

5 Ensaio Realizados e Análise dos Resultados

5.1 Introdução

Definida a metodologia dos ensaios e o tratamento dos resultados experimentais, procede-se a realização dos ensaios nas células de difusão. Neste capítulo, inicialmente, será apresentada a campanha de calibração dos transdutores de pressão das cinco células de difusão. Em seguida, apresentam-se os testes iniciais do sistema composto por as quatro novas células de difusão utilizando corpos de prova sintéticos. Na sequência, se apresentam as quatro campanhas de ensaios realizados com os folhelhos, onde se incluem os ensaios de tração indireta; as duas primeiras campanhas feitas com o folhelho Pierre01 e as duas seguintes com o folhelho BC-01; e ao final, as conclusões deste capítulo.

5.2 Ensaio em Corpos de Prova Sintéticos nas Células de Difusão

Com o término dos ensaios de calibração dos transdutores é necessário testar o sistema composto por transdutores e válvulas, para este fim, ensaios em corpos de prova sintéticos foram realizados. Os testes no sistema tiveram como objetivo obter resultados confiáveis, avaliando o real comportamento dos folhelhos e não comportamentos influenciados por um mau funcionamento das válvulas ou transdutores.

O corpo de prova sintético é produzido cortando-se dezenas de folhas de papel celofane com o mesmo diâmetro do cabeçote da célula de difusão. Estas folhas são empilhadas formando-se o corpo de prova que será ensaiado com a altura que se desejar. A montagem dos corpos de prova e as fases de ensaio seguem o mesmo procedimento descrito no capítulo 4. A Figura 5.1 apresenta uma foto mostrando o corpo de prova sintético na célula de difusão.



Figura 5.1 – Corpo de prova sintético na célula de difusão.

5.2.1 Fase de Saturação e Adensamento

Os corpos de prova sintéticos nomeados de SI01 a SI04 foram colocados sequencialmente nas quatro novas células de difusão e deu-se início à fase de saturação. No processo, estes foram submetidos inicialmente a uma pressão confinante de 1000 kPa e de 800 kPa de contrapressão (PP Topo e PP Base). Logo em sequência, a pressão confinante e a contrapressão foram elevadas em estágios de 500 kPa mantendo-se a tensão efetiva de 200 kPa constante, até chegar ao nível próximo da saturação do corpo de prova (B próximo a 1).

Concluído o processo de saturação, os corpos de prova foram adensados, submetidos a uma contrapressão (PP. Topo e PP Base) de 4000 kPa e uma pressão confinante (P. Confinante) de 14000 kPa por 24 horas.

5.2.2 Fase de Transmissão de Pressão e Difusão de Íons

Terminada a fase de adensamento, iniciou-se a fase de transmissão de pressão. Após a pressão da base (PP. Base) atingir à pressão do topo do corpo de prova (PP. Topo), prosseguiu-se com a fase de difusão de íons. As soluções salinas utilizadas foram de 200g/l de CaCl, 150g/l de NaCl, e 250g/l de KCl respectivamente para os corpos de prova SI01, SI02 e SI03. As Figuras 5.2, 5.3 e

5.4 apresentam os gráficos da transmissão de pressão e difusão de íons para estes corpos de prova.

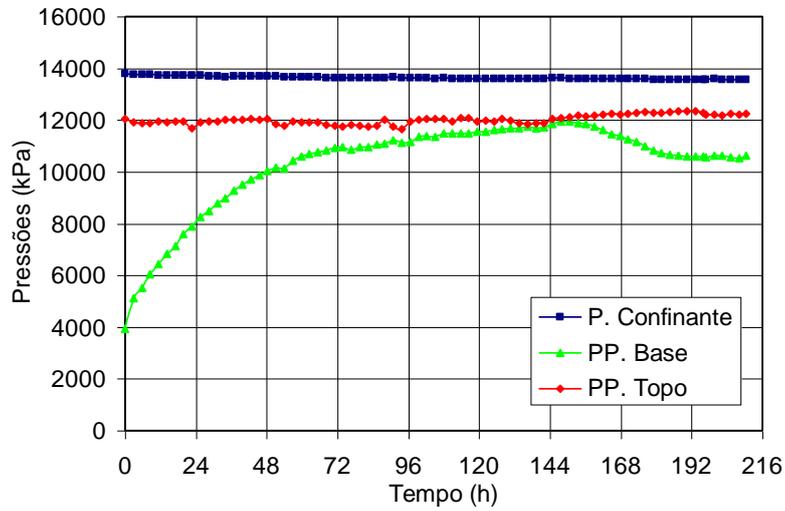


Figura 5.2 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do SI01.

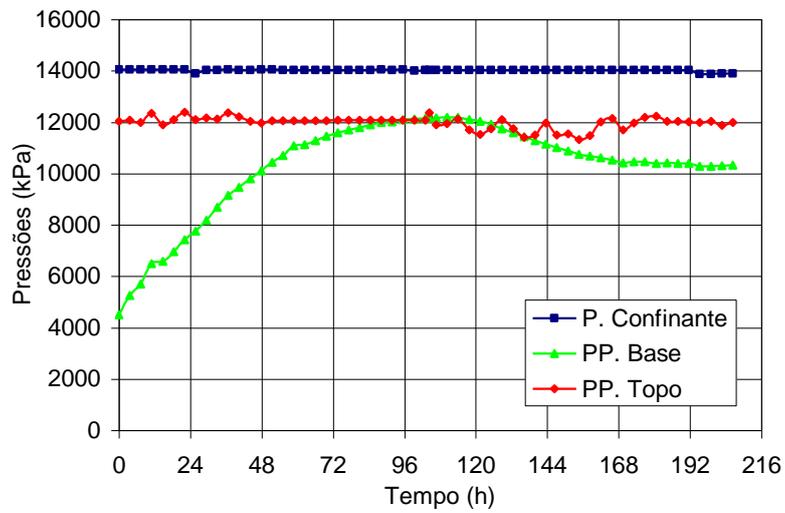


Figura 5.3 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do SI02.

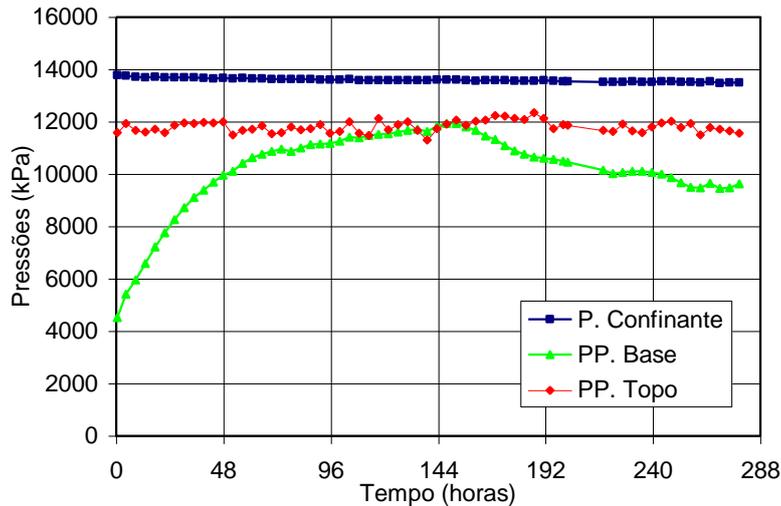


Figura 5.4 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do SI03.

Como podem ser observados os crescimentos de pressão das bases ocorrem de forma lenta. Assim, o tempo necessário para uma total transmissão de pressão é aproximadamente 150 horas para os corpos de prova SI01 e SI03 e aproximadamente 103 horas para o SI02. A pressão osmótica experimental (ΔP_{osm}) foi aproximadamente de 1600 kPa, 1700 kPa e 2300 kPa respectivamente, para SI01, SI02 e SI03.

Os tempos prolongados para uma completa transmissão de pressão no caso dos corpos de prova fabricados a partir de celofane são a consequência da distribuição de tamanho dos poros que estes apresentam; os ensaios de porosimetria feitos neste material por Muniz (2005) indicaram medianas de diâmetros de poros muito reduzidos (0,0074 μm), menores que os valores obtidos para os folhelhos estudados neste trabalho.

A Figura 5.5 apresenta o gráfico da fase de transmissão de pressão do SI04. Como pode ser observado, são necessárias aproximadamente 20h para este corpo de prova experimentar uma transmissão de pressão completa. Este tempo é muito curto comparado com os tempos dos corpos de prova SI01, SI02 e SI03 que apresentam um comportamento mais típico deste tipo de material.

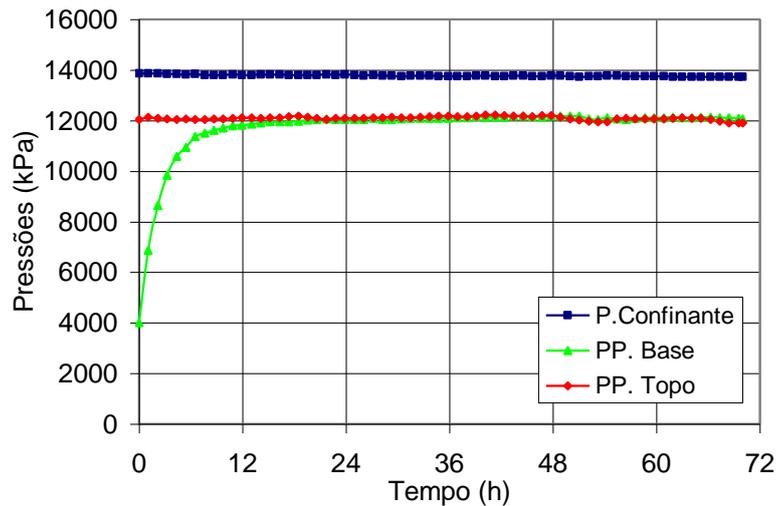


Figura 5.5 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do SI04.

As quatro células foram desmontadas e a célula que continha o corpo de prova com comportamento atípico, foi novamente testada.

O corpo de prova desta vez usado foi fabricado de PVC cego (maciço). Dada a imposição de uma gradiente de pressão hidráulica neste, não teria que se experimentar algum acréscimo da pressão da base, pois a água do topo não teria como percorrer o material maciço; este comportamento é o esperado, sempre que o sistema funcione normalmente. A Figura 5.6 apresenta a montagem do corpo de prova na célula de difusão a ser testada.

Este corpo de prova não precisa ser saturado nem adensado. A saturação realizada teve a única função de saturar as linhas de pressão, o geotêxtil e a pedra porosa.



Figura 5.6 – Corpo de prova de PVC maciço na célula de difusão.

Na Figura 5.7 se apresenta o gráfico de transmissão de pressão. Como se pode observar, o transdutor localizado na base do corpo de prova experimentou acréscimos em suas medições, a tendência desta pressão é seguir aumentando até atingir o valor da pressão do topo. Este comportamento é anormal e confirma algum problema com a célula de difusão, pois o esperado era não se observar nenhum indicio de transmissão de pressão neste corpo de prova.

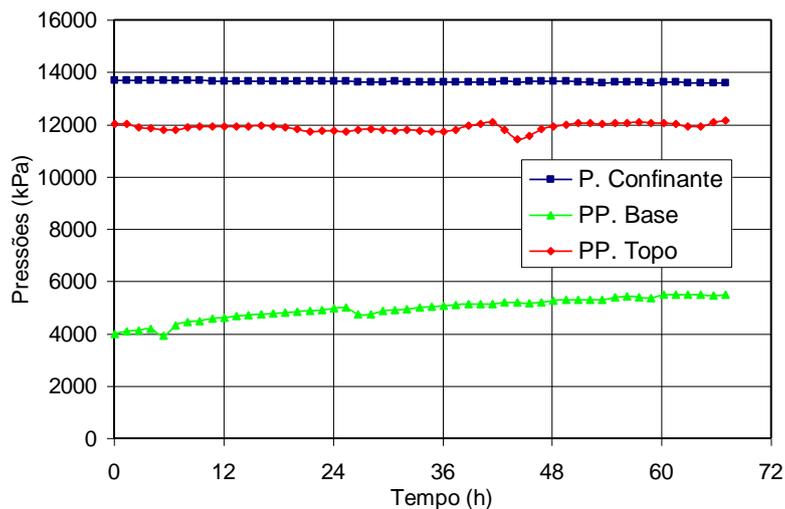


Figura 5.7 – Fase de transmissão de pressão com corpo de prova de PVC (com transmissão de pressão).

Na tentativa de identificar o problema, o sistema de válvulas foi verificado; pode-se reparar na Figura 4.10a que as válvulas de topo e base são comunicadas por uniões “T”. Se a válvula da base estivesse com algum defeito, esta não isolaria eficientemente a pressão do reservatório inferior e, como consequência, a pressão imposta no topo (na fase de transmissão de pressão) poderia ser transmitida ao reservatório da base. Se isto acontecer, os parâmetros avaliados nos ensaios com folhelhos, não seriam derivados de uma transmissão de pressão real pelo corpo de prova.

Na tentativa de resolver o problema, decidiu-se trocar a válvula da base desta célula, e ensaiar novamente o corpo de prova sintético de PVC. A Figura 5.8 apresenta o gráfico da transmissão de pressão. Como pode ser observado, o comportamento da pressão da base foi o esperado, não se teve acréscimos de pressão indicando um bom funcionamento da válvula trocada.

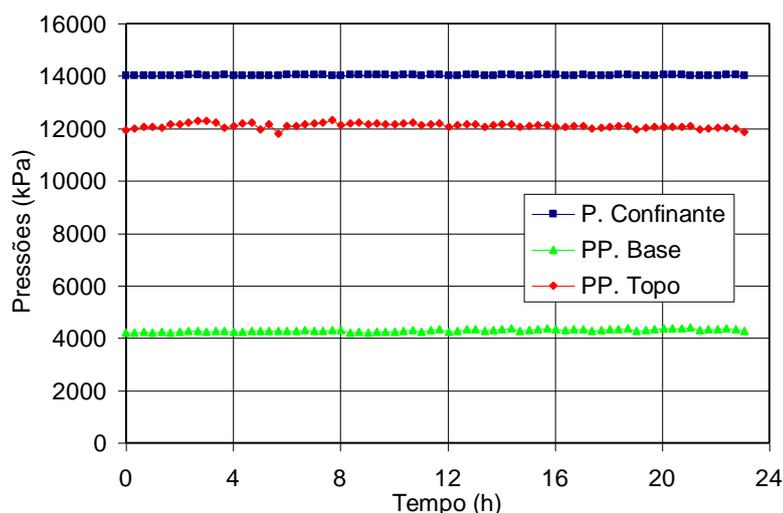


Figura 5.8 – Fase de transmissão de pressão com corpo de prova de PVC (sem transmissão de pressão).

Ao finalizar esta campanha de ensaios, as quatro novas células de difusão, junto com a antiga, estão aptas para os ensaios utilizando corpos de prova dos folhelhos; os resultados serão decorrentes do real comportamento destes e não influenciados por um mau funcionamento dos equipamentos.

5.3 Ensaio em Folhelhos nas Células de Difusão

Como mencionado anteriormente, os resultados em ensaios que visaram avaliar o coeficiente de reflexão em folhelhos (Duarte, 2004 e Muniz, 2005) indicaram uma boa correlação entre o coeficiente de reflexão (α) e a distribuição de tamanho dos poros. Os coeficientes de reflexão dos folhelhos testados aumentaram com a diminuição de tamanho dos poros e com a maior porcentagem de microporos, independentes da mineralogia e, por conseguinte da CTC que estes apresentavam. Fontoura et al. (2007) em função desses resultados sugerem que o coeficiente de reflexão é mais influenciado pela distribuição de tamanho dos poros que pela mineralogia.

Espera-se que nos ensaios com os dois tipos de folhelho estudados nesta dissertação, possa ser validado o verificado anteriormente.

No laboratório, para uma melhor identificação, os corpos de prova do folhelho Pierre01 e do folhelho BC01 são nomeados, respectivamente, de CP e

BC acompanhados de um número. Vale indicar que os corpos de prova utilizados para os ensaios de difusão não respeitaram o ordem numérico, pois alguns destes foram descartados para este tipo de ensaios, basicamente pelo estado em que se encontravam (fissuras, trincas, etc.).

Nas campanhas realizadas, exceto no corpo de prova BC02, os campos de tensões impostos nas etapas de transmissão de pressão e difusão de íons foram as mesmas, com a finalidade de avaliar as propriedades decorrentes de um mesmo estado de tensões. Nas fases de difusão de íons, diversas soluções salinas a diferentes concentrações foram utilizadas.

Finalizando cada campanha, os corpos de prova ensaiados foram retirados das células de difusão e encaminhados para a avaliação da sua resistência a tração mediante ensaios brasileiros.

Fizeram-se quatro campanhas, as duas primeiras foram realizadas com o folhelho Pierre01 e as duas seguintes com o folhelho BC-01. Estas são descritas a seguir.

5.3.1 Primeira Campanha de Ensaio com o Folhelho Pierre01

Cinco ensaios simultâneos foram realizados nos CP's 04, 05, 09, 10 e 11. Esta bateria de ensaios visou avaliar a permeabilidade absoluta de todos os corpos de prova. Além deste parâmetro, foram estimados os coeficientes de difusão iônica (D_e) das soluções utilizadas como fluido de circulação (CaCl_2 , NaCl e KCl), e os coeficientes de reflexão (α) dos corpos de prova CP's 09, 10 e 11.

5.3.1.1 Dados Iniciais dos Corpos de Prova

Os corpos de prova selecionados para os ensaios, inicialmente, tiveram suas dimensões e massa (W) determinadas. A densidade dos grãos (G) e a umidade natural (w) apresentaram valores iguais a 2,72 e 9,54%, respectivamente. A Tabela 5.1 apresenta os dados iniciais dos corpos de prova e os índices físicos

obtidos. Neste conjunto de ensaios observa-se um índice de vazios inicial médio de 0,29 e uma porosidade inicial média de 22,65 %.

Tabela 5.1 – Dados e índices físicos iniciais e finais dos corpos de prova (folhelho Pierre01).

Parâmetros	CP04	CP05	CP09	CP10	CP11
Altura (mm)	14,92	15,55	15,13	15,07	15,02
Diâmetro (mm)	38,12	37,99	37,56	37,58	37,55
Massa (W, g)	38,60	40,16	38,93	38,99	38,65
Umidade (w, %)	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54
Volume (V, cm ³)	17,03	17,63	16,76	16,72	16,63
Massa específica (g/cm ³)	2,27	2,28	2,32	2,33	2,32
Densidade dos grãos	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72
Índice de vazios (e)	0,314	0,307	0,282	0,277	0,282
Grau de saturação (S, %)	82,55	84,34	91,69	93,58	91,95
Porosidade (n, %)	23,92	23,53	22,06	21,71	22,01

5.3.1.2 Fase de Saturação e Adensamento

Foram necessários 10 estágios para a conclusão desta fase nos CP's 04 e 05 e 16 estágios nos CP's 09, 10 e 11.

Os CP's 04 e 05 foram submetidos inicialmente a uma pressão confinante (P. Confinante) de 500 kPa e a 400 kPa de contrapressão (PP. Topo e PP. Base). Em sequência, estas foram elevadas em estágios de 500 kPa, mantendo-se 100 kPa como a tensão efetiva, até chegar próximo a completa saturação, condição observada no valor final do parâmetro B, o qual ficou próximo à unidade.

Por outro lado, os CP's 09, 10 e 11, foram submetidos inicialmente a uma pressão confinante de 650 kPa e a 400 kPa de contrapressão (PP. Topo e PP. Base). Em seguida, as pressões foram elevadas em estágios de 100 kPa mantendo-se 250 kPa como a tensão efetiva de saturação. A Tabela 5.2 apresenta os valores do parâmetro B calculados para cada estágio desta fase.

Tabela 5.2 – Valores do parâmetro B de Skempton para cada corpo de prova (folhelho Pierre01).

Estágios	CP04	CP05	CP09	CP10	CP11
Estágio 1	0,211	0,246	0,113	0,394	0,462
Estágio 2	0,438	0,576	0,185	0,514	0,564
Estágio 3	0,653	0,738	0,277	0,545	0,645
Estágio 4	0,787	0,818	0,273	0,661	0,714
Estágio 5	0,839	0,861	0,413	0,615	0,707
Estágio 6	0,873	0,876	0,435	0,645	0,704
Estágio 7	0,884	0,902	0,447	0,754	0,810
Estágio 8	0,904	0,857	0,497	0,754	0,840
Estágio 9	0,906	0,923	0,566	0,767	0,809
Estágio 10	0,915	0,920	0,595	0,778	0,854
Estágio 11	-	-	0,593	0,825	0,879
Estágio 12	-	-	0,665	0,761	0,804
Estágio 13	-	-	0,618	0,853	0,910
Estágio 14	-	-	0,699	0,814	0,902
Estágio 15	-	-	0,728	0,842	0,896
Estágio 16	-	-	0,720	0,875	0,937

Finalizada a saturação, os corpos de prova foram adensados sob pressão confinante de 14000 kPa e contrapressão de 4000 kPa. Esta fase, neste caso, foi realizada em 21h para os cinco corpos de prova.

5.3.1.3 Fase de Transmissão de Pressão

As Figuras 5.9 a 5.13 apresentam as variações da pressão confinante (P. Confinante), da pressão na base (PP. Base) e da pressão no topo do corpo de prova (PP. Topo) dos CP's ao longo desta fase, assim como o ajuste numérico aos dados experimentais. Como descrito no capítulo anterior, os ajustes numéricos obtidos nesta fase (mediante o programa FPORO), fornecem uma estimativa do coeficiente de permeabilidade dos corpos de prova ensaiados. O módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) adotados para o folhelho Pierre01 foram obtidos da literatura (Crook *et al.*, 2002) e correspondem, respectivamente,

a 1565MPa e 0,43 para corpos de prova com planos de acamamento a 45° em relação ao eixo que é a mesma condição dos corpos de prova deste folhelho.

No ensaio realizado no CP11, apresentado na Figura 5.13, verifica-se um comportamento diferenciado da pressão na base do corpo de prova, provavelmente, provocado por um erro experimental não identificado no decorrer do ensaio. O ajuste numérico realizado seguiu a tendência inicial de transmissão de pressão.

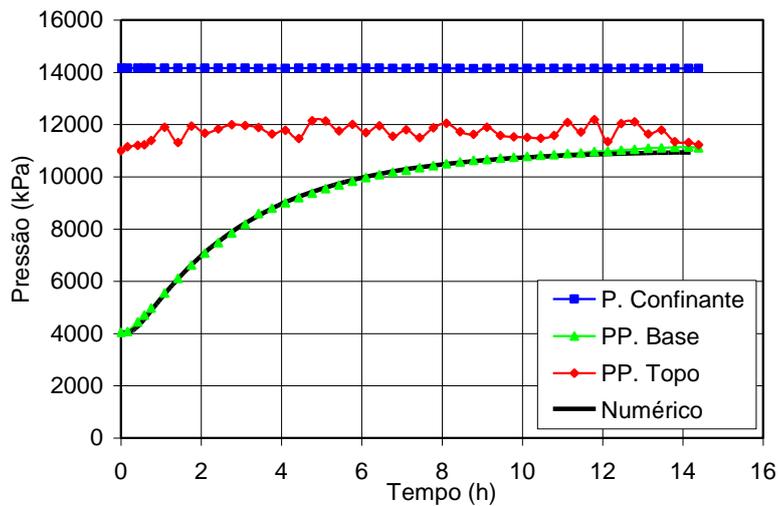


Figura 5.9 – Fase de transmissão de pressão com água do CP04.

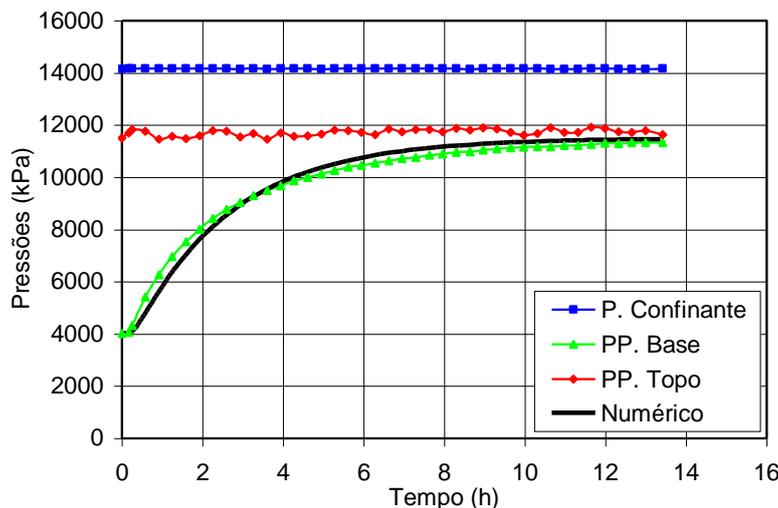


Figura 5.10 – Fase de transmissão de pressão com água do CP05.

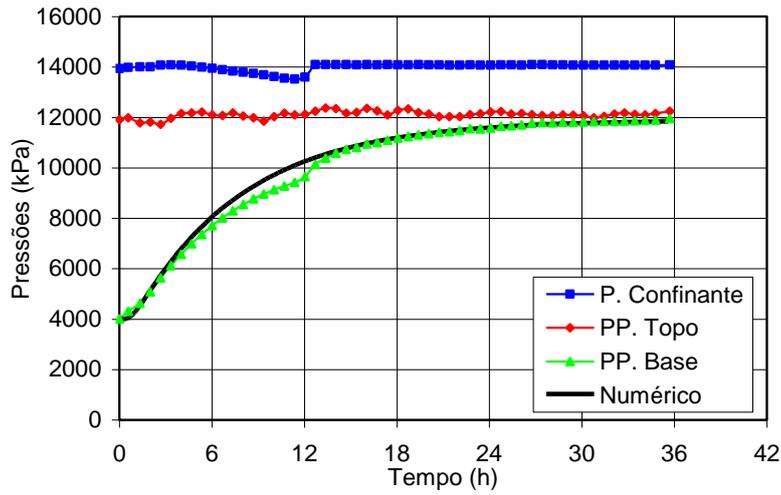


Figura 5.11 – Fase de transmissão de pressão com água do CP09.

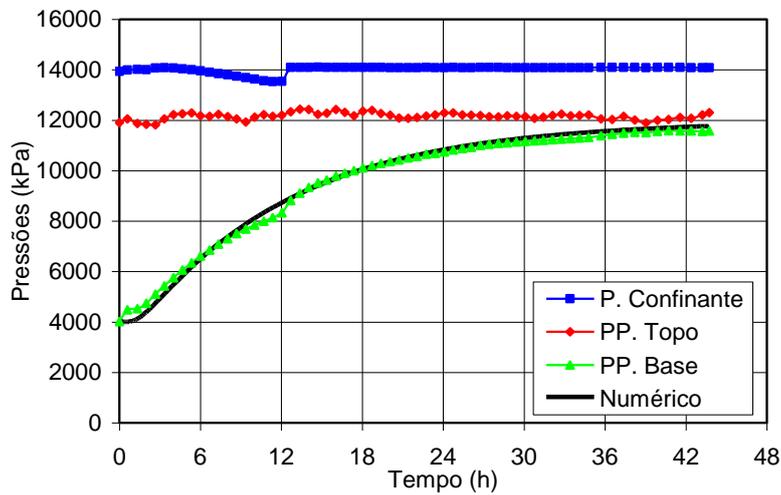


Figura 5.12 – Fase de transmissão de pressão com água do CP10.

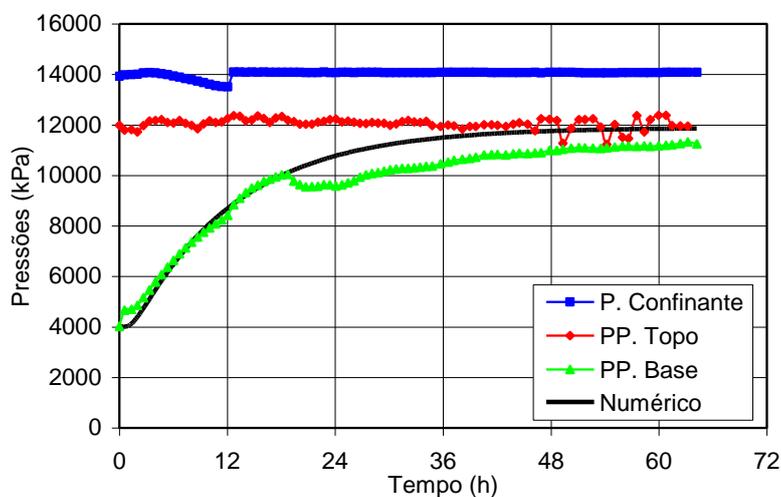


Figura 5.13 – Fase de transmissão de pressão com água do CP11.

A Tabela 5.3 apresenta os valores de permeabilidade absoluta obtidas mediante o ajuste numérico, pode-se observar que os CP's 04 e 05 apresentaram maiores valores quando comparados com os CP's 09, 10 e 11.

Tabela 5.3 – Valores de permeabilidade absoluta obtidos para cada corpo de prova (folhelho Pierre01).

Corpos de prova	CP04	CP05	CP09	CP10	CP11
Permeabilidade (m ²)	$7,0 \cdot 10^{-21}$	$7,0 \cdot 10^{-21}$	$3,0 \cdot 10^{-21}$	$1,6 \cdot 10^{-21}$	$1,6 \cdot 10^{-21}$
Permeabilidade (nD)	7,1	7,1	3,06	1,63	1,63

5.3.1.4 Fase de Difusão de Íons

A fase de difusão de íons foi realizada utilizando soluções de 350g/l CaCl₂, 274g/l de NaCl e 290g/l de KCl, respectivamente, para os CP's 09, 10 e 11. As Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam, respectivamente, a variação das pressões ao longo das fases de transmissão de pressão e difusão de íons para estes CP's. Nestes gráficos são apresentadas também as curvas de ajuste numérico utilizando o programa FPORO.

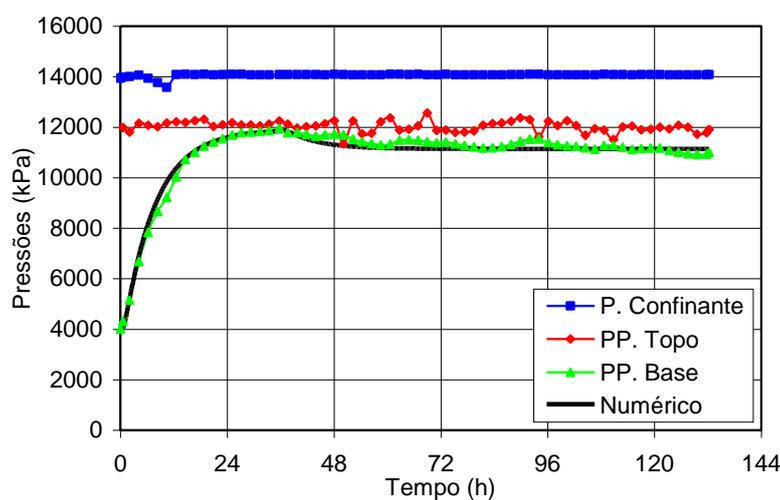


Figura 5.14 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do CP09.

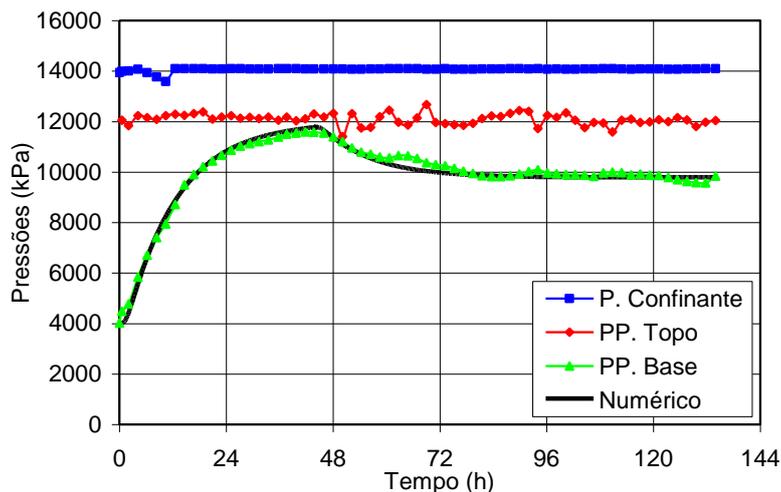


Figura 5.15 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do CP10.

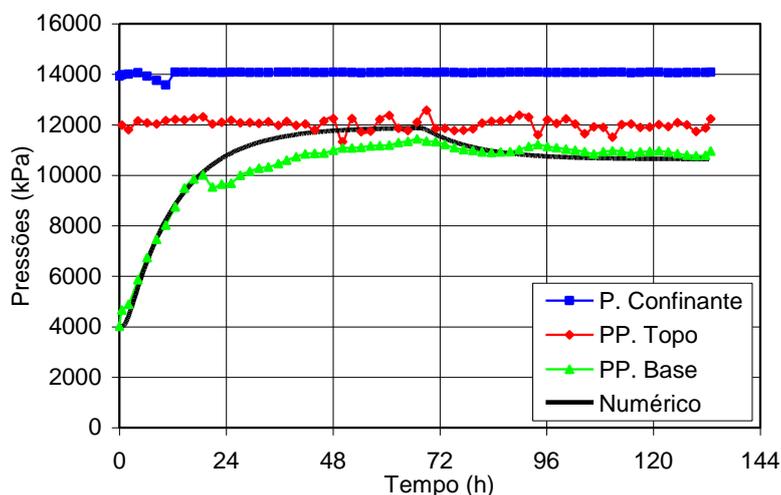


Figura 5.16 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do CP11.

A metodologia usada para a obtenção do coeficiente de reflexão experimental (α_{exp}) foi descrito no capítulo anterior. A Tabela 5.4 apresenta os resultados da atividade química de cada solução utilizada (A_f), a pressão osmótica teórica (Π), a pressão osmótica gerada experimentalmente (ΔP_{osm}) e o coeficiente de reflexão experimental (α_{exp}) obtido para cada corpo de prova.

Tabela 5.4 – Valores do coeficiente de reflexão obtidos experimentalmente (folhelho Pierre01).

Corpos de Prova	CP09	CP10	CP11
Concentração	350g/l CaCl ₂	274g/l NaCl	290g/l KCl
A _f	0,851	0,831	0,891
Π (kPa)	22005,7	25349,6	15691,6
ΔP _{osm} (kPa)	737	2129	1050
α _{exp} (%)	3,35	8,40	6,69

Pode-se inferir que os maiores coeficientes de reflexão (α_{exp}) correspondentes aos CP's 10 e 11 estariam relacionados às menores permeabilidades estimadas destes CP's em relação ao CP09.

Como descrito no capítulo anterior, para a obtenção da tortuosidade (τ_o) e, por conseguinte do coeficiente de difusão efetivo das soluções (D_e), precisa-se da quantidade dos íons contidos no reservatório da base do corpo de prova, em tal sentido, ao final dos ensaios, o fluido presente no reservatório inferior é coletado e encaminhado para realização de análises químicas. A Tabela 5.5 apresenta os resultados destas análises. As porcentagens de CaCl₂, NaCl e KCl foram obtidas por análise estequiométrica considerando que existe cloreto suficiente para a formação destes compostos.

Tabela 5.5 – Análises químicas do fluido presente no reservatório inferior (folhelho Pierre01).

Concentração (mg/l)	Corpos de Prova		
	CP09 350g/l CaCl ₂	CP10 274g/l NaCl	CP11 290g/l KCl
Na ⁺	141,780	497,250	269,020
K ⁺	7,070	11,650	13,650
Ca ⁺⁺	12,090	234,580	1538,120
Ba ⁺⁺	0,051	0,198	0,385
Sr ⁺⁺	0,625	8,062	6,791
Mg ⁺⁺	0,950	86,710	2,160
Cl ⁻	1395,77	3080,32	4524,22
CaCl ₂	33,50	649,60	4259,20
NaCl	360,40	1264,10	683,90
KCl	13,50	22,20	26,00

De posse de estimar as concentrações finais das soluções salinas utilizadas em cada corpo de prova (valores em negrito na Tabela 5.5), realizou-se a retroanálise utilizando o programa FPORO, como podem ser vistos nas curvas numéricas apresentadas nas Figuras 5.14 a 5.16 acima. Os resultados de tortuosidade (τ), coeficiente de difusão efetivo (D_e) e coeficiente de reflexão (α_{num}) estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores obtidos numericamente (folhelho Pierre01).

Corpos de Prova	CP09	CP10	CP11
Concentração	350g/l CaCl₂	274g/l NaCl	290g/l KCl
τ	0,0290	0,0590	0,0264
D_e (m ² /s)	3,89. 10 ⁻¹¹	9,50. 10 ⁻¹¹	5,25. 10 ⁻¹¹
α_{num} (%)	3,70	10,0	7,0
α_{exp} (%)	3,35	8,40	6,69

Como podem ser observados, os valores do coeficiente de reflexão obtidos experimentalmente, são muito próximos aos valores numéricos.

Observa-se também que a solução de NaCl (274g/l) exposta ao CP10 apresenta o maior coeficiente de difusão efetivo (D_e) em relação as soluções que foram expostas aos CP09 e CP11; este fato é decorrente da maior concentração, desta mesma solução, encontrada no reservatório inferior (1,264 g/cm³) do CP10.

Nas Figuras 5.17 a 5.219 são apresentados os gráficos do ajuste numérico ao valor da concentração obtida pela análise química.

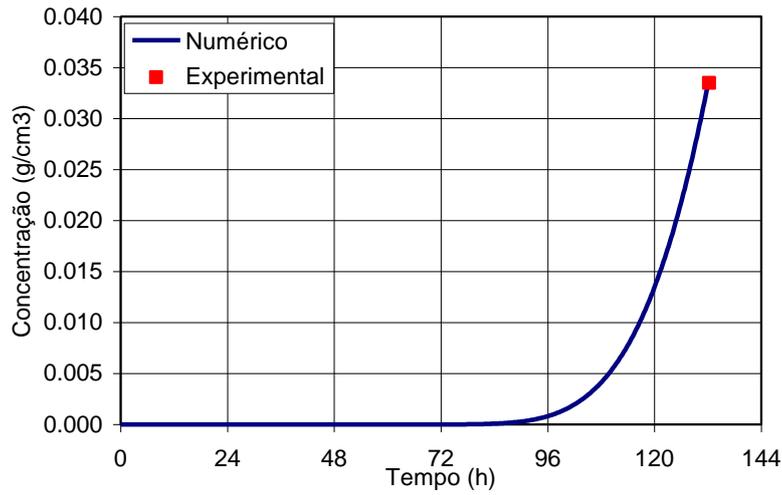


Figura 5.17 – Ajuste numérico da concentração no CP09.

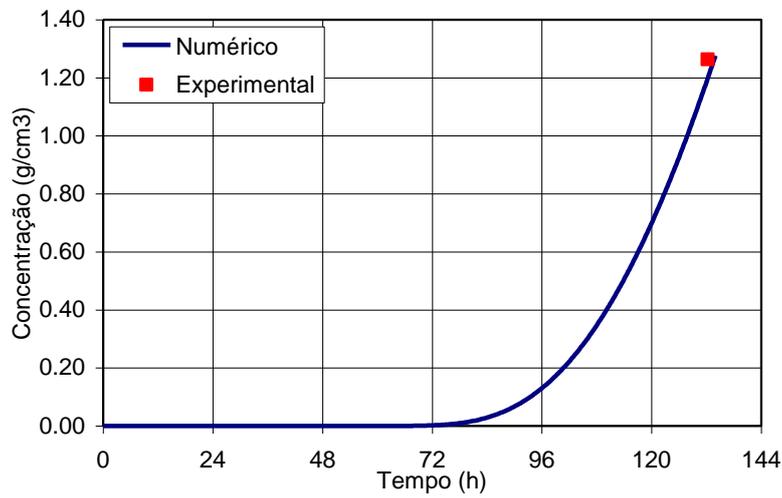


Figura 5.18 – Ajuste numérico da concentração no CP10.

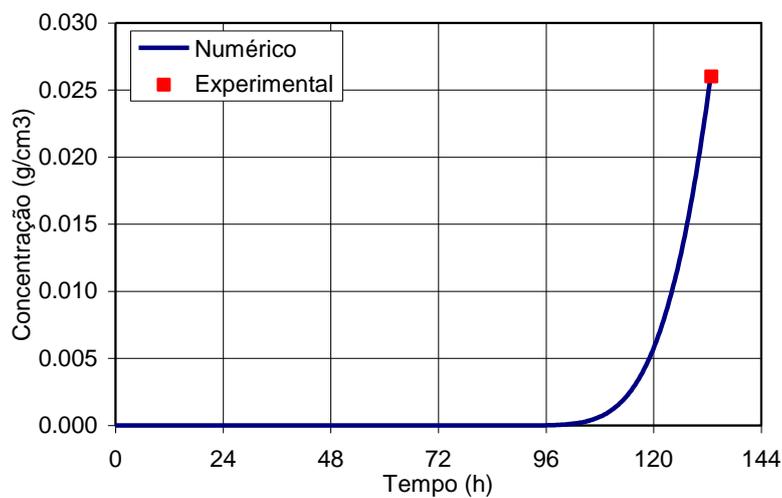


Figura 5.19 – Ajuste numérico da concentração no CP11.

5.3.1.5 Dados Finais dos Corpos de Prova

Na Tabela 5.7 são apresentados os dados e os cálculos dos índices físicos finais dos CP's 09, 10 e 11.

Tabela 5.7 – Dados e índices físicos finais dos corpos de prova (folhelho Pierre01).

Parâmetros	CP09	CP10	CP11
Altura (mm)	15,34	15,29	15,18
Diâmetro (mm)	37,93	37,94	37,83
Massa (W, g)	39,23	39,25	38,85
Umidade (w, %)	9,75	10,56	9,75
Volume (V, cm ³)	17,33	17,28	17,06
Massa específica (g/cm ³)	2,26	2,27	2,28
Densidade dos grãos	2,72	2,72	2,72
Índice de vazios (e)	0,319	0,324	0,311
Grau de saturação (S, %)	83,15	88,55	85,27
Porosidade (n, %)	24,18	24,49	23,72

Independente do tipo e da concentração salina utilizada observa-se, em todos os casos, valores de umidade e volume finais superiores aos iniciais, indicando que o folhelho Pierre01 absorveu água ao longo do processo. Este comportamento é similar ao verificado nos ensaios com os folhelhos B (Duarte, 2004) e B-L (Muniz, 2005) e o oposto do verificado no folhelho B-S (Muniz, 2003). Observam-se também na Tabela 5.7 valores de índice de vazios, e porosidade superiores aos iniciais. Por outro lado, verifica-se que os graus de saturação que os corpos de prova apresentaram ao final de ensaio foram menores aos iniciais.

5.3.2 Segunda Campanha de Ensaio com o Folhelho Pierre01

Nesta última campanha, com este tipo de folhelho, foram realizados quatro ensaios simultâneos. Desta vez, na fase de difusão de íons, foram utilizados como fluido de circulação, soluções salinas de formiato de sódio (NaCOOH) e cloreto de sódio (NaCl) a diferentes concentrações. O objetivo é o mesmo, estimar os

parâmetros de transporte de massa (permeabilidade, coeficiente de difusão e reflexão) e assim complementar os resultados já obtidos na campanha anterior. Os CP's ensaiados foram nomeados como CP12, 13, 14 e 15.

5.3.2.1 Dados Iniciais dos Corpos de Prova

A Tabela 5.8 apresenta os dados iniciais dos corpos de prova e os índices físicos obtidos. A densidade dos grãos (G) e a umidade natural (w) apresentaram valores iguais a 2,72 e 9,71%, respectivamente. Observam-se valores iniciais médios de índices de vazios e porosidade, respectivamente iguais a 0,29 e 22,66%. Estes valores são praticamente iguais à média dos últimos cinco ensaios realizados na campanha anterior. Considerando os valores iniciais obtidos nesta campanha e na campanha anterior, podemos então definir como o índice de vazios (e) e porosidade (n) respectivamente valores de 0,29 e 22,50% para este tipo de folhelho.

Tabela 5.8 – Dados e índices físicos iniciais dos corpos de prova (folhelho Pierre01)

Parâmetros	CP12	CP13	CP14	CP15
Altura (mm)	14,93	15,12	14,93	15,18
Diâmetro (mm)	37,61	37,56	37,33	37,66
Massa (W, g)	38,52	38,59	38,29	38,94
Umidade (w, %)	9,71	9,71	9,71	9,71
Volume (V, cm ³)	16,59	16,75	16,34	16,91
Massa específica (g/cm ³)	2,32	2,30	2,34	2,30
Densidade dos grãos	2,72	2,72	2,72	2,72
Índice de vazios (e)	0,285	0,295	0,274	0,296
Grau de saturação (S, %)	92,59	89,37	96,53	89,33
Porosidade (n, %)	22,19	22,80	21,48	22,81

5.3.2.2 Fase de Saturação e Adensamento

Foram necessários 11 estágios para conclusão desta fase. A Tabela 5.9 apresenta os valores do parâmetro B calculados para cada estágio. Os CP's foram

submetidos inicialmente a uma pressão confinante (P. Confinante) de 500 kPa e a 400 kPa de contrapressão (PP. Topo e PP. Base). Em seguida, as pressões foram elevadas em estágios de 500 kPa mantendo-se 100 kPa como a tensão efetiva de saturação. No estágio 9 observa-se que todos os corpos de prova se encontram com o maior parâmetro B, já no estágio 10 e 11 experimentaram uma leve queda.

Tabela 5.9 – Valores do parâmetro B de Skempton para cada corpo de prova (folhelho Pierre01).

Estágios	CP12	CP13	CP14	CP15
Estágio 1	0,096	0,327	0,268	0,335
Estágio 2	0,267	0,606	0,594	0,586
Estágio 3	0,494	0,750	0,753	0,723
Estágio 4	0,604	0,802	0,825	0,809
Estágio 5	0,805	0,856	0,898	0,879
Estágio 6	0,826	0,859	0,900	0,880
Estágio 7	0,860	0,850	0,899	0,883
Estágio 8	0,880	0,878	0,941	0,920
Estágio 9	0,910	0,883	0,953	0,928
Estágio 10	0,871	0,864	0,908	0,899
Estágio 11	0,871	0,863	0,906	0,905

Finalizada a saturação, os corpos de prova foram adensados sob pressão confinante de 14000 kPa e contrapressão de 4000 kPa. Esta fase foi realizada em 23h para o CP12 e em 67h para os demais corpos de prova.

5.3.2.3 Fase de Transmissão de Pressão

As Figuras 5.20 a 5.23 apresentam as variações da pressão confinante (P. Confinante), da pressão na base (PP. Base) e da pressão no topo do corpo de prova (PP. Topo) ao longo desta fase, assim como o ajuste numérico aos dados experimentais. A análise numérica foi realizada considerando os mesmos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da campanha anterior que foram respectivamente iguais a 1565 MPa e 0,43 (Crook *et al.*, 2002).

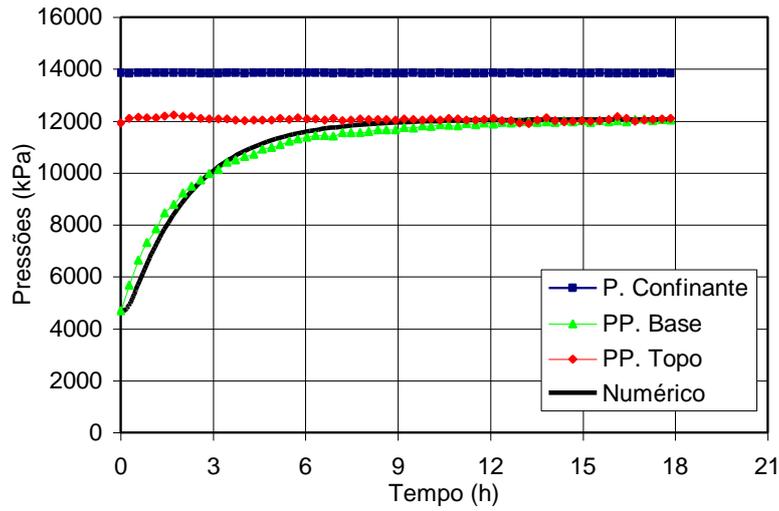


Figura 5.20 – Fase de transmissão de pressão com água do CP12.

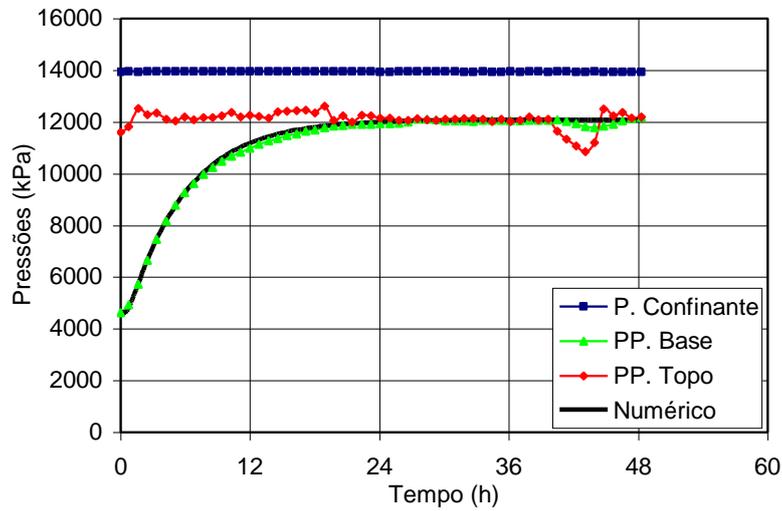


Figura 5.21 – Fase de transmissão de pressão com água do CP13.

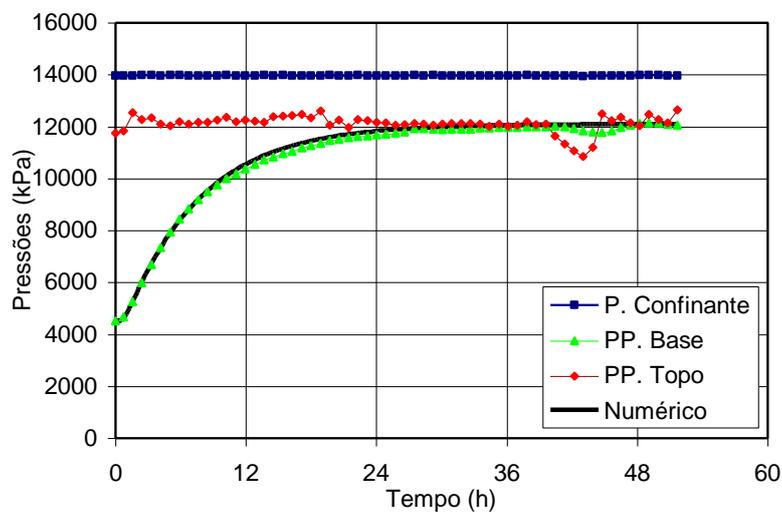


Figura 5.22 – Fase de transmissão de pressão com água do CP14.

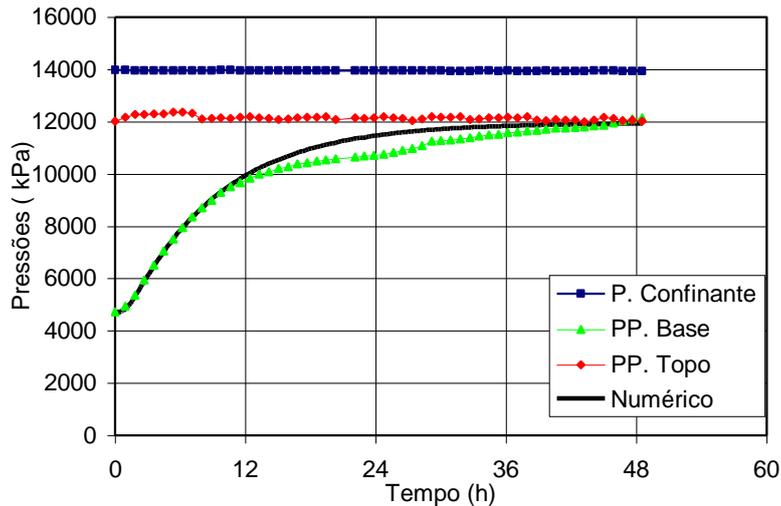


Figura 5.23 – Fase de transmissão de pressão com água do CP15.

A Tabela 5.10 apresenta os valores de permeabilidade absoluta estimada para cada corpo de prova. Verifica-se um elevado valor de permeabilidade para o CP12, decorrente do menor tempo necessário, em relação aos demais corpos de prova, para que a pressão da base (PP. Base) atinja à pressão do topo (PP. Topo).

Tabela 5.10 – Valores de permeabilidade absoluta obtidos para cada corpo de prova (folhelho Pierre01).

Corpos de prova	CP12	CP13	CP14	CP15
Permeabilidade (m ²)	1,0 . 10 ⁻²⁰	3,5 . 10 ⁻²¹	3,0 . 10 ⁻²¹	2,2 . 10 ⁻²¹
Permeabilidade (nD)	10,10	3,55	3,04	2,23

Na primeira e nesta última bateria de ensaios, os CP's forneceram valores variando de 1,63nD a 10,10nD. Para fins de comparação, poderia-se considerar como a permeabilidade absoluta do folhelho Pierre01 a média global dos valores obtidos nestes CP's; sendo assim, este apresentaria uma permeabilidade absoluta de 4,38nD. Al-Bazali (2005) apresenta valores nesta mesma ordem de grandeza (6,48nD) para este mesmo folhelho, entretanto, não é especificado a direção dos planos de acamamento dos corpos de prova que no caso em estudo é de 45° em relação ao eixo dos mesmos.

5.3.2.4 Fase de Difusão de Íons

A fase de difusão de íons para os corpos de prova CP12, CP13 e CP14 foi realizada utilizando respectivamente soluções de 300, 500 e 700g/l de formiato de sódio (NaCOOH), já no corpo de prova CP15 foi utilizada uma solução de 297,2g/l de NaCl . As Figuras 5.24 a 5.27 apresentam as variações das pressões ao longo das fases de transmissão de pressão e difusão de íons para estes CP's. Nestes gráficos são apresentadas também as curvas de ajuste numérico utilizando o programa FPORO.

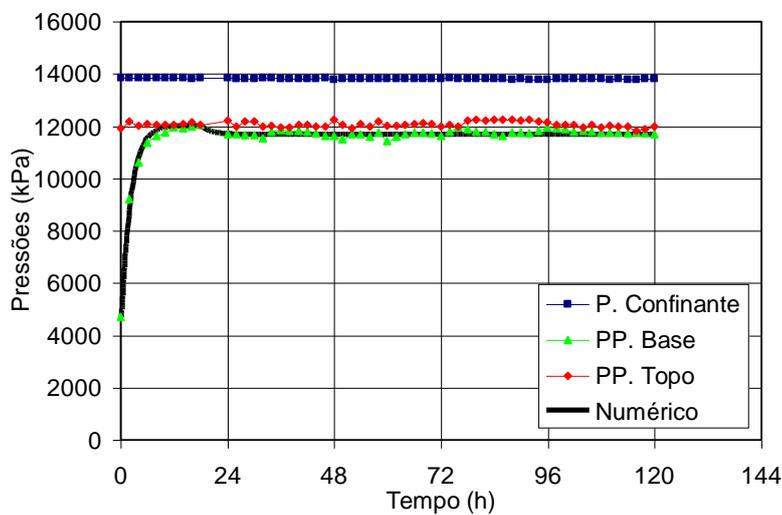


Figura 5.24 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do CP12.

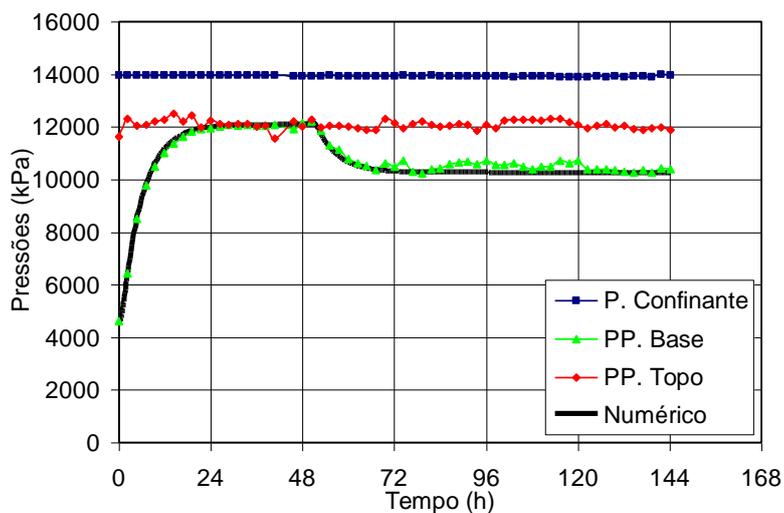


Figura 5.25 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do CP13.

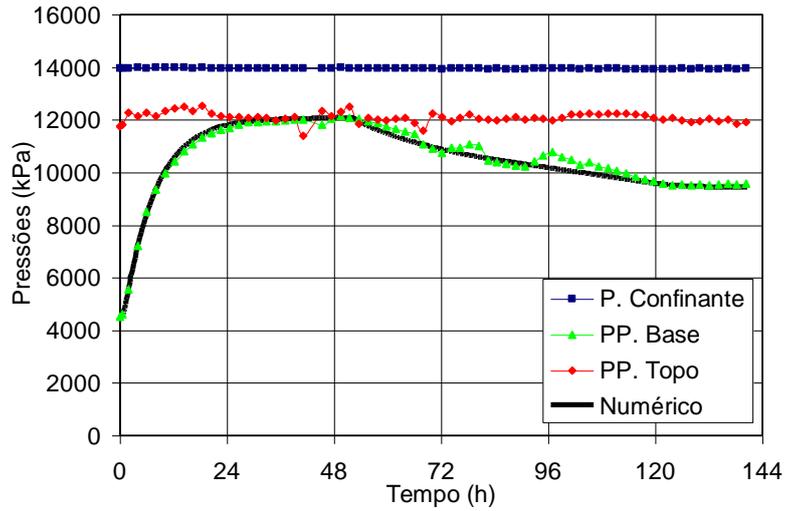


Figura 5.26 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do CP14.

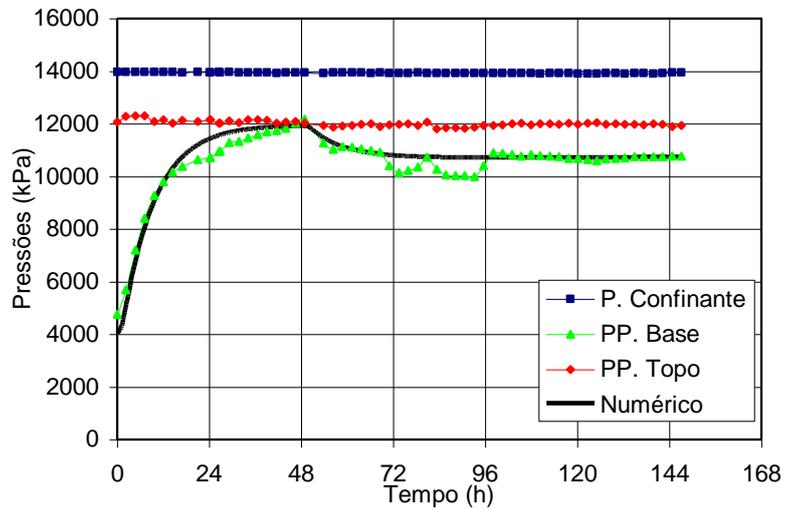


Figura 5.27 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do CP15.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados da atividade química de cada solução utilizada (A_f), a pressão osmótica teórica (Π), a pressão osmótica gerada experimentalmente (ΔP_{osm}) e finalmente o coeficiente de reflexão experimental (α_{exp}) para cada CP.

Tabela 5.11 – Valores do coeficiente de reflexão obtidos experimentalmente (folhelho Pierre01).

Corpos de Prova	CP12	CP13	CP14	CP15
Concentração	300g/l	500g/l	700g/l	297.2g/l
	NaCOOH	NaCOOH	NaCOOH	NaCl
A_f	0,849	0,714	0,597	0,798
Π (kPa)	22292,0	45899,3	70372,5	30776,6
ΔP_{osm} (kPa)	187,4	1730,0	2315,2	1255,7
α_{exp} (%)	0,84	3,8	3,29	4,08

Verifica-se que o CP12 apresenta o menor coeficiente de reflexão experimental (α_{exp}). Este resultado estaria relacionado à maior permeabilidade que este apresenta quando comparado com os demais corpos de prova.

Observa-se ainda da Tabela 5.11, que a pressão osmótica experimental (ΔP_{osm}) se apresenta inversamente proporcional a atividade da água do fluido (A_f), em outras palavras, menores valores de atividade da água das soluções salinas geram maiores pressões osmóticas em contato com os folhelhos. Pode-se observar também que, não necessariamente maiores pressões osmóticas geradas experimentalmente, significam maiores coeficientes de reflexão (α), pois estes também dependem da pressão osmótica teórica (Π) que o fluido apresenta.

Na anterior e na presente bateria de ensaios, verificaram-se coeficientes de reflexão obtidos experimentalmente (α_{exp}), variando de 0,84% a 8,40% para os diferentes CP's do folhelho Pierre01. Desses valores encontrados, para fins de comparação, podemos considerar um valor médio global do coeficiente de reflexão experimental para este tipo de folhelho, o qual resultou igual a 4,35%. Este valor é superior aos obtidos por Al-Bazali (2005) no mesmo folhelho, cujos ensaios não apresentaram valores de coeficiente de reflexão superiores a 2%.

Infelizmente, a determinação dos íons contidos no fluido do reservatório da base dos CP's não foi realizada devido à perda do fluido coletado por um mau acondicionamento das amostras que iriam para as análises químicas; por tal razão, o valor da tortuosidade e como consequência, do coeficiente de difusão efetivo não foram estimados.

Os ajustes numéricos para o cálculo do coeficiente de reflexão (α_{num}) forneceram os valores mostrados na Tabela 5.12; apresentam-se também os

coeficientes de reflexão experimentais (α_{exp}) já calculados anteriormente e as viscosidades das soluções utilizadas, obtidas mediante o uso de um viscosímetro de marca Fann modelo N 5000.

Tabela 5.12 – Valores do coeficiente de reflexão obtidos numericamente (folhelho Pierre01).

Corpos de Prova	CP12	CP13	CP14	CP15
Concentração	300g/l NaCOOH	500g/l NaCOOH	700g/l NaCOOH	297.2g/l NaCl
Viscosidade (Pa.s)	0,00255	0,00554	0,01348	0,00189
α_{num} (%)	1,50	5,00	5,20	5,20
α_{exp} (%)	0,84	3,8	3,29	4,08

Observa-se que o CP12, apresenta o menor coeficiente de reflexão numérico quando comparados aos demais corpos de prova, este comportamento também foi observado experimentalmente.

Na anterior e presente campanha verificaram-se valores do coeficiente de reflexão numérico variando de 1,50% a 10%, com uma média global de 5,37%; Todos esses valores são ligeiramente superiores aos valores estimados experimentalmente.

5.3.2.5 Dados Finais do Corpo de Prova

Na Tabela 5.13 são apresentados os dados e índices físicos finais obtidos da presente campanha. Observam-se em todos os casos valores de umidade e volume finais superiores aos iniciais, indicando que o folhelho absorveu água ao longo do processo. Este comportamento é similar ao verificado na campanha anterior, neste mesmo folhelho, e nos ensaios com os folhelhos B e B-L (Duarte, 2004 e Muniz, 2005) e o oposto do verificado no folhelho B-S (Muniz, 2003). Como observados na campanha anterior, os graus de saturação dos corpos de prova, ao final do ensaio, apresentaram-se menores em relação aos valores iniciais. Observam-se também, valores de índice de vazios e porosidade superiores aos valores iniciais.

Tabela 5.13 – Dados e índices físicos finais dos corpos de prova (folhelho Pierre01).

Parâmetros	CP12	CP13	CP14	CP15
Altura (mm)	15,07	-	15,64	15,47
Diâmetro (mm)	38,17	-	38,25	37,86
Massa (W, g)	39,20	38,59	39,90	39,23
Umidade (w, %)	11,56	10,39	11,22	10,23
Volume (V, cm ³)	17,25	-	17,97	17,42
Massa específica (g/cm ³)	2,27	-	2,22	2,25
Densidade dos grãos	2,72	2,72	2,72	2,72
Índice de vazios (e)	0,335	-	0,362	0,331
Grau de saturação (S, %)	93,90	-	84,17	84,06
Porosidade (n, %)	25,10	-	26,61	24,87

5.3.3 Ensaio de Tração Indireta (Ensaio Brasileiro)

São apresentados os resultados dos ensaios brasileiros realizados nas duas campanhas anteriores nos corpos de prova utilizados do folhelho Pierre01. Estes corpos de prova apresentaram uma resistência a tração inferior a 0,8 MPa. Nestes ensaios não foram observadas, em nenhum caso, rupturas típicas dos ensaios de tração indireta. Os planos de ruptura deste folhelho foram exatamente pela direção da laminação ou acamamento do folhelho; se sabe que os corpos de prova deste folhelho foram preparados com os planos de acamamento inclinados de aproximadamente 45° em relação ao eixo do mesmo, estas direções atuam como sendo planos de fraqueza com uma orientação preferencial para a ruptura. Na Figura 5.28 apresentam-se fotos do corpo de prova do folhelho Pierre01 rompido.

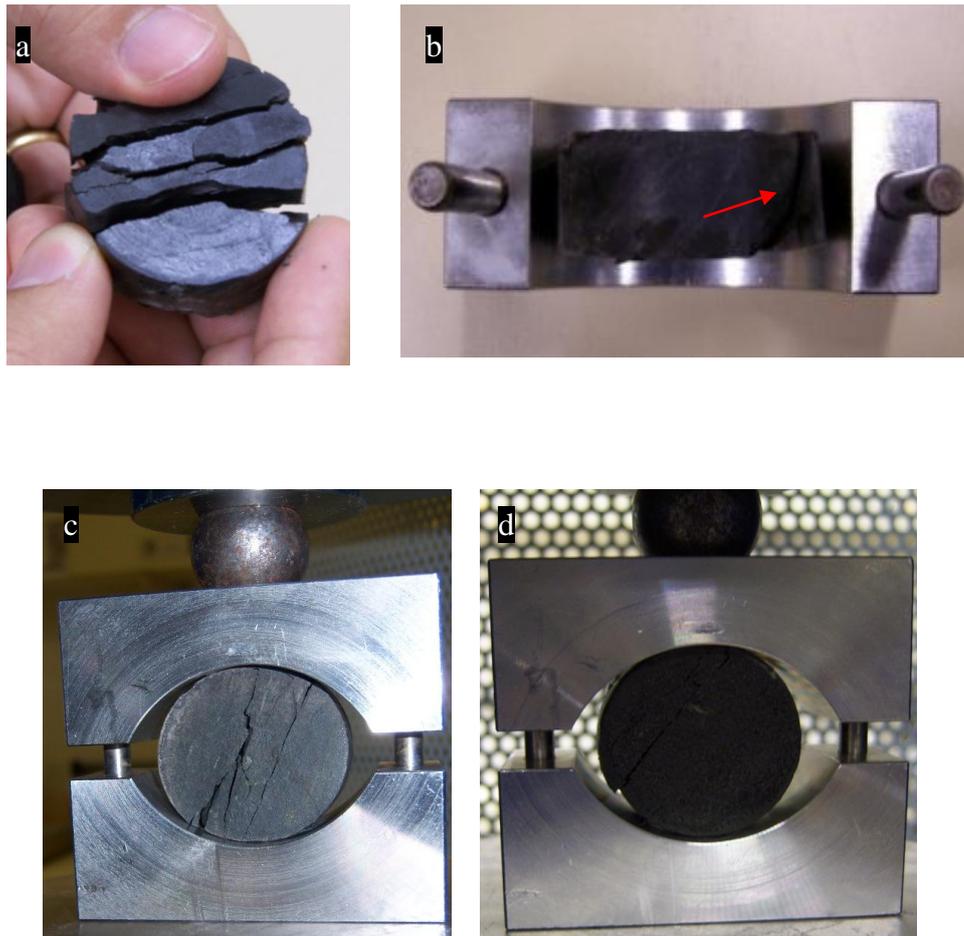


Figura 5.28 – Rupturas do corpo de prova após ensaio Brasileiro – folhelho Pierre01.

5.3.4 Primeira Campanha de Ensaio com o Folhelho BC-01

De forma a estimar os parâmetros de transporte de massa (permeabilidade, coeficiente de difusão e reflexão), na presente campanha foram realizados cinco ensaios simultâneos para os seguintes corpos de prova, BC01, BC02, BC06, BC07, BC08. Na fase de difusão de íons, soluções salinas de CaCl_2 , NaCl e KCl a diferentes concentrações foram utilizadas como fluido de circulação.

5.3.4.1 Dados Iniciais dos Corpos de Prova

A densidade dos grãos (G) e a umidade natural (w) foram obtidas apresentando valores iguais a 2,72 e 9,75%, respectivamente. A Tabela 5.14

apresenta os dados iniciais dos corpos de prova e os índices físicos obtidos. Observa-se nesta campanha, que este folhelho apresenta respectivamente valores médios de índices de vazios e porosidade iguais a 0,32 e 24,31%.

Tabela 5.14 – Dados e índices físicos iniciais dos corpos de prova (folhelho BC-01).

Parâmetros	BC01	BC02	BC06	BC07	BC08
Altura (mm)	14,98	15,22	14,83	15,04	14,95
Diâmetro (mm)	37,74	37,62	38,06	37,67	37,99
Massa (W, g)	37,85	38,12	38,13	37,87	38,39
Umidade (w, %)	9,75	9,75	9,75	9,75	9,75
Volume (V, cm ³)	16,76	16,92	16,87	16,76	16,94
Massa específica (g/cm ³)	2,26	2,25	2,25	2,26	2,26
Densidade dos grãos	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72
Índice de vazios (e)	0,322	0,328	0,320	0,321	0,317
Grau de saturação (S, %)	82,46	81,01	82,60	82,57	83,47
Porosidade (n, %)	24,33	24,71	24,29	24,30	24,10

5.3.4.2 Fase de Saturação e Adensamento

Foram necessários 10 estágios para conclusão da fase de saturação. Os corpos de prova foram submetidos inicialmente a uma pressão confinante (P. Confinante) de 600 kPa e a 400 kPa de contrapressão (PP. Topo e Base). Em seguida, as pressões foram elevadas em estágios de 500 kPa mantendo-se 200 kPa como a tensão efetiva de saturação. A Tabela 5.15 apresenta os valores do parâmetro B calculados para cada estágio desta fase.

Tabela 5.15 – Valores do parâmetro B de Skempton para cada corpo de prova (folhelho BC-01).

Estágios	BC01	BC02	BC06	BC07	BC08
Estágio 1	0,034	0,195	0,409	0,694	0,689
Estágio 2	0,165	0,418	0,629	0,886	0,893
Estágio 3	0,322	0,621	0,754	0,931	0,944
Estágio 4	0,448	0,712	0,830	0,936	0,958
Estágio 5	0,537	0,929	0,865	0,944	0,975
Estágio 6	0,668	0,989	0,885	0,964	0,979
Estágio 7	0,771	0,992	0,897	0,956	0,979
Estágio 8	0,804	0,990	0,916	0,937	0,984
Estágio 9	0,811	0,997	0,931	0,937	0,985
Estágio 10	0,816	0,996	0,930	0,913	0,984

Finalizada a saturação, os corpos de prova foram adensados sob pressão confinante de 14000 kPa e contrapressão de 4000 kPa. Esta fase transcorreu por períodos de tempo não inferiores a 21h.

5.3.4.3 Fase de Transmissão de Pressão

As Figuras 5.29 a 5.32 apresentam as variações da pressão confinante (P. Confinante), da pressão na base (PP. Base) e da pressão no topo do corpo de prova (PP. Topo) dos corpos de prova BC01, BC06, BC07 e BC08 ao longo desta fase, assim como o ajuste numérico aos dados experimentais.

No ensaio realizado no BC02 utilizou-se uma metodologia diferente da empregada normalmente. Esta metodologia, utilizada anteriormente por Muniz (2003), consiste em inserir o fluido salino no topo do corpo de prova desde o início desta fase; por outro lado, este corpo de prova foi ensaiado dentro da célula de difusão para ensaios anisotrópicos, desenvolvida pelo LIRF, sendo basicamente a mesma célula de difusão para ensaios isotrópicos (descrita no capítulo 4) instalada dentro de uma prensa que imprime a força axial, o gráfico deste ensaio no CP02 será apresentado no seguinte item.

A análise numérica foi realizada considerando o módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν), respectivamente, 14899 MPa e 0,28. Estes dados do

folhelho BC-01 foram obtidos a partir de perfis por meio de correlações existentes no programa computacional SEST[®]. O SEST[®] é uma poderosa ferramenta para projeto de estabilidade de poços; o sistema conta com módulos de cálculo que permitem a estimativa das propriedades mecânicas, das tensões in situ, entre outras. As equações 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, as correlações utilizadas no cálculo do coeficiente de Poisson e do módulo de Elasticidade utilizadas pelo programa.

$$\nu = 0,5 \left(\frac{(dts/dtc)^2 - 2}{(dts/dtc)^2 - 1} \right) \quad (5.1)$$

Onde dtc e dts são o tempo de trânsito da onda compressional e cisalhante respectivamente (em $\mu\text{s}/\text{pé}$).

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (5.2)$$

Onde G e ν são o módulo de cisalhamento (em psi) dado por $G = 1,34 \cdot 10^{10} \cdot (\rho_f / dts^2)$ e o coeficiente de Poisson, respectivamente. E ainda ρ_f a densidade da formação em g/cm^3 e dts o tempo de trânsito da onda cisalhante (em $\mu\text{s}/\text{pé}$).

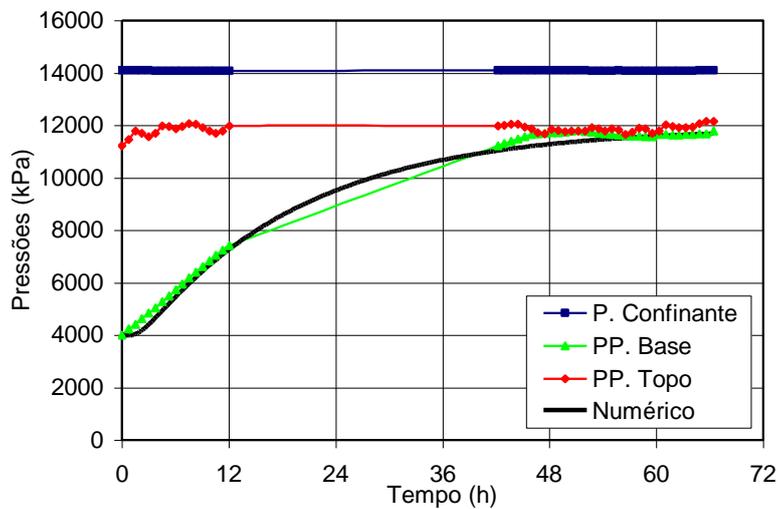


Figura 5.29 – Fase de transmissão de pressão com água do corpo de prova BC01.

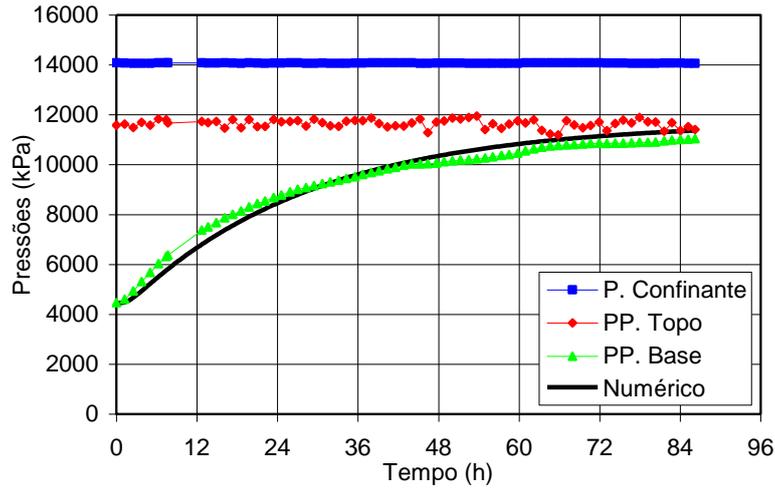


Figura 5.30 – Fase de transmissão de pressão com água do corpo de prova BC06.

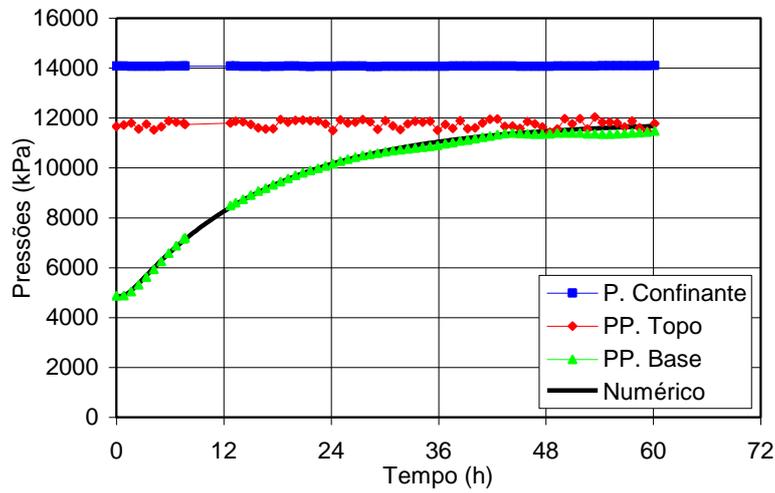


Figura 5.31 – Fase de transmissão de pressão com água do corpo de prova BC07.

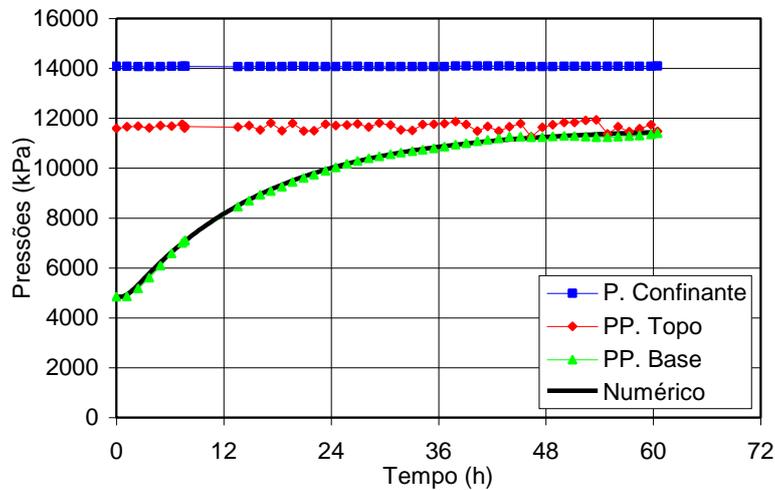


Figura 5.32 – Fase de transmissão de pressão com água do corpo de prova BC08.

A Tabela 5.16 apresenta os valores de permeabilidade absoluta estimada para cada corpo de prova. Das Figuras 5.29, 5.31 e 5.32 acima, verifica-se que os corpos de prova BC01, BC07 e BC08 apresentam o mesmo tempo necessário para que as pressões da base atinjam as pressões do topo (60h). Decorrentes deste fato, as permeabilidades destes corpos de prova são as mesmas.

Tabela 5.16 – Valores de permeabilidade absoluta obtidos para cada corpo de prova (folhelho BC-01).

Corpo de Prova	BC01	BC02	BC06	BC07	BC08
Permeabilidade (m ²)	9,0.10 ⁻²²	1,2.10 ⁻²¹	6,0.10 ⁻²²	9,0.10 ⁻²²	9,0.10 ⁻²²
Permeabilidade (nD)	0,92	1,22	0,61	0,92	0,92

5.3.4.4 Fase de Difusão de Íons

Nesta fase, soluções 150g/l de NaCl, 170g/l de CaCl₂, 260g/l de CaCl₂ e 350g/l de CaCl₂, foram utilizadas nos corpos de prova BC01, BC06, BC07 e BC08, respectivamente. No ensaio do BC02 (150g/l de NaCl) as fases de transmissão de pressão e difusão de íons foram realizadas simultaneamente. As Figuras de 5.33 a 5.37 apresentam, a variações das pressões ao longo das fases de transmissão de pressão e difusão de íons para estes corpos de prova. Nestes gráficos são também apresentadas as curvas do ajuste numérico.

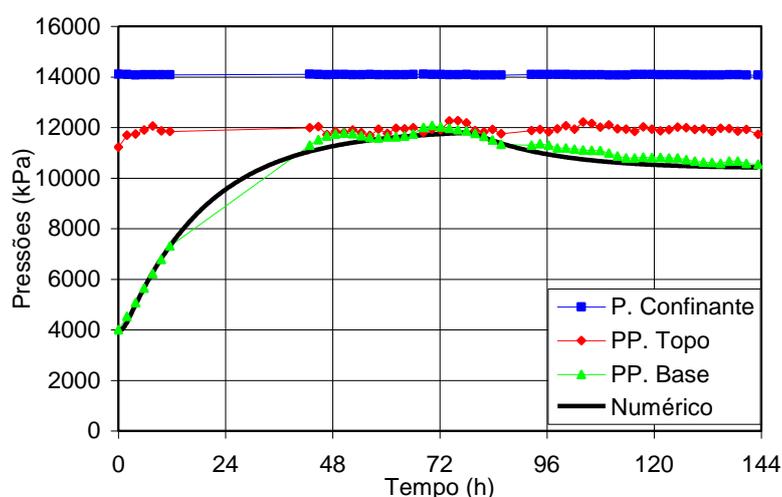


Figura 5.33 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do BC01.

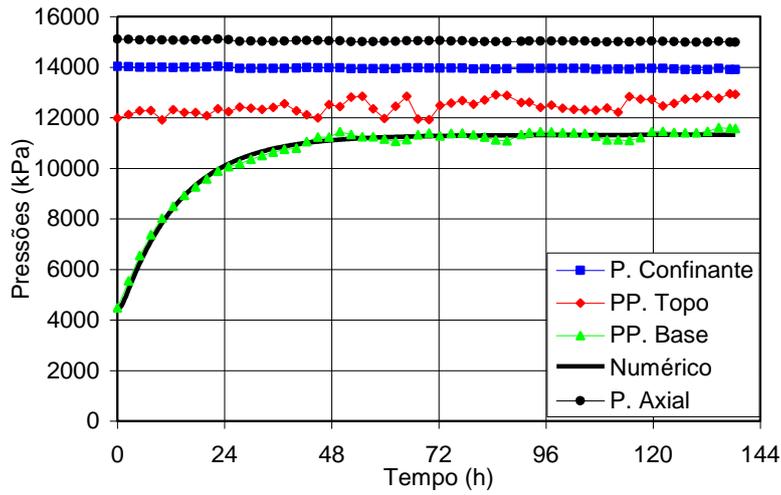


Figura 5.34 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do BC02.

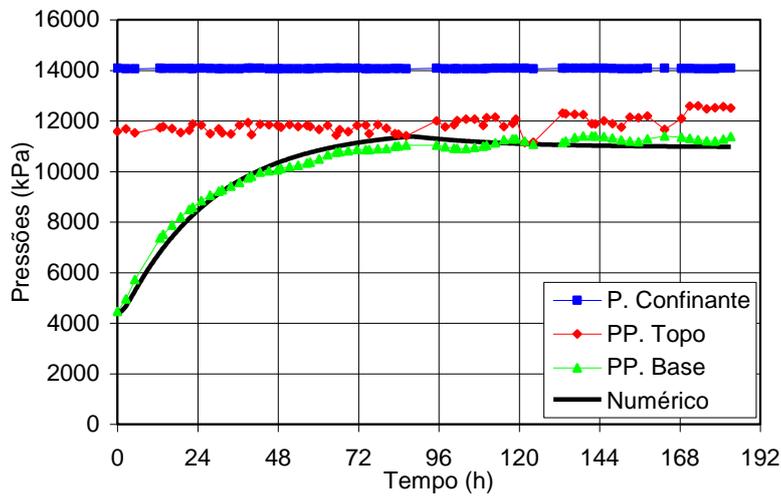


Figura 5.35 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do BC06.

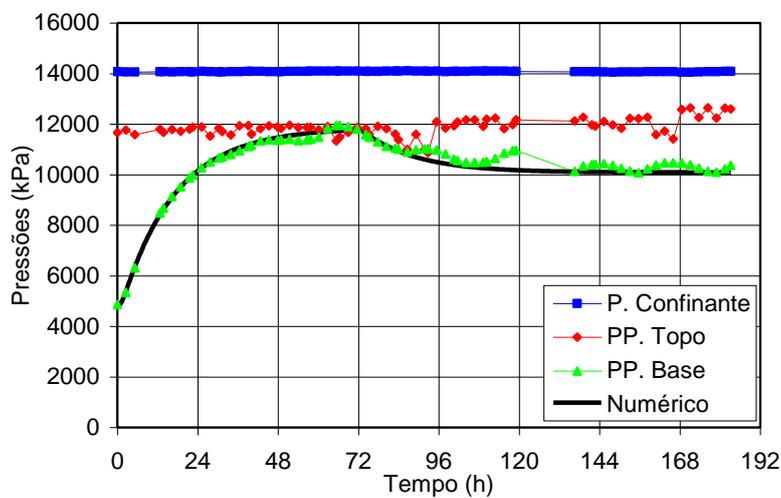


Figura 5.36 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do BC07.

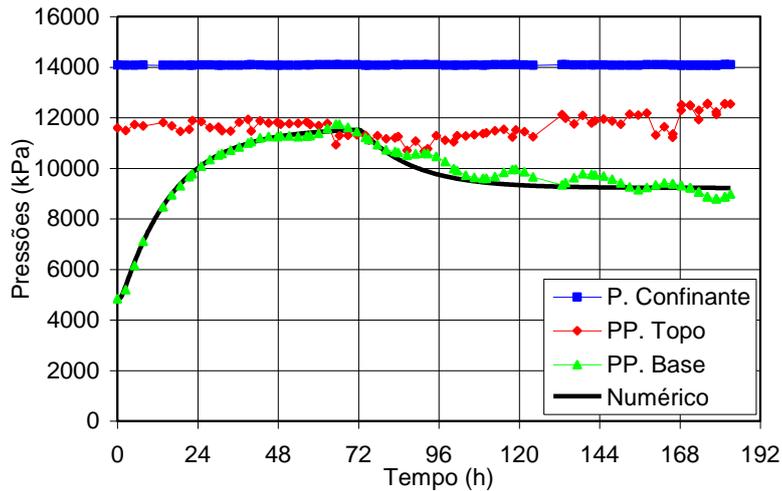


Figura 5.37 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do BC08.

No gráfico da Figura 5.34 correspondente ao BC02, observa-se que a pressão da base (PP. Base) não atinge a pressão do topo do corpo de prova (PP. Topo); este comportamento, também observado por Muniz (2003) e Duarte (2004), é devido aos gradientes químicos e hidráulicos que atuam simultaneamente gerando um fluxo osmótico no sentido contrário ao fluxo hidráulico, podendo-se obter num menor período de tempo a pressão osmótica gerada por um determinado fluido.

A Tabela 5.17 apresenta os resultados das atividades químicas das soluções utilizadas (A_f), a pressão osmótica teórica (Π), a pressão osmótica gerada experimentalmente (ΔP_{osm}) e os coeficientes de reflexão (α_{exp}) para cada corpo de prova.

Nos corpos de prova BC01 e BC02 foram circuladas a mesma solução e concentração salina, como consequência, as mesmas atividades de água. No final desta fase foi observado que a pressão osmótica gerada (ΔP_{osm}) e o coeficiente de reflexão em ambos os corpos de provas são praticamente iguais, independentemente do momento em que a solução entre em contato com o corpo de prova e do seu estado de tensões (repare-se que no BC02, além de atuar as pressões de topo, base e confinante, atua também uma pressão axial de 15000 kPa).

Tabela 5.17 – Valores do coeficiente de reflexão obtidos experimentalmente (folhelho BC-01).

Corpos de Prova	BC01	BC02	BC06	BC07	BC08
Concentração	150 g/l NaCl	150 g/l NaCl	170 g/l CaCl ₂	260 g/l CaCl ₂	350 g/l CaCl ₂
A _f	0,943	0,943	0,944	0,894	0,841
Π (kPa)	8051,4	8051,4	7923,3	15339,7	23684,9
ΔP _{osm} (kPa)	1343,0	1348,0	757,0	1829,0	2755,0
α _{exp} (%)	16,6	16,7	9,6	11,9	11,6

Como verificados na segunda campanha com o folhelho Pierre01, a redução das atividades da água das soluções salinas incrementam as pressões osmóticas geradas no folhelho (ΔP_{osm}). Pode-se observar também que, não necessariamente maiores pressões osmóticas geradas experimentalmente, significam maiores coeficientes de reflexão (α), pois estes também dependem da pressão osmótica teórica (Π) que o fluido apresenta.

A Tabela 5.18 apresenta as análises químicas realizadas do reservatório inferior, exceto para o BC01. As porcentagens de CaCl₂, NaCl e KCl foram obtidas por análise estequiométrica considerando que existe cloreto suficiente para a formação destes compostos.

Tabela 5.18 – Análises químicas do fluido presente no reservatório inferior .

Concentração (mg/l)	Corpos de prova			
	BC02	BC06	BC07	BC08
	150g/l NaCl	170g/l CaCl ₂	260g/l CaCl ₂	350g/l CaCl ₂
Na ⁺	926,000	1157,280	546,530	635,390
K ⁺	45,600	35,870	20,560	20,800
Ca ⁺⁺	16,600	4,700	17,910	1,840
Ba ⁺⁺	0,100	0,021	0,144	0,169
Sr ⁺⁺	4,000	1,286	2,0280	0,659
Mg ⁺⁺	0,100	0,870	2,860	1,950
Cl ⁻	---	1877,07	1877,07	2839,67
CaCl ₂	45,97	13,00	49,60	5,10
NaCl	2354,00	2941,90	1389,30	1615,20
KCl	86,95	68,40	39,20	39,70

Com as concentrações finais das soluções salinas utilizadas (valores em negrito na Tabela 5.18) é possível então realizar a retroanálise utilizando o FPORO, como pode ser visto nas curvas numéricas apresentadas nas Figuras 5.33 a 5.37 acima. Os resultados da tortuosidade (τ), do coeficiente de difusão efetivo (D_e) e do coeficiente de reflexão (α_{num}) obtidos, são apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Valores obtidos numericamente (folhelho BC-01).

Corpos de Prova	BC01	BC02	BC06	BC07	BC08
Concentração	150g/l NaCl	150g/l NaCl	170g/l CaCl ₂	260g/l CaCl ₂	350g/l CaCl ₂
τ	---	0,0580	0,0272	0,0280	0,0188
D_e (m ² /s)	---	$9,34 \cdot 10^{-11}$	$3,54 \cdot 10^{-11}$	$3,60 \cdot 10^{-11}$	$2,44 \cdot 10^{-11}$
α_{num} (%)	13,0	9,5	7,5	11,7	11,7
α_{exp} (%)	16,6	16,7	9,6	11,9	11,6

O corpo de prova BC08 foi exposto à mesma solução (mesmo coeficiente de difusão livre da solução, D_o) e concentração salina (mesma atividade da água) do corpo de prova CP09 pertencente ao folhelho Pierre01 (primeira campanha). Pode-se observar que o maior valor da tortuosidade do CP09 (0,0290) provocou o maior coeficiente de difusão efetivo ($3,77 \cdot 10^{-11}$ m²/s) quando comparado com o BC08 do folhelho BC-01.

Nas Figuras 5.38 a 5.41 são apresentados os gráficos do ajuste numérico ao valor da concentração obtida pela análise química.

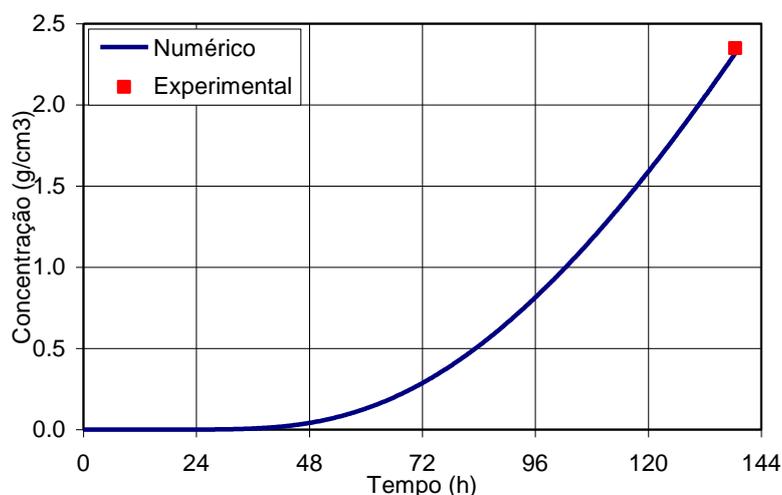


Figura 5.38 – Ajuste numérico da concentração no corpo de prova BC02.

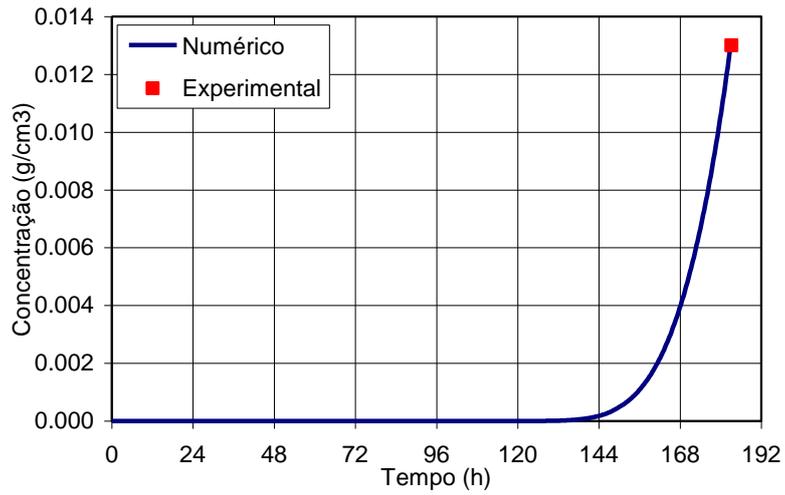


Figura 5.39 – Ajuste numérico da concentração no corpo de prova BC06.

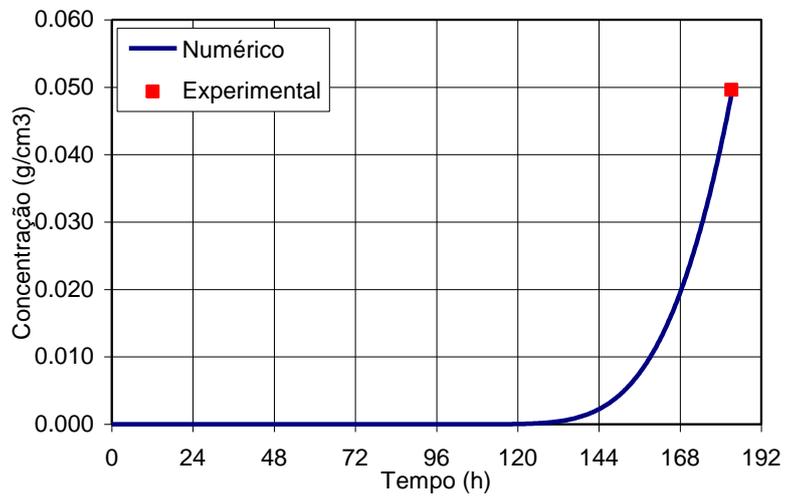


Figura 5.40 – Ajuste numérico da concentração no corpo de prova BC07.

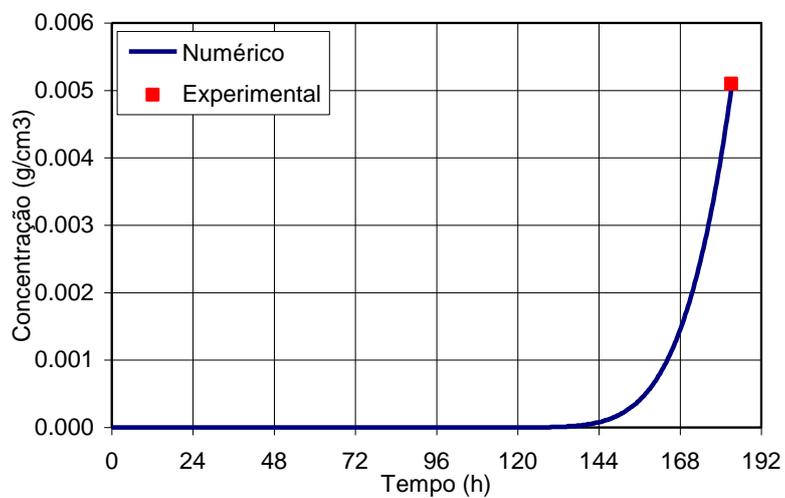


Figura 5.41 – Ajuste numérico da concentração no corpo de prova BC08.

5.3.4.5 Dados Finais dos Corpos de Prova

Na Tabela 5.20 são apresentados os dados e índices físicos finais. Observa-se em todos os casos valores de umidade final superior aos valores iniciais, indicando que o folhelho BC-01 absorveu água ao longo do processo. Este comportamento é similar ao verificado nos últimos oito ensaios realizados no folhelho Pierre01 e nos ensaios com os folhelhos B e B-L (Duarte, 2004 e Muniz, 2005) e o oposto do verificado no folhelho B-S (Muniz, 2003). Observa-se também em todos os casos, contrários ao verificado no folhelho Pierre01, que os graus de saturação dos corpos de prova, ao final do ensaio, apresentaram-se maiores em relação aos valores iniciais.

Tabela 5.20 – Dados e índices físicos finais dos corpos de prova (folhelho BC-01).

Parâmetros	BC01	BC02	BC06	BC07	BC08
Altura (mm)	14,88	15,11	14,75	14,99	14,94
Diâmetro (mm)	37,74	37,58	38,06	37,63	37,94
Massa (W, g)	37,65	38,11	38,07	37,72	38,39
Umidade (w, %)	11,35	11,69	11,61	11,41	11,04
Volume (V, cm ³)	16,65	16,76	16,78	16,67	16,89
Massa específica (g/cm ³)	2,26	2,27	2,27	2,26	2,27
Densidade dos grãos	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72
Índice de vazios (e)	0,339	0,336	0,338	0,339	0,329
Grau de saturação (S, %)	91,07	94,64	93,40	91,48	91,33
Porosidade (n, %)	25,32	25,15	25,27	25,33	24,74

5.3.5 Segunda Campanha de Ensaio com o Folhelho BC-01

De forma a complementar a primeira campanha de ensaios realizados no folhelho BC-01, foi necessária a presente campanha com a realização de quatro ensaios nas células de difusão. Na fase de difusão de íons, soluções salinas de NaCl e KCl a diferentes concentrações foram utilizadas como fluido de circulação.

5.3.5.1 Dados Iniciais dos Corpos de Prova

A densidade dos grãos (G) e a umidade natural (w) apresentaram valores respectivamente iguais a 2,72 e 9,46%; valores estes, muito próximos aos obtidos na campanha anterior para este tipo de folhelho (2,72 e 9,75%). A Tabela 5.21 apresenta os dados iniciais dos corpos de prova e os índices físicos obtidos.

Tabela 5.21 – Dados e índices físicos iniciais dos corpos de prova (folhelho BC-01).

Parâmetros	BC10	BC11	BC12	BC13
Altura (mm)	16,30	15,82	15,02	14,75
Diâmetro (mm)	37,92	38,1	37,87	38,00
Massa (W, g)	41,53	40,98	39,01	37,88
Umidade (w, %)	9,46	9,46	9,46	9,46
Volume (V, cm ³)	18,41	17,77	16,93	16,73
Massa específica (g/cm ³)	2,26	2,31	2,31	2,26
Densidade dos grãos	2,72	2,72	2,72	2,72
Índice de vazios (e)	0,320	0,291	0,292	0,315
Grau de saturação (S, %)	80,48	88,27	88,17	81,28
Porosidade (n, %)	24,22	22,56	22,59	24,04

Nos corpos de prova BC11 e BC12 se observam maiores valores de massa específica indicando um material mais denso, o que leva a menores valores de índice de vazios e porosidade quando comparados aos demais corpos de prova deste folhelho. Esta pequena variação nos valores dos índices físicos pode ser atribuída à heterogeneidade natural da formação. Considerando estes valores e os obtidos na campanha anterior, se verifica para o folhelho BC-01, uma média global de 0,31 e 23,87% respectivamente, para o índice de vazios (e) e porosidade (n).

5.3.5.2 Fase de Saturação e Adensamento

A fase de saturação foi concluída após 14 estágios. A Tabela 5.22 apresenta os valores do parâmetro B calculados para cada estágio desta fase.

Tabela 5.22 – Valores do parâmetro B de Skempton para cada corpo de prova (folhelho BC-01).

Estágios	BC10	BC11	BC12	BC13
Estágio 1	0,781	0,742	0,642	0,717
Estágio 2	0,891	0,793	0,727	0,871
Estágio 3	0,898	0,832	0,786	0,920
Estágio 4	0,894	0,870	0,842	0,931
Estágio 5	0,875	0,868	0,817	0,968
Estágio 6	0,945	0,902	0,891	0,971
Estágio 7	0,922	0,904	0,898	0,971
Estágio 8	0,936	0,897	0,861	0,981
Estágio 9	0,944	0,909	0,920	0,956
Estágio 10	0,955	0,923	0,930	0,979
Estágio 11	0,942	0,908	0,893	0,979
Estágio 12	0,946	0,897	0,910	0,981
Estágio 13	0,945	0,906	0,907	0,980
Estágio 14	0,953	0,914	0,916	0,984

Finalizada a saturação, os corpos de prova foram adensados sob pressão confinante (P. Confinante) de 14000 kPa e contrapressão (PP.Topo e PP. Base) de 4000 kPa por aproximadamente 35h.

5.3.5.3 Fase de Transmissão de Pressão

As Figuras 5.42 a 5.45 apresentam as variações da pressão confinante (P. Confinante), da pressão na base (PP. Base) e da pressão no topo do corpo de prova (PP. Topo) para os corpos de prova BC10, BC11, BC12 e BC13, ao longo desta fase, assim como o ajuste numérico aos dados experimentais. A análise numérica realizada foi considerando os mesmos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da campanha anterior, sendo respectivamente igual a 14899 MPa e 0,28; lembrando que estes dados foram obtidos a partir de perfis por meio de correlações existentes no SEST[®].

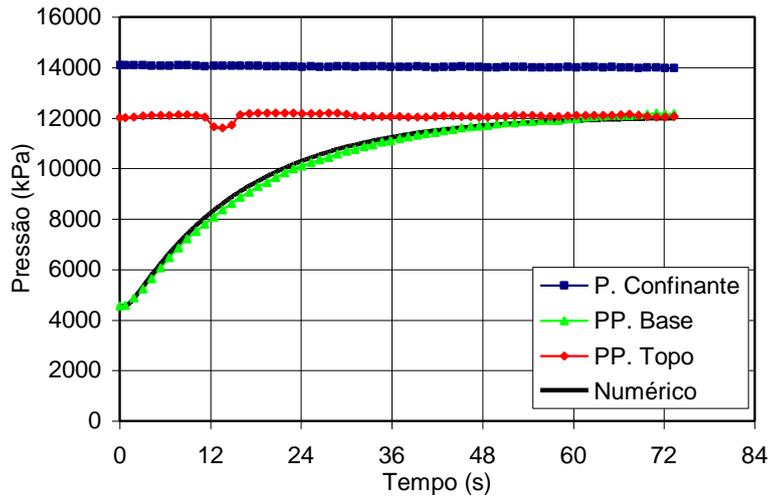


Figura 5.42 – Fase de transmissão de pressão com água do corpo de prova BC10.

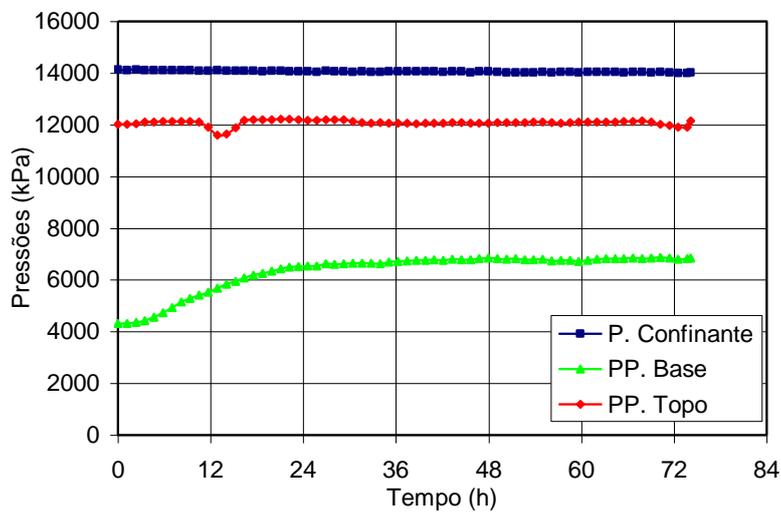


Figura 5.43 – Fase de transmissão de pressão com água do corpo de prova BC11.

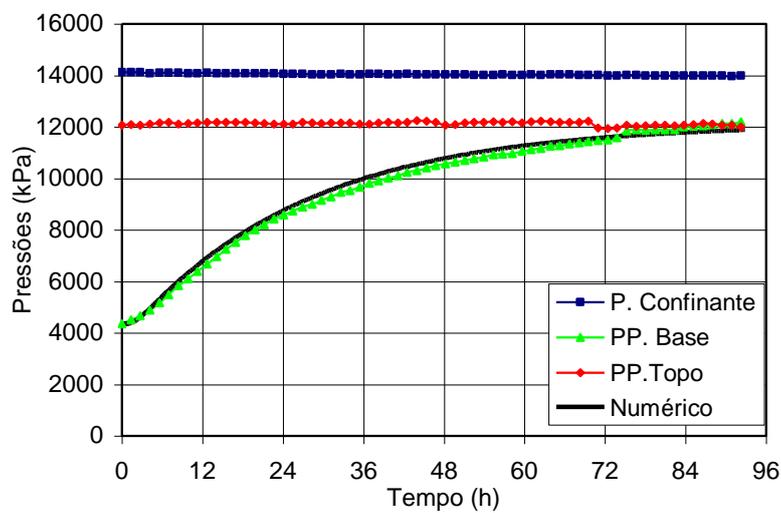


Figura 5.44 – Fase de transmissão de pressão com água do corpo de prova BC12.

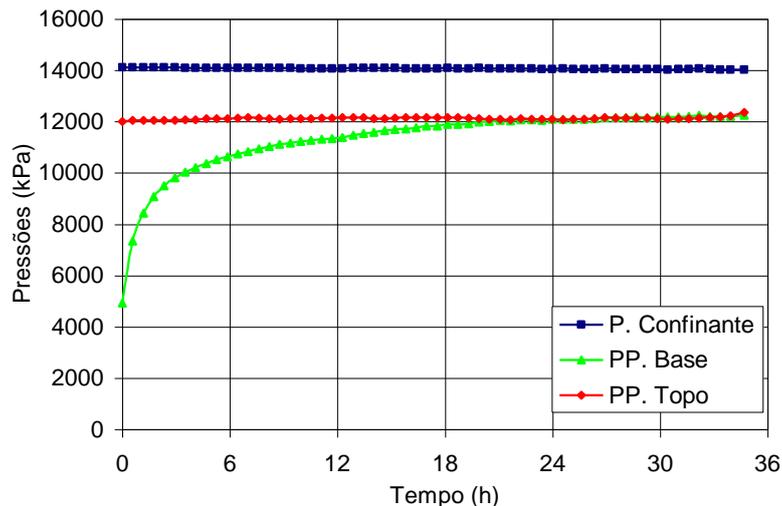


Figura 5.45 – Fase de transmissão de pressão com água do corpo de prova BC13.

Observa-se no ensaio do corpo de prova BC11 (Figura 5.43) que a pressão na base (PP. Base) não atinge a pressão do topo (PP. Topo), este comportamento é atribuído a um vazamento de óleo confinante para o geotêxtil presente no topo do corpo de prova, verificado ao final do ensaio. Por tal razão, observa-se a imperiosa necessidade de um bom isolamento do corpo de prova na montagem do ensaio como apresentado no capítulo 4 (Figura 4.11).

Muniz (2005) em ensaios com os folhelhos B-L e B-S expostos a óleo mineral na fase de transmissão de pressão, observou que as pressões da base não atingiram às pressões do topo do corpo de prova no transcorrer do ensaio, chamando de pressão capilar (P_C) à diferença de pressões entre o topo e a base quando esta se mantinha estabilizada. Desta forma, o acontecido com o corpo de prova BC11 é indiretamente o observado por este autor, o óleo mineral que ficou no topo do corpo de prova gerou uma “lâmina” com altas tensões capilares entre o óleo e o corpo de prova (água intersticial deste), que não permitiu a transmissão de pressão hidráulica; a água teria que vencer essas grandes tensões capilares para a base poder sentir o gradiente de pressão imposto.

No ensaio do corpo de prova BC13 (Figura 5.45) observa-se um crescimento acelerado da pressão da base, foi suficiente 20h para uma total transmissão de pressão. Este comportamento é diferente do padrão verificado nos outros ensaios para este tipo de folhelho que precisaram entre 72 e 96h para esta finalidade. Esta transmissão de pressão acelerada é atribuída ao estado do corpo de prova quem apresentou leves fissuramentos perceptíveis na montagem do

ensaio. Devido a este fato, não foram feitas as análises numéricas para este corpo de prova, pois se considerou que não refletiria o real comportamento deste tipo de folhelho. O ensaio nesta célula foi encerrado e o corpo de prova foi montado na prensa para a realização do ensaio brasileiro.

Os ensaios nos corpos de prova BC10 e BC12 não apresentaram problemas e foram interpretados de forma rotineira. A Tabela 5.23 apresenta os valores de permeabilidade absoluta estimada para cada um destes.

Tabela 5.23 – Valores de permeabilidade absoluta obtidos para cada corpo de prova (folhelho BC-01).

Corpo de Prova	BC10	BC11	BC12	BC13
Permeabilidade (m ²)	1,0 . 10 ⁻²¹	---	5,4 . 10 ⁻²²	---
Permeabilidade (nD)	1,01	---	0,55	---

A terceira e a presente bateria de ensaios, os corpos de prova do folhelho BC-01, forneceram valores de permeabilidade absoluta variando de 0,61nD à 1,22nD. Para fins de comparação, poderia-se considerar como a permeabilidade absoluta do folhelho BC-01, a média global dos valores obtidos nestes corpos de prova; sendo assim, este apresentaria uma permeabilidade absoluta de 0,88nD. Este valor é praticamente igual ao estimado no folhelho B (0,91nD) (Duarte, 2004), consideravelmente inferior à permeabilidade do folhelho B-S (40,50 nD) (Duarte, 2004) e superior ao folhelho B-L (0,56nD) (Muniz, 2005).

5.3.5.4 Fase de Difusão de Íons

A fase de difusão de íons foi realizada utilizando soluções de 280 e 200g/l de cloreto de sódio (NaCl), respectivamente, para os corpos de prova BC11 e BC12. No BC10 foi utilizada, uma solução de 257g/l de cloreto de potássio (KCl). As Figuras 5.46 a 5.48 apresentam as variações das pressões ao longo das fases de transmissão de pressão e difusão de íons para estes corpos de prova. Nestes gráficos são apresentadas também as curvas do ajuste numérico.

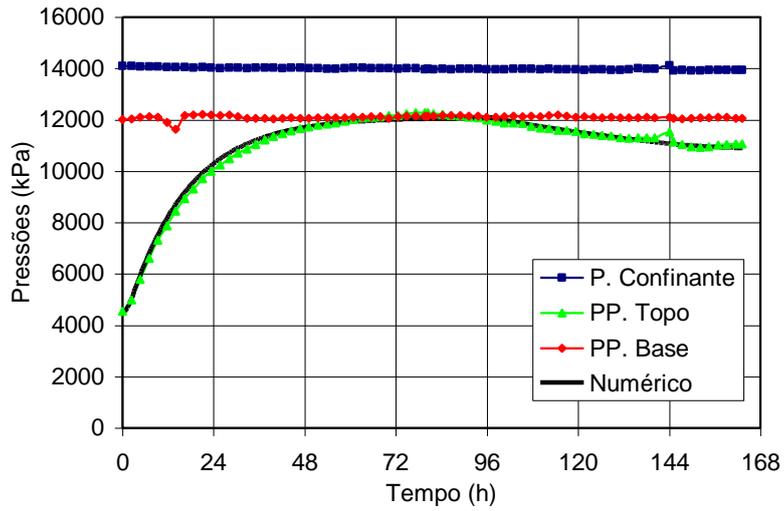


Figura 5.46 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do BC10.

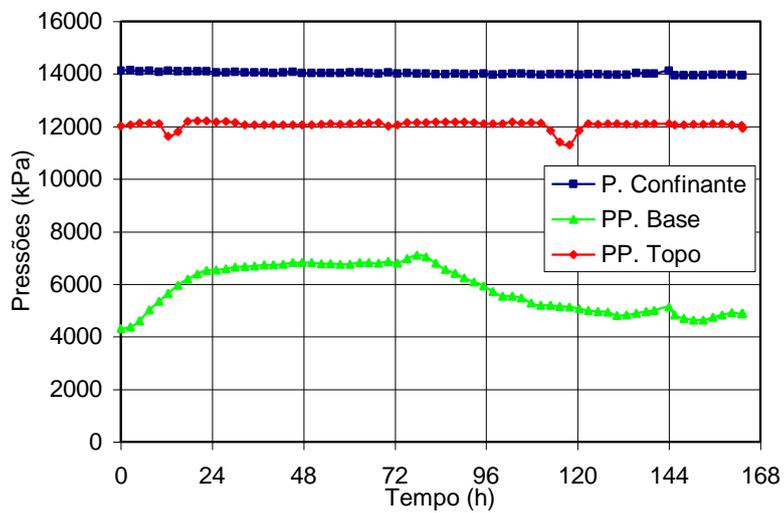


Figura 5.47 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do BC11.

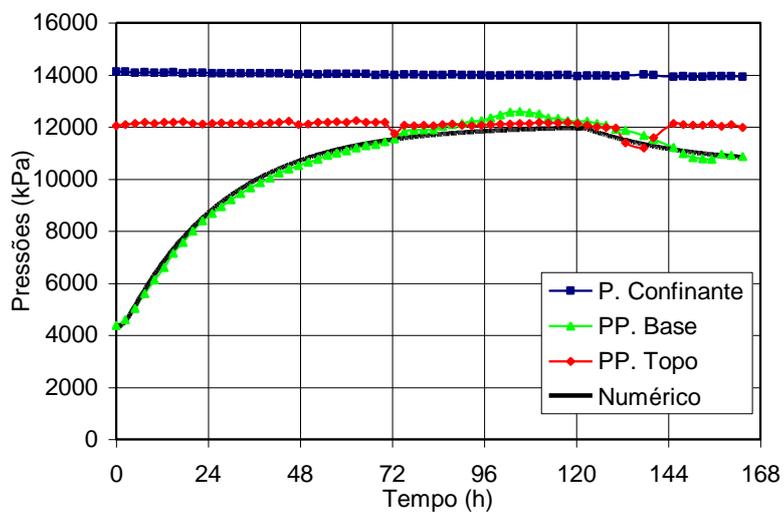


Figura 5.48 – Fase de transmissão de pressão e difusão de íons do BC12.

Na Figura 5.47 referente ao corpo de prova BC11, observa-se a queda da pressão da base (PP. Base) no momento do ingresso da solução salina dentro do mesmo, que começa aproximadamente às 80h de transcorrido o ensaio, e após 130h de ensaio uma diferença entre as pressões de topo e base igual a 7314 kPa. Entretanto, como salientado anteriormente, neste ensaio ocorreu uma contaminação por óleo confinante no topo do corpo de prova. Fica evidente que nestas circunstâncias qualquer tentativa de obter os parâmetros de transporte neste corpo de prova levaria a erros de interpretação.

Na Tabela 5.24 são apresentados os valores da pressão osmótica teórica (Π), da pressão osmótica experimental (ΔP_{osm}), do coeficiente de reflexão (α_{exp}) além da atividade da solução (A_f) que foi circulada.

Tabela 5.24 – Valores do coeficiente de reflexão obtidos experimentalmente.

Corpos de Prova	BC10	BC11	BC12
Concentração	257g/l KCl	280g/l NaCl	200g/l NaCl
A_f	0,915	0,822	0,898
Π (kPa)	12015,1	26868,2	14683,5
ΔP_{osm} (kPa)	1077	-	1236
α_{exp} (%)	9,0	-	8,4
α_{num} (%)	8,0	-	9,5

Como pode ser observado, os corpos de prova BC10 e BC12, apresentam valores muito similares do coeficiente de reflexão experimental (α_{exp}). Observa-se também o verificado anteriormente, a menor atividade da água da solução exposta ao BC12, gera a maior pressão osmótica experimental (ΔP_{osm}) neste corpo de prova; porém, este não apresenta o maior coeficiente de reflexão experimental, quando comparado com o BC10, pois a pressão osmótica teórica da solução (Π) exposta ao BC12, não se desenvolve por completo devido a taxas de invasão iônica dentro deste corpo de prova.

Na anterior e na presente bateria de ensaios, verificaram-se coeficientes de reflexão obtidos experimentalmente (α_{exp}), variando de 8,4% a 16,7% para os diferentes corpos de prova do folheto BC-01. Desses valores encontrados, para fins de comparação, podemos considerar um valor médio global do coeficiente de reflexão experimental para este tipo de folheto, o qual resultou igual a 11,97%.

Este valor é quase igual ao valor obtido no folhelho B (12,93%) (Duarte, 2004), inferior ao folhelho B-L (30,03%) (Muniz, 2005) e superior ao folhelho B-S (1,41%) (Duarte, 2004).

Ao final desta fase, não foi possível realizar as análises químicas do fluido coletado do reservatório inferior; como salientado anteriormente, as amostras coletadas apresentaram contaminação devido a problemas no armazenamento.

Ainda da Tabela 5.24 pode ser observado que os valores estimados do coeficiente de reflexão numérico (α_{num}) são muito similares aos valores obtidos experimentalmente (α_{exp}), indicando que o programa FPORO reproduz o real comportamento experimental dos folhelhos. Além disso, nas duas campanhas realizadas neste folhelho foram obtidos valores do coeficiente de reflexão numérico variando de 7,5% a 13% com uma média global igual a 10,13%.

5.3.5.5 Dados Finais dos Corpos de Prova

Na Tabela 5.25 são apresentados os cálculos dos índices físicos finais da presente campanha. Observam-se em todos os casos valores de umidade finais superiores aos iniciais, indicando que o folhelho absorveu água ao longo do processo. Este comportamento é similar ao verificado na anterior campanha, nos ensaios com o folhelho Pierre01, nos ensaios com os folhelhos B e B-L (Duarte, 2004 e Muniz, 2005) e o oposto do verificado no folhelho B-S (Muniz, 2003).

Observa-se também em todos os casos, contrários ao verificado no folhelho Pierre01, que os graus de saturação dos corpos de prova, ao final do ensaio, apresentaram-se maiores em relação aos valores iniciais; este comportamento já foi observado na anterior campanha com corpos de prova deste mesmo tipo de folhelho. Observa-se de igual modo, valores de índice de vazios e porosidade superiores aos iniciais.

Tabela 5.25 – Dados e índices físicos finais dos corpos de prova (folhelho BC-01)

Parâmetros	BC10	BC11	BC12	BC13
Altura (mm)	16,37	15,61	15,02	14,88
Diâmetro (mm)	37,90	38,17	37,83	38,03
Massa (W, g)	41,73	41,07	38,67	38,17
Umidade (w, %)	11,04	10,02	10,16	10,75
Volume (V, cm ³)	18,47	17,87	16,88	16,90
Massa específica (g/cm ³)	2,26	2,30	2,29	2,26
Densidade dos grãos	2,72	2,72	2,72	2,72
Índice de vazios (e)	0,336	0,302	0,308	0,334
Grau de saturação (S, %)	89,26	90,29	89,75	87,52
Porosidade (n, %)	25,18	23,18	23,55	25,04

5.3.6 Ensaio de Tração Indireta (Ensaio brasileiro)

São apresentados os ensaios brasileiros realizados nas duas campanhas realizadas nos corpos de prova do folhelho BC-01.

A Tabela 5.26 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios e os valores de resistência à tração obtida para cada corpo de prova. Pode-se verificar uma resistência à tração média de 1,29 MPa. Como se pode observar, estes valores obtidos neste tipo de folhelho são superiores aos obtidos no folhelho Pierre01 (menores que 0,8 MPa), os quais falharam somente com a imposição da pré-carga. Estas diferenças de comportamento poderiam ser atribuídas à maior cimentação carbonática que o folhelho BC-01 apresenta.

A Figura 5.49 apresenta um corpo de prova instalado no mordente curvo com a fratura vertical típica deste tipo de ensaio.

Tabela 5.26 – Parâmetros obtidos do ensaio brasileiro no folhelho BC-01.

Corpos de prova	Pré-carga (kN)	Tempo até fratura primária (min:s)	Força Máxima (kN)	Resistência à tração (MPa)
BC01	0,19	02:00	1,04	1,18
BC06	0,23	01:01	1,59	1,81
BC07	0,44	01:11	1,28	1,45
BC08	0,42	00:48	1,71	1,91
BC10	0,66	0:00	0,66	0,67
BC11	0,68	0:23	1,01	1,07
BC12	0,55	3:26	1,02	1,12
BC13	0,62	1:13	0,98	1,10

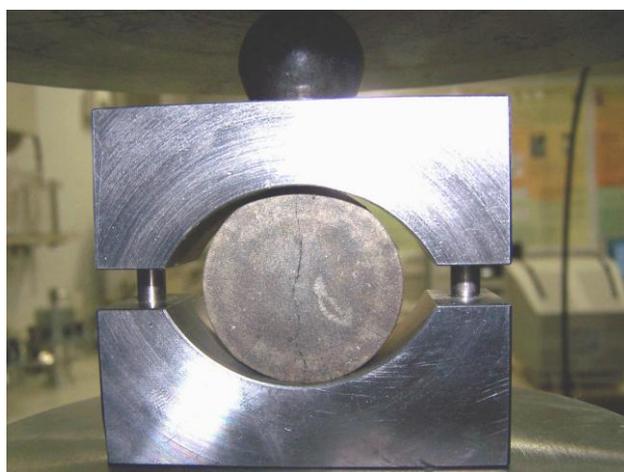


Figura 5.49 – Ruptura típica do ensaio brasileiro ocorrida no BC06 (folhelho BC-01).

Um dos problemas enfrentados para realização dos ensaios é a baixa resistência à tração destes folhelhos. Às vezes, como observados no folhelho Pierre01, a ruptura do corpo de prova ocorria somente com a pré-carga imposta. Outra observação é que muitas vezes a ruptura primária não ocorre na direção tradicional como apresentada na Figura 5.49, mas sim na direção dos planos de acamamento deste folhelho. A Figura 5.50a e b apresenta um exemplo deste tipo de ruptura no folhelho BC-01, cujos planos de acamamento e ruptura são perpendiculares ao eixo do corpo de prova. Este fenômeno já foi observado anteriormente nos ensaios de tração indireta nos corpos de prova do folhelho Pierre01, diferentemente do folhelho BC-01, estes apresentavam planos de

acabamento e ruptura com ângulos mergulhando 45° em relação ao eixo dos corpos de prova.



Figura 5.50 – Rupturas ocorridas no folheto BC-01; (a) Vista frontal inclinada BC10 (CP10) e (b) Vista do topo.

5.4 Conclusões das Campanhas de Ensaio

Com a finalidade de se obter resultados confiáveis, decorrentes do bom funcionamento do sistema, foram necessários ensaios em corpos de prova sintéticos, testes das válvulas da base e a calibração de todos os transdutores de pressão.

Verificou-se a importância de ensaiar corpos de prova em perfeitas condições, pois a qualidade dos resultados depende do estado destes. Observou-se que corpos de prova fissurados aceleram a transmissão de pressão.

É de suma importância a correta montagem do corpo de prova na célula de difusão, que garanta a isolamento do folheto do óleo da pressão confinante, verificou-se que a contaminação do corpo de prova por este fluido causa comportamentos anômalos nas fases do ensaio.

Os ensaios brasileiros, além de mostrar a baixa resistência à tração dos folhetos, apresentaram a diferença marcante da direção de fissilidade ou laminação dos corpos de prova, que falharam, na maioria das vezes, por estes planos de fraqueza orientada. Os ensaios brasileiros realizados por Hsu *et al.* (2002), em 23 corpos de prova do folheto “Eagle Ford”, apresentaram valores de resistência a tração variando de 0,72 MPa a 1,12 MPa com uma média de 0,93

MPa. Os ensaios brasileiros no folhelho BC-01 e Pierre01 apresentaram valores da mesma ordem de grandeza. No entanto, como sugeridos por este autor, esses valores têm que ser aplicados com muita precaução e cautela.

Observou-se nas campanhas de ensaio, que as pressões osmóticas geradas experimentalmente foram incrementadas quando a atividade da água da solução salina, exposta ao folhelho, foi diminuída. Estes comportamentos foram anteriormente observados por diversos pesquisadores, entre eles, van Oort (2003) e Al-Bazali (2006).

Observou-se em ambos os folhelhos que os valores finais de umidade, de índice de vazios e da porosidade dos corpos de prova foram superiores aos valores iniciais. Ao final do ensaio, os graus de saturação dos corpos de prova do folhelho BC-01, aumentaram em relação aos valores iniciais; este comportamento é contrário ao apresentado pelos corpos de prova do folhelho Pierre01.

Os coeficientes de difusão efetivos estimados em ambos os folhelho estão na ordem de 10^{-11} m²/s, estes resultados são da mesma ordem de grandeza dos estimados por Muniz (2003) nos folhelhos B-S e N e dez vezes maiores que os obtidos por Lomba (1998) no folhelho Speeton do Mar do Norte.

Observou-se que os corpos de prova do mesmo folhelho apresentam heterogeneidade nas medidas dos parâmetros de transporte, porém, à tendência do comportamento de ambos os folhelhos é marcante, assim, o folhelho BC-01 apresentou valores de permeabilidade absoluta e do coeficiente de reflexão experimental variando de 0,61nD a 1,22nD e 8,4% a 16,7%, respectivamente. Por outro lado, o folhelho Pierre01 apresentou valores de permeabilidade absoluta e coeficiente de reflexão experimental variando de 1,63nD a 10,10nD e 0,84% a 8,4%, respectivamente.

Observam-se, claramente, a tendência do folhelho BC-01 em apresentar menores valores de permeabilidade absoluta e maiores valores de coeficiente de reflexão quando comparado com o folhelho Pierre01. Al-Bazali *et. al* (2006) e Osuji *et. al* (2008) observaram também este comportamento em ensaios que visavam avaliar a eficiência de membrana em folhelhos.

Para fins de comparação, a Tabela 5.27 apresenta um resumo de alguns parâmetros obtidos na caracterização e nos ensaios nas células de difusão. Os valores reportados dos coeficientes de reflexão e permeabilidade são as médias globais dos resultados obtidos nos corpos de prova de cada tipo de folhelho.

Tabela 5.27 – Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios do folhelho BC-01 e do folhelho Pierre01

Folhelho	Direção da fissilidade	CTC (meq/100g)	Mediana de Diâm. dos poros (μm)	Porcent. de microporos (<0,1 μm)	Permeab. (nD)	α_{exp} (%)
BC-01		34,95	0,0512	11,43	0,88	11,97
Pierre01		7,15	0,0232	15,30	4,38	4,35

Como mencionado nas conclusões da campanha de caracterização dos folhelhos, de acordo com o postulado do Fontoura *et al.* (2007), que sugere que o coeficiente de reflexão (α) é mais influenciado pela distribuição de tamanho dos poros que pela mineralogia; esperava-se o maior coeficiente de reflexão do folhelho Pierre01 quando comparado com o folhelho BC-01. Os ensaios nas células de difusão mostraram o contrário, pode-se observar na Tabela 5.27 que o folhelho BC-01 apresentou mais do que o dobro do valor (α_{exp}) que o folhelho Pierre01.

As campanhas de ensaios realizadas nos dois tipos de folhelho mostram que as permeabilidades não apresentam uma boa correlação com a porosimetria que estes possuem; pode-se observar claramente, na Tabela 5.27, quando ambos os folhelhos são comparados, que o folhelho Pierre01 apresenta a maior permeabilidade, possuindo a menor mediana de diâmetro dos poros e maior porcentagem de microporos. Estes resultados são contrários aos observados nos folhelhos B, N B-L e, como mostrados anteriormente, estes apresentaram uma boa correlação entre a permeabilidade e a porosimetria; em outras palavras, as permeabilidades foram reduzidas com as menores medianas de diâmetros de poros e as maiores porcentagens de microporos. Destes resultados, observa-se que a relação permeabilidade e o diâmetro dos poros dos folhelhos Pierre01 e BC-01, aparentemente, são inconsistentes.

Vale lembrar que, em rochas sedimentares, a deposição favorável de partículas cria microfaturas alinhadas à fissilidade que induzem ao folhelho uma significativa anisotropia na permeabilidade. Por isso, um fluxo substancial existiria

paralelo à direção da laminação que faz que o coeficiente de permeabilidade numa direção seja maior que na outra (perpendicular à laminação).

Na configuração das células de difusão, a água ou a solução salina é intrudida axialmente no corpo de prova (pelo topo); por tal razão, os parâmetros de transporte estimados são os referentes à direção vertical paralela ao eixo dos corpos de prova, em consequência é de suma importância conhecer a facilidade ou a dificuldade que água e os íons apresentaram no caminho que percorreram, de acordo, com a orientação da fissilidade que os corpos de prova possuem.

Como esquematizados na Tabela 5.27 acima, os corpos de prova do folhelho BC-01 apresentam planos de fissilidade perpendiculares ao eixo dos mesmos; já o folhelho Pierre01 apresenta um mergulho ligeiramente superior à 45°. Esta configuração que apresentam estes folhelhos são as propriedades que definem a permeabilidade e, por conseguinte, o coeficiente de reflexão que o folhelho possui. O folhelho Pierre01 apresenta um caminho preferencial para que a água e os íons percorram axialmente do topo à base do corpo de prova; no entanto, o folhelho BC-01, apresenta uma maior dificuldade para que estes percorram o mesmo caminho, razão pela qual, o folhelho BC-01, apresenta menor permeabilidade e, conseqüentemente, maior coeficiente de reflexão quando comparado com o folhelho Pierre01. A menor permeabilidade do folhelho BC-01 observa-se claramente, no maior tempo que este precisa para uma completa transmissão de pressão (60h à 94h) em relação ao folhelho Pierre01(14h à 60h).

O autor acredita que uns dos parâmetros muito importantes de se levar em conta na caracterização dos folhelhos é a distribuição de diâmetro dos poros. No entanto, para um bom entendimento dos processos de transporte de massa, além de avaliar a distribuição do diâmetro dos poros, também se deve conhecer o grau e a direção da fissilidade dos corpos de prova em relação aos seus eixos, estes definiram a permeabilidade e, por conseguinte o coeficiente de reflexão que o folhelho possui.

Acredita-se que a boa correlação da distribuição de diâmetro dos poros e o coeficiente de reflexão dos folhelhos B, N (Duarte, 2004) e B-L (Muniz 2005), seja devido à boa correlação da permeabilidade com a porosimetria, pois todos os corpos de prova foram preparados com a mesma inclinação da fissilidade em relação ao eixo dos mesmos (perpendiculares). Afirma-se então que, a

porosimetria é quem nesse caso definiu a permeabilidade e, por conseguinte, o coeficiente de reflexão destes.

Depois desta campanha de ensaios e verificados o postulado do Fontoura *et al.* (2007) o autor acredita que na caracterização dos folhelhos é de suma importância avaliar a distribuição de diâmetro dos poros, seguidamente, deve-se comprovar se a permeabilidade guarda uma relação direta com esta. Sendo assim, a porosimetria definiria o coeficiente de reflexão ou pelo contrário, só a permeabilidade. No presente estudo, não ficou evidente o grau de influência da mineralogia e da CTC dos argilominerais que o folhelho possui, pois o folhelho BC-01 que possui o maior coeficiente de reflexão possui também o maior valor de CTC dos seus argilominerais (vide na Tabela 5.27 acima). Porém, a diferença marcante das permeabilidades no sentido vertical foi quem definiu o coeficiente de reflexão dos dois tipos de folhelhos estudados nesta dissertação.