

4.

Apresentação e Análise dos Resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com os três diferentes arenitos, já apresentados no capítulo anterior. Os resultados dos ensaios serão utilizados para estudar: a variação da permeabilidade das rochas em função dos diferentes estados de tensão (hidrostático e triaxial verdadeiro) atuantes nas mesmas; a anisotropia de permeabilidade horizontal; e, por fim, a histerese de permeabilidade, observada durante os ciclos de carregamento e descarregamento dos corpos de prova (CPs).

Vale ressaltar que, quando for feita referência à permeabilidade horizontal, trata-se de medidas de permeabilidade obtidas na direção horizontal do equipamento de ensaio, direção esta que pode ser denominada X ou Y (direções horizontais perpendiculares entre si). Portanto, como já foi observado no capítulo 3, direção horizontal ou vertical, neste trabalho, refere-se à orientação do corpo de prova em relação ao seu posicionamento na célula triaxial, não à sua orientação *in situ*.

Por um problema sistemático de excesso de perda de carga (explicado na seção 3.3 - *Metodologia de ensaio*), identificado no equipamento de ensaio, algumas medidas de permeabilidade na direção Y foram descartadas. Estas medidas descartadas foram as correspondentes aos CPs 01-BE, 02-BE, 03-RB, 04-RB, 06-BO, 07-BO e 08-BO. Desta forma, apenas os resultados dos CPs 05-RB e 09-BO apresentam medidas de permeabilidade nas duas direções horizontais perpendiculares entre si (X e Y).

4.1.

Arenito Berea

Dois corpos de prova do arenito Berea foram ensaiados neste trabalho. Um sob estado de tensão hidrostático (CP 01-BE) e outro sob um estado de tensão triaxial verdadeiro (CP 02-BE). Neste último corpo de prova, o segundo invariante

das tensões desviadoras J_{2D} foi alterado, sempre sob um mesmo valor do primeiro invariante do tensor de tensões I_1 . Isto foi feito para observar o efeito isolado da variação da tensão desviadora na permeabilidade das rochas.

A tabela 4.1 apresenta os valores de porosidade dos corpos de prova do arenito Berea, utilizados neste trabalho.

Tabela 4.1 – Valores de porosidade dos corpos de prova do arenito Berea

Corpo de prova	Porosidade
01-BE	22,4%
02-BE	21,9%
Porosidade média: 22,2%	

A figura 4.1 mostra a variação da permeabilidade do CP 01-BE, na direção X, em função da tensão aplicada (I_1). Na tabela 4.2 estão apresentados o programa de ensaio aplicado neste corpo de prova, além dos valores da poro-pressão (u) e da permeabilidade (k_x), medidos na direção X.

Pode ser observada na figura 4.1, a divisão da curva I_1 vs. k_x em três regiões. O resultado apresentado na figura 4.1 está de acordo com Ferfera *et al.* (1997), já apresentado na figura 2.20, que caracteriza a evolução da permeabilidade de uma rocha, em função do estado de tensão, sob três fases. A *região I* (primeira fase) constitui o fechamento das fissuras preexistentes com o aumento do carregamento, levando à diminuição da permeabilidade. Na segunda fase (*região II*), os grãos e poros do material deformam-se com o aumento do carregamento aplicado, sendo responsáveis pela diminuição da permeabilidade. Já na terceira fase, representada pela *região III*, por se tratar de uma rocha de alta porosidade, o dano mecânico leva à mobilização de grãos, que se depositam nas gargantas dos poros, levando ao estreitamento dos canais de fluxo e conseqüentemente, mais uma vez, à diminuição da permeabilidade.

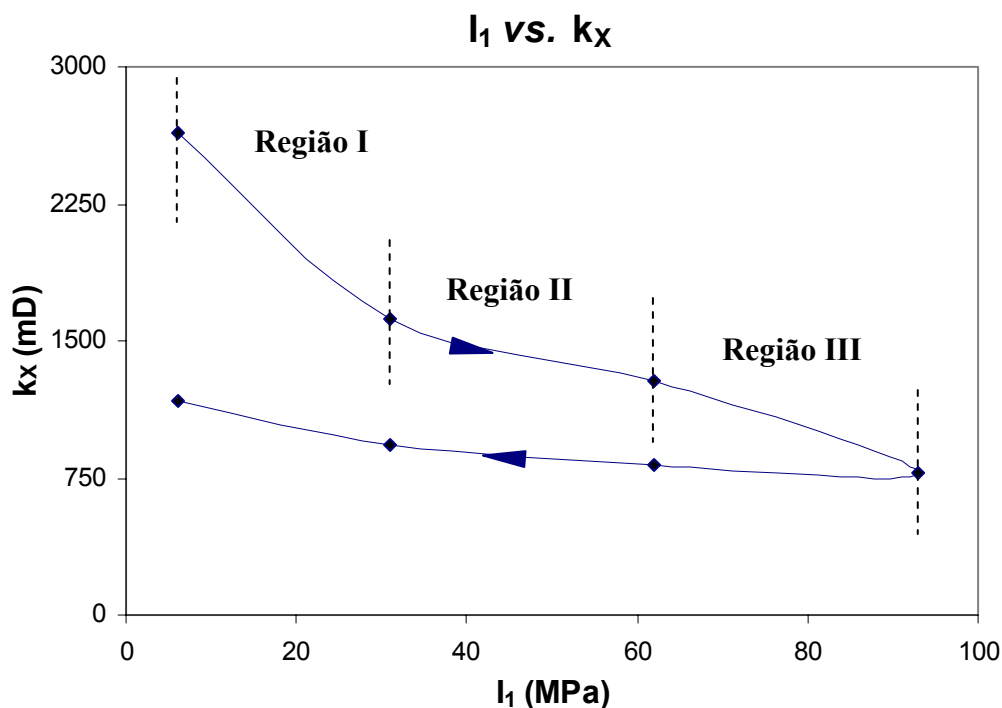


Figura 4.1 – Variação da permeabilidade em função do estado de tensão hidrostática aplicado no arenito Berea 01-BE

Tabela 4.2 – Programa de ensaio hidrostático aplicado no arenito Berea 01-BE para medida da permeabilidade na direção X

CP 01-BE - Permeabilidade na direção X

Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)			k_x (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}	ΔP (MPa)	
1º	2,1	2,1	2,1	2,3E-03	6	0	4,6E-03	2637
2º	10,3	10,3	10,3	3,8E-03	31	0	7,6E-03	1616
3º	20,7	20,7	20,7	4,8E-03	62	0	9,6E-03	1276
5º	31,0	31,0	31,0	7,8E-03	93	0	1,6E-02	782
6º	20,7	20,7	20,7	7,4E-03	62	0	1,5E-02	818
7º	10,3	10,3	10,3	6,6E-03	31	0	1,3E-02	928
8º	2,1	2,1	2,1	5,2E-03	6	0	1,0E-02	1172

Ainda na figura 4.1, pode ser observada uma grande histerese de permeabilidade. Pouca permeabilidade foi recuperada no descarregamento do corpo de prova, uma indicação da deformação plástica ocorrida no mesmo. Já para o CP 02-BE, com histerese ainda maior, praticamente nenhuma permeabilidade foi recuperada durante o descarregamento, como mostra a figura 4.2. Isto é uma

indicação de que o estado de tensão triaxial verdadeiro (presença de tensão desviadora) gera mais dano mecânico no material do que o estado de tensão hidrostático. Dano mecânico, segundo Dusseault e Gray (1992), seria a degradação irreversível da resistência ou rigidez da rocha e alteração das suas propriedades de fluxo, como resultado de mudanças permanentes no arranjo microscópico dos grãos do material, que estão associadas a deformações plásticas. Vale ressaltar que no CP 02-BE foi observado maior dano mecânico, sofrido pela estrutura interna da rocha, mesmo com o valor de I_1 atuante neste (62 MPa) sendo menor do que o valor máximo de I_1 atuante no CP 01-BE (93 MPa).

A permeabilidade do CP 02-BE foi medida em função da variação de J_{2D} , sob um estado de tensão triaxial verdadeiro, sem variação do nível de tensão média atuante (figura 4.2). A tabela 4.3 mostra, além da trajetória de tensão seguida pelo CP 02-BE, os valores de poro-pressão (u) e permeabilidade (k_x) na direção X, medidos durante o ensaio.

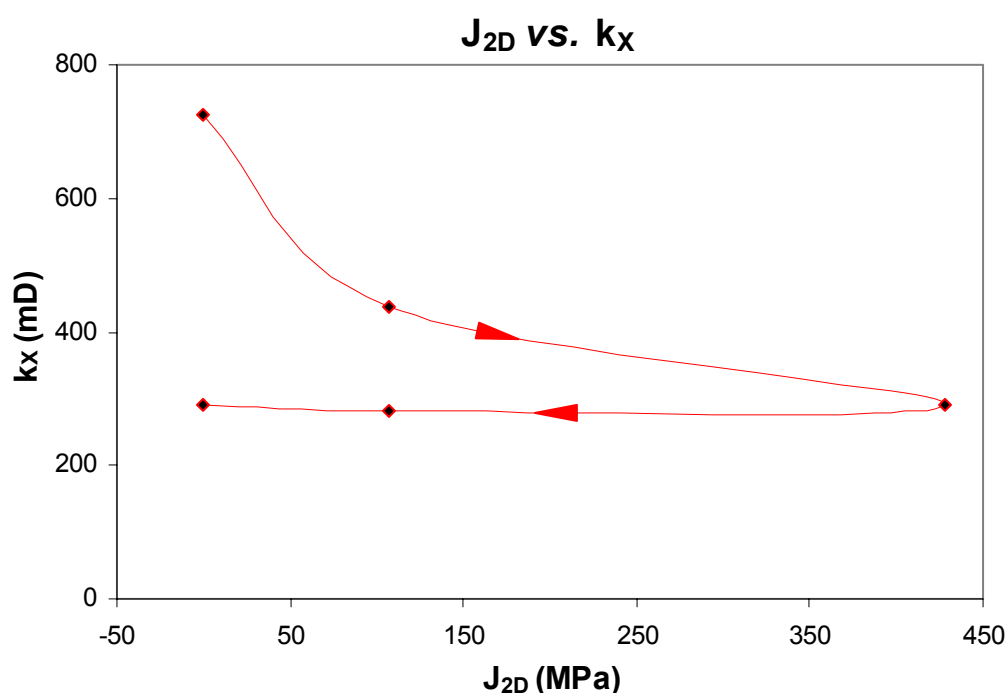


Figura 4.2 – Variação da permeabilidade em função do estado de tensão triaxial verdadeiro aplicado no arenito Berea 02-BE

Tabela 4.3 – Programa de ensaio triaxial verdadeiro aplicado no arenito Berea 02-BE para medida da permeabilidade na direção X

CP 02-BE - Permeabilidade na direção X								
Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)		ΔP (MPa)	k_x (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}		
1º	20,7	20,7	20,7	8,5E-03	62	0	1,7E-02	726
2º	31,0	10,3	20,7	1,4E-02	62	107	2,8E-02	439
3º	41,4	0,0	20,7	2,1E-02	62	428	4,2E-02	291
4º	31,0	10,3	20,7	2,2E-02	62	107	4,4E-02	280
5º	20,7	20,7	20,7	2,1E-02	62	0	4,2E-02	290

Vale ressaltar que a ordem de magnitude dos valores da permeabilidade, medidos nos CPs 01-BE e 02-BE, estão diferentes. Isto pode ser verificado ao comparar o valor da permeabilidade do terceiro estágio da tabela 4.2 (1276mD) com o do primeiro estágio da tabela 4.3 (726mD), pois estes são valores de permeabilidade sob um mesmo estado de tensão atuante. Esta diferença entre os valores de permeabilidade pode ser atribuída a duas razões. A primeira é a heterogeneidade dos arenitos, mas por se tratar de arenito Berea, conhecido como um material bem homogêneo, não é a mais provável. A segunda, agora sim, mais provável, é o fato dos corpos de prova terem sido recebidos sem orientação quanto a sua posição *in situ*. Esta falta de orientação, portanto, gera a possibilidade de, em cada um dos ensaios, os corpos de prova terem sido posicionados na célula triaxial, com as direções horizontais (X e Y) e vertical (Z) diferentes das direções *in situ*.

4.2.

Arenito Rio Bonito

Os três ensaios executados com o arenito Rio Bonito, assim como os com o arenito Botucatú, seguiram uma mesma trajetória de tensões, diferente destas últimas seguidas pelos arenitos Berea.

Por meio desta nova trajetória de tensões, em cada um dos ensaios, pôde ser feita uma comparação entre os resultados de variação da permeabilidade dos corpos de prova, quando sob estado de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro.

O estado de tensão triaxial verdadeiro foi sempre aplicado na seguinte relação entre as tensões: (0,6: 0,8: 1,0) para (σ_x : σ_y : σ_z).

A tabela 4.4 apresenta os valores de porosidade dos corpos de prova do arenito Rio Bonito, utilizados neste trabalho.

Tabela 4.4 – Valores de porosidade dos corpos de prova do arenito Rio Bonito

Corpo de prova	Porosidade
03-RB	21,0%
04-RB	20,3%
05-RB	22,3%
Porosidade média:	21,2%

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam, respectivamente, os resultados da variação da permeabilidade dos CPs 03-RB e 04-RB sob os estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro. Já as tabelas 4.5 e 4.6, nesta ordem, mostram os programas de ensaio aos quais estes mesmos corpos de prova foram submetidos e os valores da poro-pressão (u) e da permeabilidade (k_x) medidos nos ensaios, na direção X.

É importante notar que as curvas de variação da permeabilidade sob o estado de tensão hidrostático dos CPs 03-RB e 04-RB não apresentam o mesmo aspecto da curva do CP 01-BE (figura 4.1), onde foram identificadas três fases de evolução da permeabilidade. Esta diferença está atribuída ao fato de que nos CPs 03-RB e 04-RB, o primeiro estágio de tensão hidrostática corresponde a 10,3 MPa, enquanto que CP 01-BE, o primeiro estágio corresponde a 2,1 MPa, ou seja, a diferença entre o nível de tensão aplicado condiciona esta diferença nas curvas. Isto poderá ser observado também em todos os ensaios com o arenito Botucatú.

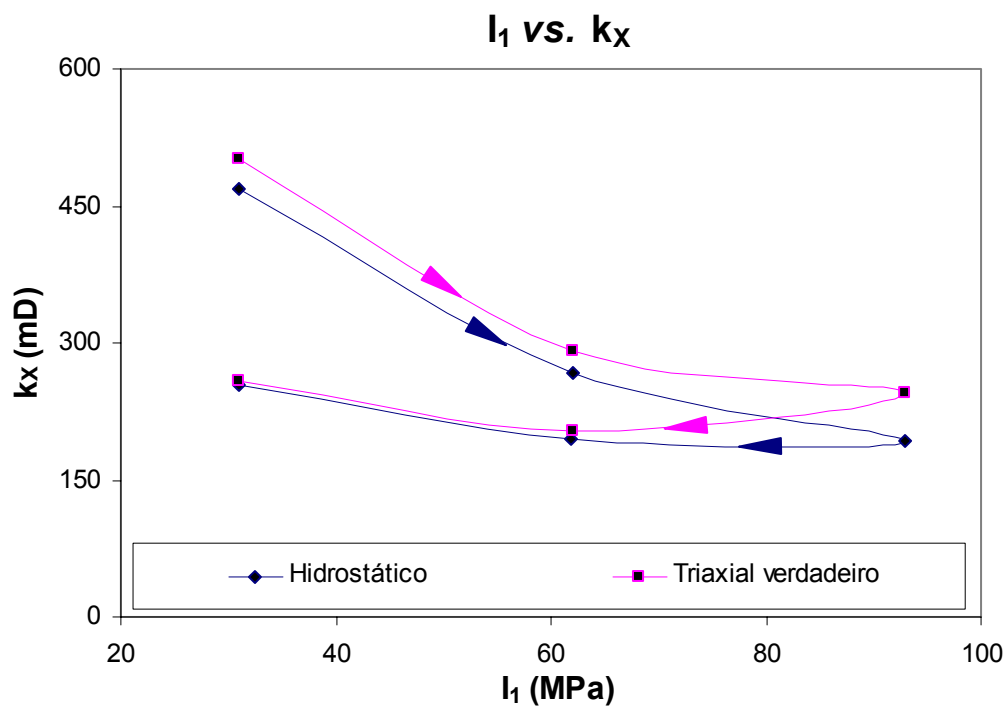


Figura 4.3 – Variação da permeabilidade em função dos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro aplicados no arenito Rio Bonito 03-RB

Tabela 4.5 – Programa de ensaio aplicado no arenito Rio Bonito 03-RB para medida da permeabilidade na direção X

CP 03-RB - Permeabilidade na direção X

Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)		ΔP (MPa)	k_x (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}		
1º	7,8	10,3	12,9	1,3E-02	31	7	2,6E-02	501
2º	10,3	10,3	10,3	1,4E-02	31	0	2,8E-02	469
3º	15,5	20,7	25,9	2,2E-02	62	27	4,4E-02	292
4º	20,7	20,7	20,7	2,4E-02	62	0	4,8E-02	267
5º	23,3	31,0	38,8	2,6E-02	93	60	5,3E-02	246
6º	31,0	31,0	31,0	3,4E-02	93	0	6,7E-02	193
7º	15,5	20,7	25,9	3,2E-02	62	27	6,3E-02	204
8º	20,7	20,7	20,7	3,3E-02	62	0	6,6E-02	195
9º	7,8	10,3	12,9	2,5E-02	31	7	5,0E-02	259
10º	10,3	10,3	10,3	2,6E-02	31	0	5,1E-02	253

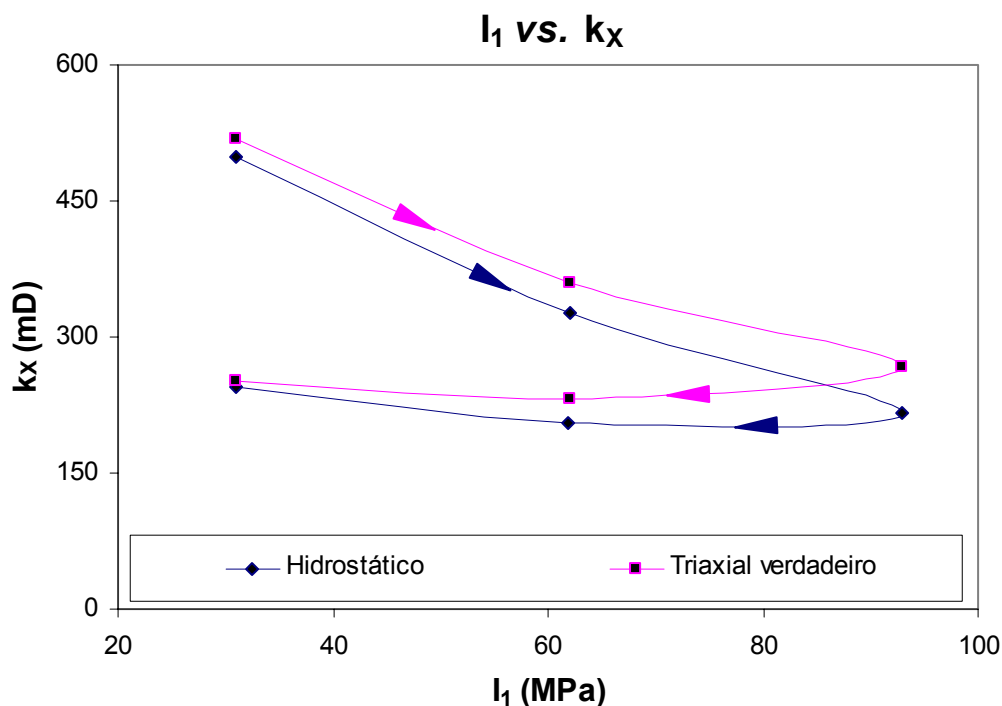


Figura 4.4 – Variação da permeabilidade em função dos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro aplicados no arenito Rio Bonito 04-RB

Tabela 4.6 – Programa de ensaio aplicado no arenito Rio Bonito 04-RB para medida da permeabilidade na direção X

CP 04-RB - Permeabilidade na direção X

Estágio	Tensão (MPa)				Invariantes de tensão (MPa)			
	σ_x	σ_y	σ_z	u (MPa)	I_1	J_{2D}	ΔP (MPa)	k_x (mD)
1º	7,8	10,3	12,9	1,2E-02	31	7	2,4E-02	518
2º	10,3	10,3	10,3	1,2E-02	31	0	2,5E-02	498
3º	15,5	20,7	25,9	1,7E-02	62	27	3,4E-02	359
4º	20,7	20,7	20,7	1,9E-02	62	0	3,8E-02	327
5º	23,3	31,0	38,8	2,3E-02	93	60	4,6E-02	267
6º	31,0	31,0	31,0	2,8E-02	93	0	5,7E-02	216
7º	15,5	20,7	25,9	2,7E-02	62	27	5,3E-02	231
8º	20,7	20,7	20,7	3,0E-02	62	0	6,0E-02	205
9º	7,8	10,3	12,9	2,4E-02	31	7	4,9E-02	252
10º	10,3	10,3	10,3	2,5E-02	31	0	5,0E-02	246

A figura 4.5 refere-se ao ensaio realizado com o CP 05-RB. Este ensaio apresentou medida de permeabilidade nas duas direções horizontais perpendiculares entre si, X e Y.

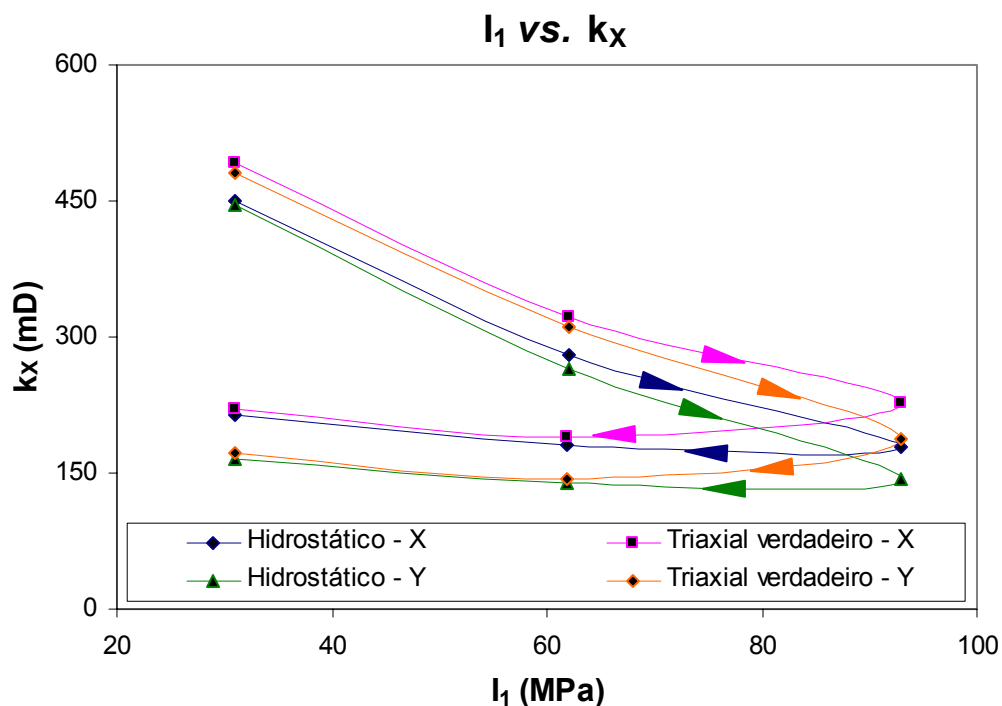


Figura 4.5 – Variação da permeabilidade nas direções X e Y, em função dos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro aplicados no arenito Rio Bonito 05-RB

Nas tabelas 4.7 e 4.8 estão apresentados os valores de tensão aplicados no CP 05-RB, de poro-pressão (u) e de permeabilidade (k_x e k_y) medidos no ensaio, nas direções X e Y, respectivamente.

Tabela 4.7 – Programa de ensaio aplicado no arenito Rio Bonito 05-RB para medida da permeabilidade na direção X

CP 05-RB - Permeabilidade na direção X

Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)		ΔP (MPa)	k_x (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}		
1º	7,8	10,3	12,9	1,3E-02	31	7	2,5E-02	492
2º	10,3	10,3	10,3	1,4E-02	31	0	2,8E-02	449
3º	15,5	20,7	25,9	1,9E-02	62	27	3,8E-02	323
4º	20,7	20,7	20,7	2,2E-02	62	0	4,4E-02	280
5º	23,3	31,0	38,8	2,7E-02	93	60	5,5E-02	227
6º	31,0	31,0	31,0	3,5E-02	93	0	6,9E-02	180
7º	15,5	20,7	25,9	3,3E-02	62	27	6,6E-02	189
8º	20,7	20,7	20,7	3,4E-02	62	0	6,9E-02	180
9º	7,8	10,3	12,9	2,8E-02	31	7	5,6E-02	221
10º	10,3	10,3	10,3	2,9E-02	31	0	5,8E-02	213

Tabela 4.8 – Programa de ensaio aplicado no arenito Rio Bonito 05-RB para medida da permeabilidade na direção Y

CP 05-RB - Permeabilidade na direção Y

Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)		ΔP (MPa)	k_y (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}		
1º	7,8	10,3	12,9	1,3E-02	31	7	2,6E-02	481
2º	10,3	10,3	10,3	1,4E-02	31	0	2,8E-02	446
3º	15,5	20,7	25,9	2,0E-02	62	27	4,0E-02	312
4º	20,7	20,7	20,7	2,4E-02	62	0	4,7E-02	264
5º	23,3	31,0	38,8	3,4E-02	93	60	6,7E-02	187
6º	31,0	31,0	31,0	4,4E-02	93	0	8,8E-02	142
7º	15,5	20,7	25,9	4,4E-02	62	27	8,7E-02	143
8º	20,7	20,7	20,7	4,5E-02	62	0	9,0E-02	139
9º	7,8	10,3	12,9	3,6E-02	31	7	7,3E-02	172
10º	10,3	10,3	10,3	3,8E-02	31	0	7,5E-02	166

O CP 05-RB, no início do ensaio, praticamente não apresentou anisotropia de permeabilidade horizontal. Contudo, com o aumento do nível de tensão, a anisotropia de permeabilidade aumentou, tanto sob tensão hidrostática quanto sob tensão triaxial verdadeira, como pode ser visto nas tabelas 4.9 e 4.10, respectivamente. A tensão triaxial verdadeira está representada da seguinte forma: σ_x ; σ_y ; σ_z .

Um comportamento similar foi observado no trabalho Al-Harthy *et al.* (1999) com o arenito St. Bees. Neste trabalho, ao aumentar as tensões de forma hidrostática, de 6,9 MPa para 34,5 MPa, a anisotropia de permeabilidade horizontal passou de 1,19 para 1,33. Já como o aumento do estado de tensão triaxial verdadeiro de $\sigma_x = 5,2$ MPa, $\sigma_y = 6,9$ MPa e $\sigma_z = 8,6$ MPa para $\sigma_x = 25,9$ MPa, $\sigma_y = 34,5$ MPa e $\sigma_z = 43,1$ MPa, a anisotropia passou de 1,11 para 1,20. O estado de tensão triaxial verdadeiro foi aplicado no trabalho de Al-Harthy *et al.* (1999) sob a mesma relação aplicada no trabalho aqui descrito (0,6: 0,8: 1,0).

Tabela 4.9 – Variação da anisotropia induzida no CP 05-RB pela variação do estado de tensão hidrostático

CP 05-RB		
<i>Sob estado de tensão hidrostática de 10,3 MPa</i>		
Direção	k (mD)	k_x/k_y
X	449	1,01
Y	446	
<i>Sob estado de tensão hidrostática de 31,0 MPa</i>		
Direção	k (mD)	k_x/k_y
X	180	1,27
Y	142	

Tabela 4.10 – Variação da anisotropia induzida no CP 05-RB pela variação do estado de tensão triaxial verdadeiro

CP 05-RB		
<i>Sob estado de tensão triaxial verdadeiro de 7,8: 10,3: 12,9 MPa</i>		
Direção	k (mD)	k_x/k_y
X	492	1,02
Y	481	
<i>Sob estado de tensão triaxial verdadeiro de 23,3: 31,0: 38,8 MPa</i>		
Direção	k (mD)	k_x/k_y
X	227	1,21
Y	187	

Pode ser observado nos três ensaios apresentados com o arenito Rio Bonito (figuras 4.3, 4.4 e 4.5), que a permeabilidade sob o estado de tensão hidrostático foi sempre menor do que a mesma sob o estado triaxial verdadeiro. Estes resultados estão de acordo com os resultados de Al-Harthy *et al.* (1998b, 1999), que estudaram variação da permeabilidade dos arenitos Croslands Hill, Springwell, Stainton e St. Bees sob diferentes trajetórias de tensão.

Nos ensaios com o arenito Rio Bonito, a histerese de permeabilidade observada foi sempre maior sob o estado de tensão triaxial verdadeiro. A tabela

4.11 apresenta o percentual de redução da permeabilidade (tanto na direção X quanto na direção Y), devido ao ciclo de carregamento e descarregamento, para os estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro. Quanto maior o percentual de redução da permeabilidade, maior a histerese.

Tabela 4.11 – Redução da permeabilidade dos corpos de prova do arenito Rio Bonito em função do ciclo de carregamento e descarregamento

Triaxial verdadeiro: $\sigma_x = 7,8$ MPa, $\sigma_y = 10,3$ MPa e $\sigma_z = 12,9$ MPa			
Hidrostático: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 10,3$ MPa			
Permeabilidade (mD)			
Estado de tensão	Início do carregamento	Final do descarregamento	% de redução da permeabilidade
CP03-RB (direção X)			
Triaxial verdadeiro	501	259	48,3%
Hidrostático	469	253	46,1%
CP04-RB (direção X)			
Triaxial verdadeiro	518	252	51,4%
Hidrostático	498	246	50,6%
CP05-RB (direção X)			
Triaxial verdadeiro	492	221	55,1%
Hidrostático	449	213	52,6%
CP05-RB (direção Y)			
Triaxial verdadeiro	481	172	64,2%
Hidrostático	446	166	62,8%

O estado de tensão atuante nos corpos de prova Rio Bonito (tabela 4.11), tanto no início do carregamento quanto no final do descarregamento, sob tensão hidrostática, corresponde a $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 10,3$ MPa. Já sob tensão triaxial verdadeira, também no início do carregamento e no final do descarregamento, o estado de tensão corresponde a $\sigma_x = 7,8$ MPa, $\sigma_y = 10,3$ MPa e $\sigma_z = 12,9$ MPa.

Vale ressaltar que o comportamento de histerese de permeabilidade, maior sob estado de tensão triaxial verdadeiro, é diferente daquele observado por Al-Harthy *et al.* (1998a, b). Nestes últimos, o efeito da histerese observado foi maior sob o estado de tensão hidrostático, quando comparado com o triaxial verdadeiro.

Entretanto, em Al-Harthy *et al.* (1998a, b), esta comparação foi feita sob diferentes valores de tensão média atuante no corpo de prova. Estes dois estados de tensão comparados apresentavam, em comum, apenas o valor da tensão principal maior (σ_z). No primeiro estágio dos ensaios de Al-Harthy *et al.* (1998a, b), com o arenito Doddington, o estado de tensão triaxial verdadeiro correspondente a $\sigma_x = 4,14$ MPa, $\sigma_y = 5,52$ MPa e $\sigma_z = 6,89$ MPa, enquanto que o estado hidrostático aplicado, utilizado para comparação, corresponde a $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 6,89$ MPa. A tensão média atuante no corpo de prova sob tensão triaxial verdadeira foi de 5,52 MPa, enquanto que a média da hidrostática foi de 6,89 MPa.

4.3.

Arenito Botucatú

Quatro ensaios foram realizados com os CPs 06-BO, 07-BO, 08-BO e 09-BO do arenito Botucatú. Assim como acontecido nos ensaios com o arenito Berea, com o Botucatú também foi observada uma diferença nos resultados, com relação a magnitude dos valores de permeabilidade medidos. Os CPs 06-BO e 07-BO apresentaram valores de permeabilidade próximos entre si e diferentes dos valores medidos nos CPs 08-BO e 09-BO. Os valores de permeabilidade destes dois últimos também foram próximos entre si.

As mesmas duas razões, que podem estar atribuídas à diferença nos valores da permeabilidade do arenito Berea, podem também ser atribuídas aos valores encontrados para o arenito Botucatú. Entretanto, no caso do arenito Botucatú, a heterogeneidade, comum nas formações de arenitos, não é uma causa tão improvável para esta diferença de resultados, como no caso do arenito Berea. O arenito Botucatú, tipicamente, não é homogêneo como o Berea. Desta maneira, a diferença nos resultados pode ser devido à heterogeneidade da rocha e à obtenção de corpos de prova sem informação sobre suas orientações de campo.

A tabela 4.12 apresenta os valores da porosidade dos corpos de prova do arenito Botucatú, utilizados neste trabalho.

Tabela 4.12 – Valores de porosidade dos corpos de prova do arenito Botucatú

Corpo de prova	Porosidade
06-RB	24,3%
07-RB	27,2%
08-RB	23,9%
09-RB	26,9%
Porosidade média: 25,6%	

Nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8 estão apresentados, respectivamente, os resultados da variação da permeabilidade dos CPs 06-BO, 07-BO e 08-BO sob os estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro. As tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 mostram os programas de ensaio aos quais estes mesmos corpos de prova foram submetidos e os valores de poro-pressão (u) e permeabilidade (k_x) medidos durante os ensaios, na direção X.

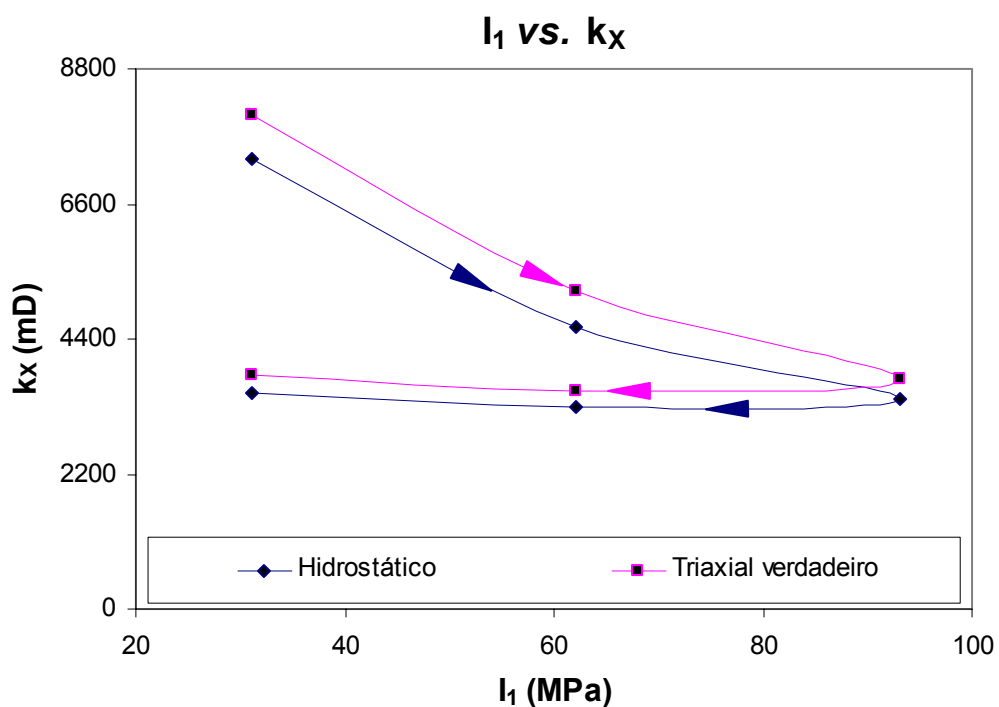
**Figura 4.6** – Variação da permeabilidade em função dos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro aplicados no arenito Botucatú 06-BO

Tabela 4.13 – Programa de ensaio aplicado no arenito Botucatú 06-BO para medida da permeabilidade na direção X

CP 06-BO - Permeabilidade na direção X

Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)		ΔP (MPa)	k_x (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}		
1º	7,8	10,3	12,9	7,4E-04	31	7	1,5E-03	8039
2º	10,3	10,3	10,3	8,1E-04	31	0	1,6E-03	7318
3º	15,5	20,7	25,9	1,1E-03	62	27	2,3E-03	5173
4º	20,7	20,7	20,7	1,3E-03	62	0	2,6E-03	4603
5º	23,3	31,0	38,8	1,6E-03	93	60	3,1E-03	3764
6º	31,0	31,0	31,0	1,7E-03	93	0	3,5E-03	3425
7º	15,5	20,7	25,9	1,7E-03	62	27	3,3E-03	3560
8º	20,7	20,7	20,7	1,8E-03	62	0	3,6E-03	3306
9º	7,8	10,3	12,9	1,6E-03	31	7	3,1E-03	3805
10º	10,3	10,3	10,3	1,7E-03	31	0	3,3E-03	3531

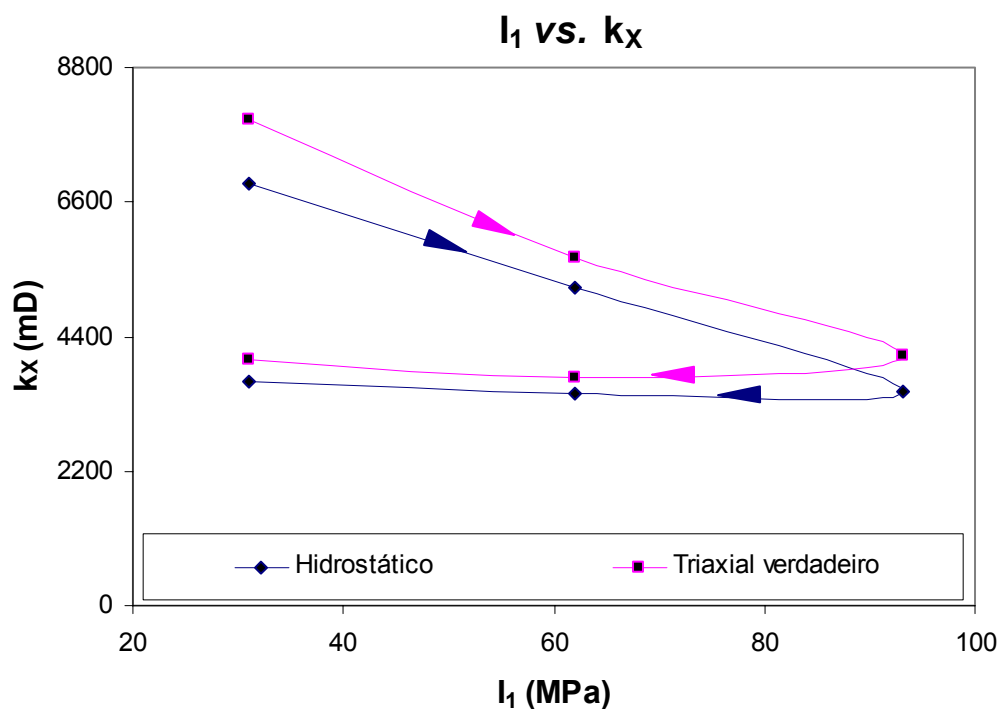


Figura 4.7 – Variação da permeabilidade em função dos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro aplicados no arenito Botucatú 07-BO

Tabela 4.14 – Programa de ensaio aplicado no arenito Botucatú 07-BO para medida da permeabilidade na direção X

CP 07-BO - Permeabilidade na direção X

Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)		ΔP (MPa)	k_x (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}		
1°	7,8	10,3	12,9	7,8E-04	31	7	1,6E-03	7962
2°	10,3	10,3	10,3	2,1E-03	31	0	4,2E-03	6894
3°	15,5	20,7	25,9	1,1E-03	62	27	2,2E-03	5695
4°	20,7	20,7	20,7	1,2E-03	62	0	2,4E-03	5186
5°	23,3	31,0	38,8	1,5E-03	93	60	3,0E-03	4080
6°	31,0	31,0	31,0	1,8E-03	93	0	3,5E-03	3515
7°	15,5	20,7	25,9	1,7E-03	62	27	3,3E-03	3718
8°	20,7	20,7	20,7	1,8E-03	62	0	3,6E-03	3461
9°	7,8	10,3	12,9	1,5E-03	31	7	3,1E-03	4017
10°	10,3	10,3	10,3	1,7E-03	31	0	3,4E-03	3657

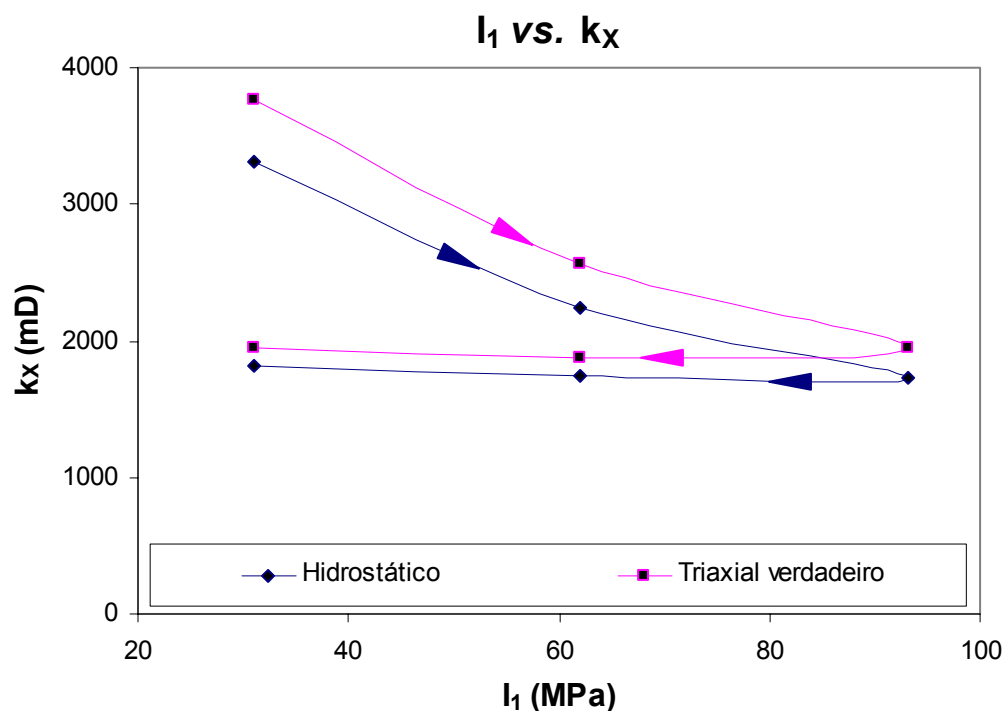


Figura 4.8 – Variação da permeabilidade em função dos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro aplicados no arenito Botucatú 08-BO

Tabela 4.15 – Programa de ensaio aplicado no arenito Botucatú 08-BO para medida da permeabilidade na direção X

CP 08-BO - Permeabilidade na direção X

Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)		ΔP (MPa)	k_x (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}		
1º	7,8	10,3	12,9	1,6E-03	31	7	3,1E-03	3761
2º	10,3	10,3	10,3	1,8E-03	31	0	3,5E-03	3315
3º	15,5	20,7	25,9	2,3E-03	62	27	4,6E-03	2566
4º	20,7	20,7	20,7	2,6E-03	62	0	5,2E-03	2245
5º	23,3	31,0	38,8	3,0E-03	93	60	6,0E-03	1952
6º	31,0	31,0	31,0	3,4E-03	93	0	6,8E-03	1730
7º	15,5	20,7	25,9	3,1E-03	62	27	6,3E-03	1880
8º	20,7	20,7	20,7	3,4E-03	62	0	6,8E-03	1740
9º	7,8	10,3	12,9	3,0E-03	31	7	6,0E-03	1947
10º	10,3	10,3	10,3	3,2E-03	31	0	6,4E-03	1824

A figura 4.9 refere-se ao ensaio realizado com o CP 09-BO. Este ensaio apresentou medida de permeabilidade nas duas direções horizontais perpendiculares entre si, X e Y.

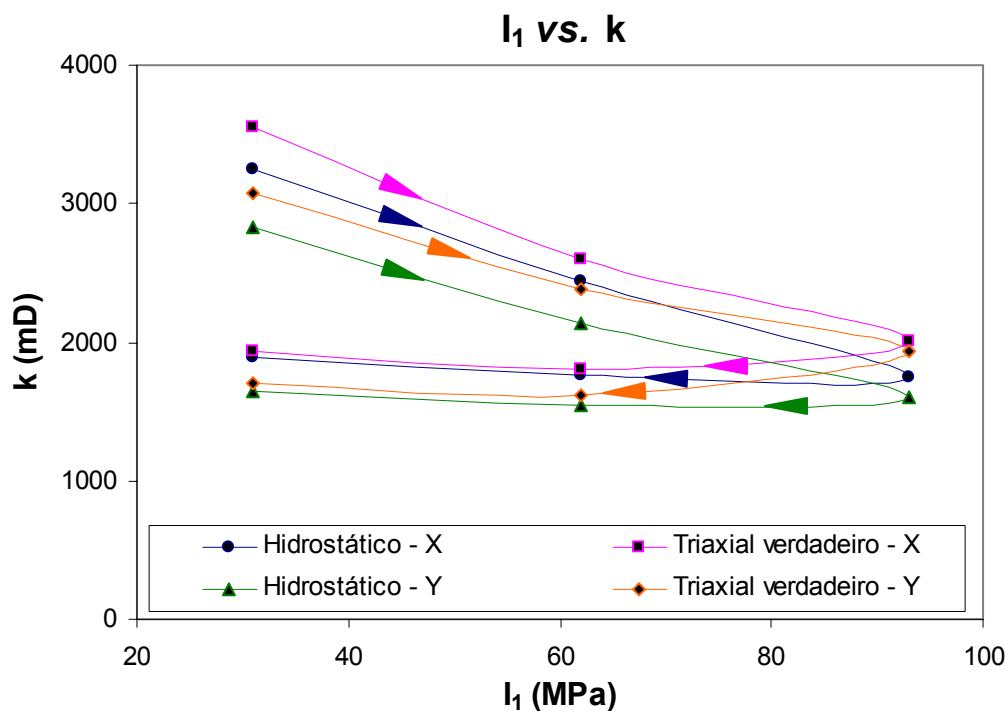


Figura 4.9 – Variação da permeabilidade nas direções X e Y, em função dos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro aplicados no arenito Botucatú 09-BO

Nas tabelas 4.16 e 4.17, respectivamente, estão mostrados a trajetória de tensão seguida pelo CP 09-BO e os valores da poro-pressão (u) e da permeabilidade (k_x e k_y), medidos durante o ensaio, nas direções X e Y, respectivamente.

Tabela 4.16 – Programa de ensaio aplicado no arenito Botucatú 09-BO para medida da permeabilidade na direção X

CP 09-BO - Permeabilidade na direção X

Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)			k_x (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}	ΔP (MPa)	
1º	7,8	10,3	12,9	1,7E-03	31	7	3,3E-03	3557
2º	10,3	10,3	10,3	1,8E-03	31	0	3,6E-03	3251
3º	15,5	20,7	25,9	2,3E-03	62	27	4,5E-03	2599
4º	20,7	20,7	20,7	2,4E-03	62	0	4,8E-03	2439
5º	23,3	31,0	38,8	2,9E-03	93	60	5,8E-03	2007
6º	31,0	31,0	31,0	3,4E-03	93	0	6,7E-03	1742
7º	15,5	20,7	25,9	3,6E-03	62	27	7,3E-03	1810
8º	20,7	20,7	20,7	3,8E-03	62	0	7,6E-03	1758
9º	7,8	10,3	12,9	3,4E-03	31	7	6,9E-03	1932
10º	10,3	10,3	10,3	3,6E-03	31	0	7,1E-03	1889

Tabela 4.17 – Programa de ensaio aplicado no arenito Botucatú 09-BO para medida da permeabilidade na direção Y

CP 09-BO - Permeabilidade na direção Y

Estágio	Tensão (MPa)			u (MPa)	Invariantes de tensão (MPa)			k_y (mD)
	σ_x	σ_y	σ_z		I_1	J_{2D}	ΔP (MPa)	
1º	7,8	10,3	12,9	1,9E-03	31	7	3,8E-03	3076
2º	10,3	10,3	10,3	2,1E-03	31	0	4,1E-03	2835
3º	15,5	20,7	25,9	2,5E-03	62	27	4,9E-03	2385
4º	20,7	20,7	20,7	2,7E-03	62	0	5,5E-03	2133
5º	23,3	31,0	38,8	3,0E-03	93	60	6,0E-03	1941
6º	31,0	31,0	31,0	3,7E-03	93	0	7,3E-03	1599
7º	15,5	20,7	25,9	3,2E-03	62	27	6,5E-03	1616
8º	20,7	20,7	20,7	3,3E-03	62	0	6,7E-03	1547
9º	7,8	10,3	12,9	3,0E-03	31	7	6,1E-03	1700
10º	10,3	10,3	10,3	3,1E-03	31	0	6,2E-03	1642

Nos quatro ensaios com o arenito Botucatu, assim como nos ensaios com o arenito Rio Bonito, pode ser observado que sob o estado de tensão hidrostático, a permeabilidade foi sempre menor do que sob o estado triaxial verdadeiro correspondente. A correspondência entre os dois estados de tensão está baseada no valor de I_1 . Estes resultados, portanto, também estão de acordo com os resultados de Al-Harthy *et al.* (1999) e Al-Harthy *et al.* (1998b), que estudaram variação da permeabilidade de arenitos, induzida por diferentes estados de tensão, inclusive sob tensão triaxial verdadeira.

Os resultados do atual trabalho, portanto, reforçam a idéia de que, além da permeabilidade de rocha variar com o nível de tensão aplicado nesta, a trajetória de tensões aplicada tem influência na variação da permeabilidade. Este comportamento já foi observado em muitos trabalhos, entre outros, Bruno *et al.* (1991), Rhett e Teufel (1992), Schutjens e de Ruig (1997), Ruistuen *et al.* (1999) e Khan e Teufel (2000).

O CP 09-BO, assim com o CP 05-RB, também não apresentou muita anisotropia de permeabilidade entre as direções X e Y. Contudo, a anisotropia do arenito Botucatu (CP 09-BO) foi maior do que a observada no arenito Rio Bonito. Porém, um comportamento contrário ao observado no arenito Rio Bonito (CP 05-RB) foi observado. No CP 09-BO, a anisotropia de permeabilidade, tanto sob o estado de tensão hidrostático quanto sob o triaxial verdadeiro, ao invés de aumentar como o aumento do nível de tensão aplicado, diminuiu.

A anisotropia de permeabilidade de arenitos está associada, sobretudo, à história de deposição dos grãos, ao processo de diagênese da rocha e ao estado de tensão atuante nesta. Não existindo, portanto, uma regra ou tendência geral para a evolução da anisotropia de permeabilidade destas rochas. Este comportamento, de aumento e diminuição da anisotropia horizontal de permeabilidade, em função do aumento do nível de tensão, também foi verificado por Al-Harthy *et al.* (1999) ao investigarem a anisotropia de permeabilidade de arenitos de afloramento e de reservatório.

As tabelas 4.18 e 4.19 apresentam a variação da anisotropia horizontal de permeabilidade induzida pelos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro, respectivamente. Pode ser observado que a anisotropia no CP 09-BO diminuiu com o aumento do estado de tensão atuante, tanto sob tensão hidrostática quanto

sob tensão triaxial verdadeira. O estado de tensão triaxial verdadeiro, como já foi mencionado acima, está representado da seguinte forma: σ_x ; σ_y ; σ_z .

Tabela 4.18 – Variação da anisotropia induzida no CP 09-BO pela variação do estado de tensão hidrostático

CP 09-BO		
<i>Sob estado de tensão hidrostática de 10,3 MPa</i>		
Direção	k (mD)	k_x/k_y
X	3251	1,15
Y	2835	
<i>Sob estado de tensão hidrostática de 31,0 MPa</i>		
Direção	k (mD)	k_x/k_y
X	1742	1,09
Y	1599	

Tabela 4.19 – Variação da anisotropia induzida no CP 09-BO pela variação do estado de tensão triaxial verdadeiro

CP 09-BO		
<i>Sob estado de tensão triaxial verdadeiro de 7,8: 10,3: 12,9 MPa</i>		
Direção	k (mD)	k_x/k_y
X	3557	1,16
Y	3076	
<i>Sob estado de tensão triaxial verdadeiro de 23,3: 31,0: 38,8 MPa</i>		
Direção	k (mD)	k_x/k_y
X	2007	1,03
Y	1941	

Assim como nos ensaios com o arenito Rio Bonito, a histerese de permeabilidade observada para os corpos de prova do arenito Botucatú foi sempre maior sob o estado de tensão triaxial verdadeiro. Desta maneira, com todos os arenitos ensaiados neste trabalho, foi observada a tendência da estrutura interna

dos corpos de prova sofrerem maior dano mecânico, quando sob estado de tensão triaxial verdadeiro. Uma indicação qualitativa do dano mecânico sofrido pela rocha pode ser obtida através da histerese da permeabilidade. Maior histerese sob um dado estado de tensão indica maior dano mecânico.

A tabela 4.20 apresenta o percentual de redução da permeabilidade nas direções X e Y, devido o ciclo de carregamento e descarregamento, para os estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro. Quanto maior o percentual de redução da permeabilidade, maior a histerese.

Tabela 4.20 – Redução da permeabilidade dos corpos de prova do arenito Botucatú em função do ciclo de carregamento e descarregamento

Triaxial verdadeiro: $\sigma_x = 7,8$ MPa, $\sigma_y = 10,3$ MPa e $\sigma_z = 12,9$ MPa			
Hidrostático: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 10,3$ MPa			
Permeabilidade (mD)			
Estado de tensão	Início do carregamento	Final do descarregamento	% de redução da permeabilidade
CP06-BO (direção X)			
Triaxial verdadeiro	8039	3805	52,7%
Hidrostático	7318	3531	51,7%
CP07-BO (direção X)			
Triaxial verdadeiro	7962	4017	49,5%
Hidrostático	6894	3657	47,0%
CP08-BO (direção X)			
Triaxial verdadeiro	3761	1947	48,2%
Hidrostático	3315	1824	45,0%
CP09-BO (direção X)			
Triaxial verdadeiro	3557	1932	45,7%
Hidrostático	3251	1889	41,9%
CP09-BO (direção Y)			
Triaxial verdadeiro	3076	1700	44,7%
Hidrostático	2835	1642	42,1%

O estado de tensão atuante nos corpos de prova Botucatú (tabela 4.20), tanto no início do carregamento quanto no final do descarregamento, sob tensão

hidrostática, corresponde a $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 10,3$ MPa. Sob tensão triaxial verdadeira, no início do carregamento e no final do descarregamento, o estado de tensão corresponde a $\sigma_x = 7,8$ MPa, $\sigma_y = 10,3$ MPa e $\sigma_z = 12,9$ MPa.

Através das tabelas 4.21 e 4.22, pode ser observada a sensibilidade da permeabilidade de cada um dos corpos de prova aos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro, respectivamente. Estas tabelas apresentam os valores da porosidade, da permeabilidade no início do carregamento e no final do carregamento (nas direções X e Y) e, por fim, o percentual de redução da permeabilidade dos corpos de prova (Berea, Rio Bonito e Botucatú).

Na tabela 4.21 (tensão hidrostática), os valores da permeabilidade no início do carregamento hidrostático são referentes ao estado de tensão $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 10,3$ MPa e os valores no final do carregamento correspondem ao estado de tensão $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 31,0$ MPa. Já na tabela 4.22 (tensão triaxial verdadeira), o início do carregamento corresponde ao estado de tensão $\sigma_x = 7,8$ MPa, $\sigma_y = 10,3$ MPa e $\sigma_z = 12,9$ MPa e o final do carregamento corresponde ao estado de tensão $\sigma_x = 23,3$ MPa, $\sigma_y = 31,0$ MPa e $\sigma_z = 38,8$ MPa.

Tabela 4.21 – Sensibilidade à tensão da permeabilidade dos arenitos sob estado de tensão hidrostático

Início do carregamento: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 10,3$ MPa Final do carregamento: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 31,0$ MPa							
CP	Arenito	Porosidade	PERMEABILIDADE (mD)				
			Direção	Início do carregamento	Final do carregamento	Percentual de redução	Percentual médio de redução
01-BE	Berea	22,4%	X	1616	782	51,6%	60,9%
03-RB	Rio Bonito	21,0%	X	469	193	58,8%	
04-RB	Rio Bonito	20,3%	X	498	216	56,6%	
05-RB	Rio Bonito	22,3%	X	449	180	59,9%	
			Y	446	142	68,2%	48,0%
06-BO	Botucatú	24,3%	X	7318	3425	53,2%	
07-BO	Botucatú	27,2%	X	6894	3515	49,0%	
08-BO	Botucatú	23,9%	X	3315	1730	47,8%	
09-BO	Botucatú	26,9%	X	3251	1742	46,4%	
			Y	2835	1599	43,6%	

Tabela 4.22 – Sensibilidade à tensão da permeabilidade dos arenitos sob estado de tensão triaxial verdadeiro

Início do carregamento: $\sigma_x = 7,8$ MPa; $\sigma_y = 10,3$ MPa; $\sigma_z = 12,9$ MPa

Final do carregamento: $\sigma_x = 23,3$ MPa; $\sigma_y = 31,0$ MPa; $\sigma_z = 38,8$ MPa

CP	Arenito	Porosidade	PERMEABILIDADE (mD)				Percentual médio de redução
			Direção	Início do carregamento	Final do carregamento	Percentual de redução	
03-RB	Rio Bonito	21,0%	X	501	246	50,9%	53,6%
04-RB	Rio Bonito	20,3%	X	518	267	48,5%	
05-RB	Rio Bonito	22,3%	X	492	227	53,9%	
			Y	481	187	61,1%	
06-BO	Botucatú	24,3%	X	8039	3764	53,2%	46,1%
07-BO	Botucatú	27,2%	X	7962	4080	48,8%	
08-BO	Botucatú	23,9%	X	3761	1952	48,1%	
09-BO	Botucatú	26,9%	X	3557	2007	43,6%	
			Y	3076	1941	36,9%	

As tabelas 4.21 e 4.22 ainda demonstram que o arenito Rio Bonito e o Botucatú apresentaram maior sensibilidade da permeabilidade à tensão hidrostática do que à tensão triaxial verdadeira. O arenito Rio Bonito sob tensão hidrostática apresentou um percentual médio de redução da permeabilidade de 60,9%, enquanto que sob tensão triaxial verdadeira o percentual foi de 53,6%. A permeabilidade do arenito Botucatú apresentou o mesmo comportamento, de maior sensibilidade ao estado de tensão hidrostático. Sob tensão triaxial verdadeira, a permeabilidade do Botucatú reduziu em média 46,1%, enquanto que sob tensão hidrostática, o percentual médio de redução da permeabilidade foi de 48%.

A maior influência do estado de tensão hidrostático na variação da permeabilidade, observada a partir dos resultados dos ensaios do presente trabalho, pode ser explicada, na opinião do autor, pelo maior efeito de redução dos raios médios das gargantas dos poros, que este estado de tensão provoca. A redução dos raios médios das gargantas dos poros significa redução da área da seção transversal das trajetórias de fluxo, o que leva à redução da permeabilidade.

Vale ressaltar que a tabela 4.22, que apresenta os resultados dos corpos de prova submetidos a um estado de tensão triaxial verdadeiro, não apresenta os dados do CP 02-BE, arenito Berea, também submetido a tensões triaxiais verdadeiras. Isto é devido ao fato da trajetória de tensão seguida pelo CP 02-BE

ser diferente da que foi seguida pelos outros corpos de prova, não podendo, desta maneira, serem utilizados para comparação, os resultados referentes ao CP 02-BE.

Os resultados apresentados na tabela 4.21 estão de acordo os trabalhos de Fatt e Davis (1952), Vairogs *et al.* (1971), Yale (1984), Kilmer *et al.* (1987) e Holt (1990), onde também foi observada a tendência de quanto menor a permeabilidade inicial do arenito, maior é a sua sensibilidade ao aumento da tensão hidrostática.

No atual trabalho, o arenito Botucatú apresentou os maiores valores de permeabilidade inicial e, sob aumento do nível de tensão hidrostática (tabela 4.21), um percentual médio de redução da mesma de 48%. O corpo de prova do arenito Berea, que apresentou permeabilidade inicial menor que a do Botucatú e maior que a do Rio Bonito, sob o mesmo estado de tensão, teve sua permeabilidade reduzida, em média, 51,6%. Já o arenito Rio Bonito, que apresentou os menores valores de permeabilidade inicial, mostrou a maior média de redução de permeabilidade, 60,9%, quando sob carregamento hidrostático, ou seja, maior sensibilidade da permeabilidade à tensão hidrostática.

O mesmo comportamento, de maior sensibilidade à tensão para arenitos com menores valores de permeabilidade inicial, foi observado ao comparar os resultados obtidos com os arenitos Rio Bonito e Botucatú, sob aumento do estado de tensão triaxial verdadeiro (tabela 4.22). O arenito Botucatú, de maior permeabilidade inicial, apresentou redução média de 46,1%, enquanto que o Rio Bonito, de menor permeabilidade inicial, em média, teve a sua permeabilidade reduzida em 53,6%.

Vale ressaltar que no trabalho de Davies e Davies (2001), vários corpos de prova de arenito da formação Travis Peak, com valores similares de permeabilidade inicial, apresentaram diferentes sensibilidades ao aumento de carregamento hidrostático, como mostra a figura 4.10.

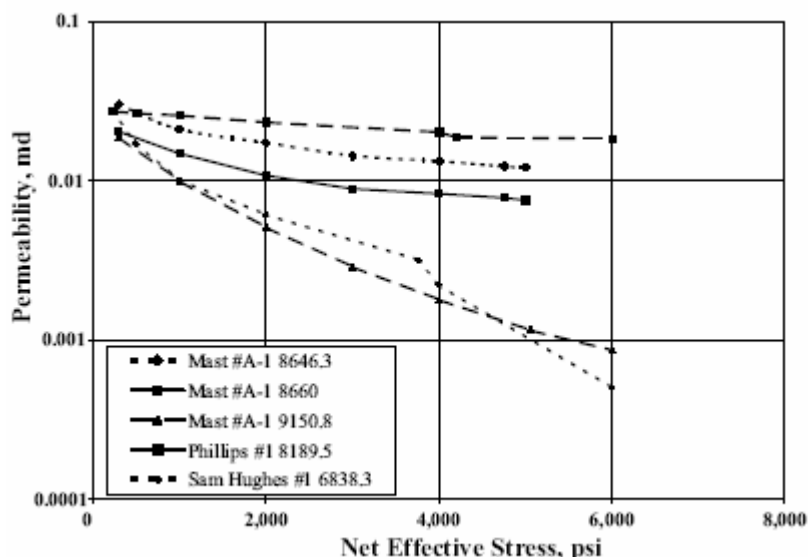


Figura 4.10 – Curvas de variação da permeabilidade de corpos de prova de arenito com permeabilidade inicial similar, mostrando diferentes sensibilidades ao aumento de carregamento hidrostático (Davies e Davies, 2001)

Esta contradição de resultados, com relação à associação da sensibilidade da permeabilidade de arenitos ao valor da permeabilidade inicial dos mesmos, talvez suporte a conclusão do autor e também de trabalhos anteriores, de que não existe um único relacionamento entre permeabilidade e tensão (Fatt e Davis, 1952; Dobrynin, 1962; Thomas e Ward, 1972; Walls, 1982; Jamtveit e Yardley, 1997; Han e Dusseault, 2003).

Um outro comportamento que pode ser observado, tanto na tabela 4.21 quanto na 4.22, é a tendência de maior sensibilidade à tensão (independente do estado de tensão aplicado) apresentada pelos arenitos de menor porosidade. Com porosidade média de 25,6% e sob tensão hidrostática, o arenito Botucatú apresentou redução de permeabilidade média de 48,0%. O Berea (CP 01-BE), sob o mesmo estado de tensão e com 22,4% de porosidade, apresentou redução de 51,6%. Já o arenito Rio Bonito, com os menores valores de porosidade, em média 21,2%, e ainda sob tensão hidrostática, apresentou 60,9% de redução média da permeabilidade.

No caso da sensibilidade à tensão dos arenitos sob um estado de tensão triaxial verdadeiro, em função do valor da porosidade (tabela 4.22), o arenito Rio Bonito, menos poroso (21,2% de porosidade média), teve sua permeabilidade reduzida, em média 53,6%. O Botucatú, com porosidade média maior (25,6%), apresentou uma menor redução média da permeabilidade, 46,1%. Ficando então,

demonstrada a tendência dos arenitos deste trabalho, com menor porosidade, de apresentarem maior sensibilidade da permeabilidade à tensão.

O trabalho de Bruno *et al.* (1991), com um equipamento de ensaio triaxial convencional, apresenta resultados com comportamento que vão de encontro ao observado neste trabalho, em se tratando da maior sensibilidade da permeabilidade à tensão, para rochas com menores porosidade e permeabilidade inicial. Bruno *et al.* (1991) investigaram a evolução da permeabilidade de três diferentes arenitos sob aumento do estado de tensão triaxial axisimétrico. Os autores observaram que o arenito mais poroso e de maior permeabilidade inicial foi o que apresentou permeabilidade mais sensível à tensão. Contudo, este arenito mais poroso e de maior permeabilidade era o mais fracamente cimentado, dentre os ensaiados. O grau de cimentação entre os grãos do arenito foi usado para justificar o resultado.

Assim como Bruno e Nelson (1990) e Bruno *et al.* (1991), o autor do presente trabalho considera que a quantidade e a resistência da cimentação dos grãos de arenito são mais determinantes do que a mineralogia destes grãos, no estudo da sensibilidade à tensão da permeabilidade destas rochas. As propriedades dos cimentos dos grãos mais fortemente controlam a redução da permeabilidade, devido o dano em rocha sedimentar principalmente ocorrer nos contornos dos grãos. Não deixando, é claro, de ser relevante informações sobre a mineralogia dos grãos.

Neste trabalho foi observada uma similaridade entre a evolução da permeabilidade sob o estado de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro. Isto pode ser conferido nas figuras 4.3 a 4.9, onde estão mostradas as curvas de evolução da permeabilidade, em função dos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro. As curvas apresentam uma mesma tendência de evolução. Existe sim, uma certa distância, na direção vertical, entre as curvas, distância esta que representa o efeito da tensão desviadora na permeabilidade. Porém, a tendência da evolução é a mesma. Este comportamento também foi relatado nos trabalhos de Zhu e Wong (1997) e Heiland e Raab (2001), que estudaram a variação da permeabilidade de arenito sob estados de tensão hidrostático e triaxial axisimétrico.

Com relação ao efeito da tensão desviadora, mencionado acima, vale ressaltar que no caso do CP 02-BE, apresentado na figura 4.2 (arenito Berea), o

efeito da tensão desviadora (J_{2D}) está mais pronunciado do que o observado nas figuras referentes aos resultados do arenito Rio Bonito e Botucatú (figuras 4.3 a 4.9). Efeito mais pronunciado significa maior redução da permeabilidade e, este é devido à diferença entre o nível de tensão desviadora que foi atingido nos ensaios. Com o CP 02-BE, pode ser visto na tabela 4.3, que o J_{2D} chegou a 428 MPa, enquanto que nos ensaios com os arenitos Rio Bonito e Botucatú, o valor máximo de J_{2D} foi 60 MPa (ver, por exemplo, a tabela 4.17).

Rochas sedimentares detríticas (arenito), de uma forma geral, são constituídas por grãos, poros (vazios) e cimentos intergranulares. O arranjo microscópico destes constituintes, juntamente com a mineralogia da rocha, têm um papel fundamental na determinação da permeabilidade da rocha. Portanto, não é simplesmente a mineralogia da rocha, a responsável pela sua permeabilidade. Em se tratando de permeabilidade induzida pelo estado de tensão atuante na rocha, a geometria e o nível do estado de tensão podem ser acrescentados como fatores também determinantes da variação da permeabilidade de uma rocha. A geometria do estado de tensão corresponde ao arranjo tridimensional das tensões principais aplicadas, enquanto que o nível do estado de tensão corresponde à magnitude das tensões.

Como os contatos individuais dos grãos não são regulares, um estado de tensão macroscópico produz uma distribuição não homogênea de tensão na microestrutura, alterando assim, o arranjo e a forma das partículas e poros e, conseqüentemente a permeabilidade do material rochoso. Geralmente, quando a tensão aplicada é anisotrópica, o tensor permeabilidade resultante se torna anisotrópico.

Os mecanismos responsáveis pela diferença na redução da permeabilidade das rochas, quando carregamentos paralelos e perpendiculares à direção de fluxo são aplicados, são a forma e a orientação das microfissuras induzidas por tensão. A permeabilidade é mais influenciada por canais de fluxo orientados paralelamente à direção de fluxo. As aberturas e, conseqüentemente, as propriedades de transporte destas são mais influenciadas por carregamento perpendicular às suas orientações. O resultado é que um campo de tensão não-hidrostático pode induzir anisotropia de permeabilidade por fechamento preferencial dos canais de fluxo alinhados mais perpendicularmente à direção de fluxo.

Um campo de tensão desviadora atuando em uma rocha resulta, em escala microscópica, em um sistema de tensão bem complexo, que fortemente afeta as trajetórias de nucleação e propagação de fissuras, que por sua vez, dependem da mineralogia, do tipo de rocha e do estado de tensão presente. As fissuras podem alterar a permeabilidade, pois estas podem abrir ou fechar, aumentando ou diminuindo, respectivamente, a área da seção transversal das trajetórias de fluxo.

Sob altas condições de tensão desviadora, a redução da permeabilidade induzida pela compressão pode ser neutralizada pela ampliação e criação de novos canais de fluxo na direção da tensão máxima. Estas ampliação e criação ocorrem devido aos danos cisalhante e de tração, sofridos pelos cimentos intergranulares, e à dilatação das microfissuras induzidas por tensão, aumentando a permeabilidade na direção correspondente. Este comportamento de redução e posterior aumento de permeabilidade é típico de rochas de baixa porosidade.

As mudanças físicas relacionadas à tensão, que podem ser citadas como causas para as variações nas relações entre grãos individuais de areia (grau de empacotamento dos grãos), são: deslizamento e rotação de grãos, mudanças na forma dos grãos e fraturamento dos grãos. Cada uma destas resulta em um aumento na densidade do empacotamento dos grãos de areia, afetando diretamente a geometria do sistema dos poros, que por sua vez, tem influência já conhecida na permeabilidade.

Em se tratando de anisotropia, esta é comum em muitas rochas, mesmo sem estrutura descontínua, devido às orientações preferenciais de grãos minerais ou história de tensão direcional. Mesmo corpos de prova de rocha aparentemente livres de estruturas acamadas, como os que foram utilizados neste trabalho (arenitos de camadas espessas), podem ter propriedades direcionais. Isto, porque estes, muito provavelmente, foram submetidos a tensões principais diferentes durante o processo de transformação dos sedimentos em rocha (diagênese).

A anisotropia de permeabilidade ou a dependência direcional de propriedades de transporte leva os fluidos a escoarem sob diferentes taxas e para diferentes direções. Podem ser citados dois tipos de anisotropia: a microscópica, causada pela orientação preferencial ou alinhamento do arcabouço da rocha e a macroscópica, causada por uma seqüência de camadas paralelas e homogêneas de rochas, cada uma delas com suas próprias características. Portanto, em se tratando de campo, a anisotropia total é uma combinação da anisotropia macroscópica

(diferentes camadas de diferentes propriedades) e da microscópica (anisotropia dentro de cada camada).

Ainda no campo, a depleção de um reservatório aumenta a tensão efetiva atuante na rocha, que por sua vez, provoca mecanismos de deformação de escala microscópica, como alteração da área de contato Hertziano entre grãos, crescimento e fechamento de microfissuras, quebra de cimento, rotação e deslizamento de grão, assim como deformação plástica dos cristais dos grãos. Rochas, freqüentemente, mostram redução de volume (compactação), perda de porosidade e conseqüentemente, redução de permeabilidade durante a produção de um reservatório (depleção).