

## 5

# MODELAGEM DA FLUÊNCIA EM EVAPORITOS UTILIZANDO A ANÁLISE AXISSIMÉTRICA

No Capítulo 5, são apresentadas as modelagens computacionais realizadas no Abaqus utilizando a análise axissimétrica, com o objetivo de prever o comportamento elástico e, especialmente, 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, fazendo, um detalhado esclarecimento dos estágios de escavação. Além disso, os resultados das simulações numéricas são apresentados e discutidos a partir dos quais se analisam os deslocamentos, deformações e tensões na parede do poço e na sua vizinhança. Simultaneamente a estes resultados, também é estudado o impacto dos estágios de escavação no comportamento do sal.

Utilizou-se o programa de elementos finitos Abaqus tanto na versão “*time hardening*” como na versão “*strain hardening*” para as modelagens de fluência, ambas já explicitadas no item 3.5.1 e 3.5.2, respectivamente.

### 5.1. Estudo de Caso

Simulou-se o caso da perfuração de um poço de petróleo de 0,16 m de raio numa seção em 2D (duas dimensões), situada na camada de sal. A profundidade de estudo se estendeu de 6000 m a 6020 m abaixo do nível do mar. Diferentemente do que ocorreu na análise de deformação plana (em que se analisou somente uma seção do poço a 6000m), na análise axissimétrica foi analisado o comportamento do evaporito ao longo de uma espessura de 20 metros (Figura 5-1 e Figura 5-3). O estrato de sal foi modelado considerando o comportamento de fluência (“*creep*”). Para realizar esta experiência foi utilizado o método dos elementos finitos através do programa Abaqus.

Nesta modelagem axissimétrica, foram realizadas 10 escavações de 2 metros cada, no total de 20 metros, justamente para simular o andamento da perfuração do poço.

A característica da estratigrafia deste estudo de caso é similar à do capítulo anterior e está resumidamente apresentada na Tabela 5-1 e detalhadamente explicitada no item 4.1.

Tabela 5-1: Estratigrafia do estudo de caso.

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

## 5.2. Dados da Malha

Para simular o comportamento de fluência no poço de sal por uma análise axissimétrica, construiu-se uma malha de elementos finitos em 2D, composta por 20800 elementos e 21105 nós. Essa malha tem a característica de discretizar metade das dimensões totais do problema conforme representação esquemática da Figura 5-1. Adotou-se uma malha de 20 m (altura) x 15 m (largura) e um raio do poço de 0,16 m, como apresentado na Figura 5-1 e na Figura 5-3.

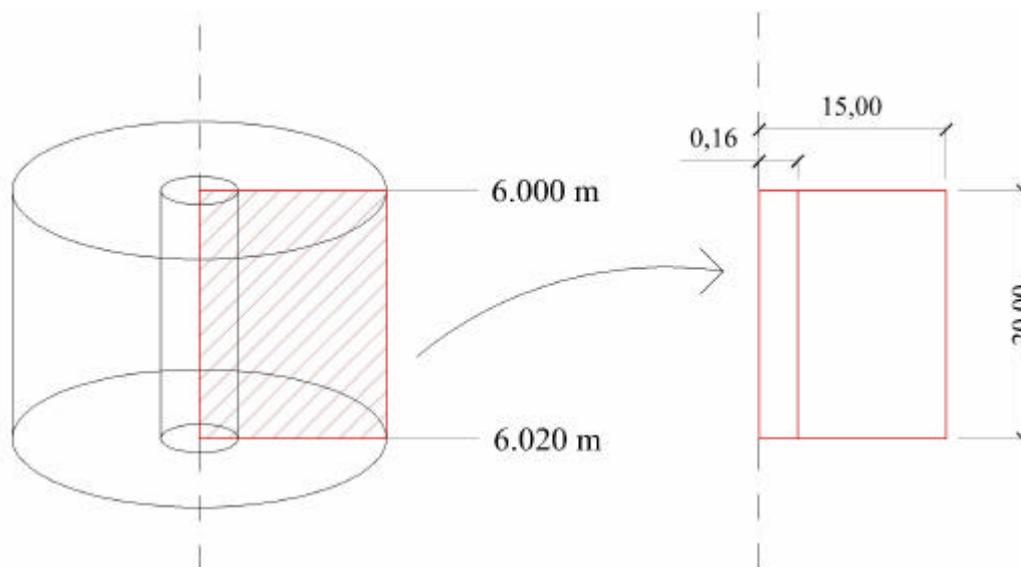


Figura 5-1: Representação esquemática da análise axissimétrica (sem escala).

Na Figura 5-2a é apresentada a malha de elementos finitos como um todo, onde os elementos azuis representam o corpo salino. Devido ao grande número de elementos, foram necessários 3 “zooms” consecutivos para melhor visualização da malha, dos elementos e do poço (Figura 5-2b,c,d).

Na Figura 5-2b e principalmente na Figura 5-2c visualiza-se a região em que foi simulada a primeira escavação, representada pelos elementos brancos. Em cada estágio de escavação, na zona a perfurar, foram utilizados 80 elementos, como pode ser observado na Figura 5-2c, sendo 4 elementos na largura equivalente ao raio do poço de 0,16m (4\*0,04m) e 20 elementos na profundidade correspondente a 2 metros (20\*0,1m). Como foram simulados 10 estágios de escavação, utilizaram-se 800 elementos (80 elementos \*10 estágios) para representar a zona a perfurar. O restante dos elementos (20000) são empregados para simular o corpo salino.

Na Figura 5-2c também pode ser observado que foi feito um maior refinamento na malha próxima ao poço, onde se esperam encontrar as maiores variações de tensões, deformações e deslocamentos. Este grau de refinamento diminui à medida que se afasta da parede do poço, onde são esperados menores variações de tensões, deformações e deslocamentos.

Na Figura 5-2d pode ser visto o tipo de elemento que foi usado na malha assim como um detalhe da simulação da primeira escavação. Observa-se que foram utilizados em toda a malha elementos quadrilaterais bilineares de 4 nós (Figura 4-2b), denominados de CAX4 no Abaqus tanto para simular a zona a perfurar quanto no restante do estrato de sal, totalizando em 20800 elementos. Foi escolhido este elemento por causa das seguintes características:

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

AX: “*axisymmetric*” – axissimétrico;

4: número de nós.

Na Figura 5-2 os eixos estão representados pelas letras x, y e z, que são equivalentes aos números 1, 2 e 3 da Figura 5-3, respectivamente. Na Figura 5-3 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. 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.

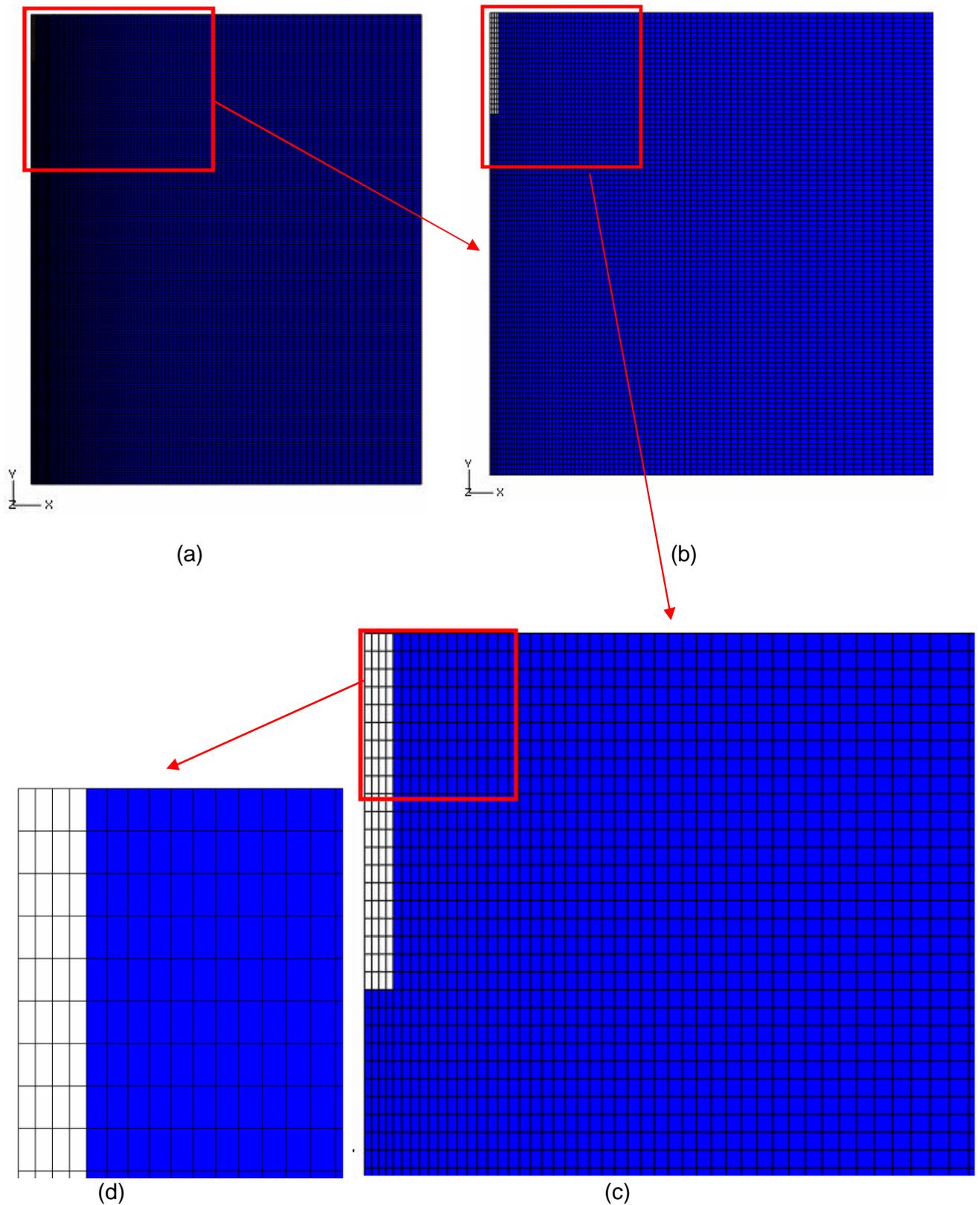


Figura 5-2: Malha de Elementos Finitos utilizada na simulação numérica (a) vista geral de toda a malha (b, c) “zoom” da malha na região do 1º estágio de escavação (d) “zoom” nos elementos que representam o poço, em branco, e o evaporito, em azul.

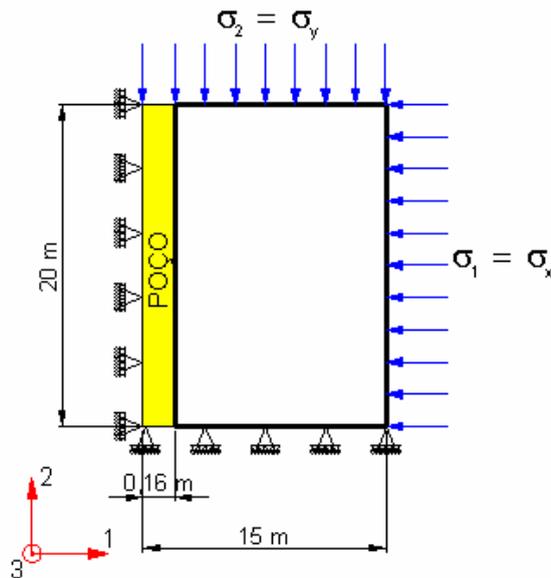


Figura 5-3: Representação esquemática das condições de contorno (sem escala).

### 5.3. Tensões de Sobrecarga

Utilizou-se o mesmo cálculo de tensões verticais do capítulo anterior (Tabela 4-2) para o cálculo das tensões “*in situ*”, já que as características da estratigrafia são similares. Foi considerado o caso isotrópico do material, no qual as tensões nas direções 1, 2 e 3 eram iguais ( $s_x = s_y = s_z$ ). Portanto, nas simulações numéricas, foram consideradas as tensões “*in situ*” iguais e constantes nas direções 1 e 2 aplicadas a seção de estudo. Em outras palavras, na Figura 5-3, adotou-se  $\sigma_1 = \sigma_2 = 107,58$  MPa.

### 5.4. Parâmetros utilizados

A simulação do *creep* no Abaqus possui duas fases: a fase elástica e fase de fluência. Na fase de fluência, os parâmetros elásticos e as constantes empíricas adotados foram similares aos do Capítulo 04 (item 4.4.), já que foram simuladas as mesmas características estratigráficas (Tabela 5-1).

Portanto, como detalhadamente explicitado nos item 4.4.1. e 4.4.2, o resumo dos parâmetros elásticos e constantes empíricas adotados em todas as simulações numéricas deste trabalho está apresentado na Tabela 5-2.

Tabela 5-2: Resumo dos parâmetros elásticos e constantes empíricas adotados.

Parâmetros Elásticos	Constantes empíricas de fluência
$E = 2,04 \text{ E}+07 \text{ KPa}$	$A = 2,3937 \text{ E}^{-26}$
$\nu = 0,36$	$n = 3,0$
-	$m = -0,7$

## 5.5. Etapas

A simulação foi dividida em vinte e uma 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, conforme descrito no item 5.3.

O segundo “*step*” é a desativação dos elementos que compõem o primeiro estágio de escavação para simular justamente a perfuração do poço. Neste mesmo *step* foram simuladas a resposta elástica e a introdução das pressões provocadas pelo peso do fluido de perfuração na parede do poço. Adotaram-se os valores obtidos na Tabela 4-3 para os valores equivalentes de tensões para cada peso de fluido de perfuração.

No terceiro “*step*”, ativa-se a fase do “*creep*” da primeira escavação. Nesta etapa, foi considerado um tempo de 900 segundos até que iniciasse a próxima escavação. Isso porque se adotou uma velocidade de perfuração de 8 m/h. Uma vez que cada escavação possuía 2 m, o tempo gasto nesta perfuração foi de 900s.

O quarto “*step*” é a desativação dos elementos que compõem a segunda escavação para simular justamente o andamento da perfuração do poço. Assim como no segundo “*step*”, foram simuladas a resposta elástica e a introdução das tensões na rocha salina provocadas pela pressão do fluido de perfuração na parede do poço neste trecho. Sendo assim, os “*steps*” pares correspondem sempre à desativação dos elementos que compõem a perfuração e, nestas etapas, também foram simuladas as respostas elásticas e a introdução das tensões na rocha de sal provocadas pela pressão do fluido de perfuração na parede do poço do respectivo trecho, como apresentado na Tabela 5-3.

No quinto “*step*”, assim como no terceiro e nas demais etapas ímpares, ativa-se a fase do “*creep*” da respectiva escavação durante 900 segundos

(Tabela 5-3). Além disso, a fluência continua acontecendo nos estágios de escavações anteriores. Por exemplo, na quinta etapa se ativou a fluência do trecho da 2ª escavação (6002 a 6004m) e também simulou a fluência do 1ª estágio de escavação (6000 a 6002m) por mais 900s.

Tabela 5-3: Resumo das 21 etapas utilizadas na simulação numérica.

<b>“Step” (etapa)</b>	<b>Estágio de Escavação (qtd)</b>	<b>Profun- didade (metros)</b>	<b>Tempo (segundos)</b>	<b>Execução</b>
1	-	6000	0	Tensões “ <i>in situ</i> ”
2	1ª	6000-6002	0	Solução elástica (1ª escavação)
3	-	6002	0-900	Fluência (1ª escavação – 900s)
4	2ª	6002-6004	900	Solução elástica (2ª escavação)
5	-	6004	900-1800	Fluência (900s)
6	3ª	6004-6006	1800	Solução elástica (3ª escavação)
7	-	6006	1800-2700	Fluência (900s)
8	4ª	6006-6008	2700	Solução elástica (4ª escavação)
9	-	6008	2700-3600	Fluência (900s)
10	5ª	6008-6010	3600	Solução elástica (5ª escavação)
11	-	6010	3600-4500	Fluência (900s)
12	6ª	6010-6012	4500	Solução elástica (6ª escavação)
13	-	6012	4500-5400	Fluência (900s)
14	7ª	6012-6014	5400	Solução elástica (7ª escavação)
15	-	6014	5400-6300	Fluência (900s)
16	8ª	6014-6016	6300	Solução elástica (8ª escavação)
17	-	6016	6300-7200	Fluência (900s)
18	9ª	6016-6018	7200	Solução elástica (9ª escavação)
19	-	6018	7200-8100	Fluência (900s)
20	10ª	6018-6020	8100	Solução elástica (10ª escavação)
21	-	6020	8100-2600100	Fluência (2592000s = 30 dias)

A vigésima primeira etapa foi um pouco diferente das anteriores. Nesta última etapa também se ativou a fluência do 10º trecho escavado (6018 a 6020m). No entanto, como apresentado na Tabela 5-3, foi considerado um tempo de estudo de 30 dias para a fluência. Isto significa que se pode analisar o comportamento do evaporito desde a escavação até o 30º dia. Em outras

palavras, foi simulada a fluência de todo estrato salino estudado por um período de 30 dias (2592000s) após a última escavação. 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 no Abaqus.

Na versão “*time hardening*”, depois de realizar todos os vinte e um “*steps*” e obter os resultados para um peso de fluido de perfuração, realizou-se este procedimento novamente para outros casos que levam em consideração diferentes pesos de fluido de perfuração. Sendo assim, foram realizadas nove simulações utilizando esta versão, com a alteração dos pesos dos fluidos de perfuração de 9 a 13 ppg, variando a cada 0,5 ppg.

Na versão “*strain hardening*” também foi realizada uma simulação numérica para efeito de comparação com a versão “*time hardening*”, usando um peso de fluido de perfuração de 11ppg. Utilizou-se somente a comparação com 11ppg por ser um valor intermediário entre 9 e 13 ppg e para que a análise dos resultados não ficasse repetitiva.

## **5.6. 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 muito bem apresentada por causa da escala de cores. Por outro lado, a análise dos resultados neste formato não é muito prática. Sendo assim, alguns desses resultados “default” foram colocados no Apêndice C para familiarização com o software e para melhor visualização da propagação dos efeitos da perfuração no estrato salino.

Os resultados serão apresentados, comentados e discutidos de forma gráfica para facilitar sua análise, assim como aconteceu no Capítulo 04. Além disso, também serão divididos em três blocos: deslocamentos, deformações e tensões.

### 5.6.1. Deslocamentos

Primeiramente, foi feita uma análise dos deslocamentos radiais na parede do poço com a simulação do avanço da escavação, considerando um peso de fluido de perfuração de 11ppg. Sendo assim, está apresentada na Figura 5-4 um gráfico em que cada curva representa o deslocamento radial no meio de cada estágio de escavação, ou seja, a 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 e 19 metros medidos a partir do topo da camada de sal analisada. Vale esclarecer que a curva “a 1 metro do topo”, por exemplo, corresponde a profundidade de 6001 m a partir da lâmina d’água. O eixo das abscissas é uma escala de tempo dividida por 900 segundos. Foi adotada esta escala, pois o deslocamento de cada trecho escavado se inicia após a simulação da perfuração, como está esquematizado na Tabela 5-3. Ou seja, quando “tempo/900s” for zero, é simulada a escavação do primeiro trecho e conseqüentemente se iniciam os deslocamentos radiais neste segmento. Quando “tempo/900s” for um, iniciam-se os deslocamentos do segundo trecho e assim sucessivamente.

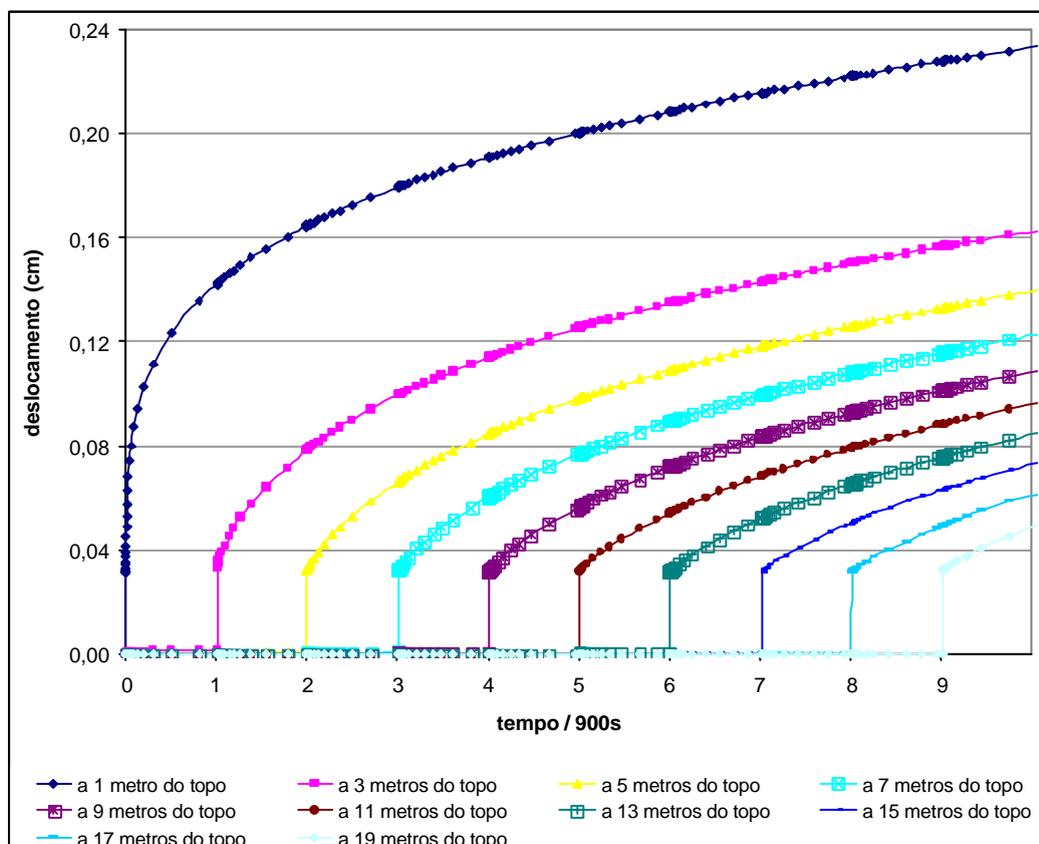


Figura 5-4: Fechamento do poço com avanço da escavação.

Na Figura 5-4 também podem ser visualizados claramente os deslocamentos causados pela solução elástica instantânea em cada trecho de escavação, representado pelo segmento reto inicial de cada curva. Como os parâmetros elásticos foram os mesmos em todo o estrato de sal modelado, os deslocamentos provocados pela solução elástica também foram iguais (0,032cm), independentemente da profundidade analisada.

Por outro lado, os deslocamentos provocados pela fluência não aconteceram da mesma forma para todas as profundidades analisadas apesar de as constantes empíricas terem sido iguais. Constatou-se que os deslocamentos próximos ao topo do estrato salino estudado, curva “a 1 metro do topo” da Figura 5-4, sofreram influência da modelagem e da variação do estado de tensões. Sendo assim, decidiu-se analisar neste capítulo o comportamento do ponto localizado “a 11 metros do topo”, ou seja, a 6011 m abaixo da lâmina d’água.

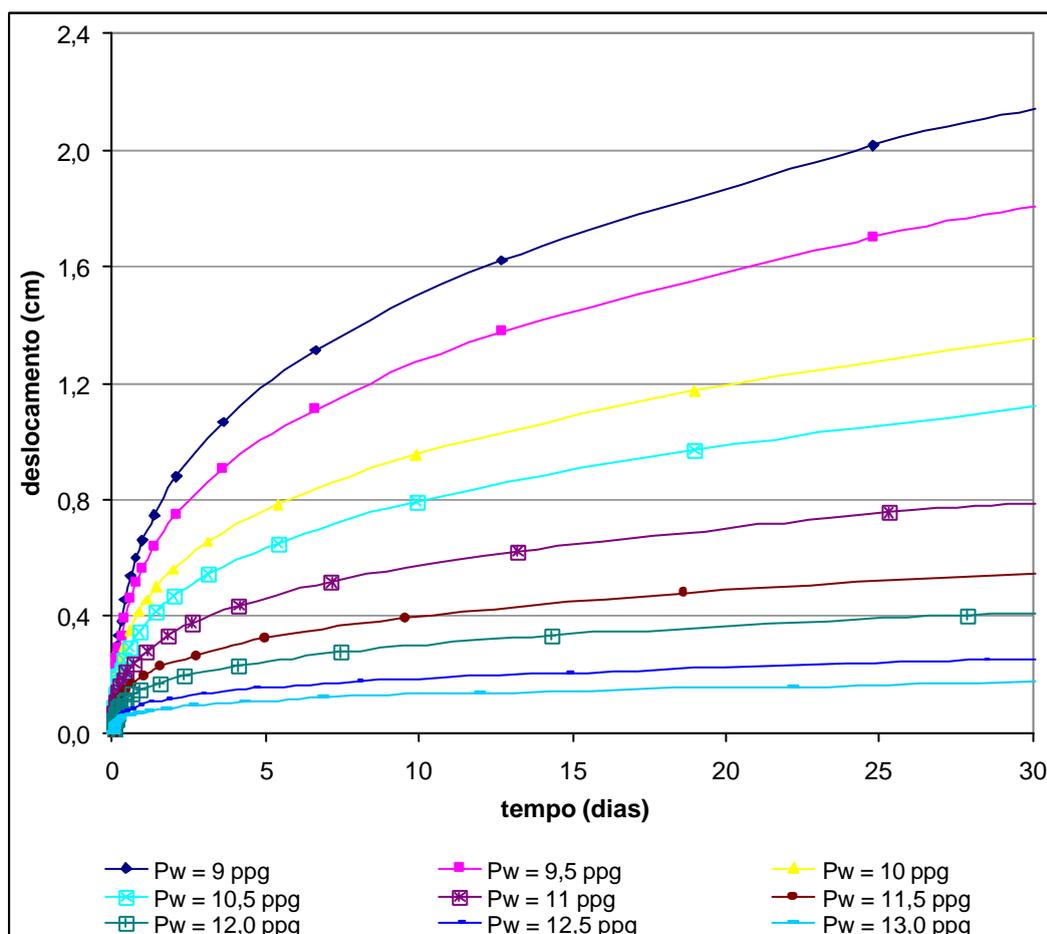


Figura 5-5: Fechamento do poço ao longo do tempo (30 dias) para diferentes fluidos de perfuração.

Na Figura 5-5 e na Figura 5-6 estão apresentados os deslocamentos radiais na parede do poço, a 11 metros do topo da camada salina estudada, ou seja, a 6011 m abaixo da lâmina d'água, levando-se em conta um período de tempo de um mês e um dia, respectivamente. Foram consideradas a solução elástica e a fluência do período analisado para os diversos fluidos de perfuração, do 9 ao 13 ppg, variando em 0,5 ppg. Analisando estes dois gráficos, os deslocamentos na parede do poço foram menores quando se fez a modelagem com maiores pesos de fluido de perfuração.

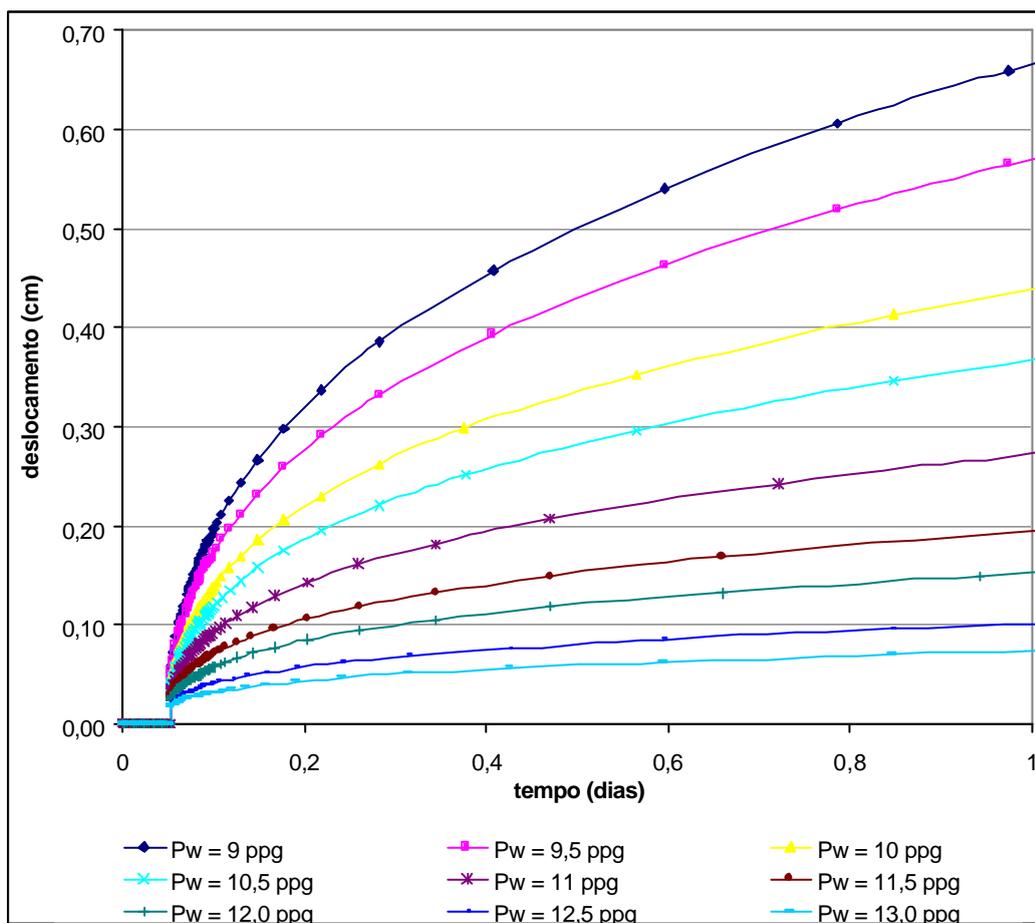


Figura 5-6: Fechamento do poço ao longo do tempo (1º dia) para diferentes fluidos de perfuração.

Como já dito, na Figura 5-6 podem ser visualizadas as mesmas curvas da Figura 5-5, todavia, com um enfoque nos deslocamentos radiais na parede do poço no primeiro dia após o início da perfuração do estrato salino. Os deslocamentos somente se iniciaram no instante igual a 0,05 dias (4500 segundos), correspondente ao momento em que a simulação da perfuração do poço ultrapassou o ponto de análise, ou seja, a 11 metros a partir do topo

camada salina conforme Tabela 5-3. Vale a pena lembrar que a velocidade de perfuração adotada foi de 8m/h, então cada estágio de escavação de 2 metros durou 900 segundos.

No gráfico apresentado na Figura 5-7, pode ser observado o deslocamento radial na parede do poço (eixo 'x') pelos diversos pesos de fluidos de perfuração (eixo 'y') considerando também o ponto de análise a 11 metros do topo da camada salina estudada. 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, a partir do início da escavação do topo do estrato salino.

Na Figura 5-7, percebe-se que os deslocamentos gerados pela solução elástica são praticamente desprezíveis quando comparados com os deslocamentos causados pela fluência. Verifica-se também que os deslocamentos no primeiro dia após a perfuração do poço são maiores que os demais.

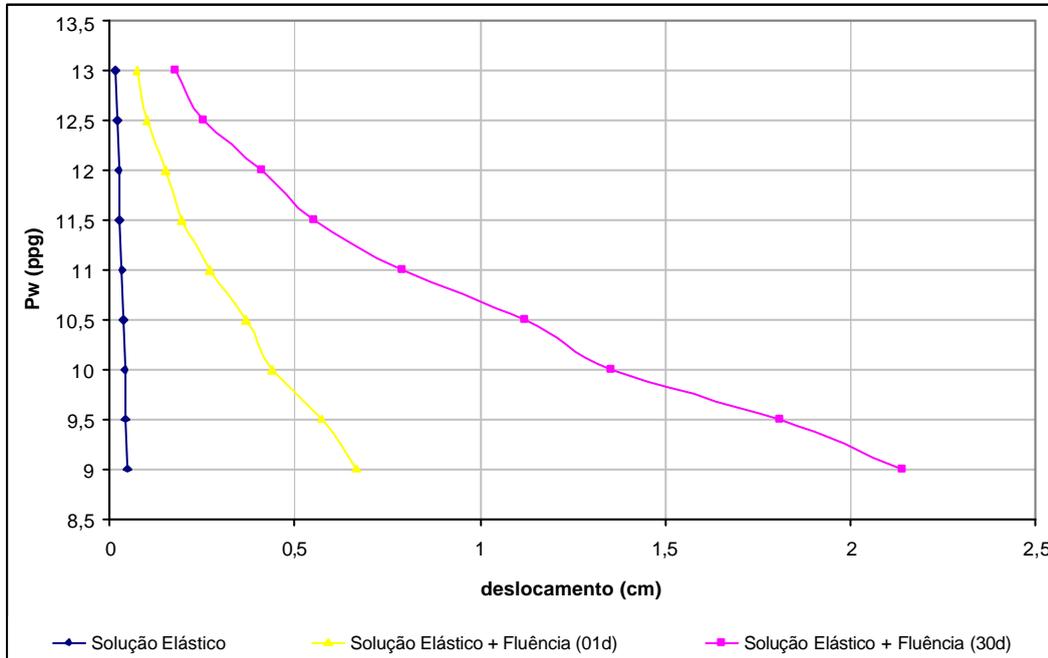


Figura 5-7: Fechamento do poço considerando a solução elástica e a fluência em 1 dia e em 30 dias para diversos pesos de fluido de perfuração.

A Figura 5-8 e a Figura 5-9 apresentam os comportamentos dos deslocamentos radiais do evaporito desde a parede do poço ( $r/R = 1$ ) até uma

distância equivalente a 8 vezes o raio do poço ( $r/R = 8$ ) para um peso de fluido de perfuração de 11ppg, analisando sempre a 11 metros do topo da camada de sal modelada. 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. Cada curva representa uma etapa da simulação numérica conforme descrito detalhadamente na Tabela 5-3. Na Figura 5-9 foi feito um "zoom" da Figura 5-8 no eixo 'y', de 0 a 0,1cm, para facilitar a visualização das curvas.

Como está explicitado na Tabela 5-3, as etapas 10 e 11 correspondem aos deslocamentos gerados pelo 5º estágio de escavação. Na etapa 10 é simulada a perfuração de 8 a 10 metros, a pressão causada pelo fluido de perfuração de 11ppg e a resposta elástica. A etapa 11 corresponde aos deslocamentos de fluência deste quinto estágio de escavação. Os deslocamentos provocados pelas etapas de 2 a 11 foram aproximadamente zero, pois a simulação da perfuração do poço ainda não chegou no ponto analisado, que estava a 11 metros do topo do estrato salino, ou seja, a 6011 m. Em outras palavras, a aproximação da escavação não provocou deslocamentos significativos no ponto de estudo. Como esses deslocamentos se aproximaram de zero, não houve necessidade de mostrar as curvas das etapas 2 a 9 na Figura 5-8 e na Figura 5-9, pois coincidiriam com as curvas das etapas 10 e 11.

O ponto analisado foi perfurado no 6º estágio de escavação, ou seja, na 12ª etapa, em que aconteceram os deslocamentos causados pela solução elástica. Na Figura 5-9, podem ser visualizados claramente esses deslocamentos ao redor do poço. Então, os valores dos deslocamentos provocados pela 12ª etapa podem ser obtidos pela diferença entre as curvas "etapa 12" e "etapa 11". Como os valores da curva "etapa 11" se aproximam de zero, os deslocamentos gerados por esta etapa é a própria curva "etapa 12".

A 13ª etapa corresponde aos deslocamentos provocados pela fluência durante 900 segundos após o início da escavação deste trecho de 6010 a 6012 metros. Como se adotou uma velocidade de perfuração de 8m/h, 900s corresponderam ao tempo gasto em um segmento de 2 metros. A Figura 5-9 mostra os deslocamentos devidos à fluência em 900 segundos, podendo ser obtidos pela diferença entre as curvas "etapa 13" e "etapa 12". Os deslocamentos acumulados até a 13ª etapa estão apresentados na curva "etapa 13".

A 14ª etapa, assim como as outras etapas pares subseqüentes, correspondem às soluções elásticas instantâneas após a escavação do respectivo trecho. Ou seja, a 14ª etapa simulou a escavação e a resposta

elástica do 7º estágio de escavação, de 6012 a 6014 metros. A 16ª etapa simulou a escavação e a resposta elástica do 8º estágio de escavação, de 6014 a 6016 metros e assim sucessivamente (Tabela 5-3). Portanto, pode ser observado na Figura 5-8 e na Figura 5-9 que o ponto de estudo (6011m) não é influenciado por essas etapas. Em outras palavras, a simulação do andamento da perfuração após o ponto estudado não provoca novos deslocamentos elásticos, pois todo o deslocamento elástico a 11 metros do topo da modelagem já ocorreu instantaneamente na 12ª etapa.

A 15ª, 17ª e 19ª etapas correspondem aos deslocamentos ao redor do poço causado pela fluência em 900 segundos. Os valores dos deslocamentos causados nessas etapas são a diferença entre as curvas destas etapas e as etapas anteriores. Por exemplo, na Figura 5-9, os deslocamentos ao redor do poço provocado pela 17ª etapa podem ser obtidos pela diferença da curva “etapa 17” e a curva “etapa 16”.

Finalmente, a 21ª etapa corresponde aos deslocamentos ao redor do poço causado pela fluência em 30 dias. Na Figura 5-8, a distância da curva “etapa 21” em relação às outras curvas se justificou pelo tempo em que a fluência estava sendo considerada. Isto é, nas outras etapas ímpares (da 3ª à 19ª), foi considerado um período de fluência de 900s, diferentemente da 21ª etapa, que foi de 30 dias. Os deslocamentos significativos de fluência ao redor do poço provocados somente pela 21ª etapa podem ser obtidos pela diferença entre as curvas “etapa 21” e “etapa 20”. Pode-se visualizar na Figura 5-8 os deslocamentos desde o início da escavação até a 21ª etapa, que são justamente os valores que geram a curva “etapa 21”.

Observa-se ainda que nas curvas da “etapa 12” até a “etapa 21” da Figura 5-8 e da Figura 5-9 os deslocamentos na parede do poço foram maiores e decresceram à medida que se afastaram dele, independentemente da etapa analisada. Vale destacar também que, nestas curvas, os deslocamentos mais significativos aconteceram próximos à parede do poço.

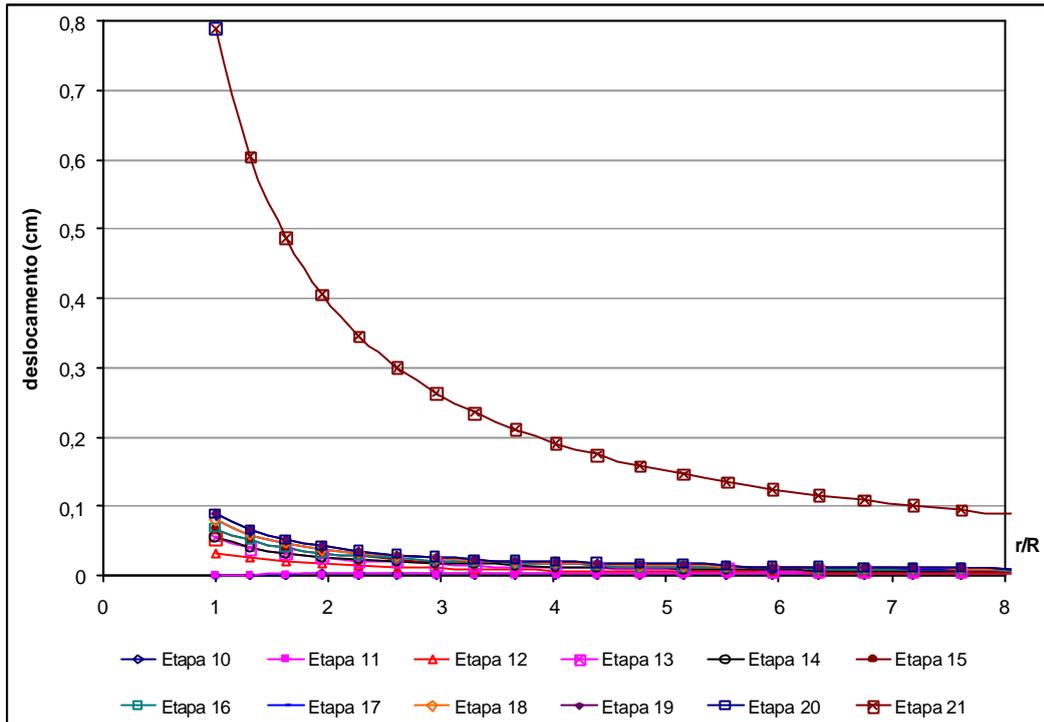


Figura 5-8: Deslocamento radial (0 a 0,8 cm) ao redor do poço para um peso de fluido de 11 ppg.

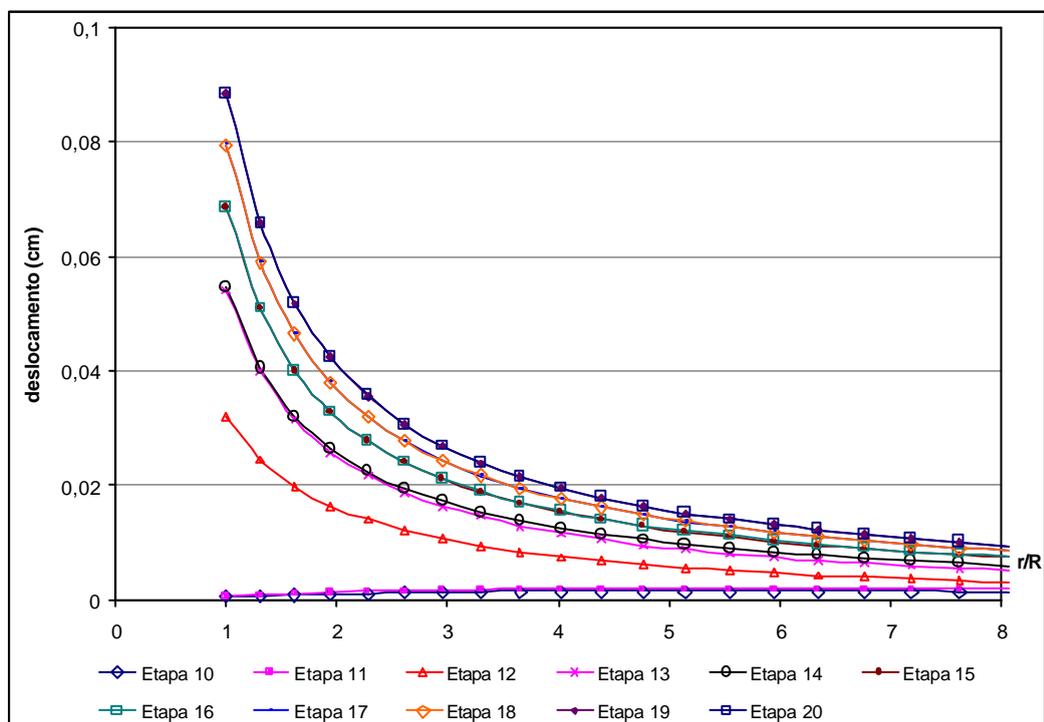


Figura 5-9: Deslocamento radial ("zoom" em 0,1 cm) ao redor do poço para um peso de fluido de 11 ppg.

Na Figura 5-10 estão apresentados os deslocamentos radiais em relação ao afastamento do eixo do poço, considerando a solução elástica instantânea e

a fluência em um período de um mês. Cada curva representa um peso de fluido de perfuração utilizado, que foi de 9ppg, 11ppg e 13ppg. Apesar de o gráfico em questão mostrar os dados até uma distância equivalente a 50 vezes o raio do poço ( $r/R = 50$ ), os deslocamentos significativos ocorreram nas proximidades do poço até uma distância de cinco vezes o raio do poço ( $r/R = 5$ ), independente do peso de fluido de perfuração utilizado.

Pode ser constatado também pela Figura 5-10 que, para o fluido de 9 ppg, os deslocamentos devidos à fluência são mais impactados por causa da maior diferença de tensões entre as tensões “*in situ*” e as pressões geradas pelo fluido de perfuração quando comparados com os resultados da 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, não importando o peso de fluido de perfuração utilizado.

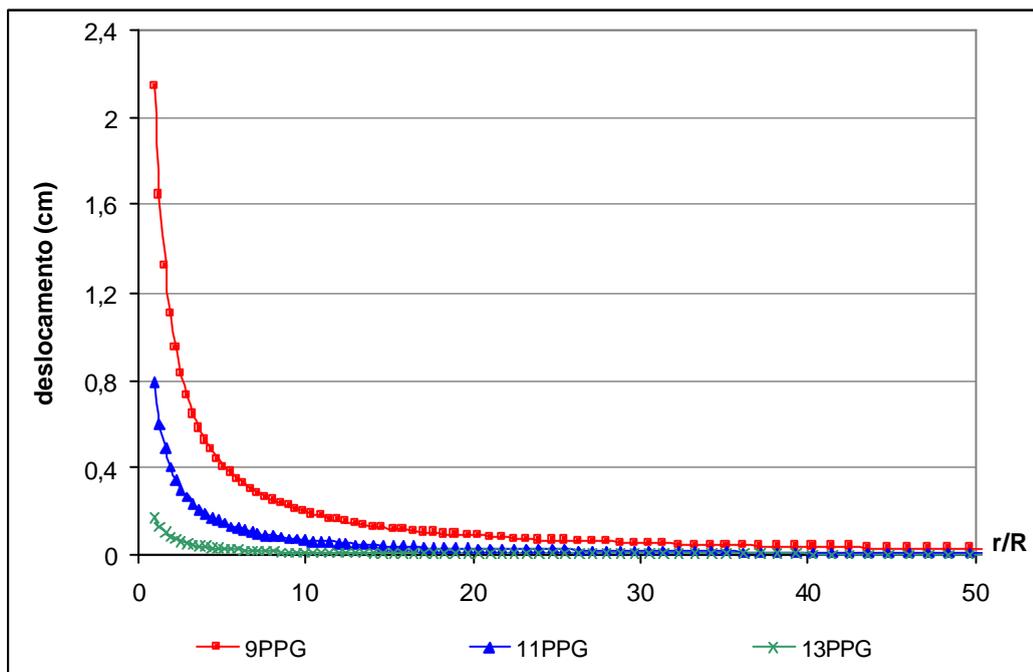


Figura 5-10: Deslocamento horizontal ao redor do poço considerando a solução elástica mais a fluência em um mês.

### 5.6.2. Deformações

Na Figura 5-11 e na Figura 5-12, estão apresentadas as deformações radiais na parede do poço ao longo do tempo, considerando a solução elástica e a fluência. Na Figura 5-11 foi levado em conta um período de fluência de um

mês e na Figura 5-12, um período de um dia. Vale destacar novamente que todos esses cálculos de deformações foram feitos na parede do poço, a 11 metros do topo do estrato que foi modelado (ver Figura 5-1), ou seja, a 6011 m abaixo da lâmina d'água. Outro ponto importante é que a deformação no eixo das coordenada é adimensional, isto é, 0,02 corresponde a 2% de deformação horizontal.

Nas simulações numéricas com maiores pesos de fluido de perfuração se observam menores deformações na parede do poço em qualquer instante analisado, tanto para pequenos intervalos de tempo quanto para um período de 30 dias (Figura 5-11 e Figura 5-12).

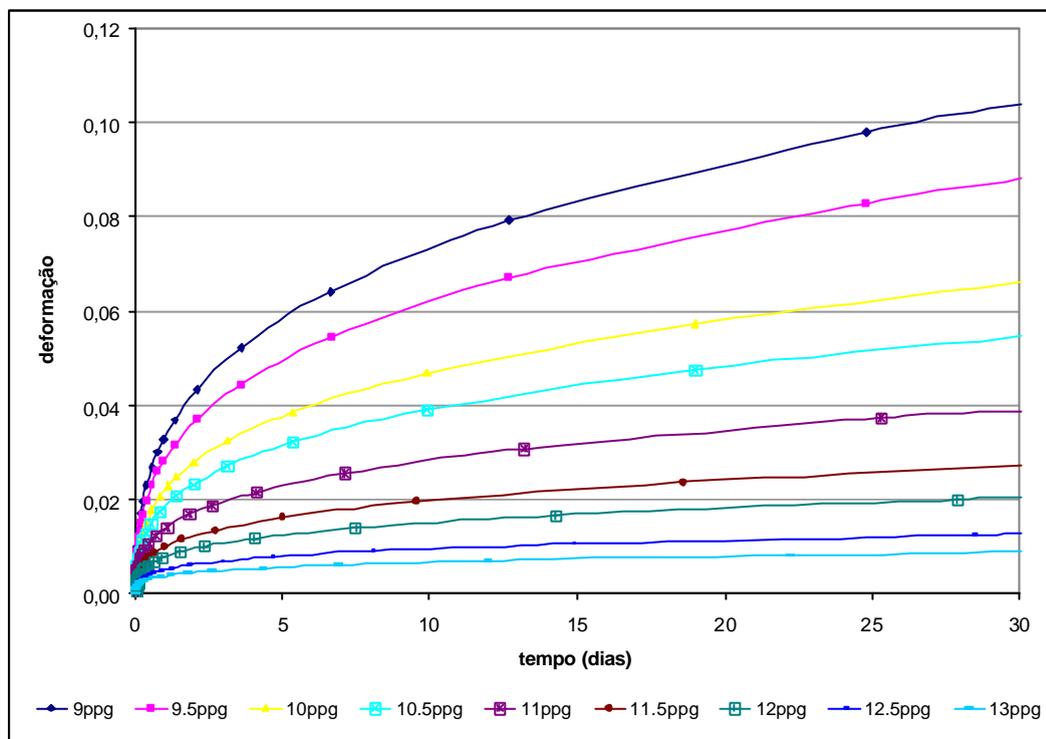


Figura 5-11: Deformações radiais na parede de poço para diversos fluidos de perfuração em um mês.

Na Figura 5-12 (assim como na Figura 5-6), os deslocamentos somente se iniciaram no instante igual a 0,05 dias (4500 segundos), correspondente ao momento em que a simulação da perfuração do poço ultrapassou o ponto de análise, ou seja, a 11 metros a partir do topo camada salina.

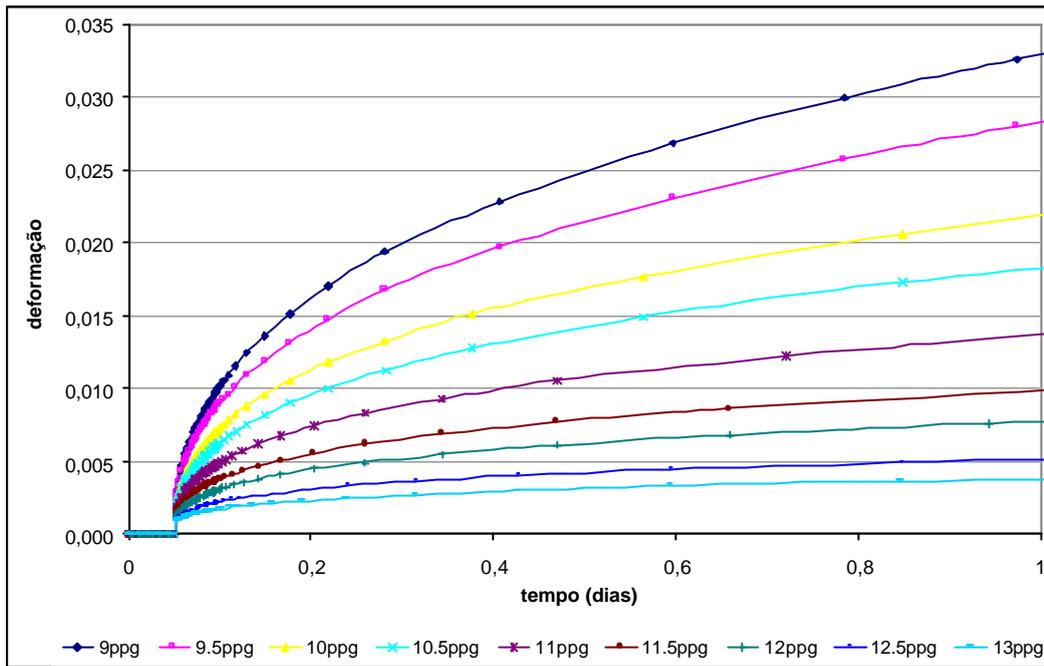


Figura 5-12: Deformações radiais horizontais na parede de poço para diversos fluidos de perfuração no 1º dia.

Na Figura 5-13, o ponto de análise também está na parede do poço a 11 metros do topo do estrato salino modelado, isto é, a 6011 m abaixo da lâmina d'água. Nesta figura, 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 foram muito elevadas.

As deformações por fluência apresentadas neste item (5.6.2) dependem diretamente da lei de formação e dos parâmetros adotados na modelagem. Uma correta calibração das constantes empíricas de fluência, por exemplo, são de fundamental importância para prever as corretas deformações que ocorrerão numa situação real de perfuração de um poço de petróleo em um estrato salino. Neste estudo de caso, os parâmetros e constantes utilizados estão apresentados no item 5.4.

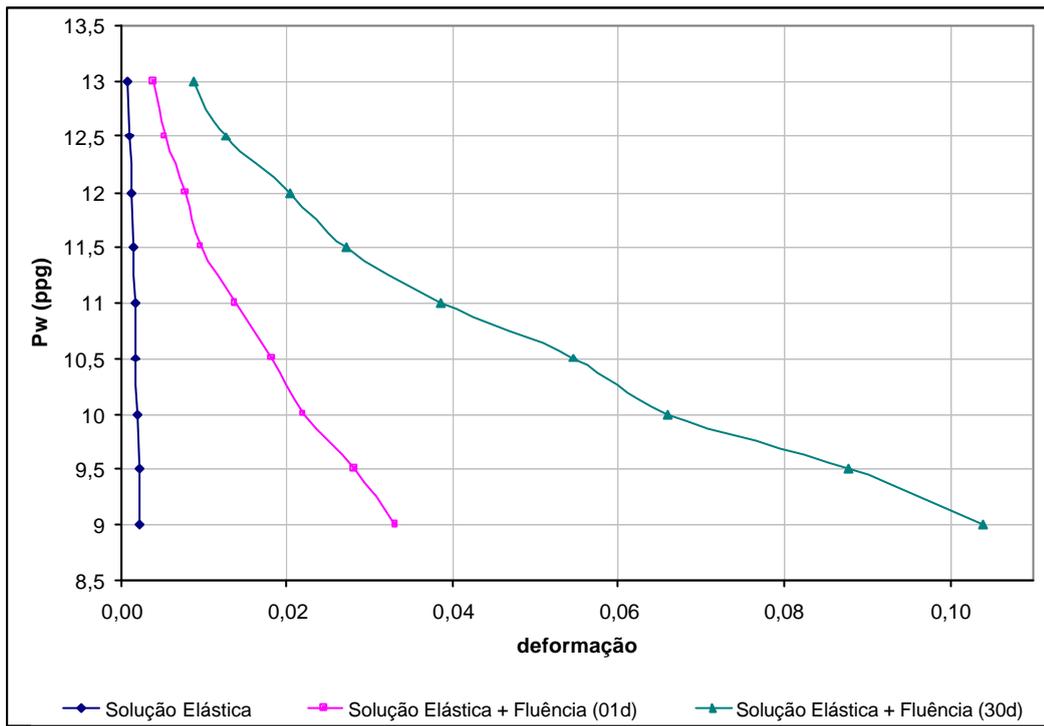


Figura 5-13: Deformação horizontal considerando a solução elástica e a fluência em 1 dia e em 30 dias para diversos pesos de fluido de perfuração.

### 5.6.3. Tensões

Na Figura 5-14 e na Figura 5-15, estão apresentadas as tensões radiais ao redor do poço, considerando o ponto analisado a 11 metros do topo do estrato salino modelado, ou seja, a 6011 m a partir do lâmina d'água (Tabela 5-3). A Figura 5-14 mostra essas tensões desde a parede do poço ( $r/R=1$ ) até um afastamento de 50 vezes o raio do poço ( $r/R=50$ ). Na Figura 5-15 foi feito um “zoom” no eixo das abscissas da figura anterior, passando para uma análise até 8 vezes o raio do poço ( $r/R=8$ ) para melhor visualização das curvas.

Como explicitado na Tabela 5-3, as etapas 10 e 11 corresponderam aos deslocamentos gerados pela solução elástica e pela fluência, respectivamente, do 5º estágio de escavação. As tensões não variaram nas etapas de 2 a 11, ou seja, permaneceram iguais às tensões “*in situ*” (107 MPa), pois a aproximação da escavação não provocou variações de tensões. Então, na Figura 5-14 e na Figura 5-15, como estas tensões radiais não variaram até a 11ª etapa, não houve necessidade de mostrar as curvas das etapas 2 a 9, pois coincidiriam com as curvas das etapas 10 e 11.

O ponto analisado foi perfurado no 6º estágio de escavação, ou seja, na 12ª etapa, no qual aconteceu a variação brusca das tensões radiais com a simulação da perfuração, da resposta elástica e das pressões geradas pelo peso do fluido de perfuração. Por exemplo, na parede do poço ( $r/R=1$ ), as tensões radiais que se igualavam às tensões “*in situ*” (107 MPa) deveriam passar a ser iguais as pressões provocadas pelo peso de fluido de 11ppg (77 MPa). Esta pequena diferença em relação ao valor apresentado na Figura 5-15 foi ocasionado devido ao esquema de cálculo das tensões no método dos elementos finitos. Foi feito o cálculo nos pontos de integração do elemento e estes valores foram extrapolados para a parede do poço.

A 13ª etapa correspondeu às redistribuições de tensões radiais provocados pela fluência durante 900 segundos após o início da escavação deste trecho de 6010 a 6012 metros. A curva “etapa 13” da Figura 5-15 mostra as tensões radiais ao redor do poço depois de simulada a perfuração, a solução elástica e a fluência. As diferenças entre as curvas “etapa 13” e “etapa 12” correspondem às variações de tensões provocadas pela fluência.

A 14ª etapa, assim como as outras etapas pares subseqüentes, correspondem às soluções elásticas instantâneas após a escavação do

respectivo trecho (Tabela 5-3). A partir daí, podem ser observados na Figura 5-15, que o ponto de estudo (6011m) não foi influenciado por estas etapas. Em outras palavras, a simulação do andamento da perfuração após o ponto estudado não provoca alteração nas tensões radiais, assim como ocorreu nos deslocamentos.

A 15<sup>a</sup>, 17<sup>a</sup> e 19<sup>a</sup> etapas corresponderam às tensões radiais ao redor do poço causado pela fluência em 900 segundos (Tabela 5-3). Os valores das tensões radiais gerados nestas etapas são a diferença entre as curvas destas etapas e as etapas anteriores. Por exemplo, na Figura 5-15, as tensões radiais ao redor do poço provocadas pela 15<sup>a</sup> etapa podem ser obtidas pela diferença da curva “etapa 15” e a curva “etapa 14”.

A 21<sup>a</sup> etapa correspondeu às tensões radiais ao redor do poço causado pela fluência em 30 dias. Na Figura 5-14 ou na Figura 5-15, a distância da curva “etapa 21” em relação às outras curvas se justifica pelo tempo em que a fluência está sendo considerada. Isto é, nas outras etapas ímpares (da 3<sup>a</sup> à 19<sup>a</sup>), está sendo considerado um período de fluência de 900s, diferentemente da 21<sup>a</sup> etapa, que foi de 30 dias.

Observa-se também na Figura 5-14 e na Figura 5-15 a grande variação de tensões radiais provocada pela fluência desde o início da perfuração do poço até o final da análise, que pode ser visualizado pela diferença entre as curvas “etapa 21” e “etapa 12”. Constata-se também que a redistribuição de tensões causada pela fluência é maior logo após a simulação da escavação quando comparada com os outros instantes. Isto pode ser comprovado pela maior diferença entre as curvas “etapa 13” e “etapa 15” em relação à diferença entre a “etapa 17” e a “etapa 19”.

Na Figura 5-14, como já era esperado, pode ser visto em todas as curvas que, a uma distância de 50 vezes o raio do poço ( $r/R=50$ ), as tensões radiais se igualaram às tensões “*in situ*” (107MPa). Constatou-se ainda que à medida que a diferença de tensões aumenta, acresce também a extensão até a estabilização das tensões. Por exemplo, a curva referente à “etapa 12” se iguala às tensões “*in situ*” a uma distância de oito vezes o raio do poço ( $r/R=8$ ). No entanto, a “etapa 21” somente se iguala aos 107 MPa a uma distância de 35 vezes o raio do poço ( $r/R=35$ ).

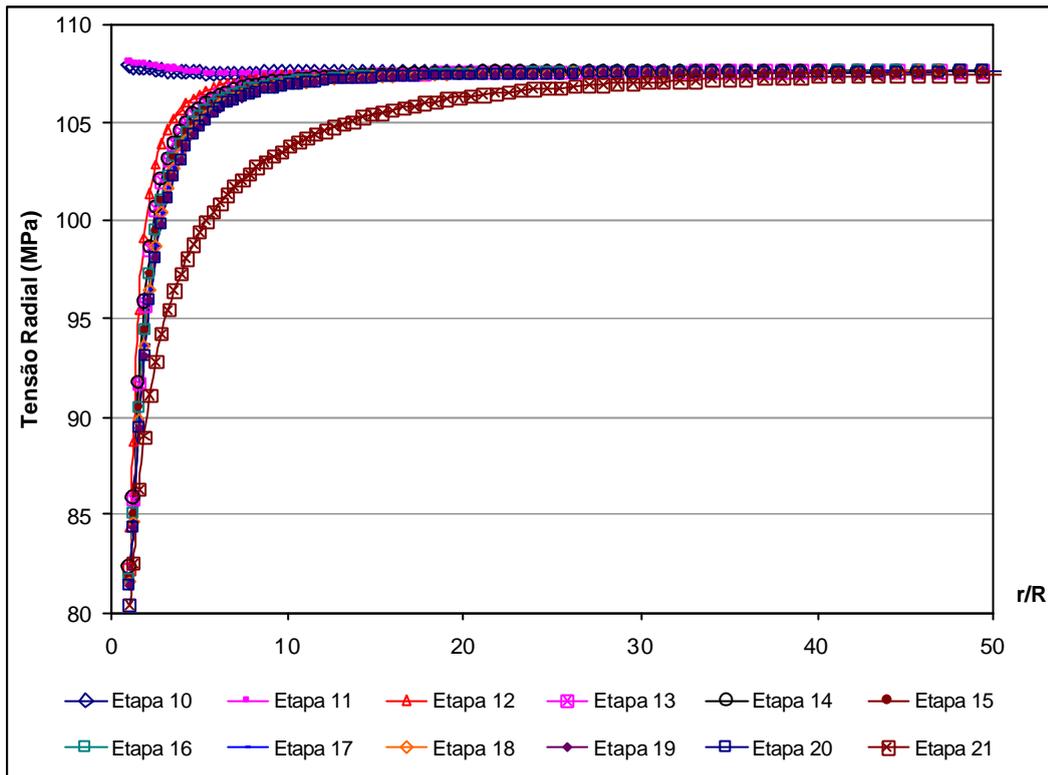


Figura 5-14: Redistribuição das tensões radiais ao redor do poço ( $r/R = 50$ ).

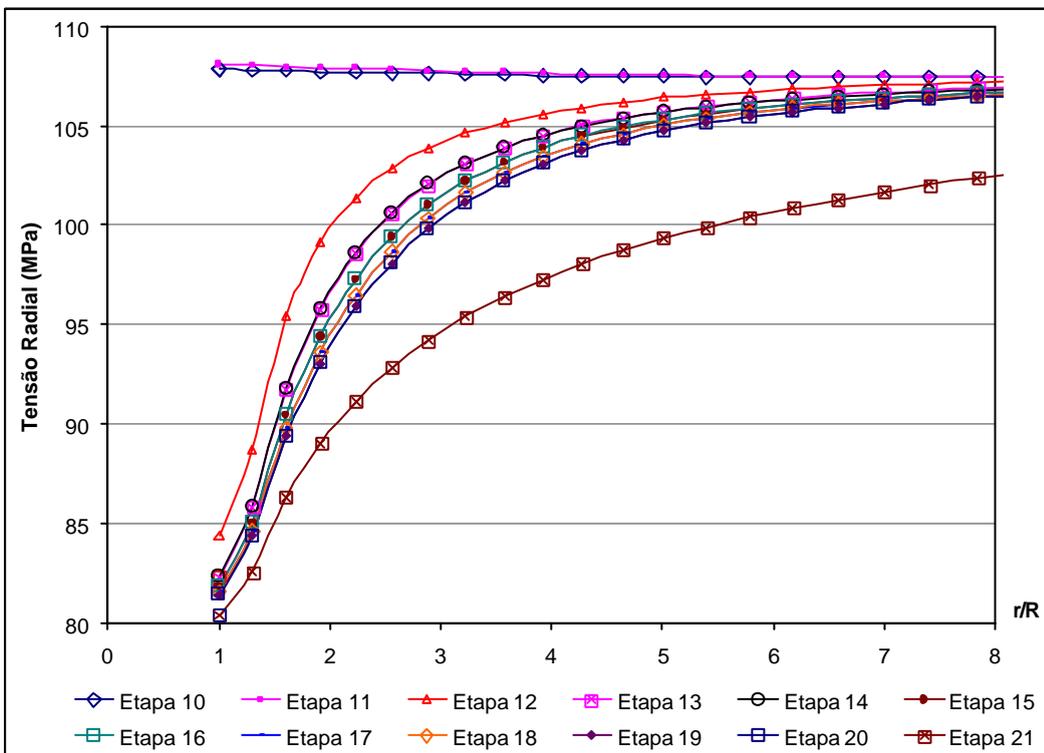


Figura 5-15: Redistribuição das tensões radiais ao redor do poço ("zoom" em  $r/R = 8$ ).

A Figura 5-16 apresenta as tensões radiais a partir da parede do poço ( $r/R=1$ ) até uma distância de 50 vezes o raio do poço ( $r/R=50$ ). Observa-se que quanto menor o peso de fluido de perfuração maior a distância necessária para as tensões se igualarem às tensões “*in situ*” (107 MPa). Por exemplo, para um peso de fluido de 9ppg, as tensões radiais se estabilizaram a uma distância de 45 vezes o raio do poço. Por outro lado, para 13ppg, as tensões radiais se igualaram a 107 MPa numa extensão equivalente a  $r/R=20$ . Isto acontece porque as tensões provocadas pelo fluido de perfuração de 13 ppg (91MPa) na parede do poço se aproximavam mais das tensões “*in situ*” quando comparadas com as tensões geradas pelo fluido de 9ppg (64 MPa).

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 5-16 estes valores são de 66, 80 e 93MPa. Essas diferenças foram causadas pelo esquema de cálculo das tensões no método dos elementos finitos. Foram feitos cálculos nos pontos de integração de cada elemento e os valores foram extrapolados para os nós, ocasionando estas pequenas diferenças.

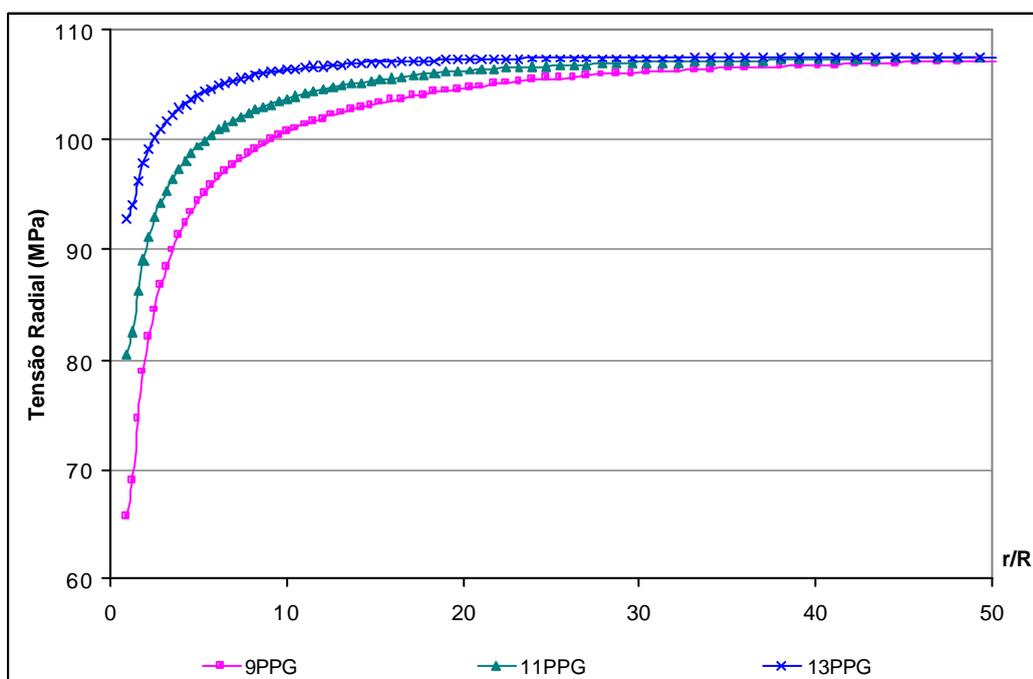


Figura 5-16: Tensões radiais ao redor do poço para diferentes fluidos de perfuração.

Na Figura 5-17 e Figura 5-18 estão apresentadas as redistribuições de tensões tangenciais ao redor do poço, considerando o ponto analisado a 11 metros do topo da camada de sal modelada, isto é, a 6011 m abaixo da lâmina d'água. A Figura 5-17 mostra estas tensões desde a parede do poço ( $r/R=1$ ) até um afastamento de 30 vezes o raio do poço ( $r/R=30$ ). Na Figura 5-15 foi feito um "zoom" no eixo das abscissas da figura anterior, passando para uma análise até 8 vezes o raio do poço ( $r/R=8$ ) para melhor visualização das curvas.

As etapas 10 e 11 corresponderam, respectivamente, aos deslocamentos gerados pela solução elástica e pela fluência, ambas do 5º estágio de escavação (Tabela 5-3). Assim como aconteceu nas análises das tensões radiais, as tensões tangenciais também não variaram nas etapas de 2 a 11, permanecendo iguais às tensões "in situ" (107 MPa), pois a aproximação da escavação não provocou variações de tensões.

Na 12ª etapa aconteceu uma grande variação das tensões tangenciais com a simulação da perfuração. Segundo a Figura 5-17, na parede do poço, por exemplo, as tensões tangenciais passaram de 107MPa para a 131MPa considerando somente a solução elástica instantânea.

A 13ª etapa correspondeu às tensões tangenciais provocadas pela fluência durante 900 segundos após o início da escavação. Observa-se que ocorreu uma queda brusca das tensões tangenciais ao redor do poço, podendo ser contabilizada pela diferença entre as curvas "etapa 12" e "etapa 13". Com o auxílio da Figura 5-18, percebe-se que a tensão tangencial na parede de poço caiu de 131MPa para 115MPa em apenas 900 segundos.

Como já foi dito, a 14ª etapa, assim como as outras etapas pares subseqüentes, correspondeu às soluções elásticas instantâneas após a escavação do respectivo trecho (Tabela 5-3). Assim como aconteceu com as tensões radiais, as tensões tangenciais não foram influenciadas por estas etapas.

A 15ª, 17ª e 19ª etapas corresponderam às redistribuições de tensões tangenciais ao redor do poço causadas pela fluência a cada 900 segundos (Tabela 5-3). A 21ª etapa correspondeu às tensões tangenciais ao redor do poço causado pela fluência em 30 dias.

Na Figura 5-18, constata-se também que a redistribuição de tensões tangenciais causada pela fluência foi maior logo após a simulação da escavação quando comparada com os outros instantes. Isto pôde ser verificado pela maior diferença entre as curvas "etapa 13" e "etapa 15" em relação à diferença entre as curvas "etapa 17" e "etapa 19".

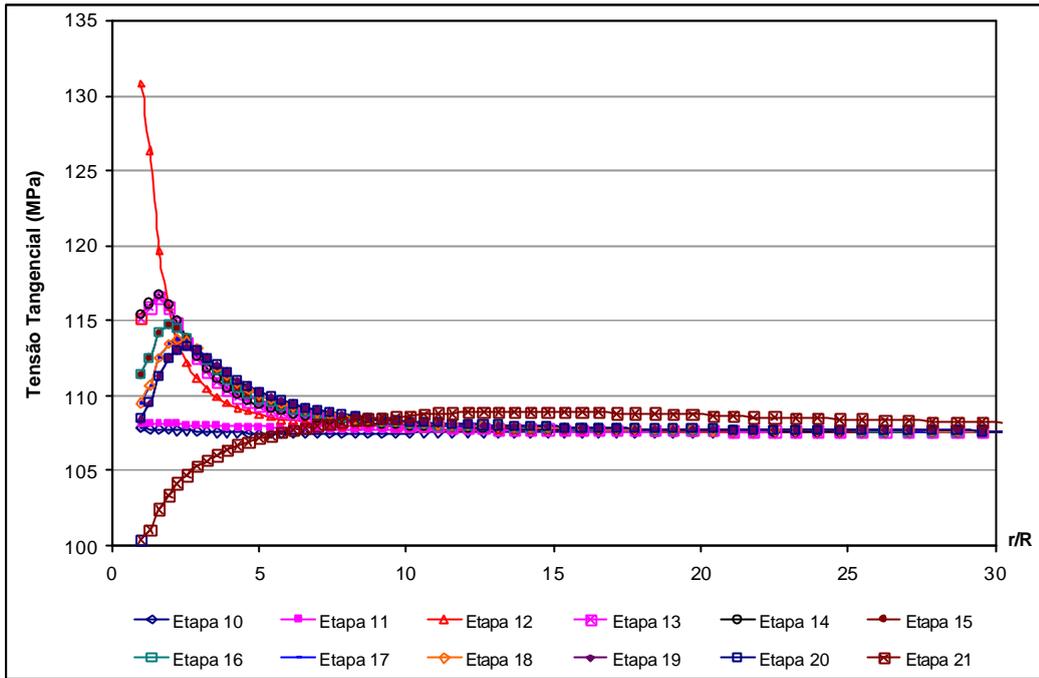


Figura 5-17: Redistribuição das tensões tangenciais ao redor do poço ( $r/R = 30$ ).

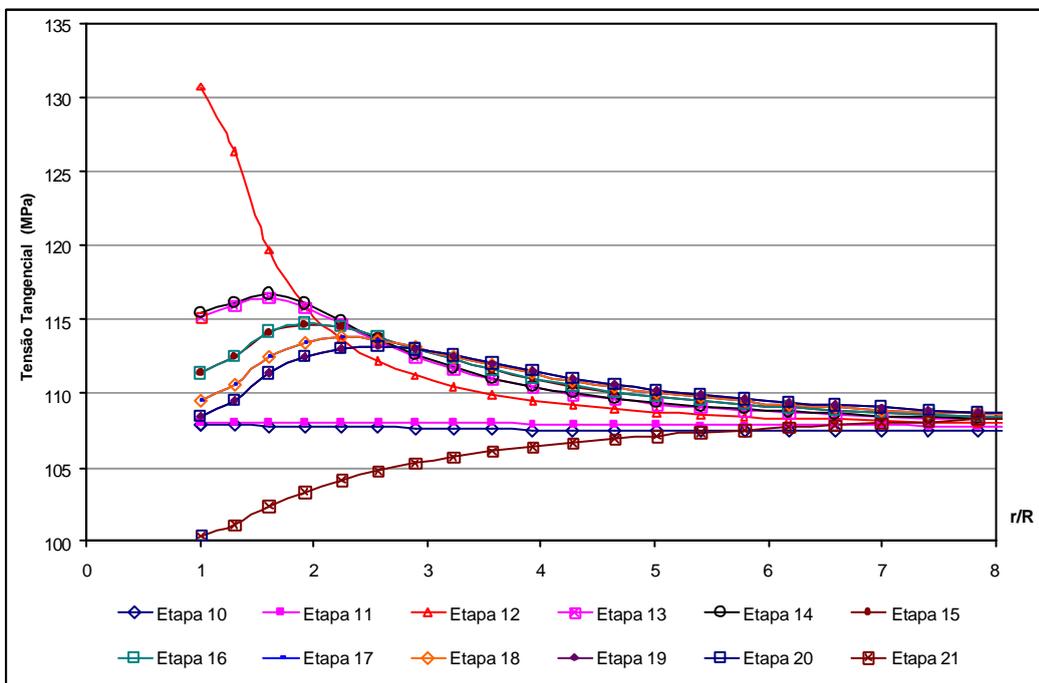


Figura 5-18: Redistribuição das tensões tangenciais ao redor do poço ("zoom" em  $r/R=8$ ).

A Figura 5-19 apresenta as tensões tangenciais a partir da parede do poço até uma distância de 50 vezes o raio do poço. Observa-se que quanto menor o peso de fluido de perfuração maior a perturbação de tensões no corpo salino.

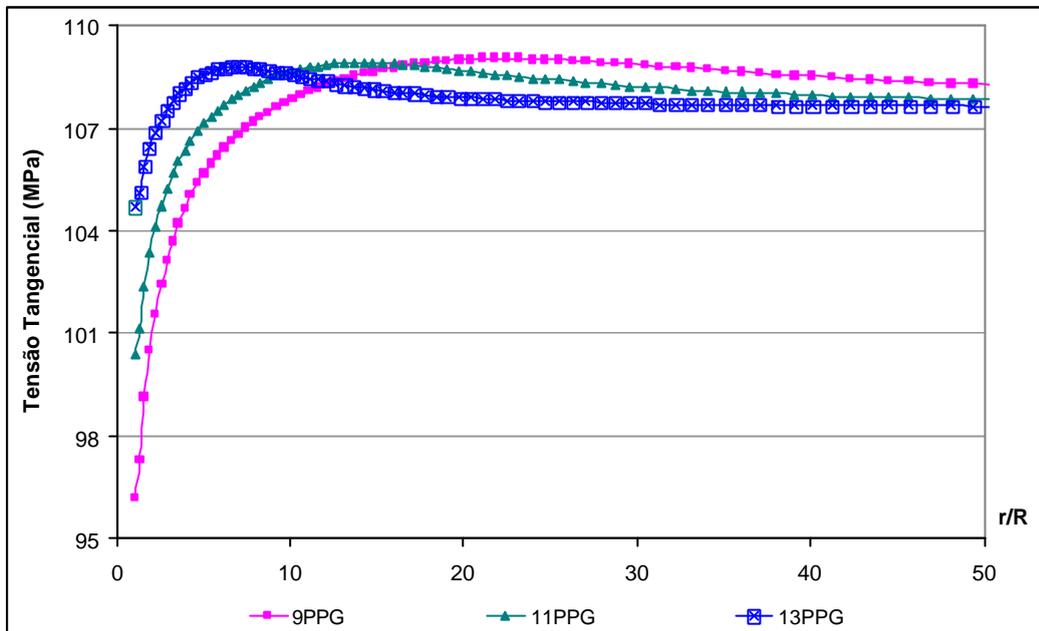


Figura 5-19: Tensões tangenciais ao redor do poço para diferentes fluidos de perfuração.

## 5.7.

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

A modelagem do problema axissimétrico deste capítulo foi feita para prever o comportamento mecânico de um estrato salino frente à perfuração de um poço de petróleo de 10 estágios de escavação de 2 metros cada. A simulação da escavação foi feita pela desativação dos elementos correspondentes ao poço. Analisou-se o comportamento dos outros elementos (evaporito) sujeitos à solução elástica e à fluência em cada etapa descrita na Tabela 5-2.

Todas as comparações foram feitas utilizando um peso de fluido de perfuração de 11ppg a um ponto localizado a 11 metros do topo do estrato salino modelado, ou seja, a 6011 m abaixo da lâmina d'água. Adotou-se esta profundidade de estudo por entender que este ponto é intermediário e não sofre interferência da modelagem.

### 5.7.1. Deslocamentos

Na Figura 5-20 e na Figura 5-21, estão apresentados os deslocamentos radiais da parede do poço considerando a solução elástica mais a fluência em um mês e em um dia, respectivamente, para as duas teorias de endurecimento.

Analisando a Figura 5-20, não há diferença percentual significativa entre as duas curvas. A curva “*strain hardening*” possui deslocamento iniciais superiores. No entanto, a curva “*time hardening*” apresenta deslocamentos superiores a partir do 23º dia, no momento em que elas se cruzam .

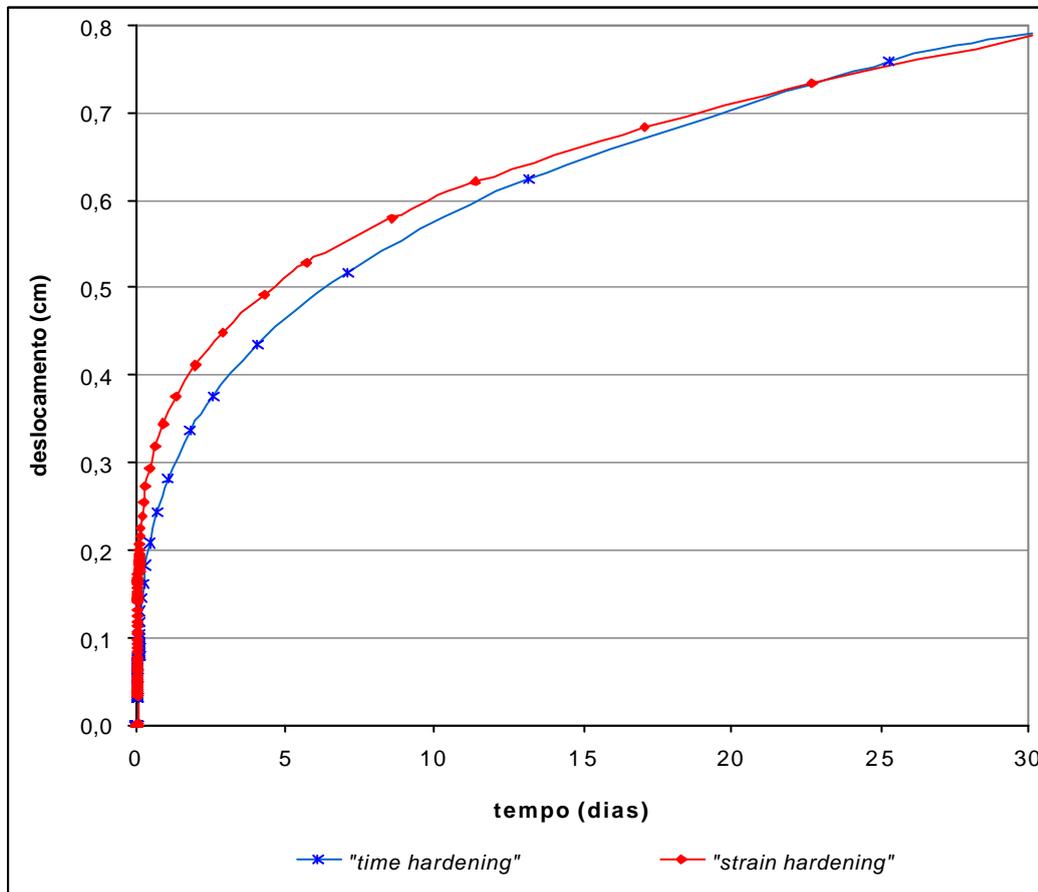


Figura 5-20: Fechamento do poço ao longo do tempo (30 dias ) para as duas teorias de endurecimento.

Fazendo um “zoom” no primeiro dia (Figura 5-21), percebe-se uma grande diferença entre os deslocamentos quando se compara a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido com a Teoria de endurecimento por Deformação.

Ainda na Figura 5-21, os deslocamentos somente se iniciam no instante igual a 0,05 dias (4500 segundos), pois corresponde ao momento em que a simulação da perfuração do poço ultrapassou o ponto de análise, ou seja, a 11 metros a partir do topo camada salina modelada (6011 m).

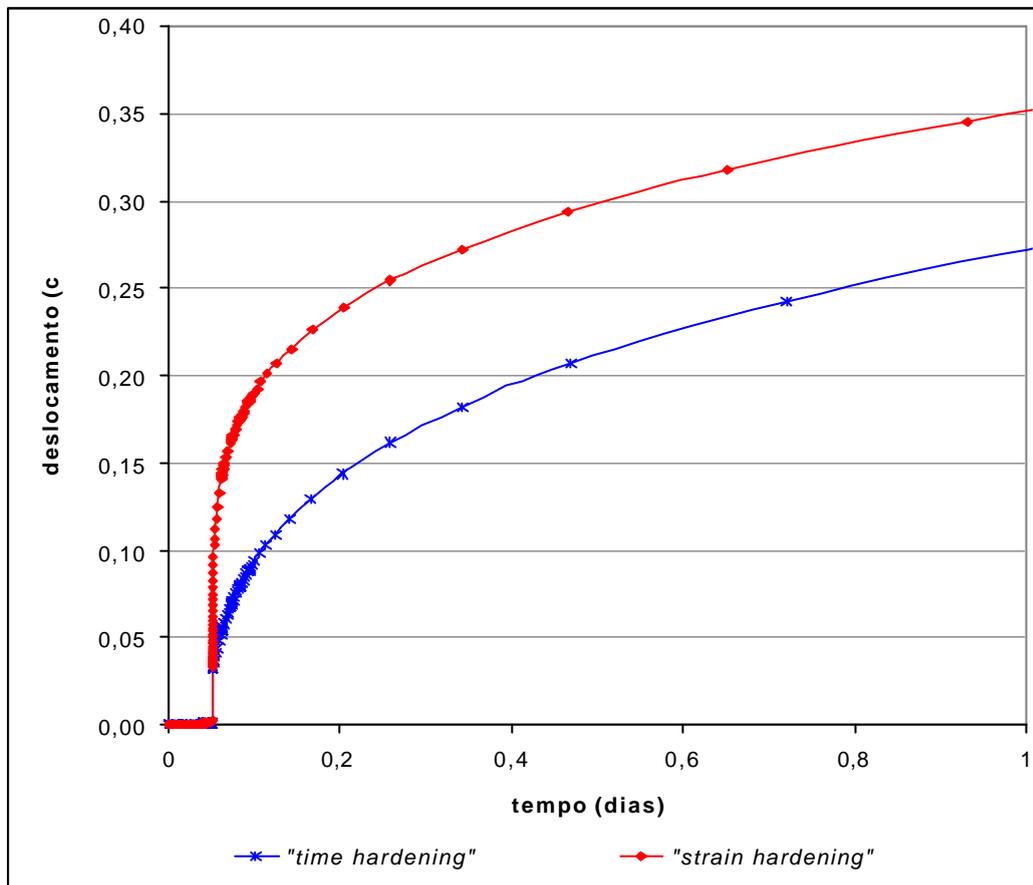


Figura 5-21: Fechamento do poço ao longo do tempo (1° dia) para as duas teorias de endurecimento.

### 5.7.2. Deformações

Na Figura 5-22 e na Figura 5-23, podem ser visualizadas as deformações radiais horizontais da parede do poço considerando a solução elástica mais a fluência em um mês e em um dia, respectivamente. Ambas as simulações foram realizadas para um peso de fluido de perfuração de 11 ppg. Vale ressaltar também que os valores das deformações no eixo das coordenadas são adimensionais, ou seja, 0,04 corresponde a 4% de deformação.

Assim como aconteceu com os deslocamentos, as deformações calculadas pela teoria de endurecimento por deformação foram maiores principalmente nos primeiros instantes após a escavação quando se compara

com os resultados da teoria de endurecimento por tempo transcorrido. O formato da Figura 5-23 se assemelha aos das curvas apresentadas na literatura (Figura 3-12).

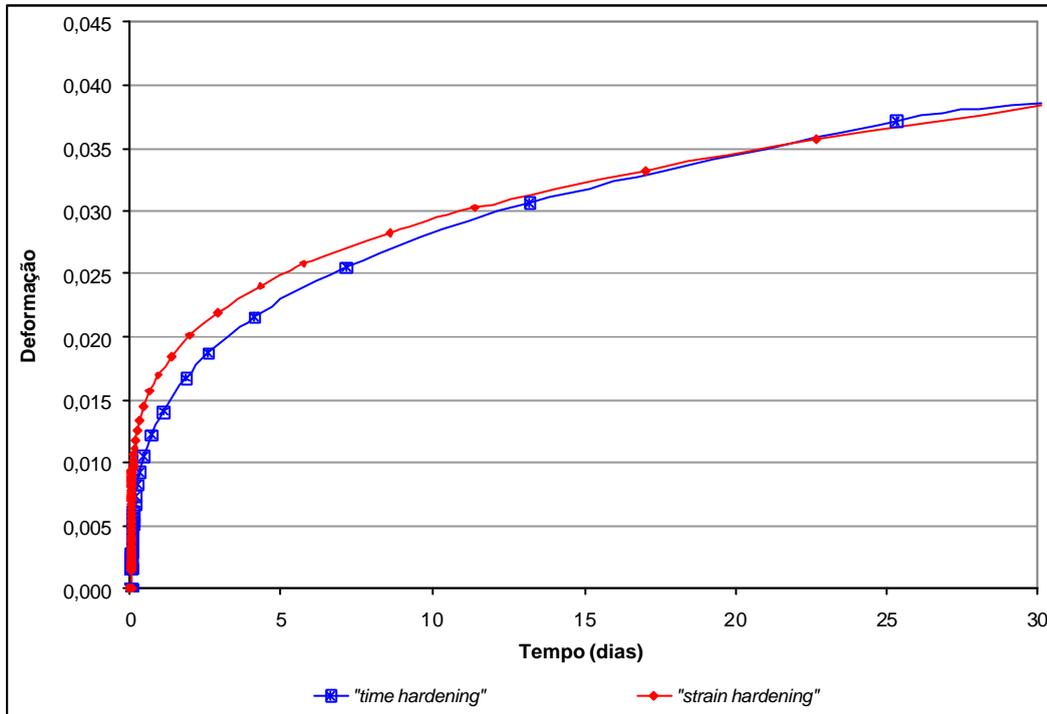


Figura 5-22: Deformação radial do poço ao longo do tempo (30 dias ) para as duas teorias de endurecimento.

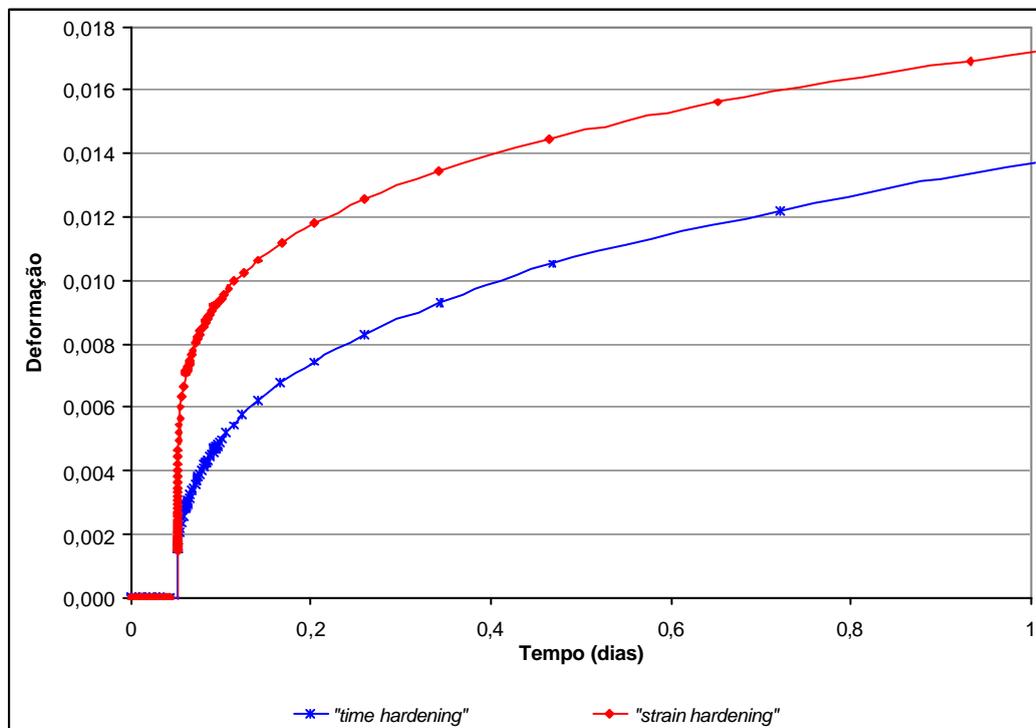


Figura 5-23: Deformação radial do poço ao longo do tempo (1º dia) para diferentes Teoria de endurecimento e pesos de fluidos de perfuração.

Na Figura 5-24 e na Figura 5-25, estão apresentadas as taxas de deformações na parede do poço, em  $\text{seg}^{-1}$  ao longo do tempo comparando a Teoria de endurecimento por Tempo Transcorrido e a Teoria de endurecimento por Deformação. Pôde-se observar nestes dois gráficos que a taxa de deformação ou velocidade de deformação ( $\dot{\epsilon}$ ) decresceu com o tempo, em especial nos primeiros dias em ambas as teorias, o que é esperado quando se está analisando a fluência primária, que é o caso das formulações utilizadas pelo Abaqus.

Na Figura 5-24 a escala no eixo das ordenadas varia de 0 a  $1,0\text{E}-07\text{s}^{-1}$  e o eixo das abscissas, de 0 a 30 dias. Aparentemente, observa-se que a taxa de deformação ( $\dot{\epsilon}$ ) da teoria "time hardening" foi maior que a da "strain hardening" em todo o período analisado. No entanto, quando se analisa a Figura 5-25 (considerando as primeiras 12 horas e deformações 0 a  $1,0\text{E}-06\text{s}^{-1}$ ), constata-se que nas primeiras horas as taxas de deformações foram maiores para a teoria baseada nas deformações ("strain hardening"), o que já era esperado após analisar as inclinações das curvas da Figura 5-23. Isto porque a taxa de deformação ou velocidade de deformação pode ser obtida pelas inclinações das curvas da Figura 5-22 e da Figura 5-23. Conforme a Figura 5-23, a variação da inclinação das duas curvas foram praticamente as mesmas a partir do tempo igual a 0,2 dias, o que se refletiu nos gráficos da Figura 5-24 e Figura 5-25.

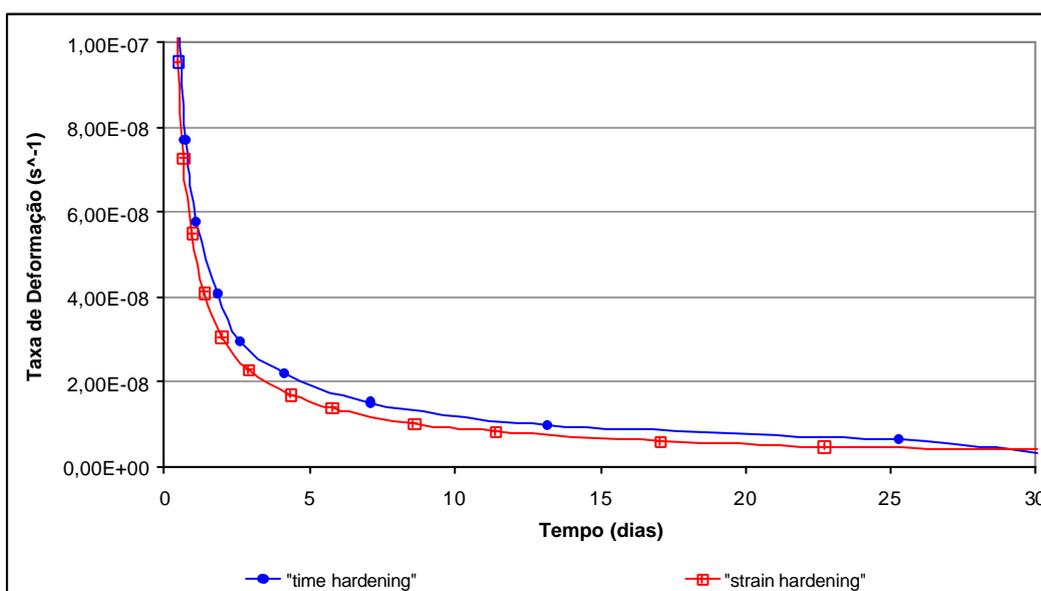


Figura 5-24: Taxa de deformação (0 a  $1,00\text{E}-07\text{ s}^{-1}$ ) ao longo de 30 dias na parede do poço para as duas teorias de endurecimento.

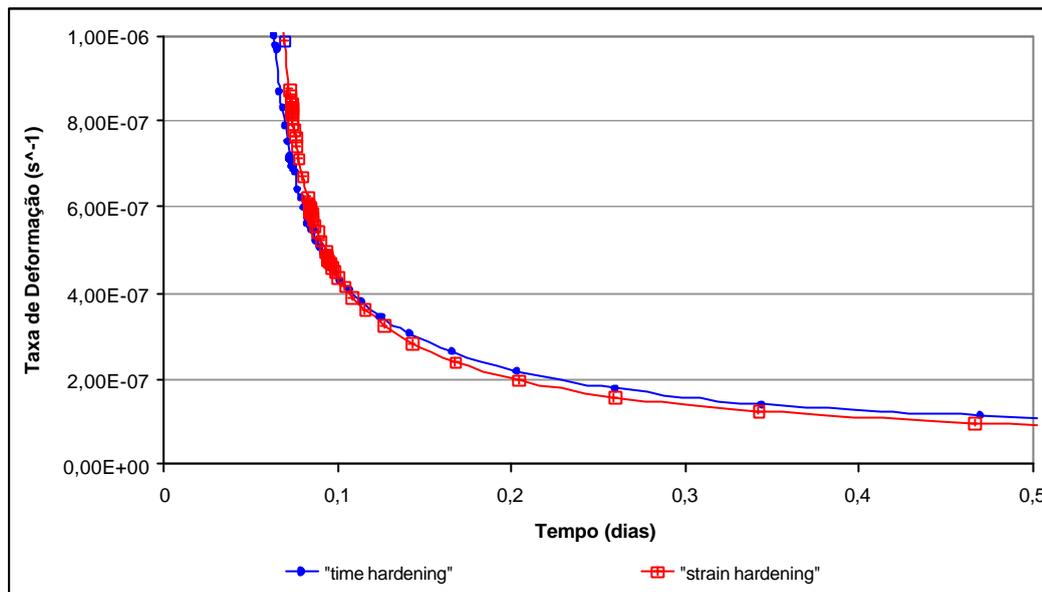


Figura 5-25: Taxa de deformação (0 a  $1,00 \text{ E-}06 \text{ s}^{-1}$ ) ao longo de 12 horas na parede do poço para as duas teorias de endurecimento.

Na modelagem axissimétrica, é possível identificar a diferença entre as teorias de endurecimento por tempo transcorrido e a teoria de endurecimento por deformação porque esta simulação leva em consideração a seqüência de escavação. O andamento da perfuração do poço em etapas provocou uma variação brusca do estado de tensões no corpo salino, o que motivou a diferença entre as duas curvas da Figura 5-23. Segundo a literatura, discutida no item 3.4 e ilustrada na Figura 3-12, a mudança repentina do estado de tensões provoca diferentes comportamentos dependendo da teoria adotada.

### 5.7.3. Tensões

As análises da Figura 5-26 até a Figura 5-29 foram feitas simultaneamente devido à similaridade de alguns comportamentos, e também, para evitar comentários repetitivos. Nestes gráficos, utilizou-se um peso de fluido de perfuração de 11ppg e o ponto analisado estava a 11 metros do topo do estrato salino, ou seja, a 6011 m a partir da lâmina d'água. Nestes gráficos, "time" corresponde à teoria de endurecimento por tempo transcorrido e "strain", à teoria de endurecimento por deformação.

A Figura 5-26 e Figura 5-27 apresentam as variações de tensões radiais ao longo de um afastamento em relação ao eixo do poço, considerando 30 vezes e oito vezes o raio do poço, respectivamente. A Figura 5-28 e Figura 5-29 mostra a redistribuição de tensões tangenciais para essas mesmas distâncias em relação ao eixo do poço, ou seja  $r/R=30$  e  $r/R=8$ , respectivamente. Foi feito um “zoom” na Figura 5-27 e Figura 5-29 para melhor visualização e análise das curvas.

Como está explicitado na Tabela 5-3, as etapas 10 e 11 corresponderam aos deslocamentos gerados pela solução elástica e pela fluência, respectivamente, do 5º estágio de escavação. Observa-se que as tensões radiais (Figura 5-26 e Figura 5-27) e as tensões tangenciais (Figura 5-28 e Figura 5-29) não variaram significativamente nessas etapas, permanecendo praticamente iguais às tensões “*in situ*” (107 MPa) para ambas as teorias de endurecimento. Isto porque a aproximação da escavação não provocou variações de tensões.

O ponto estudado foi perfurado no 6º estágio de escavação, ou seja, na 12ª etapa, em que aconteceu uma variação brusca das tensões radiais e tangenciais em relação às tensões “*in situ*”. Tanto nas tensões radiais (Figura 5-27) quanto nas tangenciais (Figura 5-28 e Figura 5-29) não houve diferença entre as teorias de endurecimento, justamente porque nesta etapa somente é simulada a solução elástica.

A partir da 13ª etapa as redistribuições de tensões radiais e tangenciais foram influenciadas pela fluência. Observa-se no conjunto de curvas da “etapa 13” até a “etapa 20” que as redistribuições de tensões radiais (Figura 5-26 e Figura 5-27) e tangenciais (Figura 5-28 e Figura 5-29), nos primeiros instantes, aconteceram mais rapidamente na teoria de endurecimento por deformação (indicadas pela eclipse vermelha) quando comparadas com as da teoria de endurecimento por tempo transcorrido (apontadas pela eclipse azul). A maior redistribuição de tensões logo após a escavação para a versão “strain hardening” explica as maiores deformações (Figura 5-23) e as taxas de deformações ( $\dot{\epsilon}$ ) iniciais (Figura 5-25) observadas para esta teoria.

Por outro lado, na 21ª etapa (correspondente à fluência em 30 dias) verifica-se que houve uma maior redistribuição de tensões radiais e tangenciais para a teoria de endurecimento por tempo transcorrido quando comparada com a da teoria de endurecimento por deformação.

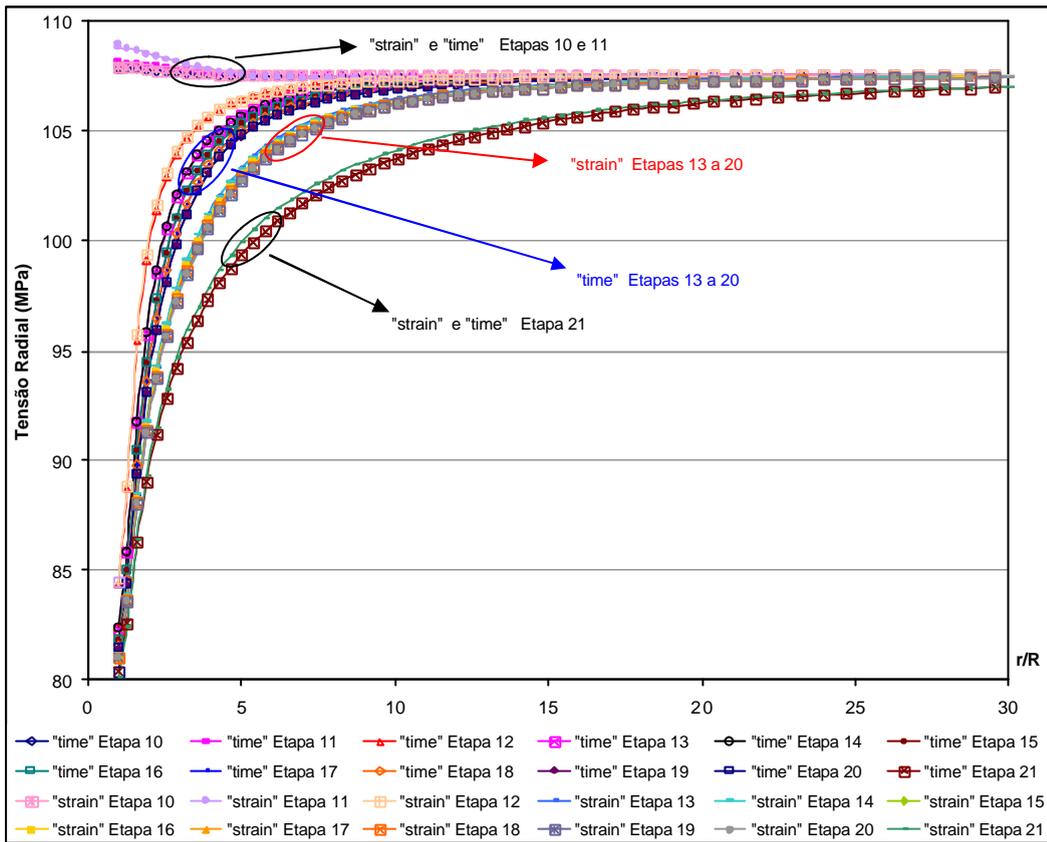


Figura 5-26: Tensões radiais ao redor do poço para as duas teorias.

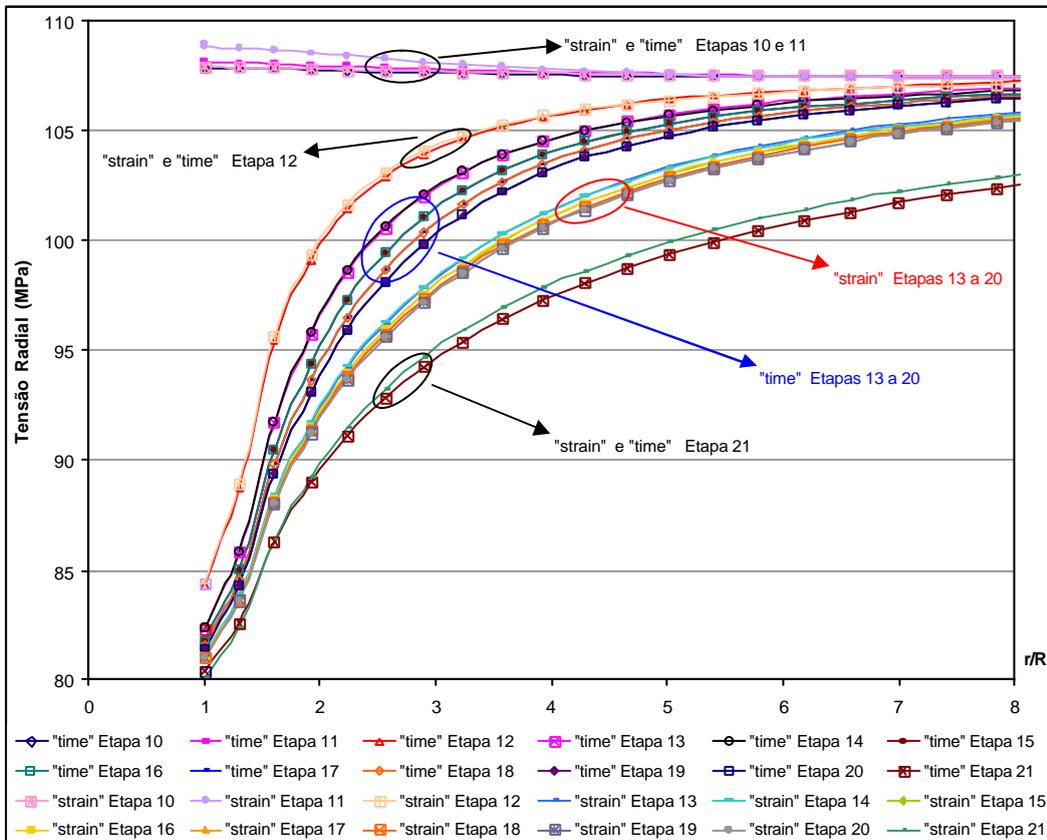


Figura 5-27: Tensões radiais ao redor do poço para as duas teorias ("zoom" em  $r/R=8$ ).

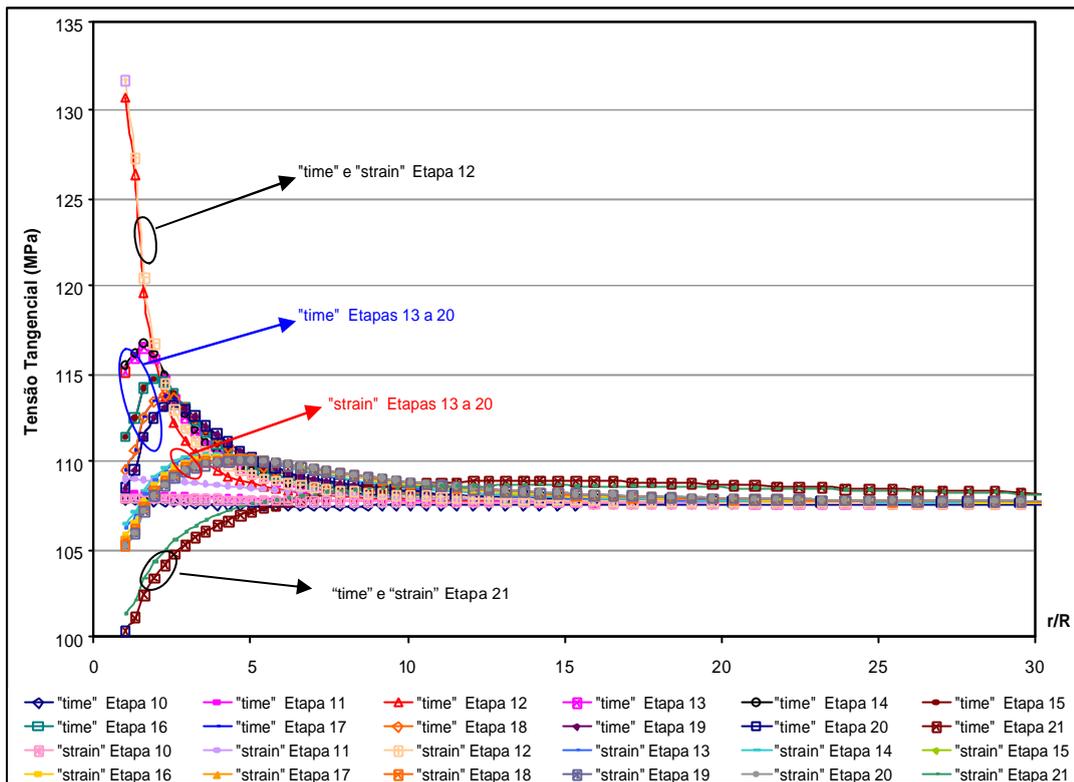


Figura 5-28: Tensões tangenciais ao redor do poço para as duas teorias.

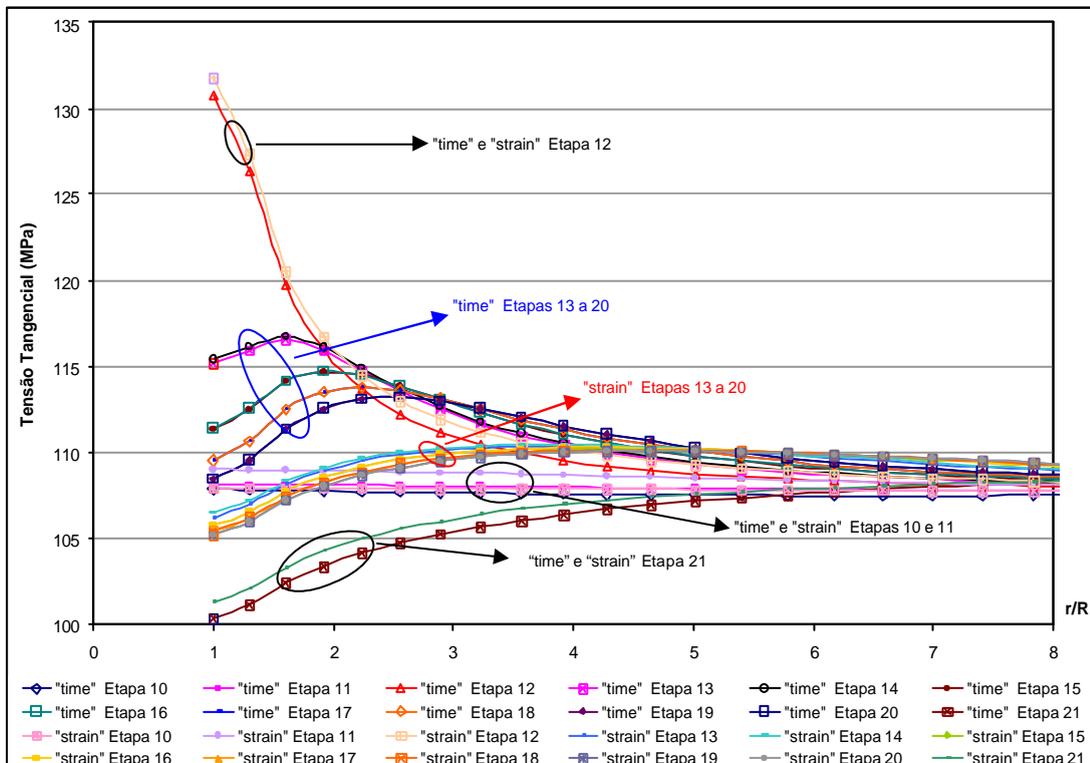


Figura 5-29: Tensões tangenciais ao redor do poço para as duas teorias ("zoom" em  $r/R=8$ ).