

### 3

## Modelagem da Estabilidade de Poços em Folhelhos

### 3.1.

#### Introdução

A avaliação da estabilidade de um poço representa um problema de mecânica de rochas clássico: predição da resposta da rocha frente a um carregamento mecânico. Alguns eventos especiais fazem a avaliação da estabilidade particularmente problemática:

- A perfuração pode ser feita a enormes profundidades, onde não existem métodos disponíveis para observar diretamente o comportamento da formação.
- Podem existir grandes variações na tensões da formação, e as tensões *in situ* não são medidas sistematicamente.
- Existem grandes variações nas propriedades do material das formações. Os custos de amostragem são altos e quantidades limitadas de material são destinadas para ensaios em laboratório.
- Diversas forças atuam sobre a formação ao redor do poço: peso e composição química do fluido de perfuração, redistribuição de tensões, mudanças na temperatura, etc.

Conseqüentemente, sem importar o grau de complexidade do modelo, a realidade não pode ser descrita fielmente. Porém, a modelagem baseada em algumas suposições ideais pode estabelecer limites que relacionados às condições práticas constituem um critério de estabilidade.

### 3.2.

#### Escolha do Modelo

Na análise de estabilidade, existem dois tipos de métodos: os empíricos e os racionais. Os métodos empíricos são baseados em correlações entre parâmetros

dos materiais perfurados e são usados para extrapolar valores obtidos em uma determinada área para uma outra com características semelhantes. Para obter uma boa correlação, a área objeto do problema deve ter sido intensivamente perfurada (de Araújo, 2002). A segunda categoria, os racionais, utiliza os conceitos da mecânica aplicada para descrever o comportamento da formação. O alcance destes métodos é bem maior do que a dos métodos empíricos já que é possível simular situações com qualquer relação entre as tensões *in situ* e qualquer inclinação e orientação do poço.

Geralmente as questões sobre como a rocha vai se comportar frente ao fluido de perfuração são esclarecidas usando um modelo de mecânica de rochas. No entanto, previamente à aplicação do modelo e dependendo do caso a estudar, as perguntas referentes ao grau de aplicabilidade do modelo selecionado, dados de entrada requeridos e a maneira como os dados de entrada podem ser interpretados são de notável importância (Gazaniol & Forsans, 1994).

Inicialmente, definir entre um modelo elástico simples ou um modelo elasto-plástico depende dos dados disponíveis. Quando dados mecânicos experimentais (relações tensão-deformação) estão ao alcance, um modelo elasto-plástico pode ser utilizado levando em conta uma determinada lei de plasticidade. Os dados de entrada básicos são as tensões *in situ*, pressão de poros e propriedades mecânicas e físico-químicas do folhelho. Existe grande dificuldade em determinar, com exatidão, as tensões *in situ*, mesmo que os seus valores tenham uma influência importante nos resultados. A estimativa da pressão de poros, essencial na determinação das tensões efetivas as quais controlam a ruptura à compressão e à tração da rocha, é ainda mais complexa, visto que medições diretas da pressão de poros não são possíveis em rochas de baixa permeabilidade como os folhelhos. Conseqüentemente, a predição da pressão de poros está baseada em outros parâmetros (parâmetros da perfuração ou de registro, por exemplo) e o seu desvio das linhas de tendência (Fjær et al., 1992).

Na consideração das condições de drenagem, lembrando a baixíssima permeabilidade do folhelho, a situação drenada ou não drenada dependerá da faixa de tempo de análise. Dado que muitas rochas apresentam um comportamento em função do tempo, a condição não drenada pode acabar sendo desprezada na prática, exceto para folhelhos com permeabilidade extremamente baixa, como seria o caso de rochas com  $k$  menor que 1 nanodarcy (Chen & Ewy, 2002).

Severos problemas podem surgir para um tempo posterior ao tempo atual de perfuração. Existem dois mecanismos intrínsecos os quais controlam o comportamento tensão-deformação com o tempo da rocha saturada: o adensamento e o *creep*. O primeiro é devido aos excessos de pressão de poros induzidos pela mudança do estado de tensão, tornando a permeabilidade um parâmetro fundamental. O segundo mecanismo, o *creep*, está caracterizado por uma deformação da matriz rochosa que varia com o tempo para níveis de tensão efetiva constante. Em muitos casos, separar estes dois efeitos pode se tornar impossível em folhelhos. O adensamento geralmente dominará no curto prazo depois do carregamento, enquanto o *creep* dominará a deformação posterior a este.

Por conseguinte, o dilema de como trabalhar acopladamente os efeitos mecânicos e físico-químicos em função do tempo é um assunto bastante recente que elude qualquer julgamento. No entanto, através da modelagem, é possível fazer uma análise de sensibilidade efetiva que contribua na construção de uma estratégia para enfrentar problemas de estabilidade de folhelhos.

### **3.3. Modelos Desenvolvidos na Literatura Incluindo o Efeito Químico**

Diferentes modelos analíticos e numéricos têm sido desenvolvidos para a predição do risco de instabilidade do poço em folhelhos. Grande parte dos simuladores de estabilidade de poço aplicados na atualidade pela indústria estão baseados no método analítico considerando um modelo tensão-deformação elástico, o qual restringe a modelagem a condições de contorno e comportamento da formação muito simples além da não interação folhelho-fluido de perfuração (Frydman & da Fontoura, 2001).

Contudo, modelos de estabilidade de poço que incluam os efeitos físico-químicos têm sido desenvolvidos. Os principais questionamentos práticos estão direcionados a determinar quanta mudança houve devido a esses processos, além da estimativa da escala de tempo real.

Yew *et al.* (1990), avaliaram a distribuição de tensões produzida pela absorção de água ao redor do poço através da aplicação da mecânica dos sólidos deformáveis. Neste trabalho, mostra-se a absorção de umidade (através da

membrana semipermeável perfeita do folhelho) como um processo difusivo, o qual induz, ao redor do poço, tensões de caráter similar àquelas produzidas por mudanças da temperatura em um meio elástico e anisotrópico.

Para o poço, em estado de deformação plana ( $\varepsilon_{zz} = 0$ ), as relações tensão-deformação são descritas como:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} [\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})] + \varepsilon_H \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} [\sigma_{\theta\theta} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{zz})] + \varepsilon_H \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta})] + \varepsilon_V = 0 \quad (3.4)$$

Através das curvas e resultados obtidos a partir de ensaios em folhelho para diferentes teores de umidade (Tabela 3. 1), foi estabelecido que o módulo de Young ( $E$ ) diminui com o aumento do conteúdo de água na rocha, enquanto que o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) permanece constante. Por este motivo, o coeficiente de Poisson é considerado invariável no processo.

Tabela 3. 1 – Propriedades do material (Yew *et al.* 1990)

TEOR DE UMIDADE (%)	INCREMENTO DE UMIDADE (%)	$E$ ( $10^6$ psi)	$\nu$
1.4	-	3.13	0.16
1.7	0.3	2.80	0.18
2.2	0.8	2.20	0.15
4.4	3.0	0.73	-

O fluxo de água decorrente da absorção de água é considerado dependente do teor de umidade inicial na superfície da amostra e de uma constante de absorção estimada experimentalmente, única para cada material.

Através da aplicação de elementos finitos nas equações de equilíbrio e fluxo de massa, são adquiridos os dados de deslocamento e tensão ao redor do poço

decorrentes das características de absorção. O fluido de perfuração exerce uma pressão de 5000 psi (34,5 MPa), e a magnitude das tensões *in situ* não é levada em conta nesta avaliação. Este fato impossibilita estimar a sua influência nas propriedades de absorção do material ao redor do poço.

A Figura 3. 1 e a Figura 3. 2, mostram as tensões radiais e tangenciais máximas como sendo compressivas e geradas na região perto da parede do poço. Estas curvas foram calculadas assumindo uma constante de umidade e o tempo rotulado é o tempo requerido para o teor de umidade na superfície da parede do poço atingir este valor assumido, o qual depende do tipo de fluido em contato com o material.

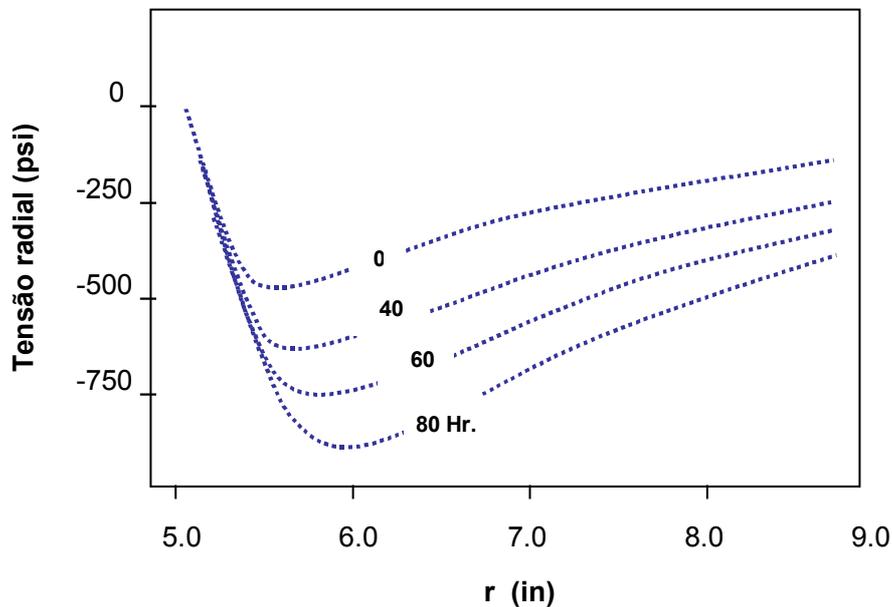


Figura 3. 1 – Tensão radial para  $P_w = 0$  psi e  $a = 5$  in (Yew *et al.*, 1990)

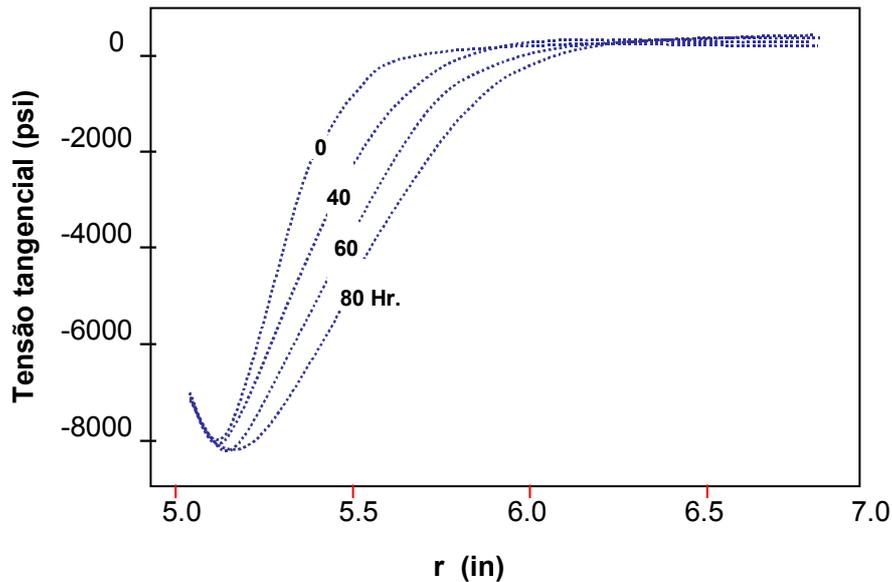


Figura 3. 2 – Tensão tangencial para  $P_w = 0$  psi e  $a = 5$  in (Yew *et al.*, 1990)

No trabalho de Mody & Hale (1993), foram incorporados tanto o conceito de fluxo hidráulico quanto as diferenças de potencial químico entre o folhelho e o fluido de perfuração base água, considerando a interface entre eles atuando como membrana semipermeável perfeita.

As equações que descrevem o comportamento mecânico do material foram derivadas com base na teoria da poroelasticidade linear, seguindo o critério de Drucker-Prager e considerando um estado de deformação plana ortogonal ao eixo do poço.

No modelo de potencial químico adotado, a equação

$$\frac{\ln a_o \times RT}{V} - \frac{\ln a_w \times RT}{V} = \Pi \quad (3.8)$$

expressa o equilíbrio dos potenciais químicos (folhelho e fluido de perfuração) quando uma membrana semipermeável ideal existe, como aquela essencialmente encontrada na *OBM*.  $V$  representa o volume parcial molar de água,  $R$  a constante universal dos gases,  $T$  a temperatura absoluta,  $a_o$  e  $a_w$  as atividades da água do folhelho e do fluido de perfuração, respectivamente.

Quando a tensão associada com o folhelho é levada em conta, a eq. (3.8) se transforma em:

$$\frac{RT}{V} \times \ln\left(\frac{a_w}{a_o}\right) = \pm \Delta P = (P - P_o) \quad (3.9)$$

onde  $\Delta P$  é a pressão de poros resultante da diferença de atividade química entre o folhelho e o fluido de perfuração;  $P_o$  é a pressão de poros da formação e  $P$  a pressão na parede do poço. Para um sistema não ideal, a pressão gerada pela osmose é diferente da calculada pela eq. (3.9). Neste caso a equação é reescrita como:

$$\alpha \times \frac{RT}{V} \times \ln\left(\frac{a_w}{a_o}\right) = \pm \Delta P \times \alpha = \Delta P_{observado} \quad (3.10)$$

onde  $\alpha$  representa a capacidade do folhelho para atuar como uma membrana semipermeável ideal e está definido como a razão entre a pressão osmótica induzida (observada) e a pressão osmótica teórica (eq. 3.11). O  $J_V = 0$  indica a definição de  $\alpha$  quando não existe fluxo hidráulico através da membrana.

$$\alpha = \left[ \frac{\Delta P_{observado}}{\Delta P_{teórico}} \right]_{J_V=0} \quad (3.11)$$

São realizados vários tipos de análise em função da variação de diferentes parâmetros como a concentração do sal, peso do fluido de perfuração, inclinação do poço, eficiência de membrana, e análises desprezando o potencial químico. O princípio utilizado como base está representado na Figura 3. 3. Comparando o estado de tensões do poço com o critério de ruptura de Drucker-Prager estabelecido para uma rocha em particular, a faixa de pesos e salinidades do fluido de perfuração que impedirão a plastificação da rocha podem ser avaliados. Na Figura 3. 4, o critério de ruptura para duas profundidades de rocha são mostrados (14280 e 14290 pés), indicando que o incremento da salinidade do fluido de

perfuração em procura do aumento da resistência não garante bons resultados na estabilidade.

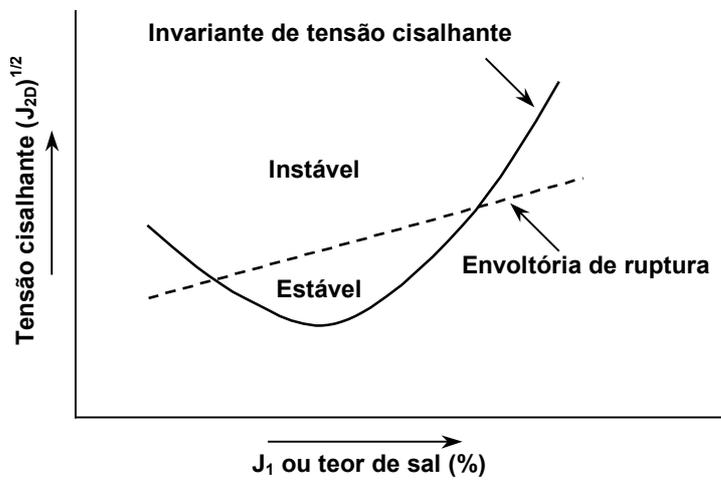


Figura 3. 3 – Comparação da envoltória de ruptura com o invariante de tensão cisalhante (Mody & Hale, 1993)

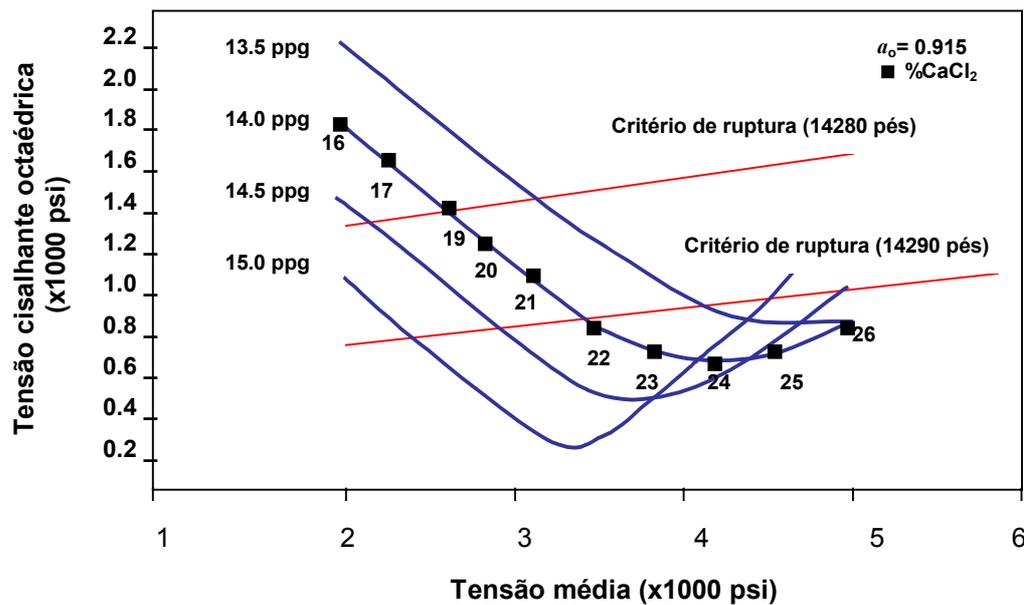


Figura 3. 4 – Avaliação do risco de colapso do poço como função do peso do fluido de perfuração e a sua salinidade (Mody & Hale, 1993)

Sherwood (1994), modificou argumentos termodinâmicos usados por Biot (1941) para incluir os potenciais químicos dos componentes do fluido dentro do folhelho, o qual é considerado como uma membrana semipermeável ideal. O modelo considera a análise para um estado de deformação plana e tensão e

deformação ao redor do poço sob um estado de tensão hidrostática em um meio isotrópico.

No limite no qual o sal tem habilidade para se movimentar para dentro ou para fora do folhelho, a deformação depende somente do potencial químico da água e da tensão aplicada. Assim, somente água entrará (ou sairá) do folhelho, pois o fluido dos poros estará constituído por íons suficientes para garantir a neutralidade elétrica da argila e do fluido nos poros.

Heidug & Wong (1996), apresentaram um modelo constitutivo para rochas sensíveis ao aumento do volume pela absorção da água, adotando uma perspectiva que não diferencia explicitamente entre a fase sólida e fluida, mas considera a rocha infiltrada de fluido (incompressível) como um meio contínuo único, tal como visa a teoria clássica da poroelasticidade de Biot (1941). Este modelo não linear considera a difusão de íons, e trata a hidratação como um processo que acontece muito rápido em comparação com a taxa para a qual a mudança do estado hidráulico é comunicada através da rocha.

O caráter complexo e acoplado das equações diferenciais requer a utilização de formulação numérica pelo método dos elementos finitos. Nesta modelagem foram simulados experimentos de laboratório projetados para estudar a interação rocha-fluido de perfuração, e depois analisar a evolução de tensão e deformação ao redor do poço.

Adaptando o modelo às condições de campo, foi obtida a mudança em tensão e deformação da rocha ao redor do poço que resultaria da invasão do fluido de perfuração. A Figura 3. 5 descreve as variações das tensões efetivas radiais ( $\sigma_r'$ ) e as tensões efetivas tangenciais ( $\sigma_\theta'$ ), junto com a diferença entre a pressão inicial de fluido dos poros e a pressão atual ( $\Delta P$ ), quando o processo de interação rocha-fluido é levado em conta e uma condição estável tem sido atingida. Embora o poço tenha sido estabilizado para uma pressão de fluido de perfuração de 5 MPa, a tensão radial efetiva experimentada pela parede do poço resulta negativa (tração), gerando ruptura por tração ao redor do poço.

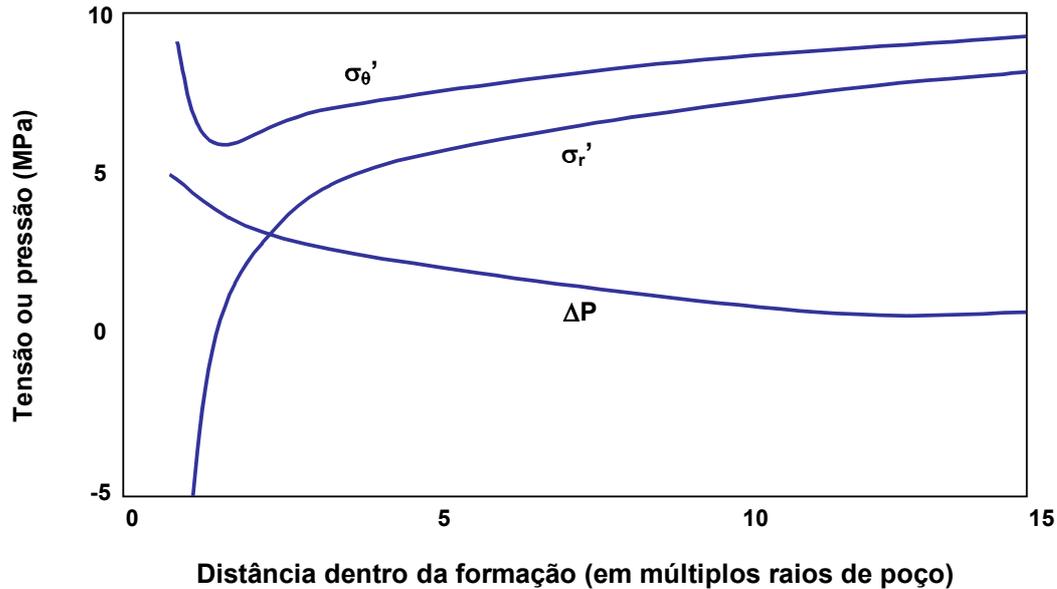


Figura 3. 5 –Tensão ao redor do poço quando a interação físico-química é levada em conta (Heidug & Wong, 1996)

Na modelagem, tensões radiais de tração desenvolvem primeiro na parede do poço, e enquanto existe invasão de fluido o tamanho da região que experimenta esta condição de tensão aumenta. A pressão da formação perto da zona de invasão sofre um decréscimo, atingindo valores negativos de  $\Delta P$ .

A diferença entre a tensão radial e a tensão tangencial,  $(\sigma_r - \sigma_{\theta})$ , provê uma medida da tensão cisalhante experimentada pela formação. A Figura 3. 6 mostra que na vizinhança do poço a tensão cisalhante aumenta monotonicamente com o tempo e quando uma condição estável é atingida, a rocha ao redor do poço fica submetida a tensões cisalhantes maiores das que existiriam sem invasão de fluido de perfuração.

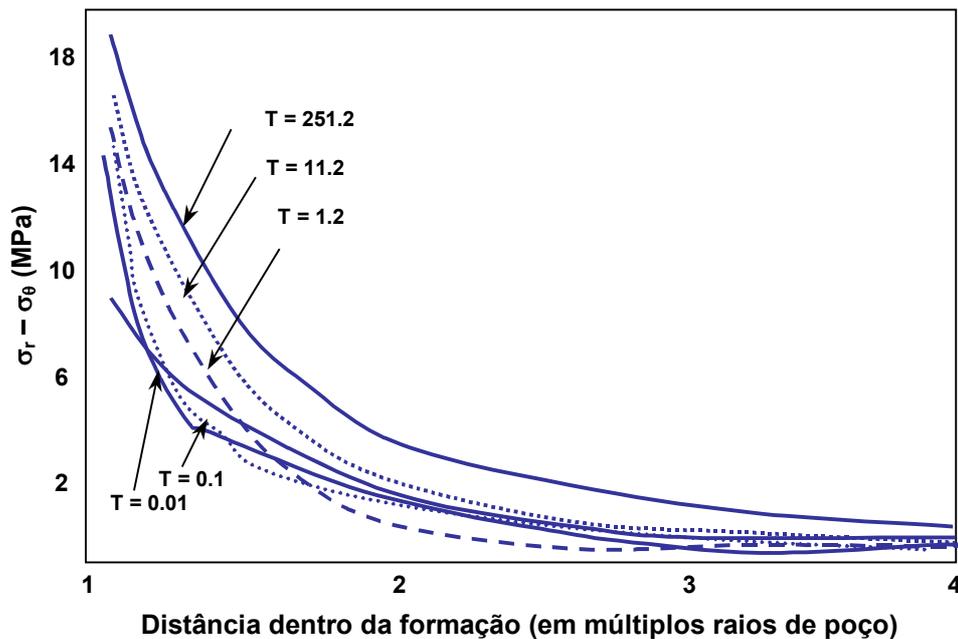


Figura 3. 6 – Tensão cisalhante como função do tempo  $T=D_e \cdot t/a^2$ , (Heidug & Wong, 1996)

Tan *et al.* (1996), apresentaram um modelo computacional que descreve a mudança na pressão de poros devido à diferença de potencial químico à medida que o fluido de perfuração interage com o folhelho. O modelo foi usado para simular quatro experimentos de laboratório os quais testemunham o mecanismo de potencial químico, e mostrar também que a mudança da pressão de poros com o tempo, como consequência do fluxo osmótico da formação para o poço, estabelece um mecanismo de estabilidade temporal devido à difusão de íons através da membrana semipermeável não perfeita que o folhelho constitui.

Em ensaios de laboratório, foi observado o incremento do coeficiente de reflexão com o aumento da tensão confinante devido a redução da porosidade. O comportamento da curva da Figura 3. 7 mostra a recuperação da pressão de poros com o tempo por causa da transferência de solutos através da membrana, devido aos baixos valores de coeficiente de reflexão do sistema. Estes valores de  $\alpha$  (entre 0.01 e 0.1), sob pressões confinantes similares (15 a 30 MPa), também foram observados por outros pesquisadores (van Oort *et al.*, 1996).

Os efeitos da concentração do sal do fluido de perfuração e o coeficiente de reflexão do folhelho na estabilidade transiente do poço foram demonstrados através de um estudo conduzido para uma temperatura de 65°C. Cloreto de sódio

foi usado para criar o gradiente de potencial químico, e uma condição de sobrepressão estabeleceu o gradiente hidráulico. Os resultados destas análises estão apresentados na forma de variação do tempo crítico com a concentração do sal. Este tempo está definido como o tempo crítico para a instabilidade ao redor do poço acontecer, isto é, o excessivo número de elementos da malha plastificando. Na Figura 3. 8, pode ser observado que o tempo crítico aumenta de forma acentuada para teores de sal acima de 25% de  $\text{CaCl}_2$ .

A Figura 3. 9 mostra a variação do tempo crítico com o coeficiente de reflexão para uma concentração de 5% de  $\text{CaCl}_2$ . Com a concentração do fluido de perfuração sendo menor que a do folhelho, a diferença de potencial químico induzirá o fluxo de água para dentro da formação (adicional ao gradiente hidráulico) o qual incrementará a pressão de poros, e diminuirá o tempo crítico com o incremento do  $\alpha$ .

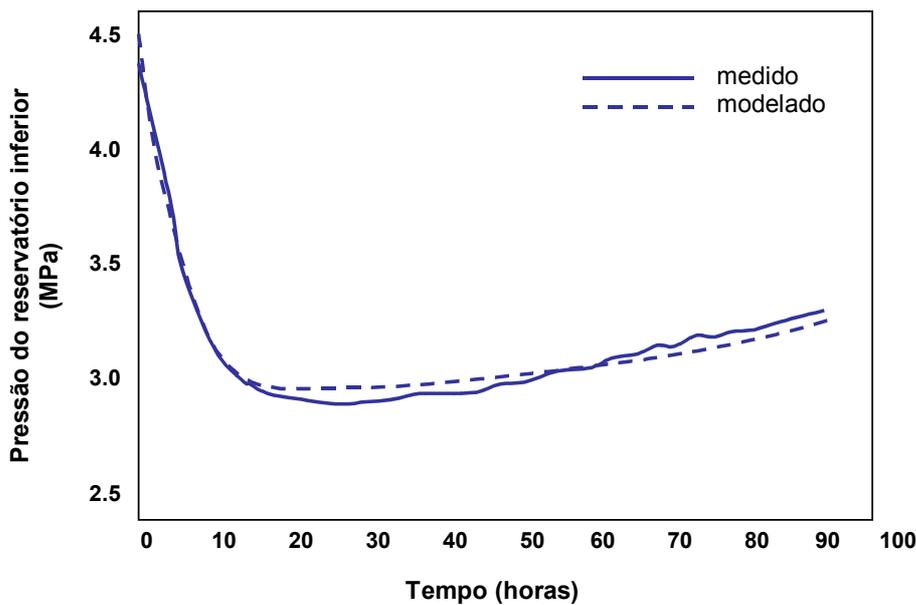


Figura 3. 7 – Mudança da pressão observada e modelada no reservatório (Tan *et al.*, 1996)

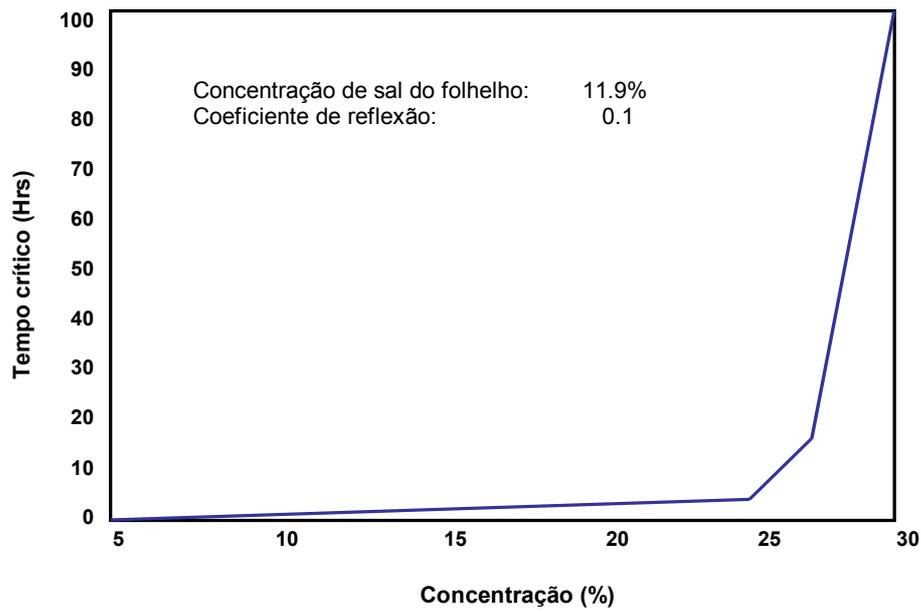


Figura 3. 8 – Variação do tempo crítico como função da concentração de CaCl<sub>2</sub> do fluido de perfuração (Tan *et al.*, 1996)

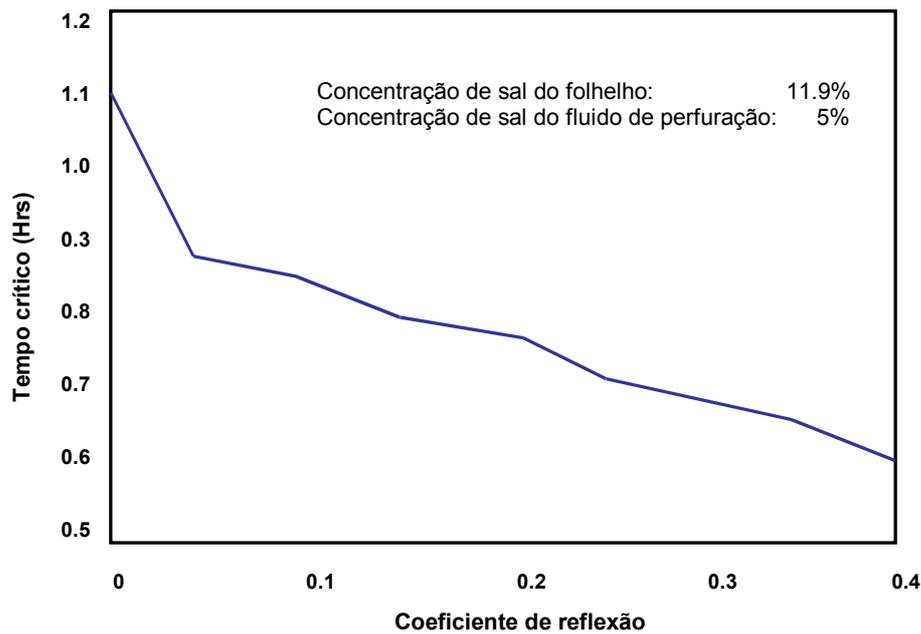


Figura 3. 9 - Variação do tempo crítico como função do  $\alpha$  para  $C_w = 5$  w/w% CaCl<sub>2</sub> (Tan *et al.*, 1996)

A variação do tempo crítico com o coeficiente de reflexão do folhelho para uma concentração do fluido de perfuração de 20% aparece na Figura 3. 10. O tempo critico aumenta com o incremento do coeficiente de reflexão, já que o

potencial químico do fluido de perfuração favorece a redução da taxa de fluxo de água para dentro da formação.

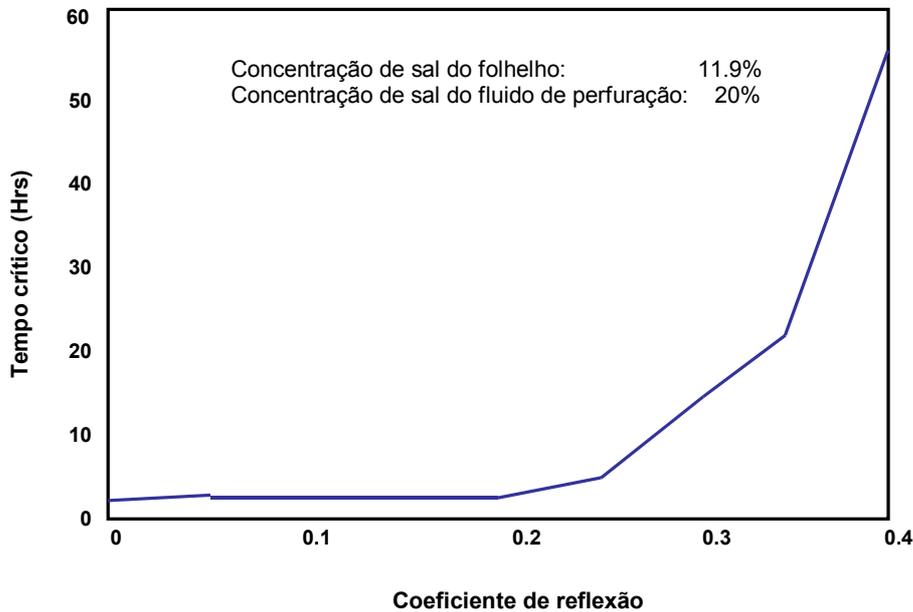


Figura 3. 10 – Variação do tempo crítico para  $C_w = 20$  w/w% de  $\text{CaCl}_2$  (Tan *et al.*, 1996)

No trabalho implementado posteriormente por Frydman & da Fontoura (1999), é apresentado um modelo envolvendo formulações de fluxo hidráulico, potencial químico e tensões de maneira acoplada, que descrevem o comportamento durante a perfuração, adicionando os processos de difusão da pressão de poros e transferência de íons. A metodologia, que permite também a avaliação da zona plástica eventualmente criada ao redor do poço, estima o efeito da concentração do sal no comportamento da rocha. Na Figura 3. 11 pode ser apreciada a presença de regiões de sobrepresão e subpressão na seção transversal do poço, no curto prazo depois de perfurado o poço. Este modelo poroelastoplástico representa as tensões e deformações ao redor do poço mais realisticamente e oferece a vantagem de ser menos conservador que os modelos elásticos.

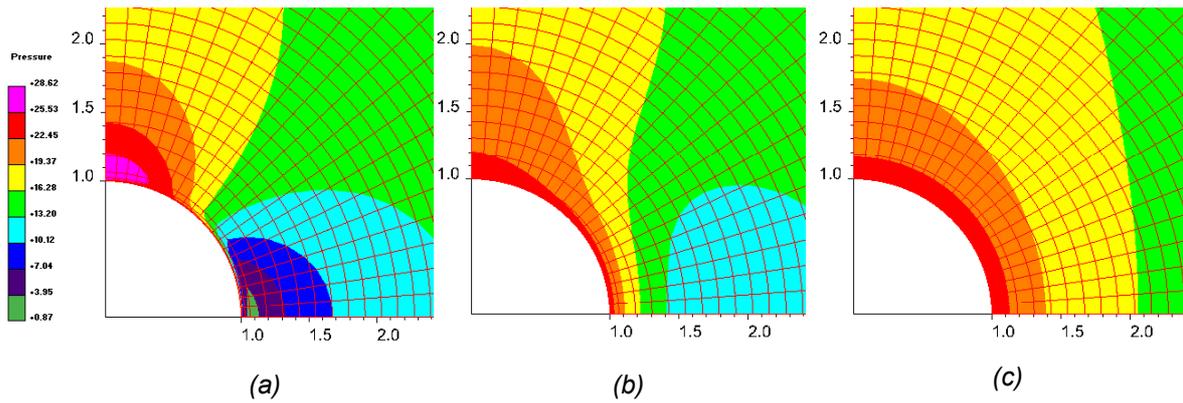


Figura 3. 11 – Pressão de poros ao redor do poço para: (a) 5 min, (b) 1 dia e (c) 10 dias após a perfuração (Frydman & da Fontoura, 1999)

Fjær *et al.* (2002), criaram um modelo elástico linear o qual simula o estado de tensões ao redor do poço levando em conta os efeitos químicos na estabilidade dos folhelhos. O modelo utiliza soluções analíticas, as quais facilitam a obtenção de resultados, mas diminuem em precisão quanto mais longe eles estão da parede do poço. No entanto, este não é considerado um problema significativo, já que os eventos críticos com respeito à estabilidade acontecem na região próxima da parede do poço.

As equações:

$$\Delta P = c_o T_f \ln\left(\frac{a_w}{a_o}\right) \quad (3.12)$$

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_\theta = -\frac{E}{1-\nu} \Delta\varepsilon_{ch} \quad (3.13)$$

reproduzem os processos físico-químicos de transporte de água e soluto. Na eq. (3.12),  $\Delta P$  representa a pressão de poros resultante da diferença de atividade química entre o folhelho e o fluido de perfuração (pressão osmótica), sendo  $c_o$  uma constante de pressão e  $T_f$  a temperatura da formação. A mudança de  $\Delta P$  devido à não idealidade do sistema está considerada através do coeficiente de reflexão ( $\alpha$ ) de maneira análoga à eq. (3.10). A deformação induzida quimicamente ( $\Delta\varepsilon_{ch}$ ) é assumida como função da capacidade de troca catiônica (propriedade que os argilominerais possuem de reagir quimicamente e

reversivelmente com cátions presentes em solução aquosa) e da quantidade relativa de minerais reativos de argila na rocha. A troca catiônica é considerada mais rápida do que o processo de difusão de íons no folhelho, sendo este último o que exerce o controle da escala de tempo. Finalmente, as distribuições em tempo e espaço dos processos estão controladas pela equação de difusão:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = C_D \nabla^2 Q \quad (3.14)$$

onde  $Q$  é a quantidade atual (concentração de íons, pressão de poros ou temperatura) e  $C_D$  é a constante de difusão.

A modelagem determina o quanto os limites de estabilidade para o peso do fluido de perfuração variam com o tempo, com base na medição de escalas de tempo e magnitudes para vários processos envolvidos. Uma geometria e estado de tensões simples foram trabalhadas: poço vertical, tensões horizontais iguais, e pressão de poros igual ao peso do fluido de perfuração. A Figura 3.12 mostra a situação quando o fluido de perfuração está em perfeito balanço com o fluido dos poros. Não existe uma pressão de poros induzida nem troca catiônica. As tensões e a pressão de poros permanecem constantes com o tempo.

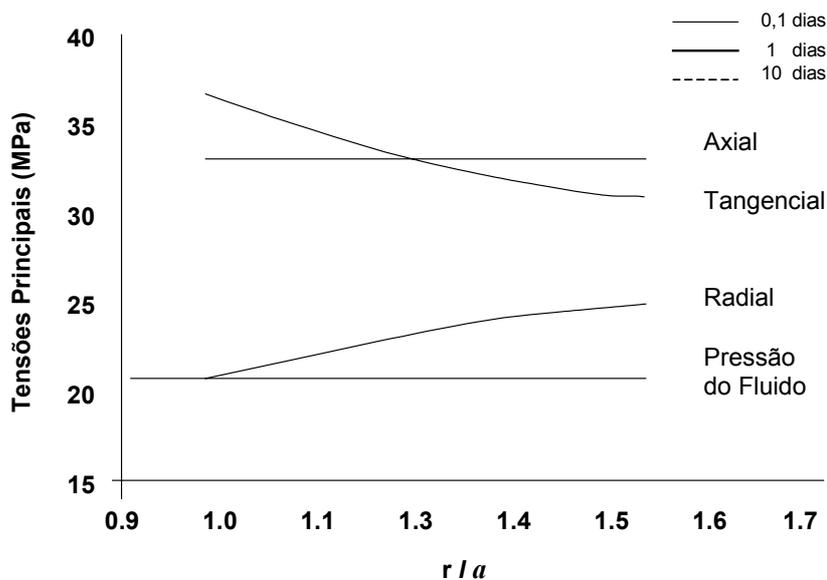


Figura 3.12 – Estado de tensões para  $C_o = C_w = 3.5\%$  w/w de NaCl (Fjær *et al.* 2002)

O efeito do fluido de perfuração com 10 w/w% NaCl aparece na Figura 3. 13. Esta composição produz um efeito osmótico (sem troca de íons) que afeta a pressão de poros e as tensões efetivas perto da parede do poço. O mecanismo traz conseqüências positivas para a estabilidade do poço, já que ele implica num ganho de suporte do fluido de perfuração no poço.

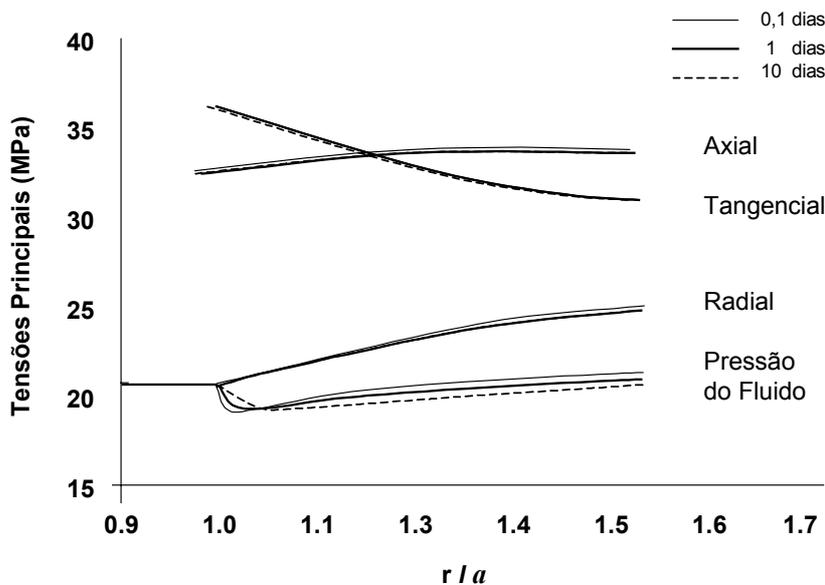


Figura 3. 13 – Estado de tensões para  $C_o = 3.5$  w/w% de NaCl e  $C_w = 10$  w/w% de NaCl (Fjær *et al.* 2002)

A Figura 3. 14 mostra o efeito da solução com 5 w/w% KCl para perfuração. Esta solução tem a mesma atividade química que a solução mostrada na Figura 3. 12. As diferenças entre estes dois casos são devidas ao processo de troca de íons apenas, o qual relaxa as tensões axiais e tangenciais na vizinhança do poço como conseqüência da diminuição de volume (*shrinkage*).

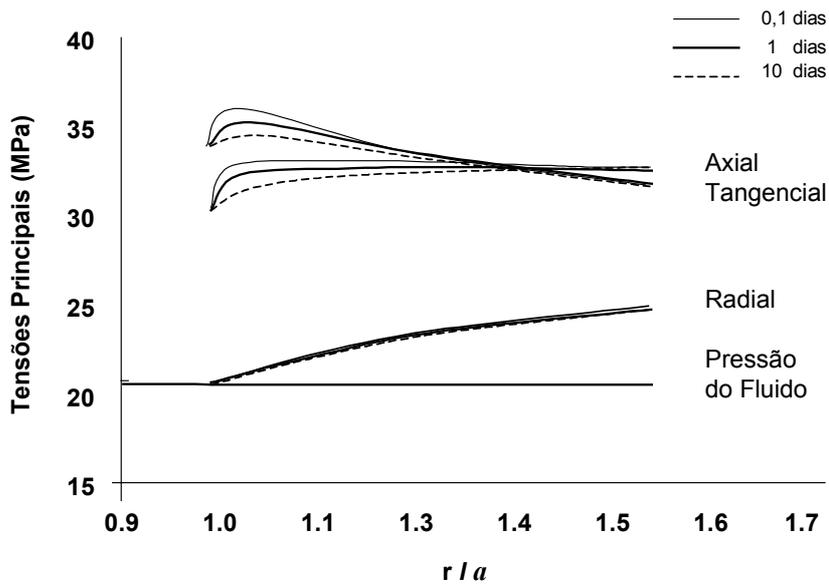


Figura 3. 14 – Estado de tensões para  $C_o = 3.5$  w/w% de NaCl e  $C_w = 5$  w/w% de KCl (Fjær *et al.* 2002)

As equações do modelo de Ghassemi & Diek (2002), estão derivadas dentro da estrutura de uma teoria químico-poroelástica contínua, a qual relaciona linearmente tensões totais e variação do conteúdo de água às deformações, pressão de poros e fração de massa de soluto através de coeficientes de anisotropia do material. As equações são resolvidas analiticamente levando em conta a compressibilidade do fluido  $e$ , por simplicidade, a rocha é assumida como isotrópica com respeito às propriedades de transporte ( $\alpha$ ,  $D_e$ ,  $k$ ).

A modelagem está baseada no problema de um poço perfurado em folhelho com isotropia transversal (Figura 3. 15). A distribuição da pressão de poros ao redor do poço para um valor constante de  $\alpha$  aparece na Figura 3. 16. A osmose química modifica o perfil de pressão de poros, e com o transcurso do tempo, a difusão de íons para dentro da rocha reduz o gradiente de potencial químico. A tensão radial efetiva experimentada na parede do poço é de tração (Figura 3. 17), e surge como consequência da redução do efeito osmótico devida ao processo de difusão de íons.

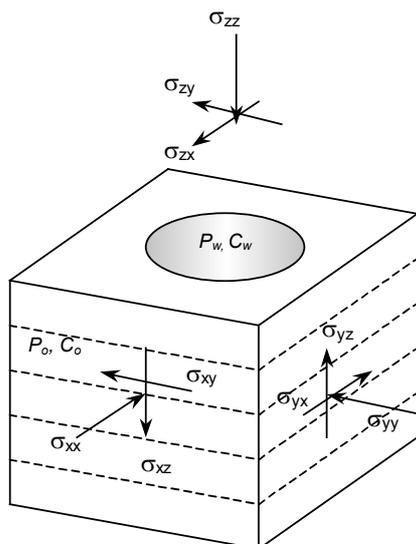


Figura 3. 15 – Geometria do problema idealizada (Ghassemi & Diek, 2002)

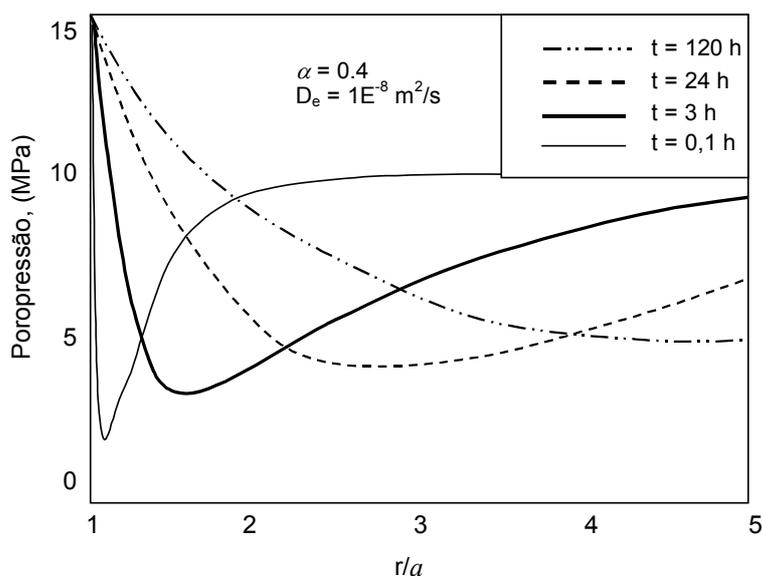


Figura 3. 16 – Pressão de poros ao redor do poço para  $P_o = 10$  MPa,  $P_w = 15$  MPa (Ghassemi & Diek, 2002)

Quanto à anisotropia, os resultados obtidos mostram sua pouca influência na distribuição da pressão de poros. Contrariamente, as magnitudes das tensões radial e tangencial são fortemente afetadas com o incremento da razão entre as propriedades de reatividade (expansão) do folhelho na direção do plano das camadas e as propriedades no plano normal ao plano isotrópico (direção de z).

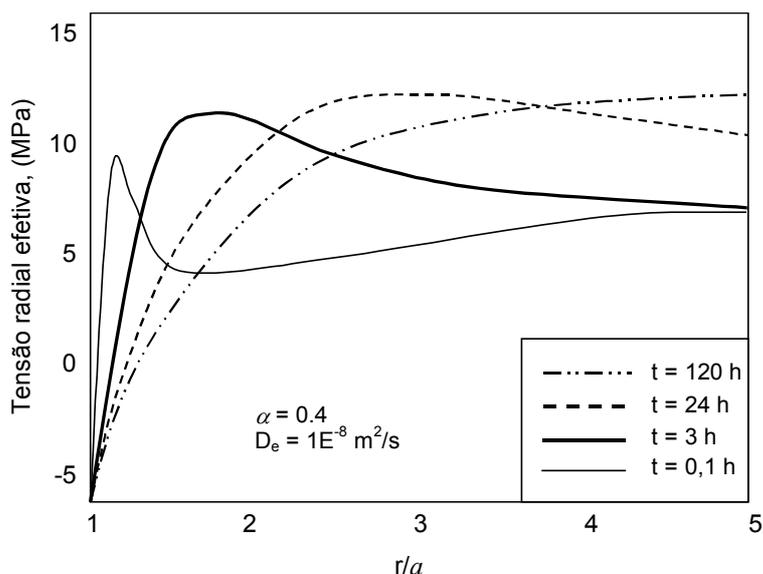


Figura 3. 17 – Evolução de  $\sigma_r'$  ao redor do poço;  $P_o = 10$  MPa,  $P_w = 15$  MPa (Ghassemi & Diek, 2002)

### 3.4. Comentários Finais

Modelos analíticos e numéricos têm sido desenvolvidos para prever o risco de instabilidade em folhelhos. A teoria da poroelasticidade constitui a base de vários deles, incluindo (ou não) fatores como a osmose química, difusão de íons, anisotropia, tensões e pressão de poros ao redor do poço. A maioria dos modelos simulam os efeitos da osmose para condições de membrana não perfeita, com o perfil de pressão de poros na região perto da parede do poço variando em função da atividade química do fluido de perfuração e do fluido dos poros, assim como da eficiência de membrana do sistema folhelho-fluido.

A maneira particular com que cada modelo aborda a temática relacionada com a interação rocha-fluido constitui um conjunto de diversas respostas, as quais convergem em uma interpretação: a distribuição de tensões ao redor do poço, quando a interação físico-química entre a rocha e o fluido é levada em conta, é função do tipo de solução empregada e do tempo de exposição da rocha ao fluido de perfuração.

Através dos modelos apresentados, observa-se que os efeitos da composição química do fluido de perfuração nos problemas de estabilidade do poço em folhelhos pode ter pelo menos duas causas: *i*) o contraste na atividade química, a qual induz a uma mudança na pressão de poros e nas tensões efetivas na região

perto da parede do poço, e *ii*) uma deformação induzida pela troca de íons na microestrutura do folhelho, o qual traz mudanças no estado de tensões naquela região.

A proposta deste trabalho visa avaliar a influência da interação rocha-fluido na estabilidade de poços perfurados em folhelho com fluidos de perfuração base água, usando o modelo apresentado por Frydman e Fontoura (1999). Uma ampliação do fundamento teórico e matemático do mesmo é apresentada no Capítulo 4.