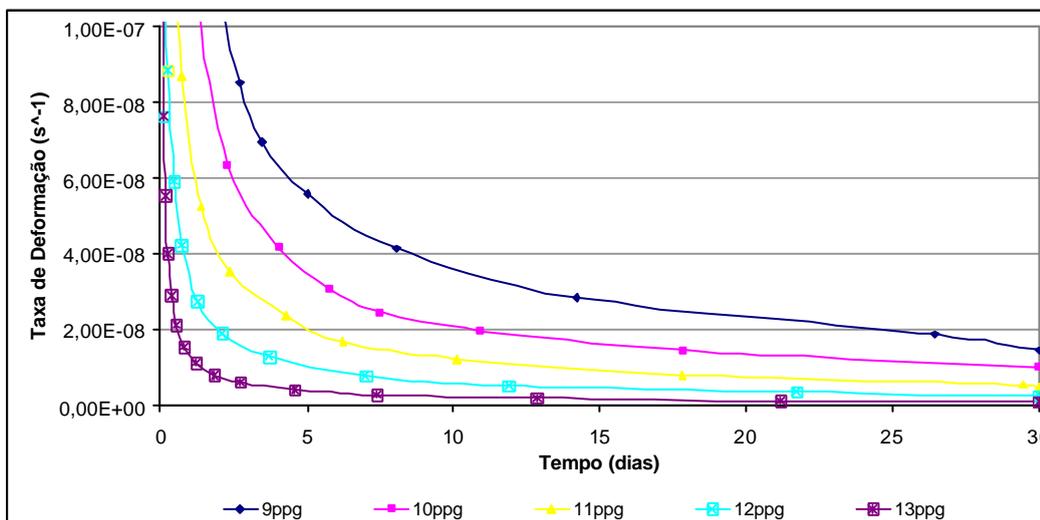


Figura 4-22: Taxa de deformação ao longo do tempo na parede do poço, considerando um “zoom” de 0 a 1,0E-07 s⁻¹.

Verifica-se, por meio da Figura 4-22, que a velocidade de deformação para um determinado tempo é maior quanto menor for o peso do fluido de perfuração.

Isto pode ser explicado pela maior diferença de tensões quando se utiliza um peso de fluido de 10 ppg em vez de um de 12 ppg, por exemplo. Esta maior diferença de tensões desviadoras, entre as tensões “*in situ*” e as pressões geradas na parede do poço pelo fluido de perfuração, provoca maiores taxas de deformações radiais. Com o tempo, as tensões entram em equilíbrio e as diferenças entre as curvas atingem um valor mínimo.

Outro ponto importante é que os valores e as formas das curvas de taxa de deformação também estão ligados diretamente aos parâmetros e à lei de fluência utilizados.

4.7.3. Tensões

Nos gráficos da Figura 4-23 até a Figura 4-30, estão apresentadas as tensões radiais e tangenciais ao longo do eixo 1 (ver Figura 4-2), desde a parede do poço ($r/R=1$) até 20 vezes o raio do poço ($r/R=20$).

Da Figura 4-23 à Figura 4-26 estão representadas as tensões ao redor do poço para fluidos de perfuração de 0 , 9, 11 e 13 ppg, respectivamente. Na Figura 4-23, estão apresentados os resultados da simulação numérica desconsiderando o peso do fluido de perfuração, ou seja, 0 ppg. É importante observar também a escala de tensões (eixo das ordenadas) da Figura 4-23, que é de 0 a 210 MPa. Por outro lado, na Figura 4-24, na Figura 4-25 e na Figura 4-26, plotaram-se os valores de tensões na mesma escala (60 a 150 MPa) para que haja um parâmetro comparação entre os pesos de 9, 11 e 13 ppg, respectivamente.

Na Figura 4-23, a redistribuição de tensões causada pela fluência ocorre no primeira hora. Depois desse período, as tensões permanecem praticamente constantes até os 30 dias, que é o tempo final da análise em questão.

Para obedecer às condições de contorno, as tensões radiais na parede do poço devem ser iguais a zero, já que o poço não foi preenchido por fluido de perfuração. Na Figura 4-23, o valor de 16 MPa de tensão radial na parede do poço é explicado pelo esquema de cálculo das tensões no método dos elementos finitos. É feito o cálculo nos pontos de integração do elemento 19 (ver Figura 4-2) e estes valores são extrapolados para a parede do poço (nó 119). A mesma diferença também acontece para a tensão tangencial instantânea elástica. Segundo Kirsch (1898), para esse caso, a tensão tangencial na parede

do poço deveria ser igual a duas vezes as tensões “*in situ*”, ou seja, 215 MPa. No gráfico o valor calculado pelo Abaqus foi de 199 MPa.

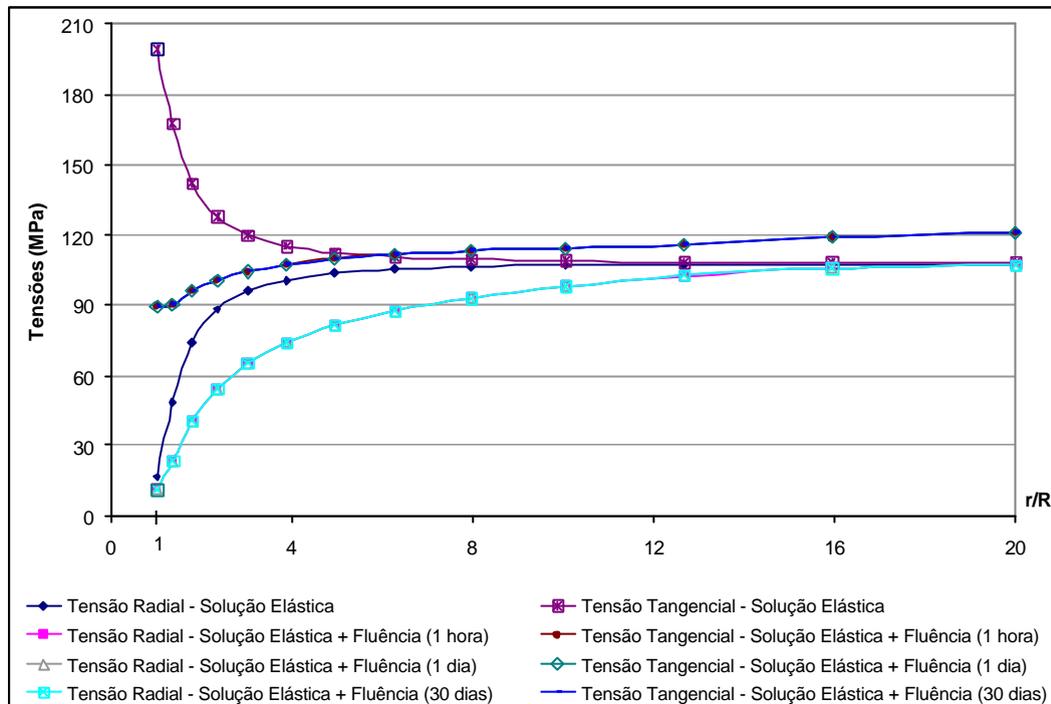


Figura 4-23: Tensões ao redor do poço sem fluido de perfuração.

Entre a Figura 4-23 e a Figura 4-26, constata-se uma queda abrupta do valor da tensão tangencial na parede de poço logo após a escavação. Essa brusca variação de tensão justifica a necessidade do emprego de intervalos de tempo iniciais muito pequenos, que no caso das simulações numéricas desta dissertação foi de 10^{-5} segundos. No caso da Figura 4-23, em que não se considerou a utilização de fluido de perfuração, a queda foi de 110MPa. No entanto, na Figura 4-24, na Figura 4-25 e na Figura 4-26, correspondentes a pesos de fluidos de 9, 11 e 13 ppg, as quedas de tensões tangenciais na parede do poço foram de 42, 28 e 13 MPa, respectivamente. As diferenças de tensões são menores quando são feitas simulações com maiores pesos de fluido de perfuração porque, neste caso, as tensões “*in situ*” (107 MPa) se aproximam mais das pressões geradas pelo peso de fluido de perfuração. Por exemplo, para 13 ppg, o peso de fluido de perfuração provoca uma pressão de 91 MPa. Todavia, 9ppg geram uma pressão de 64 MPa na parede do poço.

Na Figura 4-24, na Figura 4-25 e na Figura 4-26, observa-se também que grande parte da redistribuição de tensões causada pela fluência acontece nos primeiros instantes após a escavação até a primeira hora. Depois dessa hora as

tensões ainda se alteram lentamente até o primeiro dia e permanecem praticamente constantes até os 30 dias. Sendo assim, nos instantes iniciais (principalmente no primeiro dia após a escavação) as grandes redistribuições de tensões influenciarão diretamente a deformação por fluência do sal, independentemente do peso de fluido de perfuração utilizado.

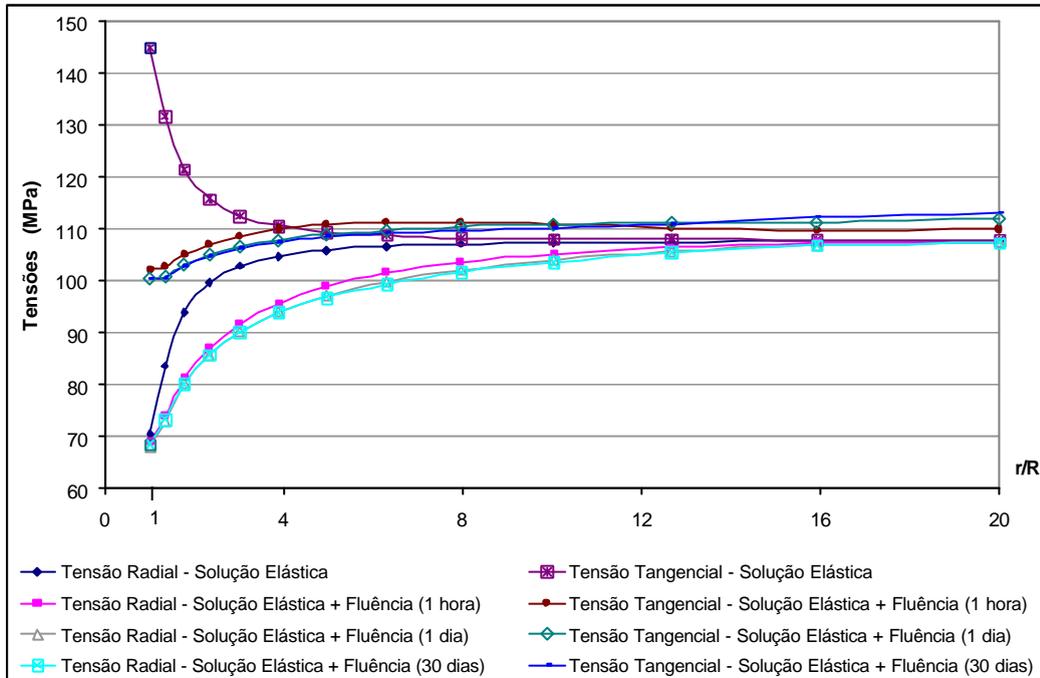


Figura 4-24: Tensões ao redor do poço para um peso de fluido de perfuração de 9 ppg.

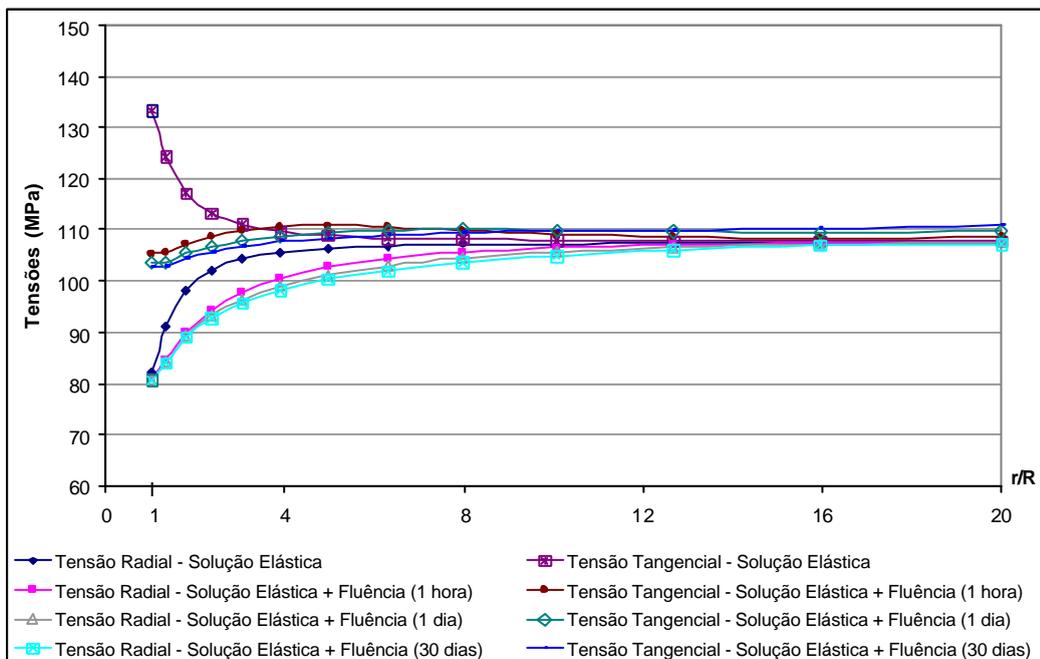


Figura 4-25: Tensões ao redor do poço para um peso de fluido de perfuração de 11 ppg.

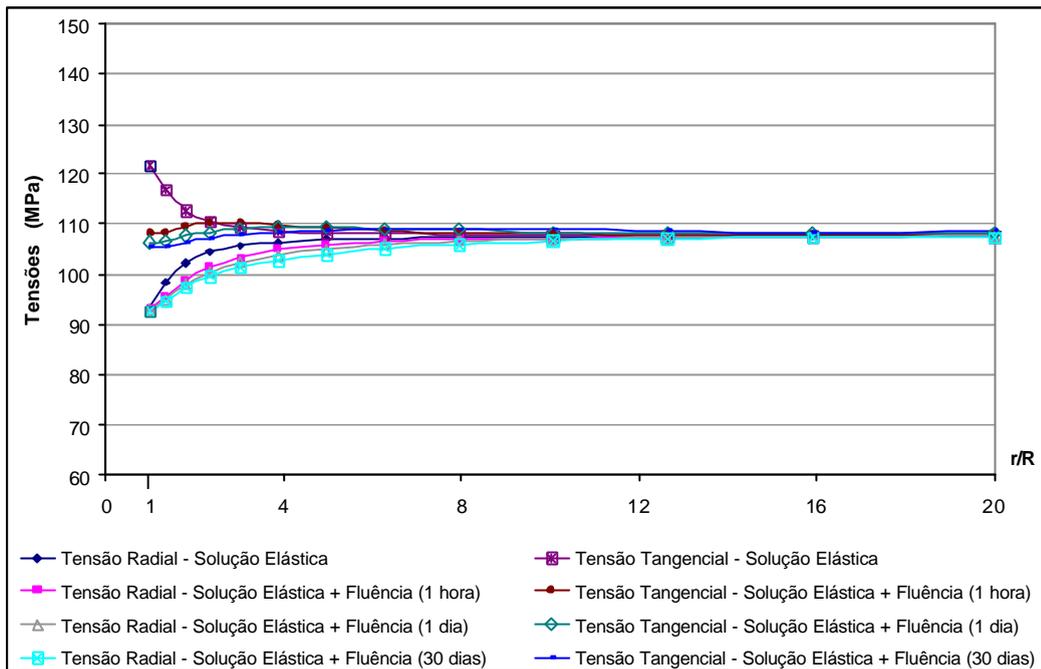


Figura 4-26: Tensões ao redor do poço para um peso de fluido de perfuração de 13 ppg.

Da Figura 4-27 à Figura 4-30, estão apresentadas as tensões ao redor do poço, em que cada gráfico representa um instante no tempo, considerando respectivamente a solução elástica instantânea, a solução elástica mais a fluência de uma hora, de um dia e de um mês.

A Figura 4-27 representa as tensões geradas pela solução elástica instantânea para diferentes fluidos de perfuração. Independente do peso do fluido de perfuração, as tensões tangenciais e radiais, neste instante, se igualam às tensões “*in situ*” (107 MPa) a uma distância de 10 vezes o raio do poço.

Ainda na Figura 4-27, constata-se que a diferença entre as tensões radiais e tangenciais são maiores (74MPa) na simulação com peso de fluido de 9ppg do que com peso de fluido de 13ppg (28MPa). Isto é provocado pela maior diferença entre as tensões “*in situ*” (107MPa) e as pressões geradas pelo peso de fluido de perfuração para o caso de 9ppg (64MPa) quando comparado com o de 13ppg (91MPa).

Outra observação a ser feita neste gráfico é que as tensões radiais na parede do poço deveriam ser iguais às pressões provocadas pelos respectivos fluidos de perfuração nas medições na parede do poço. Para o caso estudado, os fluidos de 9, 11 e 13 ppg correspondem a pressões de 64, 77 e 91 MPa, respectivamente. No gráfico da Figura 4-27 estes valores são de 71, 82 e 93MPa.

Segundo Bradley (equação 4.8), as redistribuições de tensões tangenciais provocadas pela solução elástica na parede do poço deveriam ser 151, 138 e 124MPa, respectivamente. Nesta situação, estas tensões tangenciais correspondem a duas vezes as tensões “*in situ*” menos a respectiva pressão gerada pelo fluido de perfuração. No gráfico da Figura 4-27 estes valores são de 145, 133 e 122MPa.

Essas diferenças são causadas pelo esquema de cálculo das tensões no método dos elementos finitos. São feitos cálculos nos pontos de integração de cada elemento, neste caso no elemento 19 (ver Figura 4-2b). Estes valores são extrapolados para os nós, que é o que ocorre no cálculo na parede do poço (nó 119).

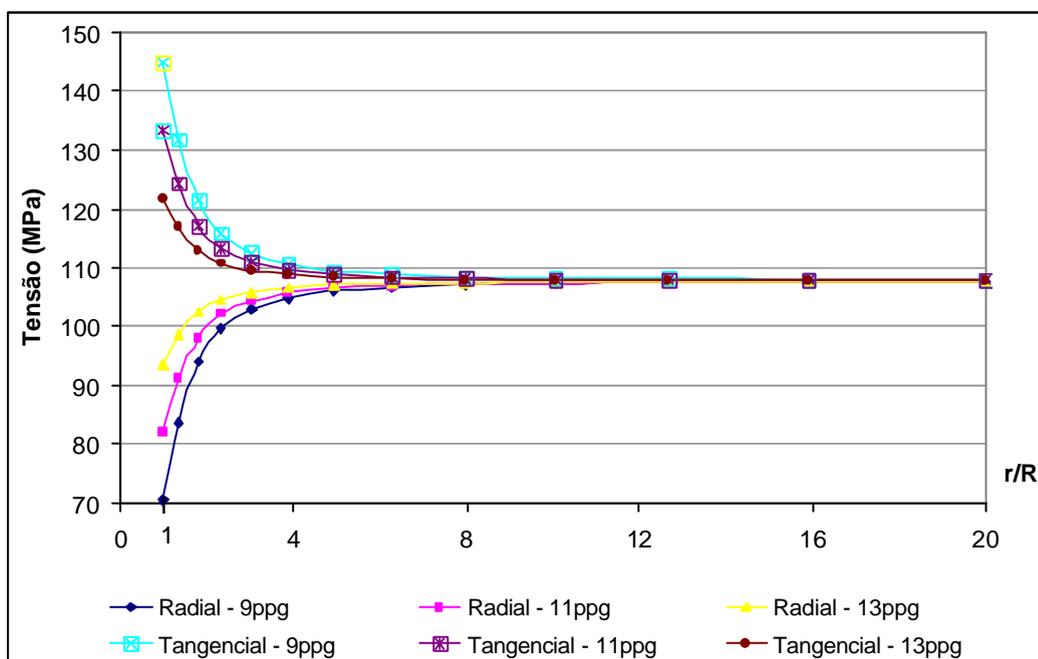


Figura 4-27: Tensões ao redor do poço considerando somente a solução elástica.

Ao analisar a Figura 4-28, a Figura 4-29 e a Figura 4-30 observa-se que as tensões radiais, considerando a fluência (1hora, 1dia, 30dias), igualam-se às tensões “*in situ*” (107MPa) a um distância de 16 vezes o raio do poço. Vale ressaltar que a uma distância de 20 vezes o raio do poço foi imposto à condição de contorno, que é justamente esta tensão “*in situ*”. Portanto, pode-se concluir que na análise das tensões com o afastamento da parede do poço a propagação das diferenças de tensões em virtude da fluência é maior do que na solução elástica, independente do peso de fluido de perfuração.

Outra constatação é que quanto menor o fluido de perfuração maior a diferença entre as tensões (radial e tangencial) próximas de poço e a tensão

inicial antes da perfuração (107MPa). Isso pode ser explicado pelo maior relaxamento de tensões para os menores pesos de fluidos que influenciará diretamente uma maior fluência. Por exemplo, o maior relaxamento de tensões para o fluido de 9ppg provocará maiores deformações por fluência quando comparado ao fluido de 11ppg.

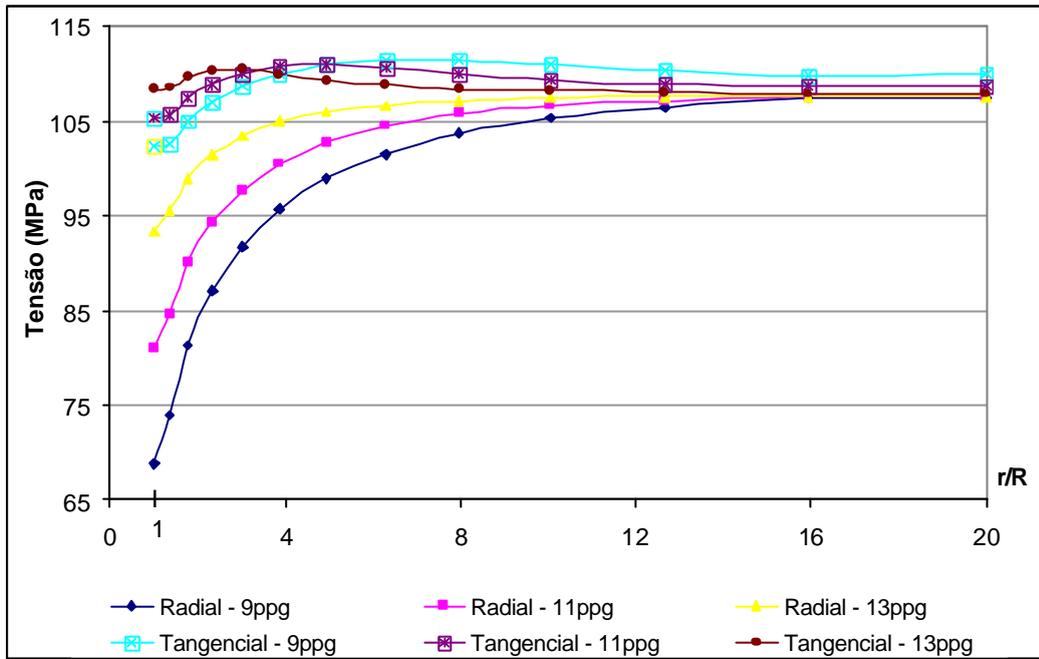


Figura 4-28: Tensões ao redor do poço considerando a solução elástica mais a fluência em uma hora.

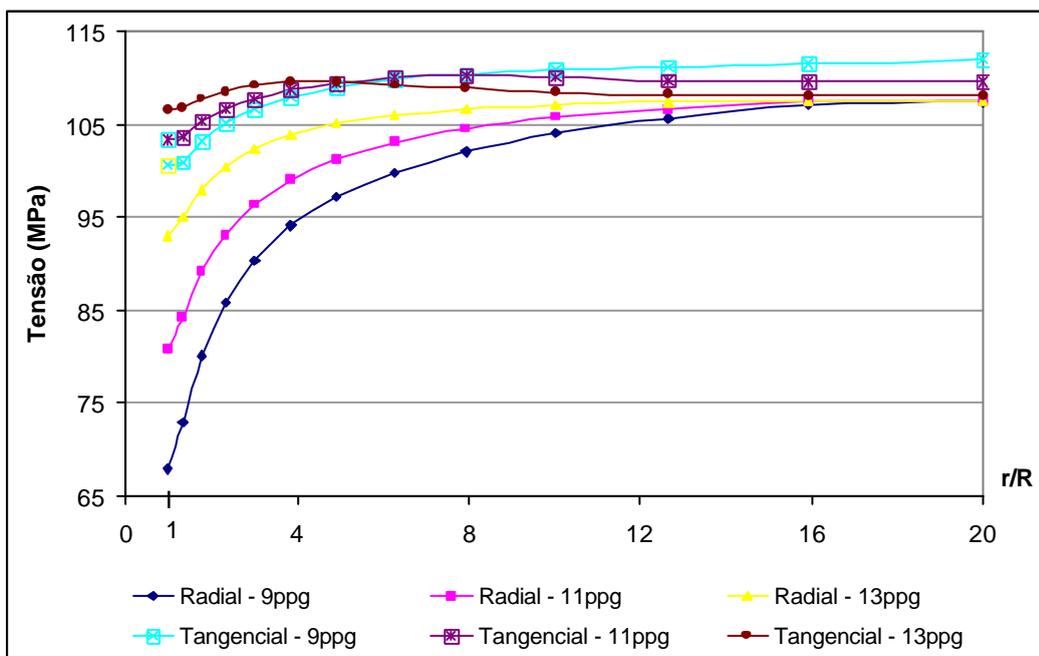


Figura 4-29: Tensões ao redor do poço considerando a solução elástica mais a fluência em um dia.

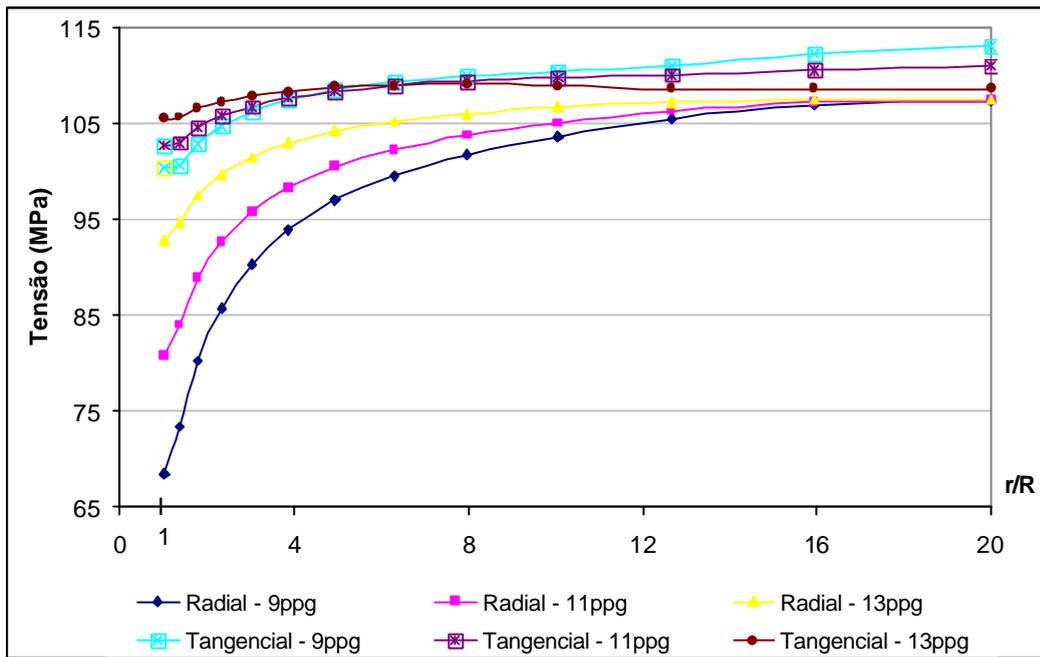


Figura 4-30: Tensões ao redor do poço considerando a solução elástica mais a fluência em um mês.

A Figura 4-31 apresenta as variações de tensões radiais e tangenciais na parede do poço com o tempo. Observa-se que a grande variação de tensões ocorre logo após a escavação e se equilibra ao longo dos dias. Sendo assim, a pior situação para a estabilidade do poço é justamente nos instantes subseqüentes ao da escavação do poço, independente do peso do fluido de perfuração utilizado. Outro ponto importante a ser comentado é que a fluência continua acontecendo com uma diferença entre as tensões constantes, mesma condição imposta num ensaio de fluência.

Constata-se também na Figura 4-31 que uma pequena variação das tensões radiais nas primeiras horas da análise não está correta. Para obedecer às condições de contorno, a tensão radial na parede do poço deve ser sempre igual à pressão gerada pelo respectivo fluido de perfuração. Nos primeiros instantes, essa variação se dá por causa do esquema de cálculo das tensões, que é feito nos pontos de integração de cada elemento e extrapolado para os nós, onde foi solicitado o cálculo.

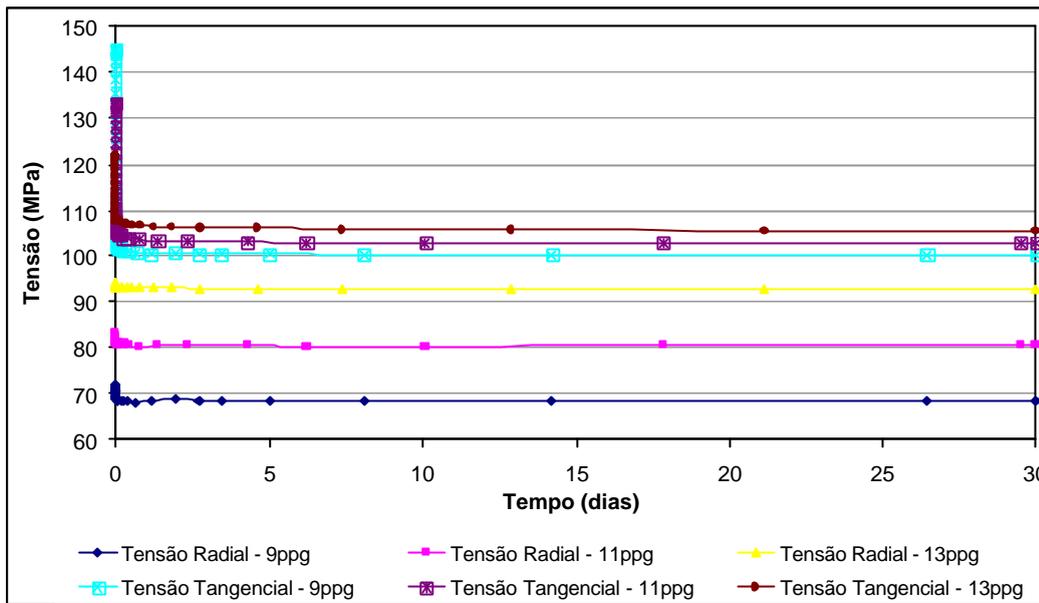


Figura 4-31: Variação das tensões com ao tempo na parede do poço.

4.8.

Resultados e análises da comparação entre a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido e a Teoria de endurecimento por Deformação

A modelagem do problema de deformação plana deste capítulo foi feita a partir do estudo de uma seção horizontal do corpo salino a uma profundidade de 6000 m. Os elementos correspondentes ao poço foram desativados para simular a perfuração e depois, analisou-se o comportamento do evaporito sujeito à solução elástica e a fluência. Neste estudo de caso, uma vez feita a escavação, a variação do estado de tensões na rocha salina ocorre lentamente até atingir o equilíbrio. Em outras palavras, as tensões radiais e tangenciais se alteram gradualmente ao longo do tempo e do afastamento da parede do poço. Por exemplo, na Figura 4-25, observa-se que praticamente não há variação das tensões após uma hora da simulação da perfuração do poço. Sendo assim, como não ocorrem variações bruscas de tensões no tempo, as trajetórias das curvas “*time hardening*” e “*strain hardening*” serão coincidentes para este caso específico. Ambas teorias de endurecimento foram abordadas no item 3.4, em que, na Figura 3.12, visualiza-se a diferença entre as duas trajetórias a partir de uma variação brusca do estado de tensões.

Daí a explicação das pequenas e desprezíveis diferenças de deslocamentos, deformações e tensões entre as teorias “*time hardening*” e “*strain hardening*”, que podem ser observadas em todos os gráficos deste item

(4.8), uma vez que os parâmetros das duas formulações são os mesmos. Visto que no item 4.7 já foram apresentados e discutidos os resultados da simulação numérica utilizando a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido, o item 4.8 se limitou a apresentar uma comparação entre as duas teorias de endurecimento.

4.8.1. Deslocamentos

Na Figura 4-32 e na Figura 4-33, estão apresentados os deslocamentos radiais da parede do poço, calculado no nó 119 (ver Figura 4-2b), considerando a solução elástica mais a fluência em um mês e em um dia, respectivamente. Em ambas as escalas de tempo, os deslocamentos são praticamente coincidentes para todos os fluidos de perfuração utilizados (9, 10, 11, 12 e 13 ppg) nas simulações numéricas quando se compara a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido (representado nos gráficos com a legenda "Time") com a Teoria de endurecimento por Deformação ("Strain").

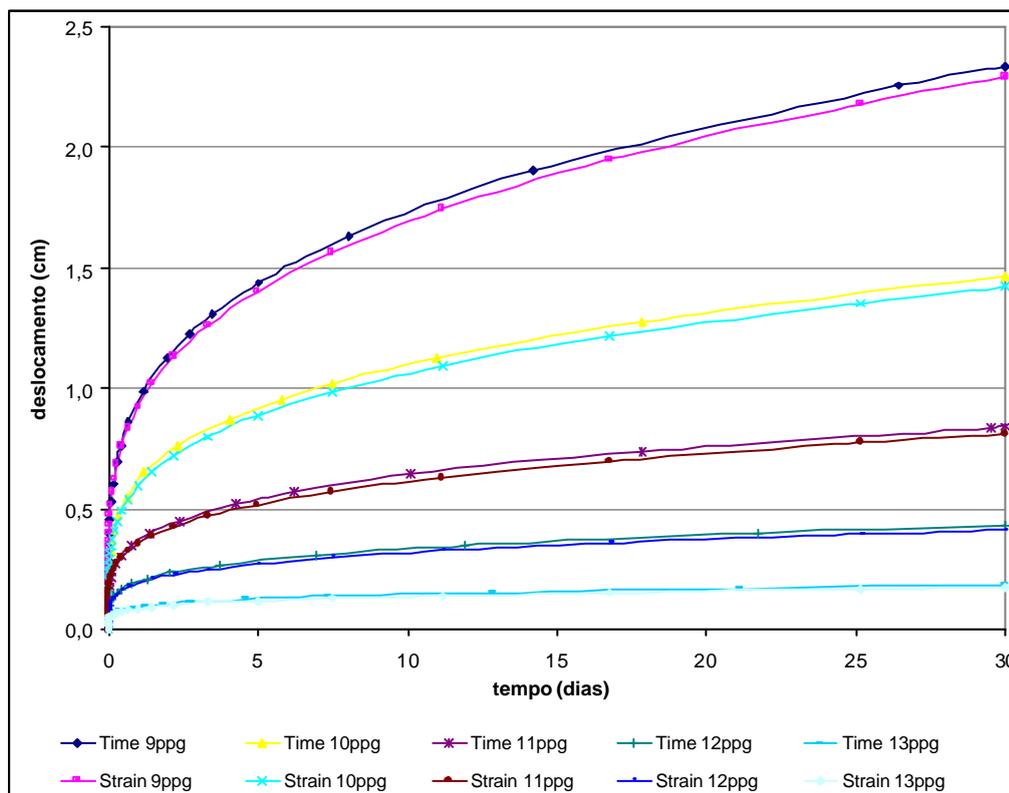


Figura 4-32: Fechamento do poço ao longo do tempo (30 dias) para diferentes Teoria de endurecimento e pesos de fluidos de perfuração.

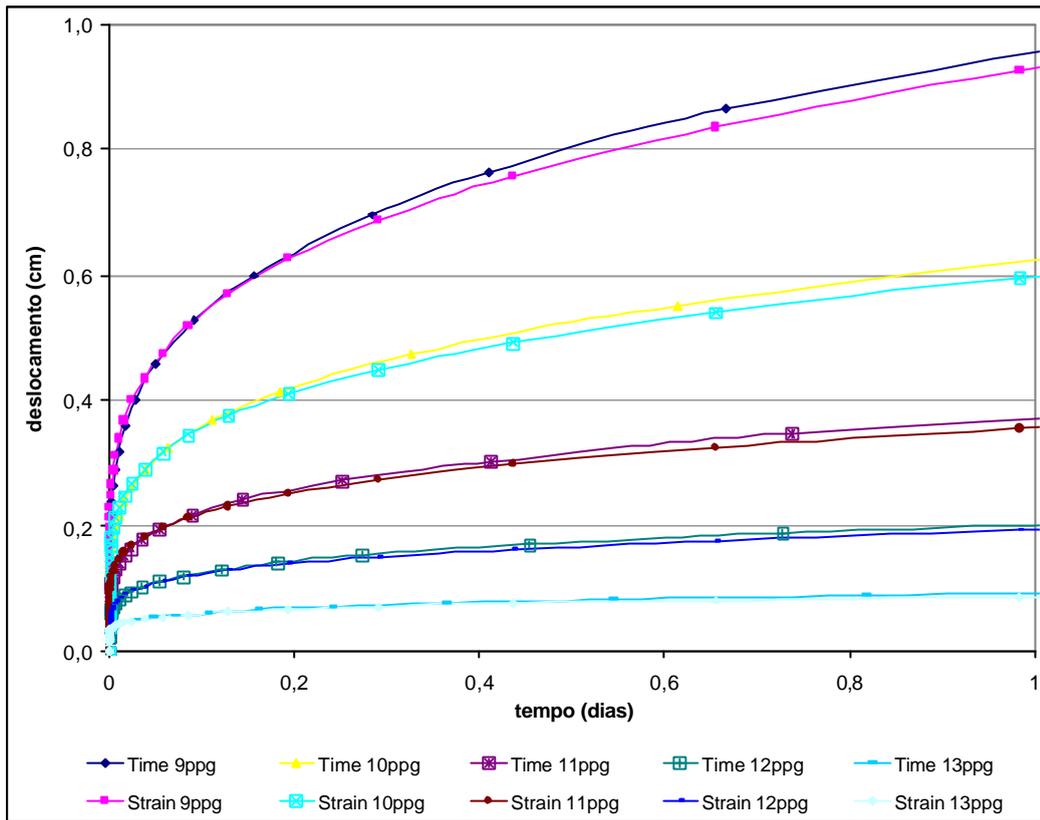


Figura 4-33: Fechamento do poço ao longo do tempo (1º dia) para diferentes Teoria de endurecimento e pesos de fluidos de perfuração.

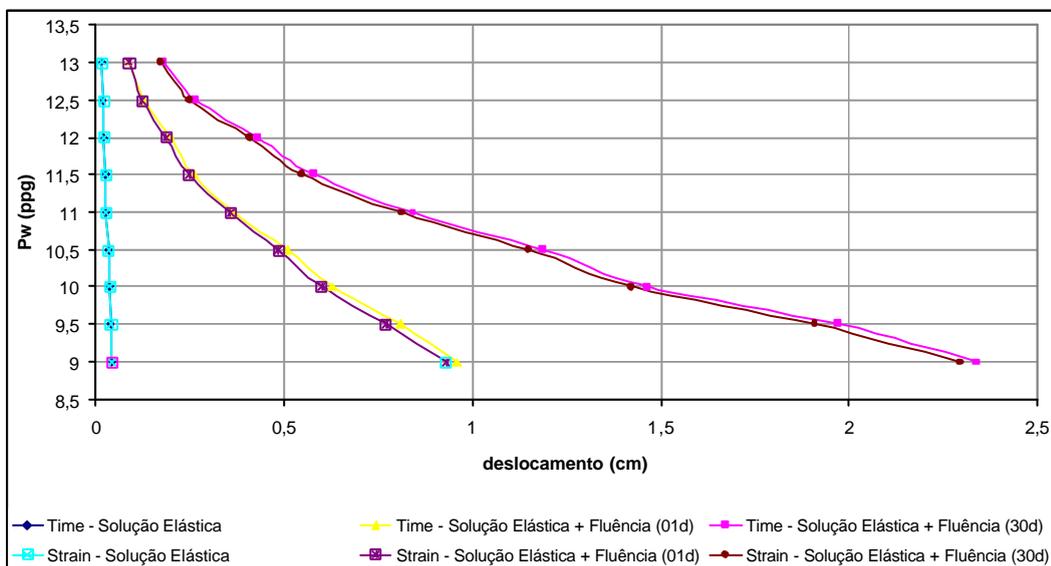


Figura 4-34: Fechamento do poço considerando a solução elástica e a fluência em 1 dia e em 30 dias para diferentes teorias e pesos de fluido de perfuração.

No gráfico da Figura 4-34 podem ser visualizadas curvas de deslocamento na parede do poço em diferentes instantes no tempo comparando a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido com a Teoria de endurecimento por

Deformação. Portanto, estão representadas seis curvas, duas para cada instante no tempo após a escavação: instantâneo, um dia e um mês. Logicamente, as duas correspondentes às soluções elásticas são similares, pois as formulações elásticas são as mesmas, independentemente da teoria de endurecimento utilizada. Por outro lado, as outras quatro curvas, tanto as duas correspondentes a um dia quanto as outras duas equivalentes um mês são praticamente semelhantes, mas não coincidentes.

4.8.2. Deformações

Na Figura 4-35 e na Figura 4-36, podem ser visualizadas as deformações radiais da parede do poço considerando a solução elástica mais a fluência em um mês e em um dia, respectivamente. Em ambas as escalas de tempo, assim como nos deslocamentos, as deformações são praticamente coincidentes para todos os fluidos de perfuração utilizados nas simulações numéricas quando se compara a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido ("*Time*") com a Teoria de endurecimento por Deformação ("*Strain*").

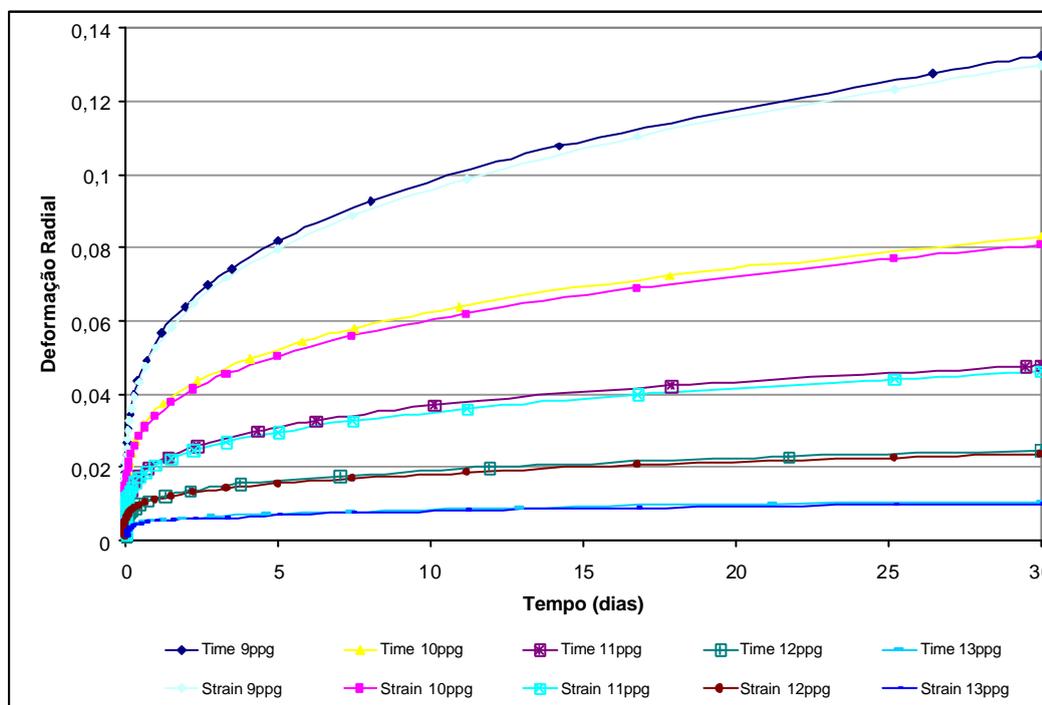


Figura 4-35: Deformação radial do poço ao longo do tempo (30 dias) para diferentes Teoria de endurecimento e pesos de fluidos de perfuração.

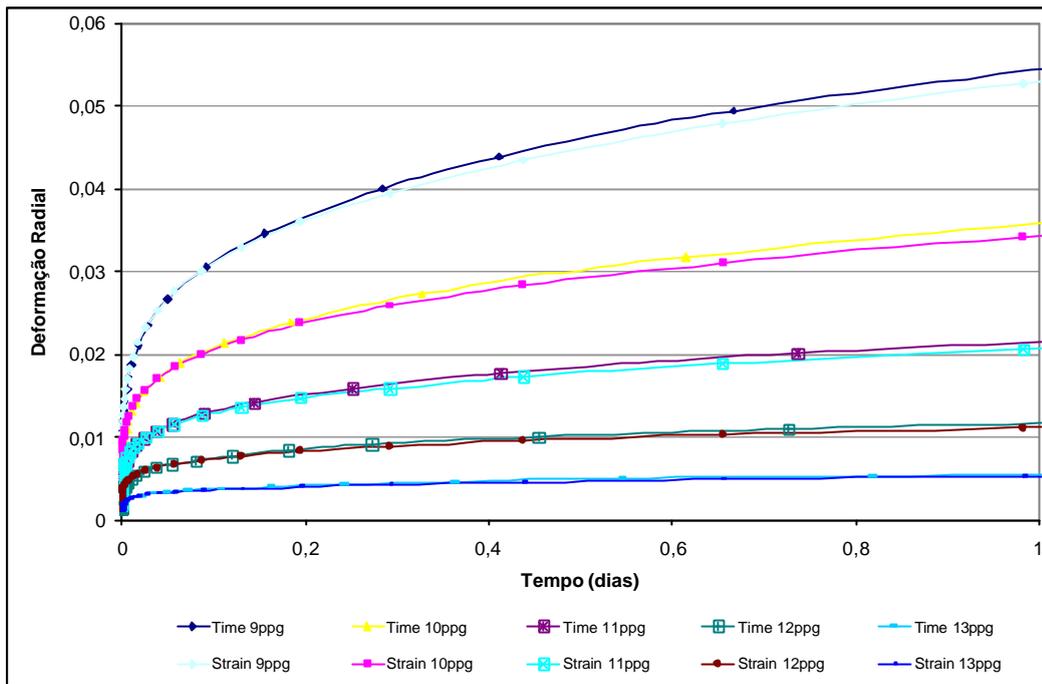


Figura 4-36: Deformação radial do poço ao longo do tempo (1º dia) para diferentes Teoria de endurecimento e pesos de fluidos de perfuração.

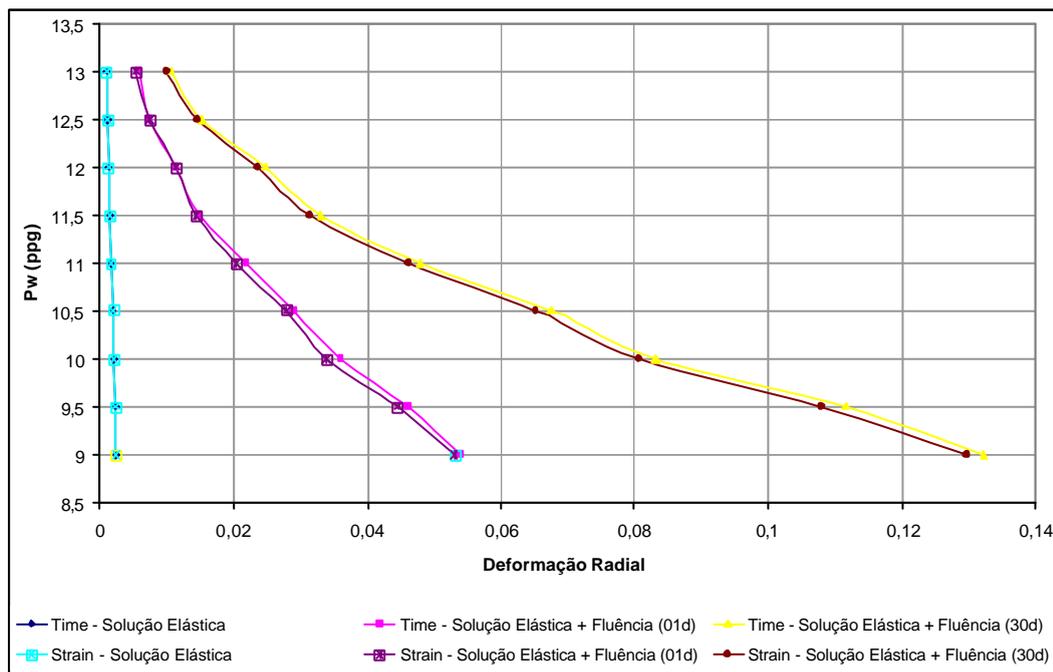


Figura 4-37: Deformação do poço considerando a solução elástica e a fluência em 1 dia e em 30 dias para diferentes teorias e pesos de fluido de perfuração.

A Figura 4-37 mostra curvas de deformação em diferentes instantes no tempo (instantâneo, um dia e um mês) na parede do poço comparando a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido com a Teoria de endurecimento por Deformação. Assim como aconteceu nos deslocamentos (Figura 4-34), as duas

curvas correspondentes às soluções elásticas são similares, pois as formulações elásticas são as mesmas, independentemente da teoria de endurecimento utilizada. Por outro lado, as outras curvas, tanto as duas correspondentes a um dia quanto as outras duas equivalentes um mês, não são exatamente coincidentes.

Na Figura 4-38 e na Figura 4-39, estão apresentadas as taxas de deformações na parede do poço ($\dot{\epsilon}$), em seg^{-1} ao longo do tempo comparando a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido (“Time”) e a Teoria de endurecimento por Deformação (“Strain”). Na Figura 4-38, a escala no eixo das ordenadas varia de 0 a $5,00\text{E-}07\text{s}^{-1}$ e na Figura 4-39 foi feito um “zoom”, em que se analisou as deformações de 0 a $1,0\text{E-}07\text{s}^{-1}$.

Pôde-se observar nestes dois gráficos da Figura 4-38 e da Figura 4-39 que a taxa de deformação ou velocidade de deformação decresce com o tempo, principalmente nos primeiros dias nas duas teorias, o que é esperado quando se está analisando a fluência primária, que é o caso das formulações utilizadas pelo Abaqus. Verifica-se também a semelhança entre as duas teorias, independentemente do peso de fluido de perfuração.

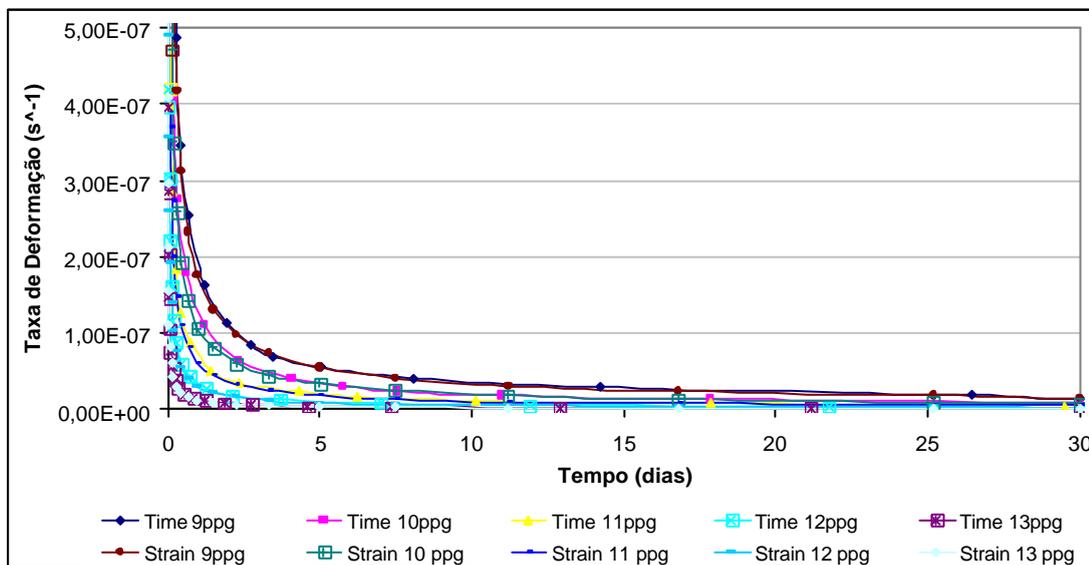


Figura 4-38: Taxa de deformação (0 a $5,00\text{E-}07\text{ s}^{-1}$) ao longo do tempo na parede do poço para diferentes teorias e pesos de fluidos de perfuração.

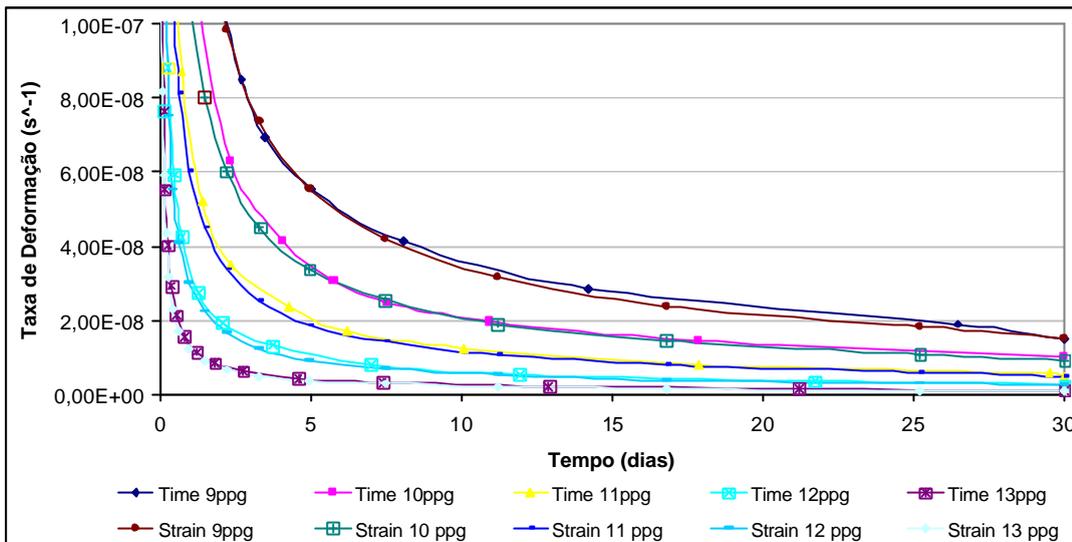


Figura 4-39: Taxa de deformação (0 a $1,00 \text{ E-}07 \text{ s}^{-1}$) ao longo do tempo na parede do poço para diferentes teorias e pesos de fluidos de perfuração, “zomm” da Figura 4-38.

4.8.3. Tensões

Nos gráficos da Figura 4-40 e da Figura 4-41 estão apresentadas as variações de tensões ao longo do eixo 1 (ver Figura 4-2), desde a parede do poço ($r/R=1$) até 20 vezes o raio do poço ($r/R=20$). Nestes exemplos, para que se pudesse realizar a comparação entre as duas teorias, utilizou-se um peso de fluido de perfuração de 11ppg.

Na Figura 4-40 e na Figura 4-41 observam-se tanto para as tensões radiais quanto para as tangenciais, respectivamente, que as soluções elásticas são coincidentes para ambas teorias. Nos demais instantes (1 hora, 1 dia, 1 mês), as curvas das duas teorias são praticamente semelhantes. Constata-se também que grande parte da redistribuição de tensões causada pela fluência acontece nos primeiros instantes após a escavação até a primeira hora, independentemente da teoria utilizada. Depois desta hora as tensões se alteram lentamente até os 30 dias.

Na Figura 4-40 todas as curvas, independentemente da teoria ou do instante no tempo, no afastamento $r/R=20$, coincidem no valor de 107 MPa, igual à condição de contorno do problema (ver Figura 4-4).

Na Figura 4-41 constata-se uma queda abrupta do valor da tensão tangencial na parede de poço logo após a escavação tanto para a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido (“Time”) quanto para a Teoria de

endurecimento por Deformação (“Strain”). Comparando as duas teorias no tempo (1 hora, 1 dia ,1 mês), observa-se também que as curvas são praticamente coincidentes.

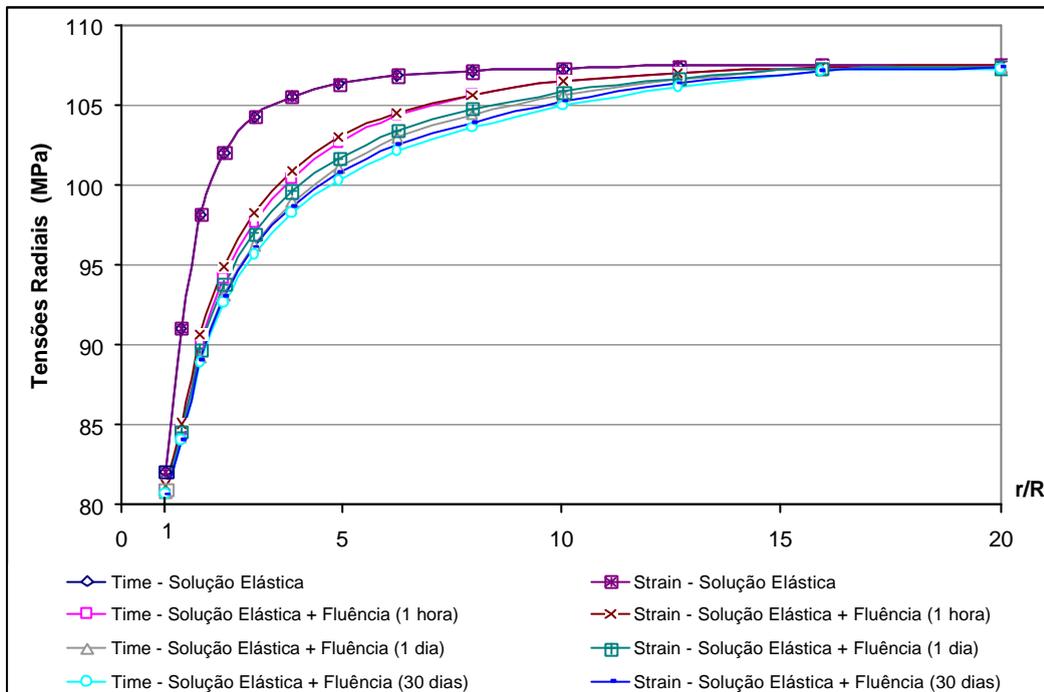


Figura 4-40: Tensões radiais ao redor do poço para as duas teorias de endurecimento em diversos instantes no tempo.

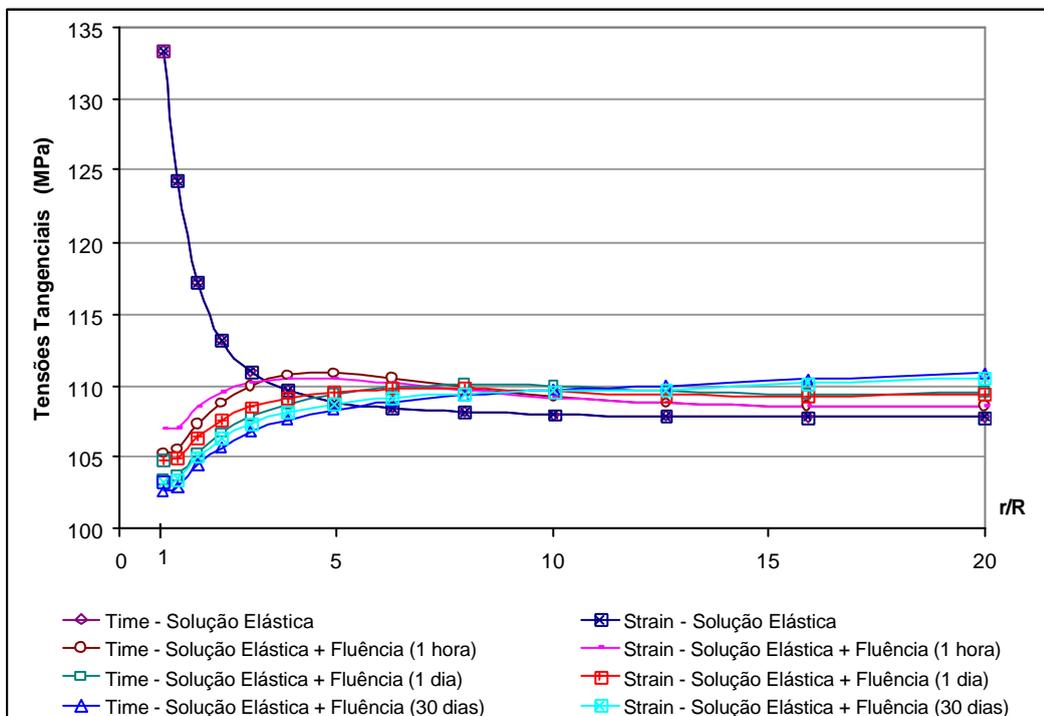


Figura 4-41: Tensões tangenciais ao redor do poço para as duas teorias de endurecimento em diversos instantes no tempo.