

## 5

# Metodologia para Análise da Interação Rocha-Fluido

### 5.1.

#### Introdução

Durante a perfuração através de formações argilosas, as interações físico-químicas e mecânicas que acontecem ao redor do poço entre o folhelho e o fluido de perfuração podem ter impacto na estabilidade. Os fatores que podem influenciar na condição de estabilidade do poço, os quais podem predominar sob determinadas condições, estão listados na Tabela 5. 1, onde são classificados como não controláveis e controláveis pelo projetista da perfuração. A resistência da rocha e o inchamento do folhelho devido à absorção da água aparecem em ambas as categorias já que, mesmo que suas características iniciais estejam determinadas pela mineralogia e fábrica da rocha, sua mudança com o tempo pode ser controlada pelas propriedades do fluido e técnicas de perfuração usadas (Thomas *et al.*, 2001).

A análise efetuada neste trabalho visou esclarecer de que maneira as propriedades físico-químicas do fluido de perfuração podem ser representadas pela modelagem através do programa FPORO 3D e quanto elas influenciam na estabilidade de poços.

Tabela 5. 1 – Fatores primários que afetam a estabilidade do poço (Thomas *et al.*, 2001)

Fatores não Controláveis	Fatores Controláveis
– Tensões <i>in situ</i>	– Tipo de fluido de perfuração
– Pressão de poros da formação	– Resistência da rocha
– Litologia da rocha	– Pressão no fundo do poço
– Composição química do fluido nos poros	– Composição química do fluido de perfuração
– Resistência da rocha	– Expansão
– Fraturas naturais	– Pressão de poros ao redor do poço
– Permeabilidade e porosidade	– Tempo de exposição
– Porosimetria/granulometria	– Taxa de circulação
– Propriedades térmicas da rocha	– Trajetória do poço
– Temperatura da formação	– Diâmetro do poço
	– Vibrações da coluna de perfuração

A Figura 5. 1 apresenta a metodologia adotada para modelar, sob condições de campo, o comportamento do folhelho frente ao fluido de perfuração base água. Ela é composta, em primeiro lugar, pela avaliação do FPORO 1D através da análise dos resultados da modelagem dos dados experimentais. A partir daí, os dados necessários para simular a interação físico-química são definidos e posteriormente aplicados no FPORO 3D, com o objetivo de estabelecer os parâmetros em função dos quais a análise estaria baseada. Após esta etapa, é realizada a simulação com o FPORO 3D, para os casos de poço vertical e inclinado sob diversas condições mecânicas e físico-químicas. A interpretação e análise dos resultados constitui o terceiro item na modelagem.

O presente capítulo apresenta a primeira etapa descrita. Já as simulações efetuadas e a discussão sobre os resultados obtidos fazem parte do Capítulo 6.

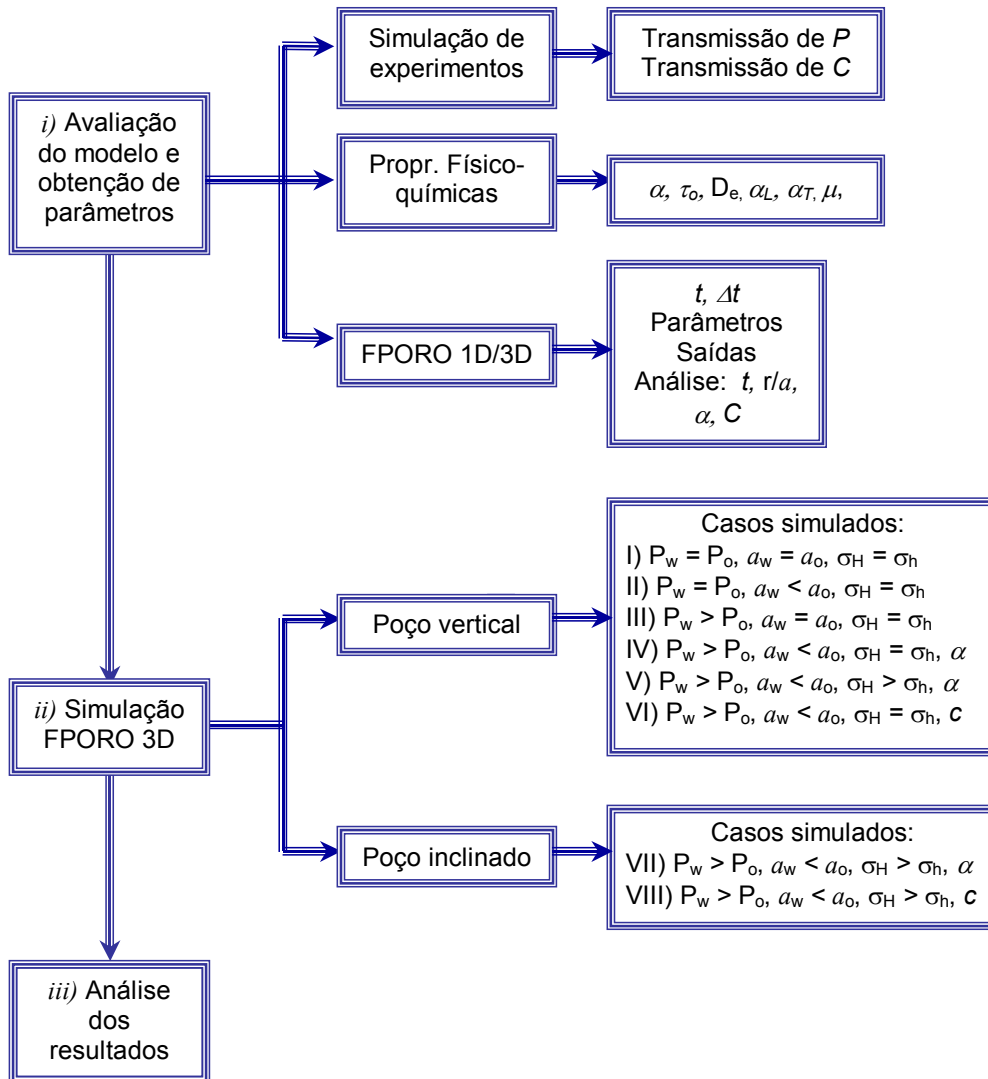


Figura 5. 1 – Esquema da metodologia utilizada neste trabalho

## 5.2. Avaliação do Modelo

### 5.2.1. Simulação de Experimentos

Em princípio, os testes descritos por van Oort (1994) e van Oort *et al.* (1996), utilizados como base para a avaliação do FPORO unidimensional, comprovaram a coerência das curvas de transmissão de pressão e difusão de íons geradas pela modelagem com o FPORO 1D (Frydman & da Fontoura, 1999 e 2001).

Muniz (2003), através de ensaios laboratoriais destinados ao estudo do mecanismo de potencial químico usando uma célula de difusão, validou também o modelo aqui apresentado. A Figura 5. 2 apresenta o esquema do equipamento,

onde um corpo de prova cilíndrico de 15 mm de altura e 38,1 mm de diâmetro é colocado entre dois “caps” (ambos contendo reservatórios internos) e envolvido por membrana termoretráctil. A instrumentação utilizada consiste de uma célula de carga interna para medir a força axial, um transdutor de pressão para a pressão de poros da base (PP. base) e dois manômetros destinados à medição da pressão confinante e da pressão de poros no topo (PP. topo) do corpo de prova. A Figura 5. 3 apresenta as leituras efetuadas e o ótimo ajuste numérico obtido com o programa FPORO 1D. A pressão osmótica gerada quando o fluido de circulação (água desmineralizada), presente no reservatório superior, é substituído pelo fluido de interesse para o ensaio (35 w/w% de  $\text{CaCl}_2$  no caso da Figura 5. 3), cresce conforme a concentração do fluido de perfuração aumenta.

O programa FPORO permite diferentes modos de análise, nas quais se incluem a análise transiente e a análise transiente com transporte de solutos. A análise transiente foi adotada para se estimar o coeficiente de permeabilidade do corpo de prova. Desta forma, executa-se o programa FPORO com diferentes valores para o coeficiente de permeabilidade até que a curva de crescimento de pressão na base seja similar à observada experimentalmente.

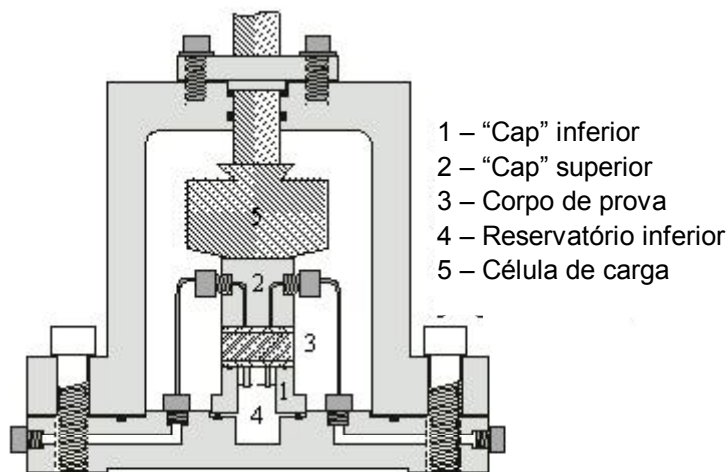


Figura 5. 2 – Esquema do equipamento desenvolvido (Muniz, 2003)

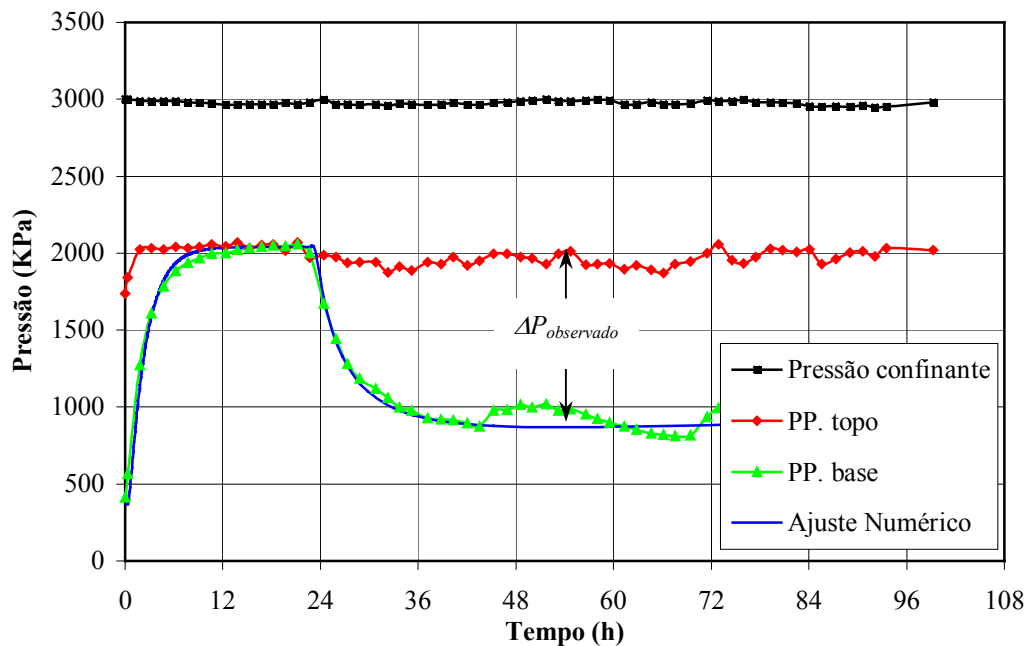


Figura 5. 3 – Fase de difusão de pressão e difusão de íons do CP31 (Muniz, 2003)

A partir do momento em que se determina o coeficiente de permeabilidade, fixa-se este parâmetro e adotam-se valores para o coeficiente de difusão efetivo e coeficiente de reflexão utilizando-se a análise que considera o transporte de solutos no FPORO, de forma que a concentração de  $\text{CaCl}_2$  ao final do ensaio (concentração obtida pela análise química no fluido do reservatório inferior) coincida com a concentração determinada pela análise numérica neste mesmo tempo.

As curvas obtidas através de simulação numérica, forneceram valores do coeficiente de reflexão ( $\alpha$ ) similares aos obtidos no laboratório e dados de tortuosidade ( $\tau_o$ ) e coeficiente de difusão efetiva ( $D_e$ ) dentro das faixas já reportadas na literatura. A Tabela 5. 2 apresenta os parâmetros obtidos do ajuste numérico aos dados experimentais para o corpo de prova CP31. Estes valores foram estimados considerando que não existe retardamento, ou seja,  $R_d$  igual a 1.

Tabela 5. 2 – Valores dos parâmetros de difusão obtidos (Muniz, 2003)

CP	$\tau_o$	$\alpha$	$D_e$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
CP31	0,025	0,0180	$3,35 \cdot 10^{-11}$

### 5.2.2. Propriedades Físico-Químicas

*Coefficiente de reflexão.* Com o objetivo de verificar o valor do coeficiente de reflexão ( $\alpha$ ) obtido pela análise numérica, a metodologia proposta por van Oort *et al.*, 1996 e Tan *et al.*, 2002 foi também adotada. A pressão osmótica teórica foi determinada através da eq. (5.1), onde:  $\Pi$  é a pressão osmótica (atm),  $V_w$  o volume molar da água pura (0,018 L/mol),  $R$  é a constante universal dos gases (0,082 L.atm/mol.°K),  $T$  é a temperatura absoluta (°K),  $a_w$  e  $a_o$  a atividade química do fluido de perfuração e a atividade química do folhelho, respectivamente.

$$\Pi = \frac{RT}{V_w} \ln\left(\frac{a_w}{a_o}\right) \quad (5.1)$$

Para o cálculo da pressão osmótica teórica é necessário determinar a atividade química da solução utilizada. Para isto, realizou-se um ensaio onde a solução é colocada em uma câmara fechada e a umidade relativa do ar neste ambiente é determinada por meio de um termohigrômetro. A sonda do aparelho, colocada dentro de um erlenmeyer junto com a solução (Figura 5. 4), mede a umidade relativa deste ambiente. Este valor obtido corresponde à atividade química da solução (Chenevert, 1970). A atividade química do folhelho ensaiado com 35 w/w% de CaCl<sub>2</sub> na câmara de difusão, de origem *off shore* (Bacia de Campos), considerou-se igual a 0.954, valor determinado experimentalmente por Rabe, 2003.



Figura 5. 4 – Ensaio para obter a atividade química de soluções

Dividindo as pressões osmóticas obtidas nos ensaios (de 1010 KPa no caso da Figura 5. 3), pelas pressões osmóticas teóricas, como descrito na eq. (3.11), obteve-se o coeficiente de reflexão de valor similar àquele fornecido pela análise numérica. A Tabela 5. 3 apresenta os resultados obtidos para os corpos de prova ensaiados com 35 w/w% de  $\text{CaCl}_2$ : a atividade química para esta solução ( $a_w$ ), a pressão osmótica teórica ( $\Pi$ ), a pressão osmótica observada nos ensaios ( $\Delta P_{\text{observado}}$ ) e os coeficientes de reflexão ( $\alpha$ ) experimental e numérico. Observa-se que os valores do coeficiente de reflexão obtidos numericamente e experimentalmente são muito próximos, comprovando que o programa FPORO é confiável para obtenção deste parâmetro. O valor obtido no laboratório para o coeficiente de reflexão confirma o fato de que o folhelho em questão atua como uma membrana semipermeável não perfeita.

Tabela 5. 3 – Coeficiente de reflexão obtido para cada CP (Muniz, 2003)

CP	$a_w$	$\Pi$ (KPa)	$\Delta P_{\text{observado}}$ (KPa)	$\alpha$	$\alpha$ (numérico)
CP31	0,5199	83936,6	1010	0,0120	0,0180
CP35	0,5199	83936,6	1045	0,0124	0,0165

*Propriedades da solução salina.* O fluido adotado neste trabalho foi uma solução salina de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Segundo van Oort (1997), dois fatores fazem do  $\text{CaCl}_2$  um ótimo sal para modelagem do efeito físico-químico em folhelhos. O primeiro está relacionado com a elevada viscosidade do filtrado, o que faz com que o fluxo hidráulico para dentro da formação seja pequeno e lento. O segundo se deve ao fato de que ele pode gerar pressões osmóticas muito altas, as quais estimulam o fluxo de água na direção do poço, pela sua baixíssima atividade quando próximo da saturação. Estas propriedades contribuem na redução da hidratação da rocha e da pressão de poros nas proximidades do poço, o que gera o aumento das tensões efetivas, melhorando a estabilidade. Um outro argumento para a sua utilização é o seu baixo custo, quando comparado com outros sais.

Na Figura 5. 5 encontra-se o comportamento da viscosidade da solução de  $\text{CaCl}_2$  em função da concentração, a  $50^\circ\text{C}$ , até a sua saturação (Rabe, 2003). Os resultados comparados com outros sais inorgânicos ( $\text{KCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ), indicam que a solução de cloreto de cálcio apresenta a maior viscosidade a  $50^\circ\text{C}$ .

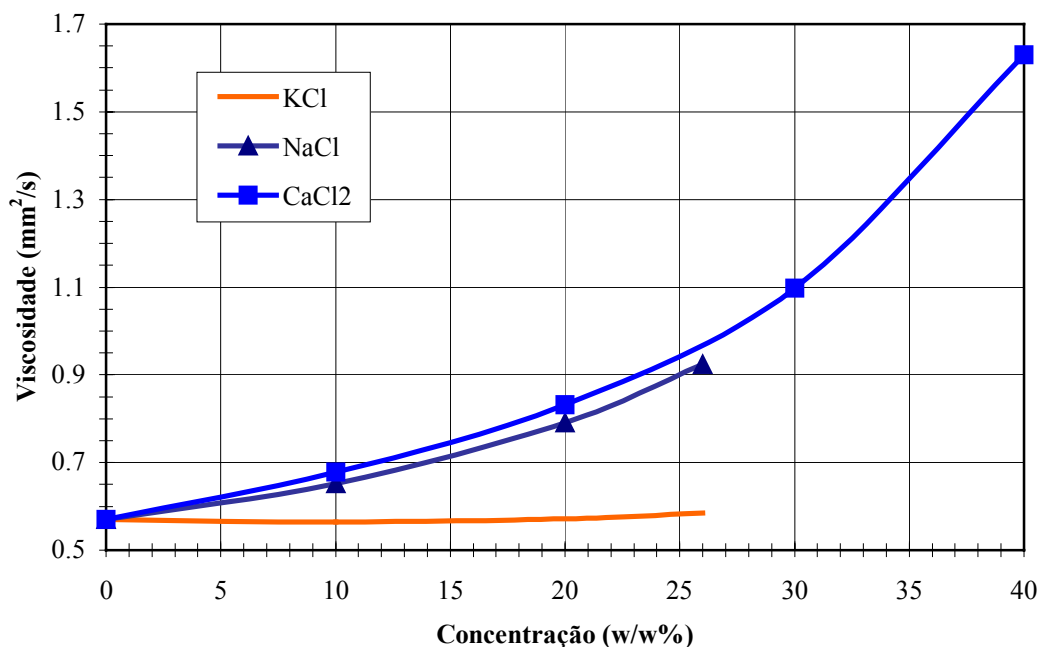


Figura 5. 5 – Viscosidade dos cloretos em função da concentração (Rabe, 2003)



*Difusão e tortuosidade.* O transporte difusivo no meio poroso é mais lento do que o transporte difusivo na solução livre devido à diminuição da área transversal de fluxo e às trajetórias tortuosas experimentadas pelo soluto, em virtude do grau de cimentação do material, diâmetro dos poros, fração argila e tipo de argilomineral, entre outros. Conseqüentemente, o coeficiente de difusão molecular efetivo do sal na água em um meio poroso ( $D_e$ ) será menor do que o valor do coeficiente de difusão na solução livre ( $D_o$ ). Em geral, as variações na definição do  $D_e$  resultam do número de fatores incluídos na definição da primeira lei de Fick. Shackelford & Daniel (1991) sugerem juntar todos os fatores que influenciam a difusão efetiva de solutos não reativos ( $R_d = 1$ ) em um fator conhecido como tortuosidade aparente ( $\tau_o$ ), o qual varia entre 0,1 e 0,4, sendo este último valor para a maioria de solos de granulação fina. A equação que descreve a difusão molecular do sal na água em um meio poroso ( $D_e$ ) resulta descrita como:

$$D_e = \tau_o D_o \quad (5.2)$$

A partir dos valores apresentados por Shackelford & Daniel (1991) para o coeficiente de difusão molecular do  $\text{CaCl}_2$  na solução livre, e assumindo o folhelho com tortuosidade igual a 0,1, foi adotado um valor de coeficiente de difusão molecular efetivo de  $1,34 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

*Dispersividade.* O fluxo de massa do sal, a partir da primeira lei de Fick, representa a difusão molecular efetiva e a dispersão (a qual é função da velocidade de fluxo) causadas por um gradiente de concentração.

O coeficiente de dispersão longitudinal ( $\alpha_L$ ) foi estimado com base na equação  $\alpha_L = 0,1H$  (Shackelford & Rowe, 1997), onde H é a distância de transporte ou no caso, a altura real do corpo de prova (15 mm). Resultados experimentais testemunham o coeficiente de dispersão transversal ( $\alpha_T$ ) como sendo dez a vinte vezes menor, o que justifica a adoção de  $\alpha_T = 0,1\alpha_L = 0,00015$ . Segundo estudos efetuados por Rowe (1987), quando se trata de transporte através de argila intata, a difusão é o mecanismo que controla o fluxo devido a um gradiente químico. Frydman & da Fontoura (1999), mostraram que os parâmetros de dispersividade são praticamente desprezíveis, neste caso, devido à baixa velocidade de fluxo nos folhelhos.

### 5.2.3. Simulação 3D

Com o intuito de estabelecer os parâmetros em função dos quais a análise se baseia, foram feitas simulações para determinar os tipos de saídas que o programa FPORO 3D oferece. A malha utilizada, composta por 525 elementos isoparamétricos quadrilaterais de 8 nós, representa a seção de  $\frac{1}{4}$  de poço no plano  $xy$ , para um raio de influência de 10 vezes o raio do poço. Na Figura 5.6 aparece a configuração descrita, onde  $x/a$  e  $y/a$  correspondem a  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$  respectivamente.

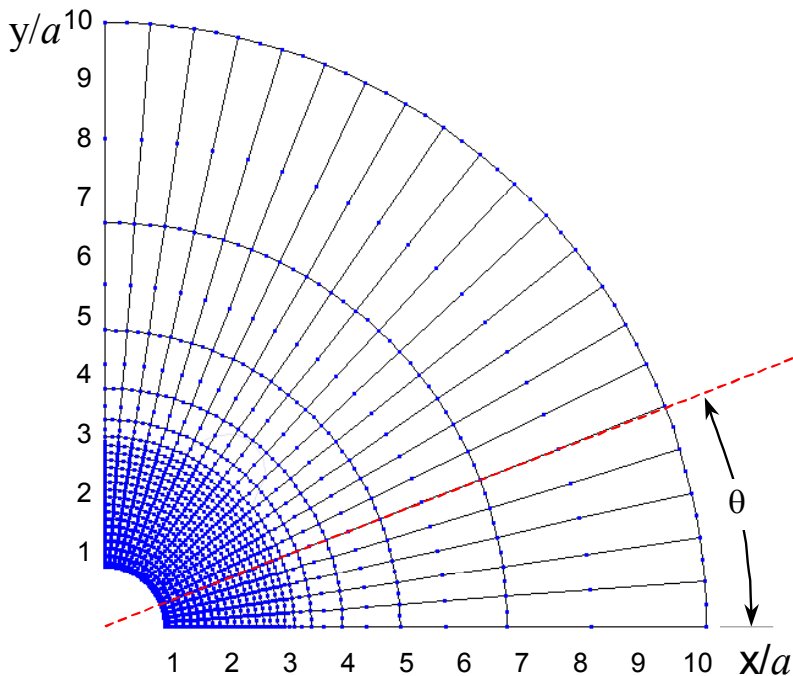


Figura 5.6 – Malha de elementos finitos usada na modelagem

O sistema de coordenadas estabelece as tensões *in situ* como orientadas vertical e horizontalmente, sendo  $\sigma_v$  a tensão vertical,  $\sigma_H$  a máxima tensão horizontal e  $\sigma_h$  a mínima. A Figura 5.7 mostra o sistema de coordenadas adotado.

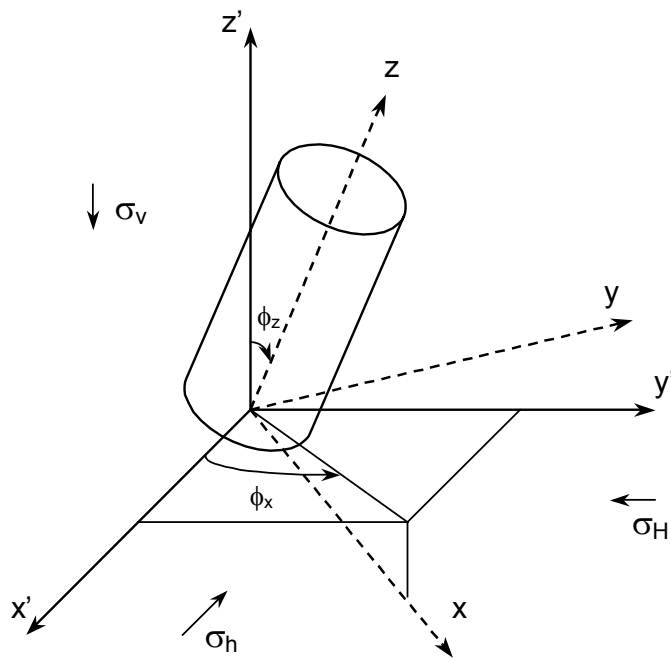


Figura 5. 7 – Sistema de coordenadas do poço

O programa FPORO permite a análise transiente e a análise transiente com transporte de solutos, sendo esta última utilizada para estabelecer as respostas relacionadas com a interação físico-química.

Para solucionar o sistema de equações não-lineares no FPORO, o processo é realizado em três etapas. Elas são:

- i) Mantendo constante a concentração do soluto, as equações de equilíbrio e continuidade são resolvidas (processo iterativo);
- ii) Mantendo os campos de deslocamentos e de pressões constantes, resultantes de *i*), é resolvida a equação de continuidade do soluto até a convergência;
- iii) O processo é repetido até a convergência ser alcançada.

A faixa de tempo máxima que seria adotada como adequada nas simulações foi estabelecida através da estimativa da variação da velocidade de transmissão de pressão e concentração usando o FPORO 1D. Três malhas de elementos Q8 (Figura 5. 8), para tamanhos de corpo de prova de 15 mm, 25 mm e 40 mm de altura, foram criadas tomando como base as condições do ensaio de difusão de Muniz (2003) e utilizando o programa Mtool (<http://www.tecgraf.puc->

rio.br/~william/mtool/). A malha gerada considera o elemento 1 como um material fictício com permeabilidade bem maior do que o folhelho ( $1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ) com a finalidade de distribuir apropriadamente o fluxo na base do corpo de prova, e alta porosidade para o cálculo adequado da compressibilidade do fluido devido a variações da pressão de poros. Nesta análise considera-se a axissimetria do problema, ou seja, representa-se somente a metade de uma seção do corpo de prova.

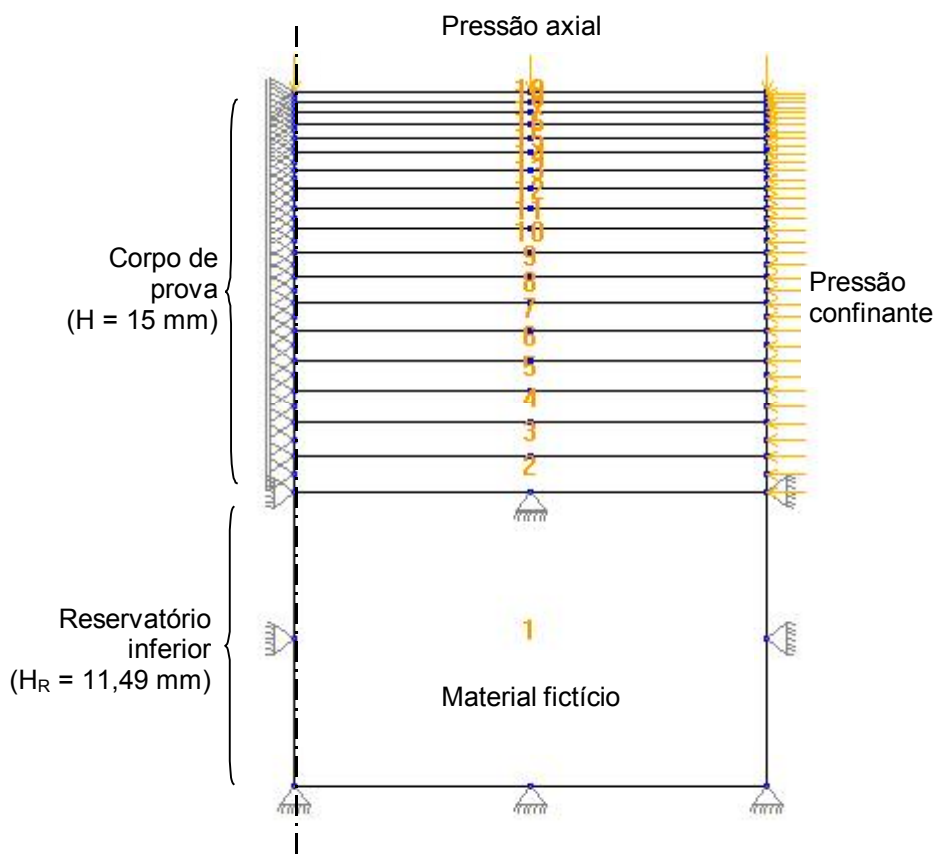


Figura 5. 8 – Malha de elementos finitos utilizada para amostra (CP31)

O arquivo de saída do Mtool não é compatível com o arquivo de entrada do Fporo. Desta forma, é necessário complementar o arquivo de entrada do Fporo com os principais dados da malha (coordenadas dos elementos, carregamentos impostos, conectividade) e demais parâmetros necessários para a análise. A Tabela 5. 4 apresenta alguns parâmetros básicos de entrada cujos valores foram utilizados na análise do CP31.

Tabela 5. 4 – Parâmetros utilizados na análise numérica do CP31 (Muniz, 2003)

Parâmetro	Valor Adotado
Módulo de Elasticidade ( $E$ )	330 MPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,22
Permeabilidade ( $k$ )	$6,0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$
Módulo de compressibilidade dos grãos ( $K_s$ )	$3,6 \times 10^{10} \text{ Pa}$
Módulo de compressibilidade do fluido ( $K_f$ )	$3,3 \times 10^9 \text{ Pa}$
Porosidade, ( $\eta$ )	0,4041
Concentração ( $C$ )	$462 \text{ Kg/m}^3$ (35 w/w%)
Peso molecular do soluto ( $M_s$ )	$110,98 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}$
Peso molecular do solvente ( $M_w$ )	$18,01528 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}$
Temperatura ( $T$ )	22 °C

A Figura 5. 9, apresenta os gráficos das fases de difusão de pressão e íons variando somente o tamanho do corpo de prova. Mostra-se que um aumento no tamanho do corpo de prova gera uma diminuição na velocidade de transmissão de pressão para o reservatório inferior. No momento em que o fluido de circulação é trocado pela solução salina (35 w/w% de  $\text{CaCl}_2$  em  $t = 24$  h), para os corpos de prova de 25 mm e 40 mm o equilíbrio da pressão ainda não foi atingido, enquanto que o corpo de prova de 15 mm já alcançou o equilíbrio de pressões para  $t = 12$  h. Nenhuma variação significativa foi observada na máxima pressão osmótica gerada em 3 dias, sendo praticamente a mesma para qualquer tamanho de corpo de prova.

A Figura 5. 10 ilustra a variação de concentração salina no reservatório inferior. Os resultados mostram que um tamanho de corpo de prova maior retarda a penetração do sal no reservatório inferior, sendo que para o CP com 40 mm de altura, a concentração depois de 10 dias é de aproximadamente  $1 \text{ Kg/m}^3$ , quantidade praticamente nula. Para o caso do corpo de prova de 15 mm seriam necessários 5 dias de ensaio para se alcançar  $25 \text{ Kg/m}^3$  de  $\text{CaCl}_2$  (aproximadamente 2,5 w/w%), enquanto que no corpo de prova de 25 mm seriam necessários aproximadamente 9 dias de ensaio.

Levando em conta que para 3 dias a máxima pressão osmótica já é visível, e que em 10 dias o soluto conseguiu atravessar 25 mm de rocha (grandeza que corresponde a 20% do raio do poço que seria adotado), foi feita uma analogia

deste comportamento unidimensional com a situação ao redor do poço. O tempo estabelecido a priori, para análise das simulações no campo, foi de 10 dias a partir deste confronto.

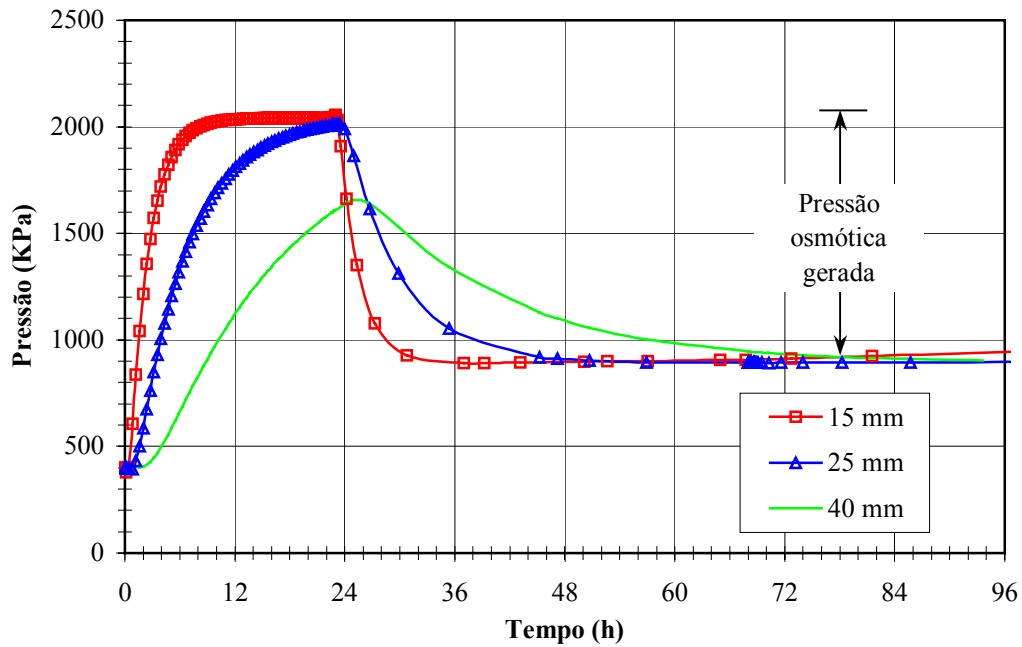


Figura 5. 9 – Difusão de pressão com a variação do tamanho do corpo do corpo de prova

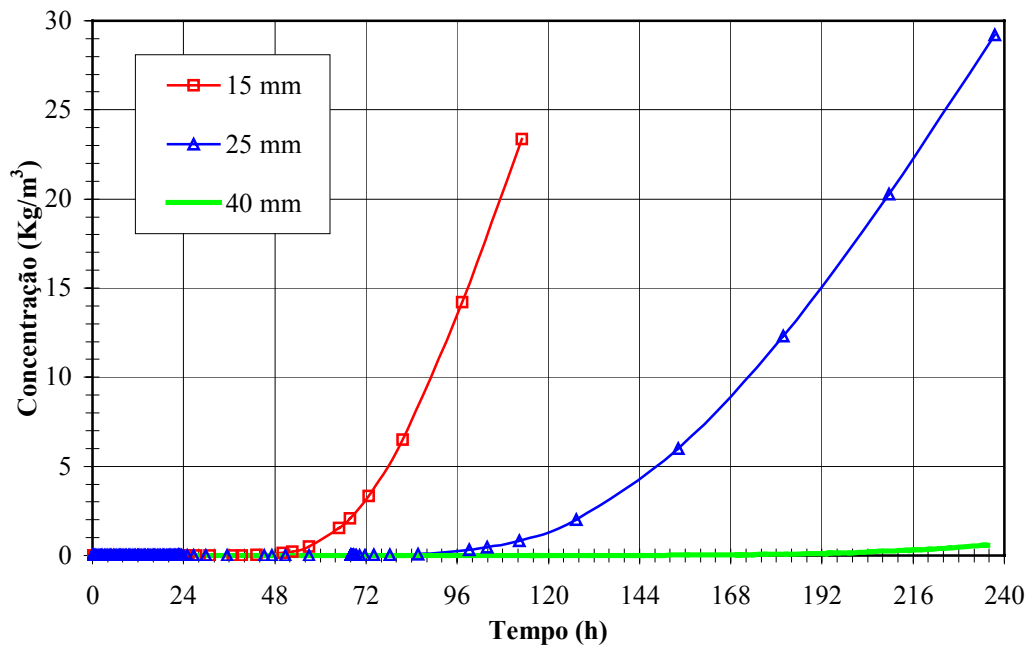


Figura 5. 10 – Difusão da concentração com a variação do tamanho do corpo de prova

Para ilustrar o esquema de solução proposta pelo FPORO 3D, o processo de perfuração de um poço inclinado em um meio poroso contínuo, deformável, e submetido a um campo de tensões anisotrópico foi simulado (Figura 5. 11). A rocha é considerada totalmente saturada e inicialmente submetida a um estado anisotrópico de tensões *in situ*. A perfuração é simulada sobre-balanceada, ou seja, a pressão do fluido de perfuração instantaneamente aplicada às paredes do poço é superior à pressão de poros original da formação.

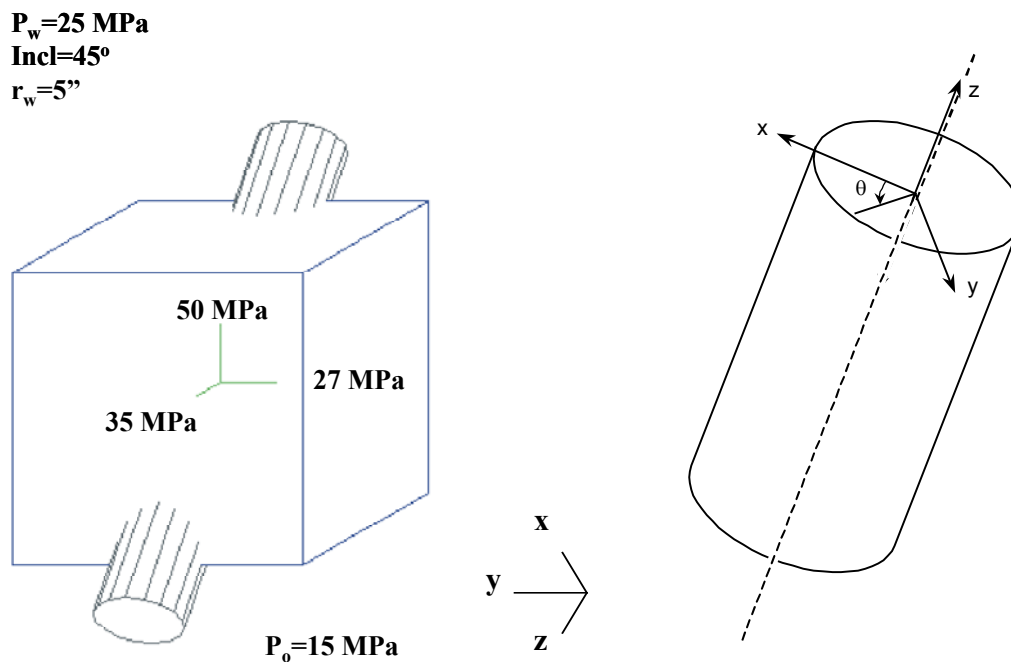


Figura 5. 11 – Descrição do cenário modelado

Os menores intervalos adotados, devido à dificuldade de convergência, aparecem na Tabela 5. 5. Esta discretização temporal exige um crescimento lento dos intervalos de tempo para alcançar a convergência do problema numérico.

A Tabela 5. 6 apresenta os parâmetros de utilizados na simulação. As propriedades do fluido dos poros e mecânicas do material da formação requeridos para a aplicação do modelo foram extraídas a partir de dados reais de campo e/ou exemplos na literatura.

Tabela 5. 5 – Incrementos de tempo utilizados no FPORO

<b>t (s)</b>	0,0	0,1	0,1	1,0	1,0	10	10	1E2	1E3	1E3	1E4	1E4	1E5	1E6	1,0E200
<b>Δt (s)</b>	0,01	0,01	0,1	0,1	1,0	1,0	10	10	10	1E2	1E2	2E2	2E2	2E2	2E2

Tabela 5. 6 – Dados usados na simulação

<b>Fluido dos Poros</b>		Módulo compress. do fluido ( $K_f$ )	MPa	3300
		Viscosidade ( $\mu_o$ )	cp	1,0
<b>Material</b>	<b>Propriedades Drenadas</b>	Módulo de Young ( $E$ )	MPa	1850
		Poisson ( $\nu$ )		0,22
<b>Propriedades de Resistência</b>	Compressão		MPa	50
	Tração		MPa	5
	Ângulo de atrito ( $\phi$ )		( <sup>o</sup> )	30
	Ângulo de dilatação ( $\psi$ )		( <sup>o</sup> )	15
	Módulo de rigidez dos grãos ( $K_s$ )		MPa	36000
	Porosidade ( $\eta$ )			0,3
	<b>Poço</b>	Inclinação		( <sup>o</sup> )
Raio ( $a$ )			m	0,127
<b>Consolidação</b>	$c_v$		m <sup>2</sup> /s	1,804E-08
	$k$		mDarcy	1,0E-05
<b>Dados Físico-Químicos</b>	<b>Tipo de solução</b>	CaCl <sub>2</sub>		
	<b>Massa molar</b>	Solvente (água)	Kg/mol	0,01802
		Soluto	Kg/mol	0,11098
<b>Coefficientes de Dispersão</b>	Difusão da solução livre ( $D_o$ )		m <sup>2</sup> /s	1,34E-09
	Difusão efetiva ( $D_e$ )		m <sup>2</sup> /s	1,34E-10
	Tortuosidade ( $\tau_o$ )			0,1
	Dispersividade longitudinal ( $\alpha_L$ )		m	0,0015
	Dispersividade transversal ( $\alpha_T$ )		m	0,00015
<b>Dissociação do sal</b>	Número de partículas ( $n_i$ )			2,601
	Fator de retardamento ( $R_d$ )			1,0
<b>Osmose</b>	Coefficiente de reflexão ( $\alpha$ )			0,010
	Concentração sal ( $C$ )		Kg/m <sup>3</sup>	538
	Viscosidade de filtração salina ( $\mu_w$ )		cp	5,2
	Temperatura ( $T$ )		°C	60



Alguns dos resultados obtidos na simulação são mostrados na Figura 5. 12. Típicamente, as respostas que o programa oferece são imagens bidimensionais do comportamento das tensões totais ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ), tensões efetivas ( $\sigma'_{xx}$ ,  $\sigma'_{yy}$ ,  $\sigma'_{zz}$ ), tensões efetivas principais ( $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_3$ ), pressão de poros ( $P$ ) e concentração ( $C$ ) em função dos tempos preestabelecidos (5 minutos, 1 hora, 1 dia, 10 dias).

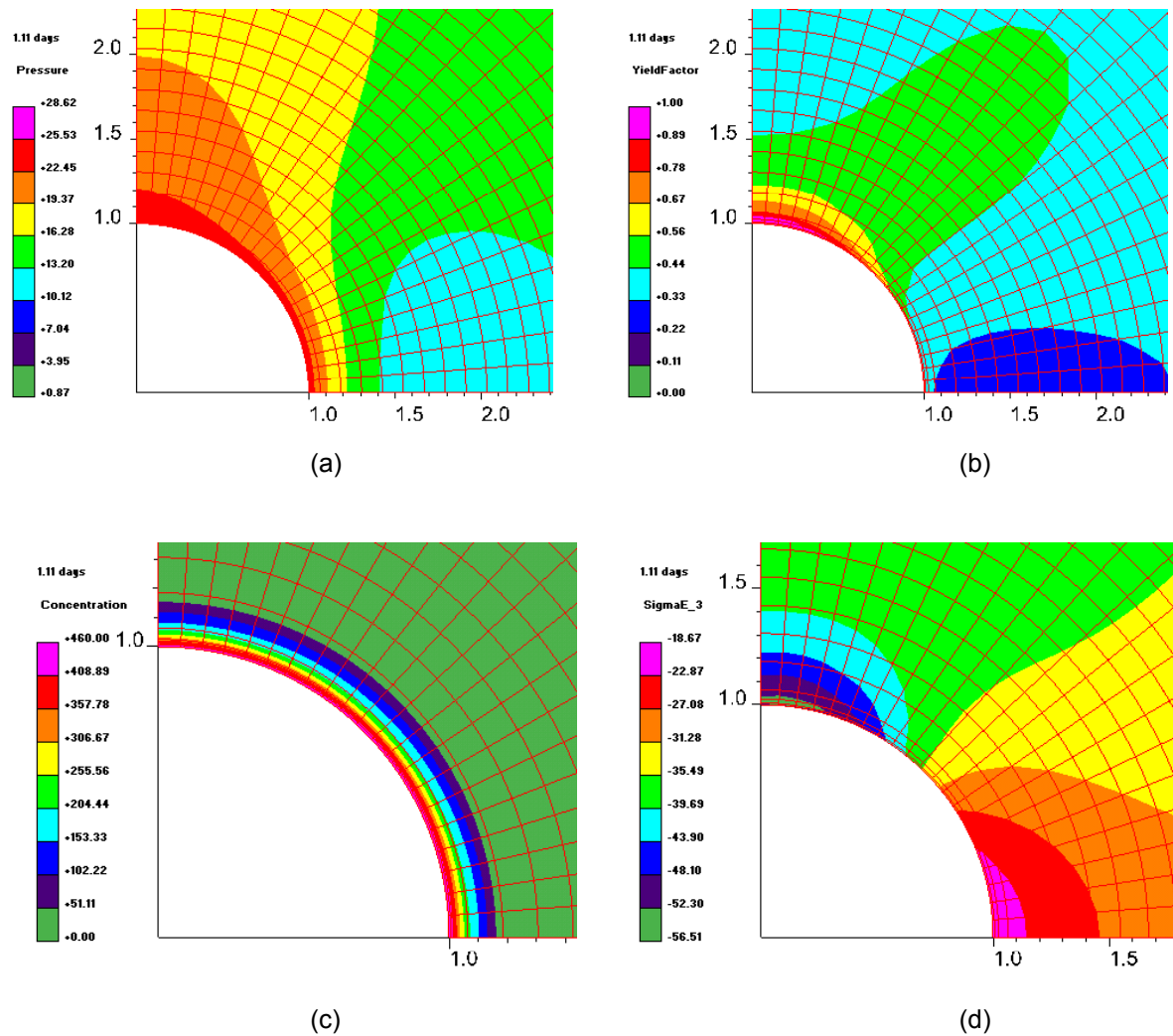


Figura 5. 12 – Resultados obtidos com o FPORO 3D para  $t = 1,1$  dias: (a) pressão de poros; (b) fator de dano; (c) difusão de íons; (d)  $\sigma'_3$

A perfuração de um poço de petróleo provoca mudanças do estado de tensões pré-existente, o qual pode gerar um dano mecânico permanente. Ele é caracterizado pela degradação irreversível da resistência da rocha e alteração das propriedades hidráulicas, como resultado de mudanças na estrutura do material ao redor do poço, que estão associadas a deformações plásticas. O fator de dano

estima a área plastificada ao redor do poço, a qual é determinada através da relação:

$$\text{fator de dano} = \frac{\tau_{atuante}}{\tau_{ruptura}} \quad (5.3)$$

Valores de fator de dano maiores ou iguais a 1, eqüivalem a um estado de dano mecânico permanente da formação.

Para a análise dos dados de deslocamento da parede do poço os resultados obtidos são apresentados de maneira adimensional (eq. 5.4) e como percentagem do valor inicial do raio do poço (eq. 5.5).

$$\text{Deslocamento}_{(r/a)} = \frac{\pm dx + a}{a} \quad (5.4)$$

$$\text{Deslocamento}_{(\%)} = \frac{\pm dx \times 100}{a} \quad (5.5)$$

### 5.3. Conclusão

Depois de estabelecida a metodologia para o estudo do modelo numérico, foi discutida ao longo deste capítulo a obtenção dos parâmetros necessários para a modelagem com o FPORO 3D. Em geral, os valores adotados aqui apresentados são uma combinação de resultados obtidos em laboratório, dados da literatura e simulação numérica dos experimentos. A comparação do coeficiente de reflexão ( $\alpha$ ) obtido em ensaios de laboratório com o valor fornecido pela simulação numérica, mostrou a confiabilidade do FPORO para o cálculo deste parâmetro.

Foram estimados o marco temporal e a discretização do tempo devido à dificuldade de convergência. Através da aplicação dos resultados obtidos na situação de laboratório (unidimensional) ao poço, a faixa de 10 dias foi assumida como apropriada para simular a interação rocha-fluido no campo. O tipo de análise a ser efetuada, foi também determinada com base nos resultados que o programa oferece.

A partir do conhecimento destas questões, foram desenvolvidas as simulações com o FPORO 3D, cujos resultados e análises aparecem contidas no Capítulo 6.