

4 Resultados e Discussões

4.1. Porosidade

As medidas de comprimento e de diâmetro da amostra de rocha foram feitas cada uma três vezes com o plano de orientação sendo alterado em aproximadamente 120° para cada medida. O valor considerado para tais medidas foi a média destes três valores, conforme Tabela 7 e Tabela 8 para as amostras 1 e 2 respectivamente.

Tabela 7 Medidas de diâmetro e comprimento da amostra 1

	<i>Valores medidos em cm</i>			<i>Média (cm)</i>
Comprimento	8,875	8,840	8,865	8,860
Diâmetro	3,800	3,790	3,800	3,796

Tabela 8 Medidas de diâmetro e comprimento da amostra 2

	<i>Valores medidos em cm</i>			<i>Média (cm)</i>
Comprimento	8,300	8,305	8,295	8,300
Diâmetro	3,800	3,795	3,795	3,796

Com base nestas medidas, o volume total da amostra 1 foi de 100,3ml, enquanto que o da amostra 2 foi de 93,9 ml.

A Tabela 9 apresenta alguns outros dados medidos que são necessários para o cálculo da porosidade das duas amostras de Bentheimer. Para este cálculo, foi admitido que a rocha é incompressível, ou seja sua porosidade a 20°C será a mesma que a 44°C, temperatura em que o experimento ocorrerá. Desta forma, a amostra foi saturada a 20°C, mesma temperatura em que foi medida a massa específica da solução salina.

Tabela 9 Dados medidos usados para o cálculo da porosidade

		<i>Valor</i>
Massa específica da solução salina (T=20°C)		1,0089 g/ml
Massa da amostra seca	1	189,9 g
	2	190,4 g
Massa da amostra saturada com solução salina	1	211,9 g
	2	211,5 g

Finalmente, a Tabela 10 indica o volume poroso e a porosidade das amostras 1 e 2.

Tabela 10 Volume poroso e porosidade das duas amostras

	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>
Volume Poroso (ml)	21,81	20,81
Porosidade (%)	21,7	22,2

4.2. Permeabilidade Absoluta

Conforme já foi dito, as duas amostras fazem parte de uma única que foi dividida em duas. Desta forma, a permeabilidade absoluta foi medida apenas para a amostra 1. Em relação a amostra 2, apenas alguns pontos foram medidos para confirmar o valor da permeabilidade absoluta.

Para o cálculo da permeabilidade absoluta da amostra 1, a solução salina foi injetada a vazões de 3,0 a 10,0 mL/min por pelo menos 3 VPs (volumes porosos). Estes valores de vazão foram definidos por conta da alta permeabilidade da amostra verificada na primeira injeção. Valores mais baixos, além de serem mais demorados, estariam vinculados a maiores erros com possíveis ruídos, já que a pressão medida já estava relativamente baixa. O diferencial de pressão marcado na Tabela 11 foi uma média ponderada dos valores medidos a cada meio minuto (0,5 minutos).

Tabela 11 Valores de vazão e diferencial de pressão usados para o cálculo da permeabilidade absoluta para a amostra 1

Vazão (mL/min)	Diferencial de pressão (psi)
3,0	0,65
4,0	0,77
5,0	0,89
6,0	1,00
7,0	1,09
8,0	1,13
9,0	1,20
10,0	1,36

Em seguida, foi realizada uma conversão de unidades para as unidades de Darcy: cm³/s (vazão) e atm (pressão). Nestas unidades, o gráfico da Figura 52 mostra o comportamento praticamente linear da pressão em função da vazão, estando assim de acordo com a Lei de Darcy. Desta forma, com a inclinação da reta, é possível calcular a permeabilidade absoluta da amostra 1, que é de aproximadamente 2107 mD.

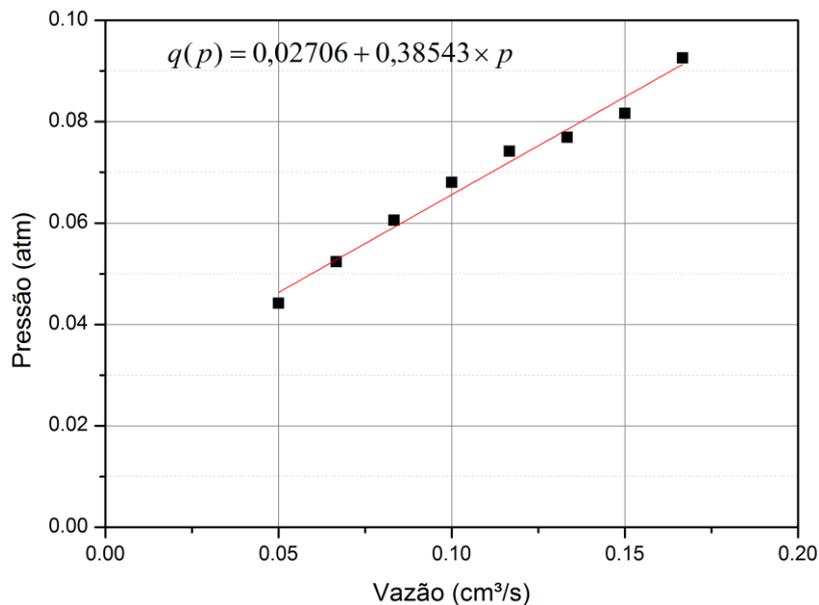


Figura 52 Comportamento praticamente linear da pressão com a vazão para amostra 1

Mesmo com menos pontos medidos, a amostra 2, conforme esperado, apresentou um valor de permeabilidade absoluta muito próximo ao encontrado para a amostra 1. A Figura 53 apresenta o comportamento da pressão com a

vazão e verifica-se que a inclinação da curva encontrada é bem próxima da apresentada na Figura 52. Para a amostra 2, a permeabilidade absoluta medida foi de 1936mD.

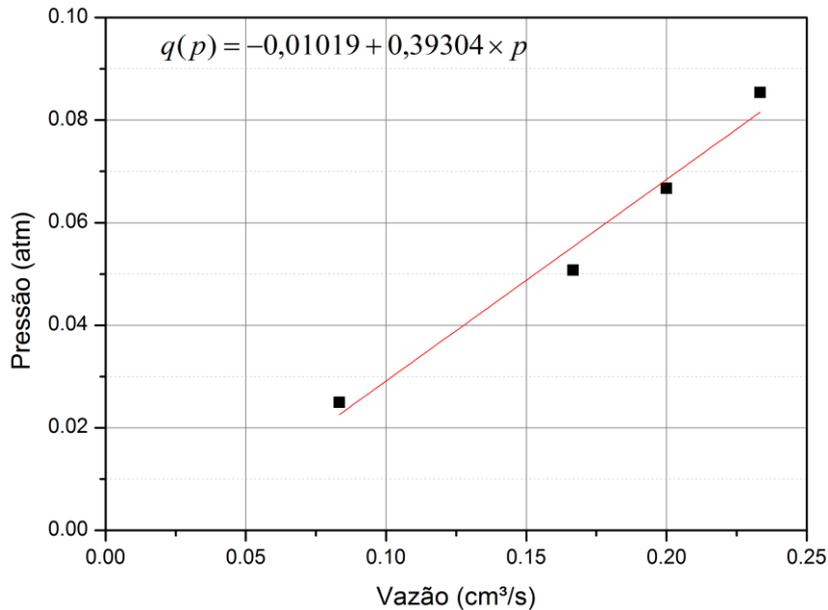


Figura 53 Comportamento da pressão x vazão para a amostra 2

4.3.

Permeabilidade Relativa – solução salina e óleo

4.3.1.

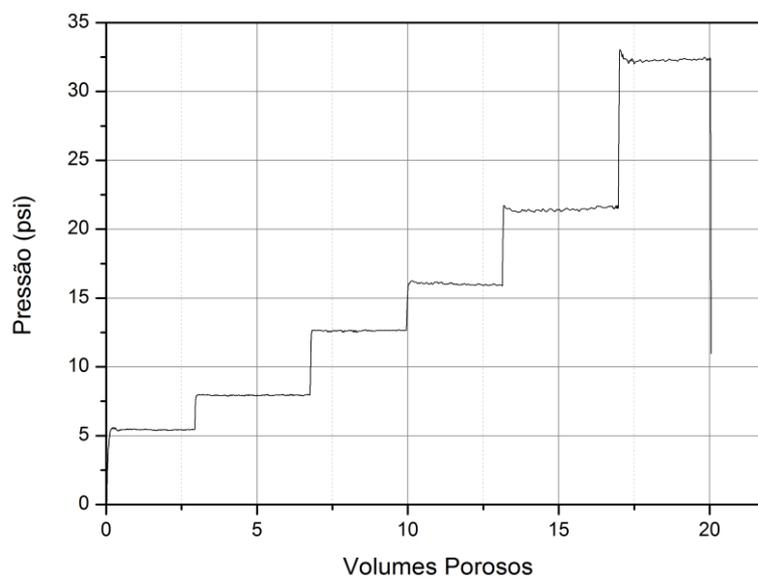
Amostra 1 – CASO BASE

Primeiramente, somente óleo foi injetado para medir a saturação conata de solução salina e, também, a permeabilidade efetiva a esta saturação. A saturação conata (S_{wc}) foi medida em aproximadamente 9,70%.

A Tabela 12 apresenta as diferentes vazões de óleo usadas e os respectivos diferenciais de pressão medidos. Já a Figura 54 apresenta o comportamento do diferencial de pressão em função do tempo (representado em forma adimensional em volumes porosos). Percebe-se que a pressão se estabilizou quase que instantaneamente, mantendo-se assim por aproximadamente 3 VPs.

Tabela 12 Diferencial de pressão medido para cada vazão de óleo

Vazão de óleo (ml/min)	Pressão (psi)
0,50	5,45
0,75	7,95
1,00	10,20
1,20	12,60
1,50	16,00
2,00	21,56
3,00	32,33

**Figura 54** Comportamento da pressão em função do óleo injetado (em VP)

A partir destes dados, a permeabilidade efetiva do óleo na saturação de água conata é de aproximadamente 1826 mD. A permeabilidade relativa é de 86,5%.

Em seguida, óleo e água foram injetados simultaneamente. Uma vazão total de 2,0 ml/min foi usada para as curvas de permeabilidade relativa na amostra 1. O número de capilaridade usado nos experimentos desta amostra é de $6,1 \times 10^{-7}$.

Nesta primeira curva foram medidos seis pontos, conforme pode-se verificar na Tabela 13. A Figura 55 apresenta o comportamento do diferencial de pressão para os seis pontos em função do volume total de fluidos injetado. Uma observação importante foi a relativa rapidez com que o regime permanente foi alcançado. Além disso, o diferencial de pressão não oscilou muito.

A saturação foi calculada baseando-se no balanço de massa e também se encontra na Tabela 13. Toda a solução salina e óleo injetados foram contabilizados, assim como suas respectivas produções. A Figura 56 apresenta os tubos com óleo e solução salina provenientes do coletor de frações. Observa-se, para os seis pontos, que a partir do terceiro tubo a razão da produção das duas fases é praticamente constante. Vale ressaltar que o último tubo geralmente possui um valor menor de fluidos produzidos por conta da injeção ter sido finalizada antes do tempo suficiente para enchê-lo. Ainda assim, até que o sistema fosse completamente despressurizado, a produção de fluidos continuou ocorrendo de forma cada vez mais lenta. Este tempo que o sistema levou para ser despressurizado foi respeitado e os fluidos foram devidamente contabilizados. As respectivas permeabilidades relativas também estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 Pontos da curva de permeabilidade relativa da solução salina e óleo – amostra 1

<i>Ponto</i>	<i>Fluido injetado</i>	<i>Vazão (ml/min)</i>	<i>Pressão (psi)</i>	<i>Saturação (%)</i>	<i>Permeabilidade Relativa</i>
1	Óleo	2,0	21,56	90,3	0,876
	Solução Salina	0		9,70	0
2	Óleo	1,6	20,25	80,16	0,661
	Solução Salina	0,4		19,84	0,001
3	Óleo	1,2	17,30	77,31	0,630
	Solução Salina	0,8		22,69	0,004
4	Óleo	1,0	15,01	77,11	0,621
	Solução Salina	1,0		22,89	0,003
5	Óleo	0,8	12,27	75,77	0,604
	Solução Salina	1,2		24,23	0,006
6	Óleo	0,4	7,44	74,30	0,508
	Solução Salina	1,6		25,70	0,012
7	Óleo	0	1,44	65,52	0
	Solução Salina	2,0		34,48	0,080

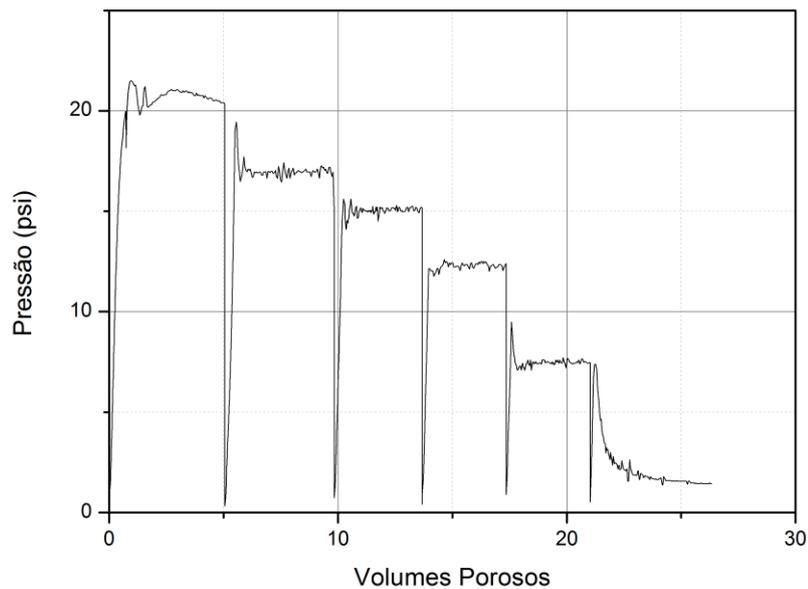


Figura 55 Comportamento da pressão em função do volume total injetado

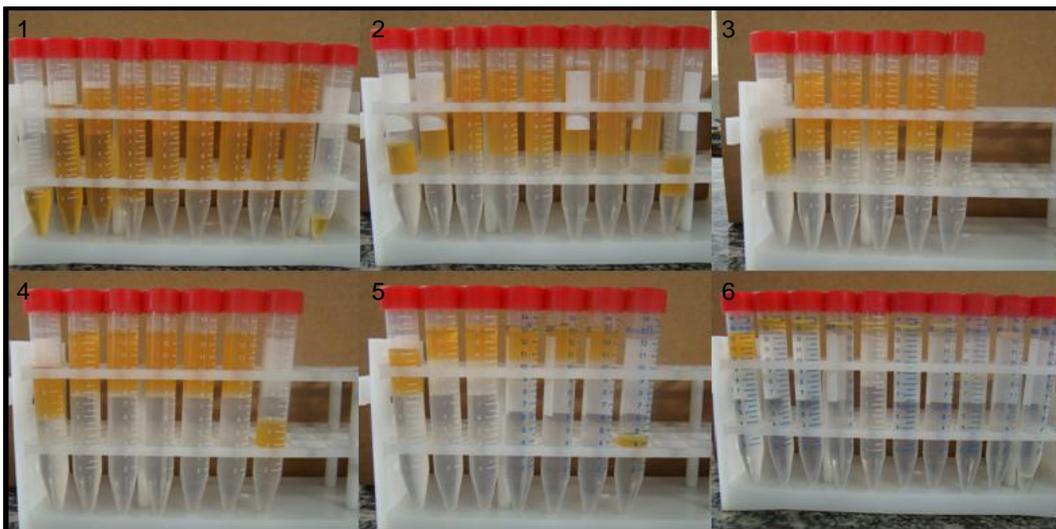


Figura 56 Recipiente contendo produção de óleo e solução salina para cada ponto

O ponto 1 apresentado na Tabela 13 serve somente para indicar que o ponto foi medido. A permeabilidade relativa usada na curva foi o valor medido com os dados da Tabela 12. Vale ressaltar que a diferença encontrada na permeabilidade relativa de apenas um ponto para o medido com vários pontos difere em aproximadamente 1%.

Por este motivo e também para não variar o Ca, que pode resultar em variações da saturação, os pontos de saturação máxima de óleo das próximas

curvas serão medidos com apenas um ponto, diferentemente de como foi feito nesta curva.

A Figura 57 apresenta a curva de permeabilidade relativa do escoamento da solução salina e óleo. Na sequência do trabalho, esta curva será mostrada como caso base de comparação com todas as curvas do escoamento de emulsão e óleo, cujos números de capilaridade sejam $6,1 \times 10^{-7}$. As saturações mais importantes desta curva estão destacadas na Tabela 14.

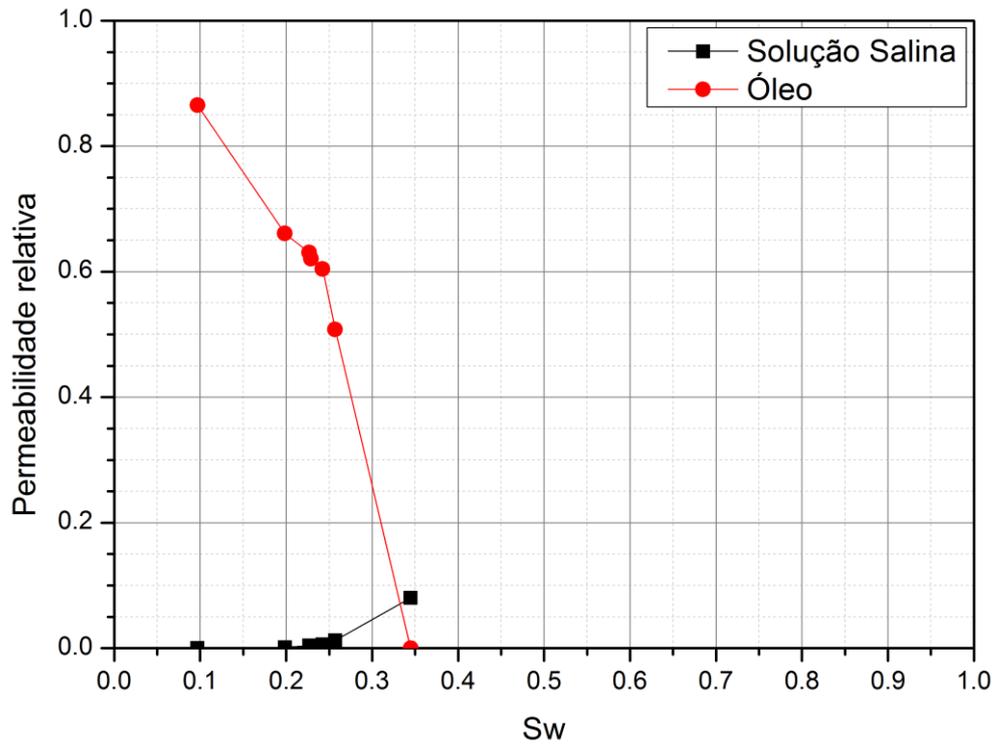


Figura 57 Curva de permeabilidade relativa da solução salina e óleo para a amostra 1

Tabela 14 Saturações relevantes da injeção de solução salina na amostra 1

Saturação conata de solução salina (S_{wc})	9,70%
Saturação de óleo residual (S_{or})	65,52%

A saturação conata medida é menor do que os valores tipicamente encontrados pela indústria, assim como a saturação residual de óleo que é maior. O motivo disso é a alta razão de viscosidade entre o óleo e o fluido deslocante nas condições do experimento. Conforme Tabela 5, a razão das viscosidades vale 169,5.

Ao final do último ponto, a solução salina deslocou 27,4% de todo o óleo existente inicialmente na amostra. Isto foi calculado através das diferenças das saturações de óleo nas condições inicial e final da curva, sendo este valor dividido pela saturação inicial (saturação máxima de óleo).

4.3.2. Amostra 2

Para esta amostra, como o número de capilaridade é menor, ao injetar óleo, um menor diferencial de pressão é atingido e, naturalmente, a saturação conata de solução salina será maior. A vazão total usada foi de 0,4 ml/min, levando a um número de capilaridade de $1,2 \times 10^{-7}$. A saturação conata foi de 19,63%, valor que é praticamente o dobro da alcançada na amostra 1. O diferencial de pressão atingido foi de 4,42 psi, o que leva a uma permeabilidade relativa de 90,8%.

Em seguida, a Tabela 15 apresenta os pontos medidos para a curva de permeabilidade relativa; a mesma pode ser vista na Figura 59. Além disso, a Tabela 16 indica as saturações mais importantes neste processo. Desta vez, devido ao longo tempo de execução do experimento (cada ponto dura em média cinco vezes mais do que na amostra 1), apenas 6 pontos foram medidos. O comportamento da pressão durante a medida dos pontos 2 a 6 se encontra na Figura 58.

Tabela 15 Pontos da curva de permeabilidade relativa da solução salina e óleo – amostra 2

Ponto	Fluido injetado	Vazão (ml/min)	Pressão (psi)	Saturação (%)	Permeabilidade Relativa
1	Óleo	0,40	4,42	19,67	0,908
	Solução Salina	0		80,33	0
2	Óleo	0,32	4,52	28,53	0,698
	Solução Salina	0,08		71,47	0,001
3	Óleo	0,20	3,79	30,99	0,543
	Solução Salina	0,20		69,01	0,003
4	Óleo	0,16	3,28	34,80	0,493
	Solução Salina	0,24		65,20	0,005
5	Óleo	0,08	2,00	36,74	0,402
	Solução Salina	0,32		63,26	0,010
6	Óleo	0	0,37	42,04	0
	Solução Salina	0,40		57,96	0,070

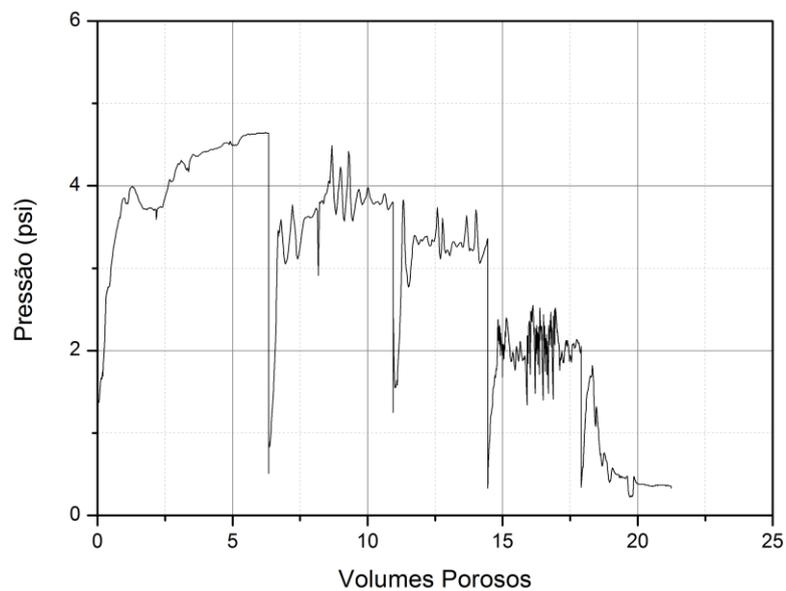


Figura 58 Comportamento da pressão em função do volume total injetado

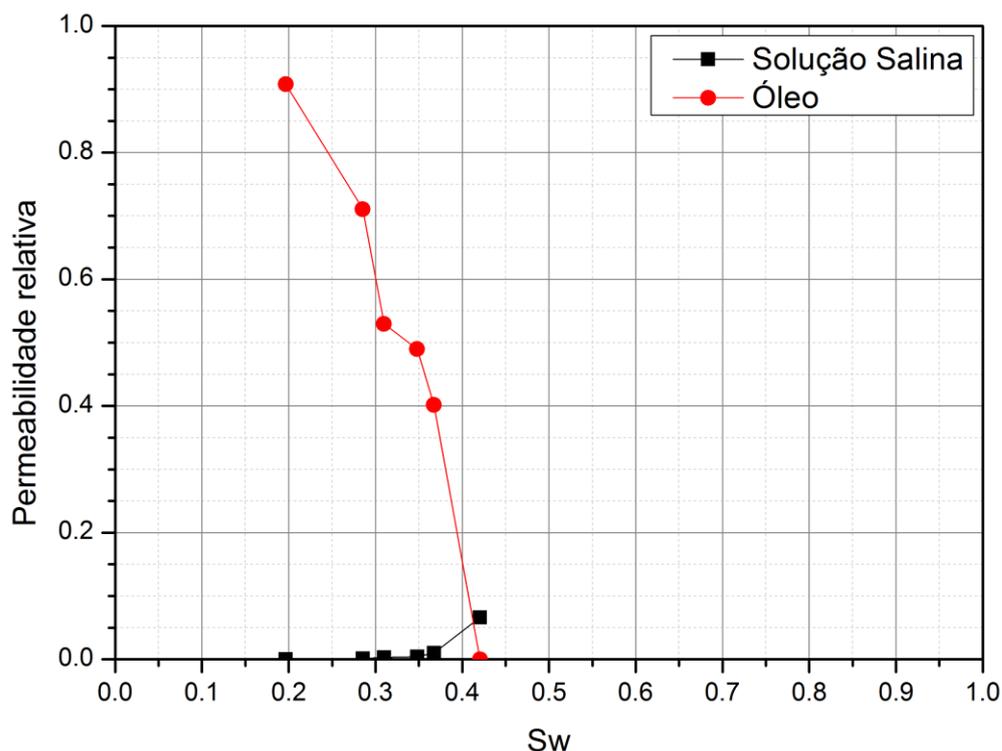


Figura 59 Curva de permeabilidade relativa da solução salina e óleo para a amostra 2

Na sequência do trabalho, esta curva será mostrada como base de comparação com todas as curvas do escoamento de emulsão deslocando óleo, cujos números de capilaridade sejam $1,2 \times 10^{-7}$.

Tabela 16 Saturações relevantes da injeção de solução salina na amostra 2

Saturação conata de solução salina (S_{wc})	19,67%
Saturação de óleo residual (S_{or})	57,96%

A saturação de óleo residual desta amostra é menor que o encontrado na amostra 1. Isto pode ser explicado pela presença mais intensa das forças capilares (C_a menor). Como a rocha é molhada pela solução salina, forças capilares são capazes de deslocar uma quantidade maior de óleo. Outro motivo que pode ter levado a isso, é a diferença da saturação conata de solução salina. Como as condições iniciais das duas amostras são diferentes, a S_{or} pode ter sido influenciada.

Apesar da diferença nas saturações, a quantidade de óleo recuperado nas duas amostras com solução salina foi muito parecida. Nesta amostra, 27,8% do

óleo foi recuperado, valor praticamente igual ao percentual de óleo recuperado na amostra 1 pela solução salina.

4.4. Permeabilidade Relativa – emulsão O-W e óleo

4.4.1. Efeito da Emulsão Amostra 1 – $Ca = 6,1 \times 10^{-7}$

Novamente foi injetado apenas óleo a uma vazão de 2,0 ml/min por um pouco mais de 5 VPs – tempo suficiente para o diferencial de pressão permanecer estável. A Figura 60 apresenta o comportamento da pressão ao longo desta injeção. Observa-se que, a partir do segundo volume poroso injetado, a pressão praticamente se mantém estável na faixa de 21,8 psi. A saturação medida foi mais uma vez 9,70% e a permeabilidade relativa medida foi de 86,7%. Essas medidas fazem com que a amostra 1 praticamente retorne às condições iniciais expostas no item 4.3.1.

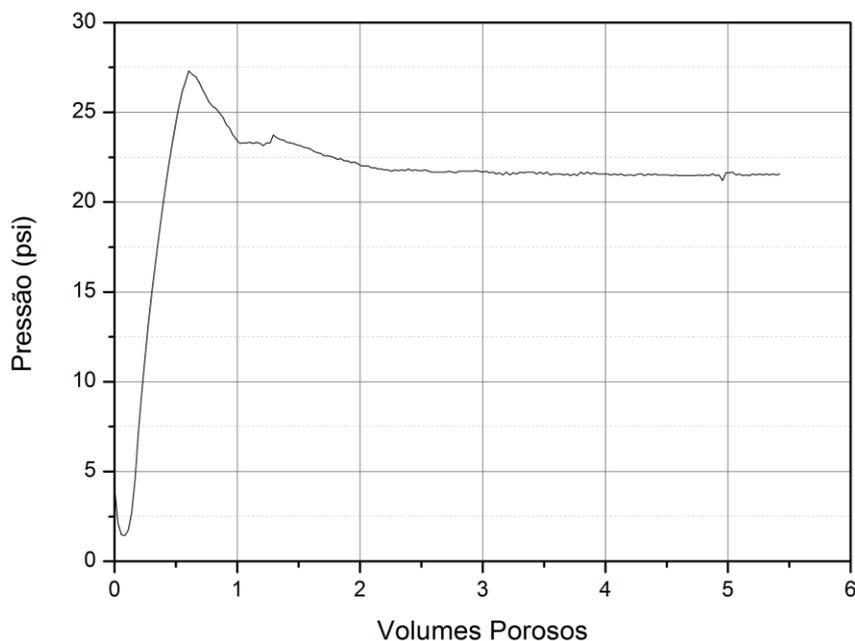


Figura 60 Injeção de óleo na amostra 1

A primeira curva medida foi com uma emulsão com 3% de óleo (fase dispersa); ela foi preparada em um béquer de 1 litro utilizando o Ultra-Turrax T25 (Figura 38) na rotação de 24000 rpm durante dois minutos. A distribuição de tamanho de gota (Figura 61) foi medida na saída do cilindro de acrílico (no ponto

mostrado na Figura 23) antes da emulsão ser injetada (antes do ponto 2 da Tabela 17) e, novamente, após o último ponto medido para confirmar o tamanho das gotas.

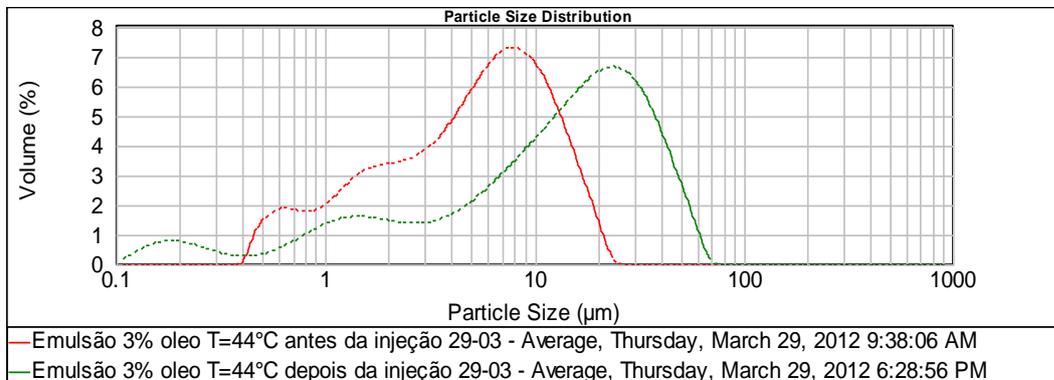


Figura 61 Distribuição do tamanho de gotas para a emulsão com 3% de óleo

A medida realizada antes da injeção da emulsão mostra que 90% das gotas são menores que 14,0 micrômetros – $d[0,9] = 14,0 \mu\text{m}$. Já a curva que representa a medida após o último ponto mostra que $d[0,9] = 37,8 \mu\text{m}$. Como o item 3.4.2 já mostrou que as emulsões são estáveis em pelo menos 28 horas, esta diferença de tamanho de gotas se deve provavelmente aos efeitos gravitacionais. Ou seja, as gotas maiores, mesmo com o agitador magnético, tendem a se localizar na parte superior do cilindro, sendo injetadas ao final da medida de cada curva. Para este trabalho, como o interesse é justamente no maior tamanho de gota injetado em cada curva, então as emulsões serão caracterizadas sempre pelo $d[0,9]$ da emulsão medida após o último ponto – para o caso base: $d[0,9] = 37,8 \mu\text{m}$.

Em seguida, a Tabela 17 apresenta os pontos usados para medir a curva, assim como as respectivas pressões, saturações e permeabilidades relativas. Foram usados os mesmos sete pontos da curva permeabilidade relativa de solução salina e óleo da amostra 1 (item 4.3.1).

Tabela 17 Pontos da curva de permeabilidade relativa da emulsão (3% óleo e $d[0.9] = 37,8 \mu\text{m}$) e óleo – amostra 1

<i>Ponto</i>	<i>Fluido injetado</i>	<i>Vazão (ml/min)</i>	<i>Pressão (psi)</i>	<i>Saturação (%)</i>	<i>Permeabilidade Relativa</i>
1	Óleo	2,0	21,80	90,30	0,867
	Emulsão	0		9,70	0
2	Óleo	1,6	20,50	74,59	0,753
	Emulsão	0,4		25,41	0,001
3	Óleo	1,2	15,45	73,50	0,734
	Emulsão	0,8		26,5	0,003
4	Óleo	1,0	13,00	72,05	0,727
	Emulsão	1,0		27,95	0,004
5	Óleo	0,8	11,50	75,77	0,657
	Emulsão	1,2		24,23	0,006
6	Óleo	0,4	7,50	74,30	0,504
	Emulsão	1,6		25,70	0,012
7	Óleo	0	2,90	65,52	0
	Emulsão	2,0		34,48	0,039

A Figura 62 apresenta o comportamento da pressão durante a tomada dos pontos 2 a 7. A oscilação da pressão no regime permanente (maior que a observada na Figura 55, quando foi injetado solução salina), indica a passagem das gotas de óleo pelo meio poroso.

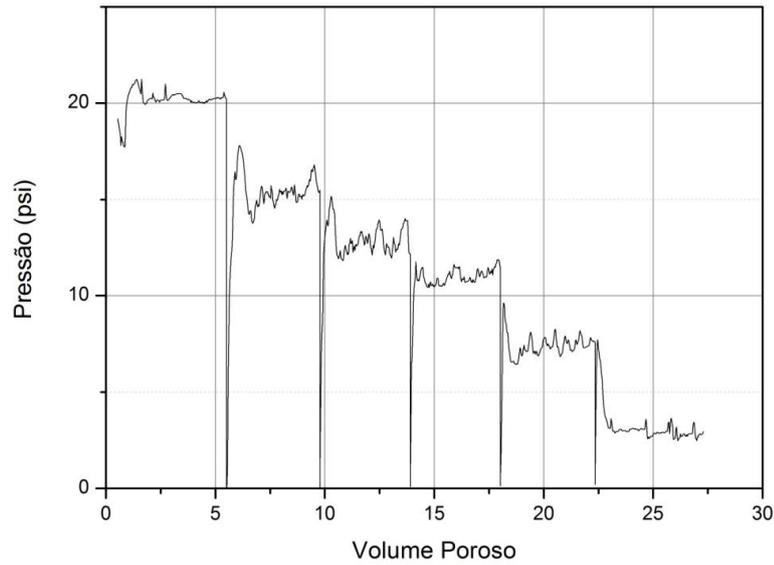


Figura 62 Comportamento do diferencial de pressão na injeção de emulsão e óleo – caso base

Finalmente, a Figura 63 apresenta a curva de permeabilidade relativa da emulsão com 3% de óleo e $d[0,9] = 37,8\mu\text{m}$ e óleo. Na mesma figura, encontra-se a curva da solução salina e óleo (a mesma da Figura 57) para ser comparada.

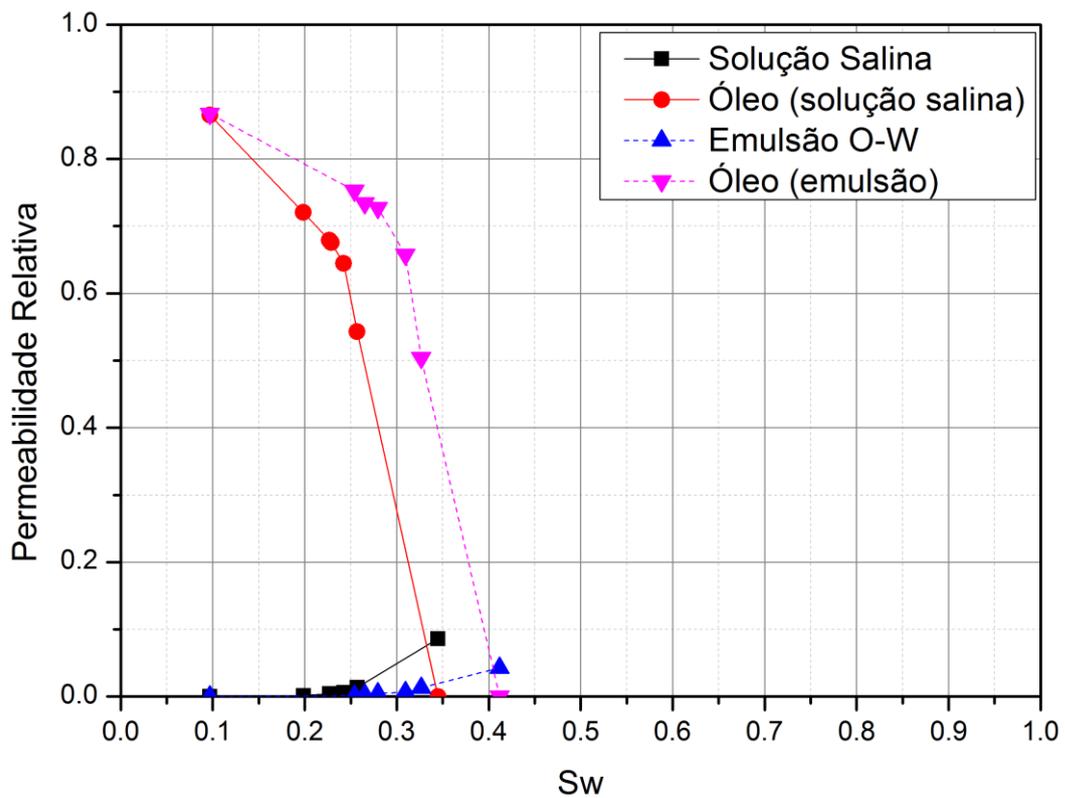


Figura 63 Curva de permeabilidade relativa de emulsão O-W ($C_o = 3\%$ e $d[0,9] = 37,8\mu\text{m}$) e óleo

As saturações mais importantes desta curva estão destacadas na Tabela 18.

Tabela 18 Saturações relevantes da injeção de emulsão

Saturação conata de solução salina (S_{wc})	9,70%
Saturação de óleo residual (S_{or})	58,80%

O resultado apresenta mudanças importantes na curva de permeabilidade relativa se comparado com a curva obtida no escoamento de óleo e solução salina. Primeiramente, a injeção da emulsão faz com que a S_{or} diminua consideravelmente, de 65,52% para 58,80%. O fator de recuperação aumentou significativamente; a solução salina foi capaz de deslocar aproximadamente 27,4% do óleo presente na amostra de rocha após o último ponto medido, já a emulsão deslocou 34,9% (aumento de 27,1%). Isso mostra que a emulsão é capaz de deslocar uma maior quantidade de óleo do reservatório.

As permeabilidades relativas do óleo na curva da emulsão são maiores do que as do óleo na curva medida com solução salina para qualquer valor fixo de saturação. Situação inversa ocorreu com a fase deslocante. Sendo assim, a mobilidade do óleo é maior com a emulsão, enquanto que a da fase deslocante é menor, resultando em uma razão de mobilidade mais favorável. Estas características da curva medida, juntamente com o comportamento da pressão visto na Figura 62, confirmam o bloqueio dos caminhos preferenciais pelas gotas de óleo, provocando um pequeno aumento de pressão e, conseqüentemente, deslocando óleo em regiões menos permeáveis até o momento em que estas gotas sejam suficientemente deformadas para escoar pelo poro, o que gera uma pequena redução de pressão. Em outras palavras, estes pequenos aumentos seguidos por reduções na pressão indicam gotas bloqueando determinados caminhos e se deformando até conseguir seguir por este caminho para serem bloqueadas novamente ou até mesmo produzidas.

O diferencial de pressão medido (e usado para calcular a permeabilidade efetiva) para cada ponto foi menor ou igual ao valor medido no caso base. Ou seja, o aumento da permeabilidade relativa do óleo não é somente devido a uma redução da pressão, já que isto não ocorre em todos os pontos. Mas sim à capacidade da emulsão em deslocar uma maior quantidade de óleo, ou seja, para cada ponto, existe uma maior variação da saturação (mais óleo é

deslocado). Isto significa que, para cada razão de vazão injetada, a saturação da fase deslocante aumenta mais intensamente que no caso base.

Uma outra forma de ver a redução da mobilidade da fase deslocante é através do diferencial de pressão medido no último ponto (quando apenas a fase deslocante é injetada). Este valor praticamente dobrou em relação ao caso base. Isto mostra que a permeabilidade relativa do último ponto se reduziu a metade, mesmo com uma saturação conata maior.

Para a próxima etapa do experimento, óleo foi injetado a vazão de 2,0 ml/min até alcançar a nova saturação conata que é 13,49%. Este valor, maior que o anterior (9,70%), confirma que caminhos do meio poroso foram realmente bloqueados. A esta saturação, o valor da permeabilidade relativa foi de 84,0%. Este já é o primeiro ponto da próxima curva.

4.4.2.

Efeito da concentração da fase dispersa

Amostra 1 – $Ca = 6,11 \times 10^{-7}$

O próximo passo é repetir as medidas com uma emulsão com 1,5% de óleo e verificar o efeito da concentração da fase dispersa na curva de permeabilidade relativa. Para criar esta emulsão, foi utilizado o mesmo procedimento da emulsão de 3% de óleo. O $d[0,9]$ medido antes da emulsão ser injetada no meio poroso é igual a 30,3 μm . Entre os dois últimos pontos medidos uma nova análise do tamanho de gotas foi realizada, onde $d[0,9] = 53,1 \mu\text{m}$. Ainda assim, em ambas análises, existem algumas gotas acima dos 100 μm . A Figura 64 mostra as duas análises de distribuição das gotas.

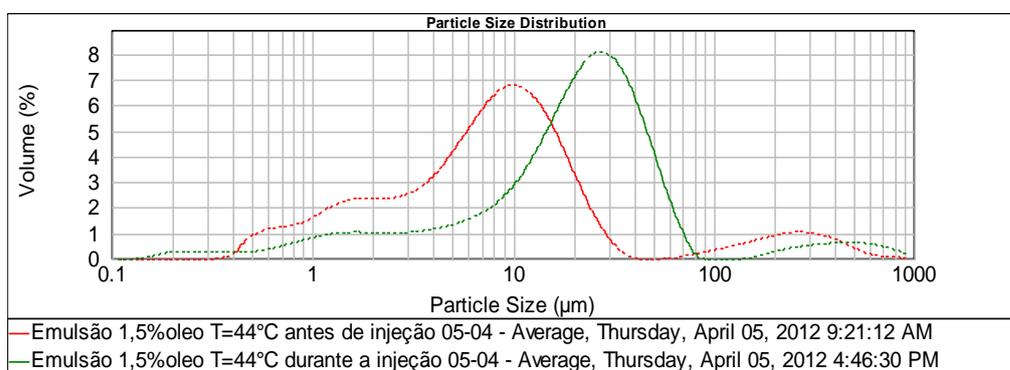


Figura 64 Distribuição do tamanho de gotas da emulsão de 1,5% de óleo

Nas curvas já medidas, percebe-se que existem 3 pontos muito próximos com saturações e permeabilidades bem próximos e, com o aumento da

saturação da solução salina, os pontos se distanciam muito. Por isso, para a curva ficar mais completa, foi decidido aumentar o número de medições para diferentes razões de injeção óleo-emulsão, como pode ser visto na Tabela 19.

Tabela 19 Pontos da curva de permeabilidade relativa emulsão (1,5% óleo e $d[0.9] = 53,1 \mu\text{m}$) e óleo

<i>Ponto</i>	<i>Fluido injetado</i>	<i>Vazão (ml/min)</i>	<i>Pressão (psi)</i>	<i>Saturação (%)</i>	<i>Permeabilidade Relativa</i>
1	Óleo	2,0	22,50	86,51	0,840
	Emulsão	0		13,49	0
2	Óleo	1,2	15,50	77,44	0,732
	Emulsão	0,8		22,56	0,003
3	Óleo	1,0	13,00	76,83	0,727
	Emulsão	1,0		23,17	0,004
4	Óleo	0,8	10,80	74,61	0,700
	Emulsão	1,2		25,39	0,006
5	Óleo	0,6	9,00	73,85	0,630
	Emulsão	1,4		26,15	0,009
6	Óleo	0,4	7,30	72,09	0,518
	Emulsão	1,6		27,91	0,012
7	Óleo	0,2	5,28	71,30	0,358
	Emulsão	1,8		28,70	0,020
8	Óleo	0,1	3,98	64,98	0,237
	Emulsão	1,9		35,02	0,027

Devido a problemas com falta de energia elétrica no laboratório de Termociências da PUC-Rio, não foi possível completar a curva com o último ponto, que seria injeção da emulsão com uma vazão de 2,0 ml/min. Até o ponto 8, 24,9% do óleo havia sido recuperado. Pelo mesmo motivo, também não foi possível realizar a análise da distribuição do tamanho de gotas para a emulsão após o último ponto. Desta forma, foi apresentada acima uma análise feita em um ponto intermediário (entre os pontos 7 e 8).

A Figura 65 apresenta o comportamento da pressão na medida de todos os pontos citados. De forma menos intensa do que na verificada na Figura 62, a pressão também oscila indicando o escoamento das emulsões pelo meio poroso.

Já a Figura 66 mostra como ficou a curva de permeabilidade relativa da emulsão O-W com 1,5% de óleo e $d[0,9] = 53,1 \mu\text{m}$. Novamente a curva da solução salina deslocando óleo é apresentada como base de comparação.

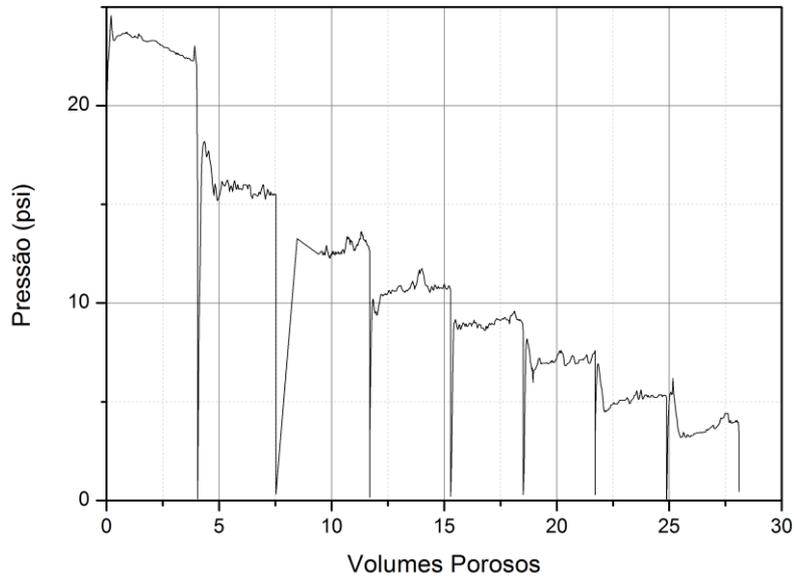


Figura 65 Comportamento do diferencial de pressão na injeção de emulsão e óleo – efeito de concentração

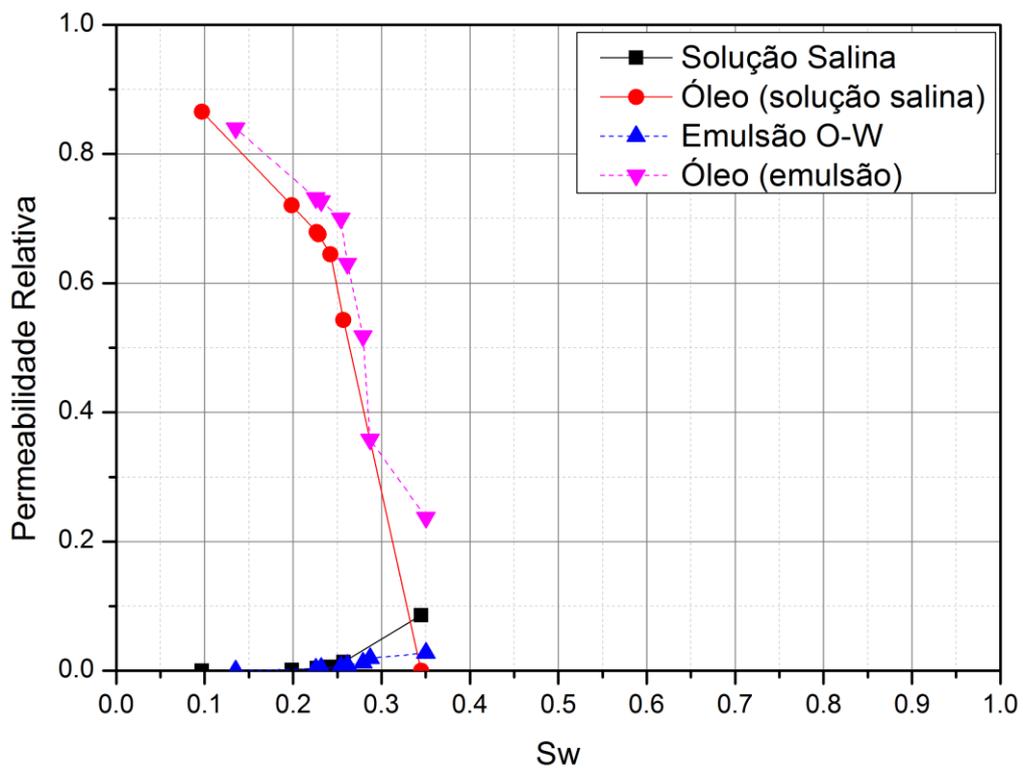


Figura 66 Curva de permeabilidade relativa da emulsão O-W ($C_o = 1,5\%$ e $d[0,9] = 53,1 \mu\text{m}$) e óleo

Mais uma vez verifica-se um aumento da mobilidade do óleo em relação a injeção da solução salina da mesma forma que foi visto no caso base, porém, até o ponto medido, com uma menor intensidade. Em relação a fase deslocante, a mobilidade também diminuiu, porém, devido a falta do último ponto, não é possível compará-la com o caso base.

Conclui-se que, ao diminuir a concentração da fase dispersa na emulsão, o mesmo efeito visto no caso base também ocorre, porém de forma menos acentuada. Apesar de não ter sido possível medir a saturação residual de óleo, o comportamento da curva obtida dá claros sinais de que quanto maior for a concentração da fase dispersa (até um determinado limite), melhor será a recuperação de óleo. A saturação de óleo no último ponto medido já é ligeiramente menor que a S_{or} da curva medida com solução salina. Mesmo em regime permanente, a pressão também possui um comportamento oscilatório, muito parecido com o visto para o caso base.

Novamente, foi injetado óleo a 2,0 ml/min e a saturação conata de solução salina voltou ao valor de 13,49%. Chegou-se a aumentar a vazão para reduzir ainda mais a saturação na tentativa de retornar a condição inicial. Foi alcançando o valor de 10,24% de saturação de solução salina. Nesta saturação, a permeabilidade relativa do óleo é 87,0%. Mais uma vez, esta combinação saturação e permeabilidade relativa fazem parte do primeiro ponto da próxima curva.

4.4.3.

Efeito do tamanho de gota **Amostra 1 – $Ca = 6,2 \times 10^{-7}$**

Uma nova emulsão com gotas maiores foi criada para a última etapa realizada na amostra 1. A concentração de óleo foi novamente 3%. O tempo da mistura no Ultra-Turrax foi o mesmo (2 minutos), porém a rotação foi reduzida a 13500 rpm. A Figura 67 mostra a distribuição do tamanho de gotas desta emulsão, cujo $d[0,9] = 147,8 \mu\text{m}$ antes da emulsão ser injetada (antes do ponto 2) e $231,3 \mu\text{m}$ após o último ponto. Desta vez, mais pontos foram medidos. A Tabela 20 apresenta todos os pontos medidos para esta curva. O ponto 1 representa a medida explicada ao final do item 4.4.2.

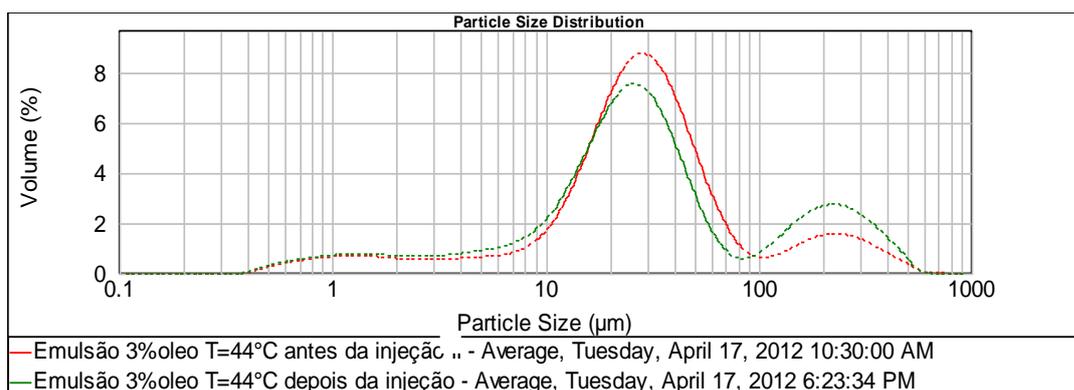


Figura 67 Distribuição do tamanho de gota da emulsão O-W com $Co = 3\%$

Tabela 20 Pontos da curva de permeabilidade relativa emulsão (3% óleo e $d[0.9] = 231,3 \mu\text{m}$) e óleo

Ponto	Fluido injetado	Vazão (ml/min)	Pressão (psi)	Saturação (%)	Permeabilidade Relativa
1	Óleo	-	-	89,76	0,870
	Emulsão	-		10,24	0
2	Óleo	1,6	20,50	70,84	0,738
	Emulsão	0,4		29,16	0,001
3	Óleo	1,2	15,60	68,22	0,727
	Emulsão	0,8		31,78	0,003
4	Óleo	1,0	13,20	64,23	0,716
	Emulsão	1,0		35,77	0,004
5	Óleo	0,8	10,65	61,81	0,710
	Emulsão	1,2		38,19	0,006
6	Óleo	0,6	8,90	58,45	0,637
	Emulsão	1,4		41,55	0,009
7	Óleo	0,4	7,10	56,17	0,532
	Emulsão	1,6		43,83	0,013
8	Óleo	0,2	5,25	55,52	0,360
	Emulsão	1,8		44,48	0,020
9	Óleo	0,1	3,98	52,54	0,237
	Emulsão	1,9		47,46	0,027
10	Óleo	0,0	2,59	44,87	0
	Emulsão	2,0		55,13	0,044

Na Figura 68, pode-se verificar o comportamento da pressão na medida dos pontos 2 a 10. Novamente a oscilação da pressão indicando o escoamento das emulsões no meio poroso pode ser destacada.

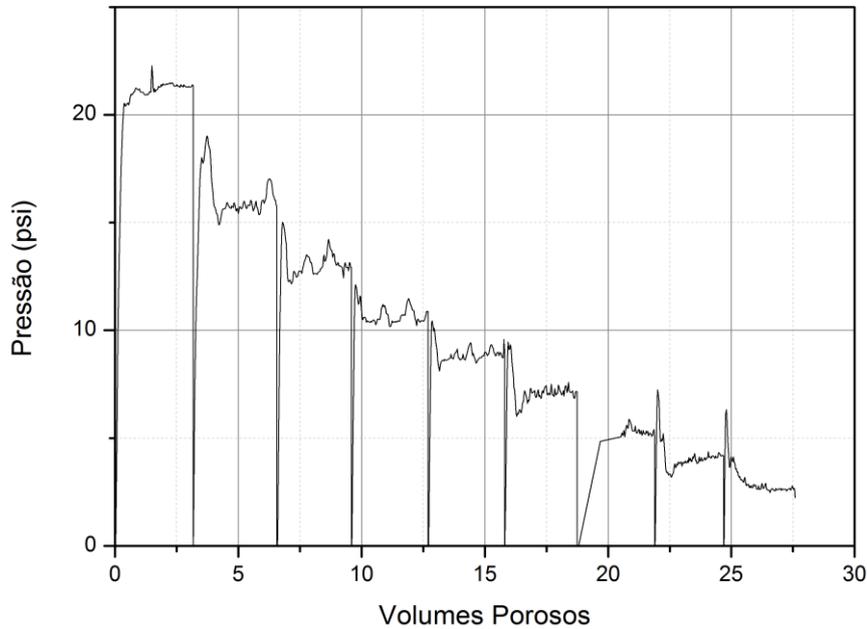


Figura 68 Comportamento do diferencial de pressão na injeção de emulsão e óleo – efeito de tamanho de gota

A Figura 69 mostra a curva de permeabilidade relativa do escoamento de emulsão O-W com $C_o = 3,0\%$ e $d[0,9] = 231,3 \mu\text{m}$ e óleo, enquanto que a Tabela 21 mostra as saturações relevantes desta curva.

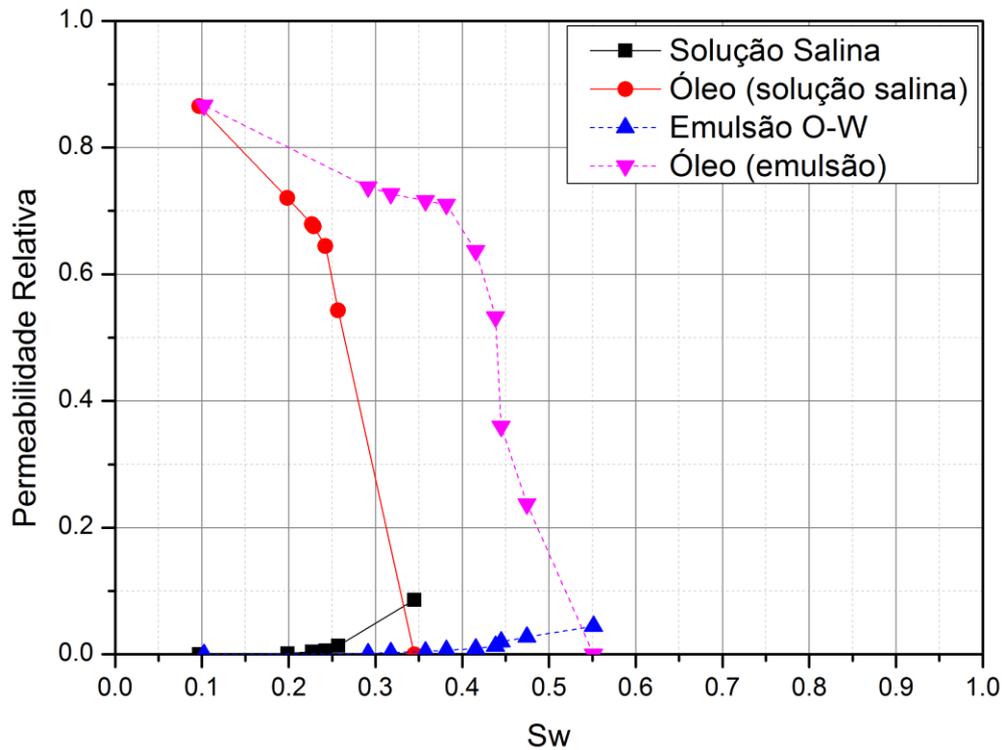


Figura 69 Curva de permeabilidade relativa da emulsão O-W ($C_o = 3,0\%$ e $d[0,9] = 231,3\mu\text{m}$) e óleo

Tabela 21 Saturações relevantes da injeção de emulsão – efeito de tamanho de gota

Saturação conata de solução salina (S_{wc})	10,24%
Saturação de óleo residual (S_{or})	44,87%

Um aumento do tamanho das gotas, conforme esperado, levou a um maior deslocamento de óleo, resultando em uma diminuição significativa da S_{or} . Ou seja, o efeito de bloqueio ocorreu de forma mais intensa com maiores gotas escoando pelo meio poroso. Enquanto que a mobilidade do óleo aumentou, a da fase deslocante diminuiu consideravelmente comparando-se com o caso base.

Aproximadamente 50% do óleo presente na amostra foi deslocado e produzido após o último ponto medido. Isto representa um aumento de 82,5% em relação a curva medida com solução salina e 43,3% em relação a curva do primeiro caso da emulsão. A Tabela 22 apresenta esses valores de forma resumida.

Tabela 22 Índices em relação ao óleo recuperado para cada caso – $Ca = 6,1 \times 10^{-7}$

	<i>Óleo recuperado ao final do experimento</i>	<i>Aumento em relação à injeção de solução salina</i>	<i>Aumento em relação à emulsão $d[0,9] = 37,8 \mu m$</i>	<i>Diferencial de pressão no último ponto (psi)</i>
Solução Salina	27,4%	-	-	1,44
Emulsão 3% $d[0,9] = 37,8 \mu m$	34,9%	27,1%	-	2,90
Emulsão 3% $d[0,9] = 231,3 \mu m$	50,0%	82,5%	43,3%	2,59

Além disso, a Tabela 22 também destaca o diferencial de pressão do último ponto de cada curva (injeção somente da fase deslocante). Repare que, da mesma forma que o óleo deslocado aumenta, a pressão de entrada também cresce. A emulsão com menor tamanho de gota praticamente dobrou a pressão de entrada, enquanto que a emulsão com o maior tamanho de gota fez com que este valor aumentasse em aproximadamente 1,8 vezes. Este aumento é esperado devido ao efeito de bloqueio provocado pela emulsão e é, ainda, uma dificuldade a ser enfrentada ao se injetar emulsões em um campo, devido às limitações dos equipamentos e, principalmente, geomecânicas.

Como conclusão, para um determinado número de capilaridade, gotas maiores refletem em um aumento do deslocamento do óleo e, conseqüentemente, uma melhora na recuperação de óleo. Maiores concentrações possuem o mesmo efeito.

4.4.4. Efeito do Número de Capilaridade (Ca) Amostra 2 – $Ca = 1,22 \times 10^{-7}$

Duas curvas de permeabilidades relativas serão apresentadas para verificar o efeito do número de capilaridade. A primeira com um menor tamanho de gotas e a segunda com um tamanho de gotas maior. Os resultados são comparados com os casos anteriores.

Após ter sido medida a curva de permeabilidade relativa para um Ca menor na amostra 2, óleo foi injetado a 0,4 ml/min novamente até a saturação

conata de solução salina ser alcançada ($S_w = 18,97\%$). Para isto, a permeabilidade relativa da amostra foi 93,3%.

Em seguida, a emulsão com 3% de óleo foi preparada no Ultra-Turrax com uma rotação de 24000 rpm por 2,5 minutos. O objetivo de aumentar o tempo foi para tentar deixar a curva de distribuição de tamanho de gotas unimodal e com menor desvio padrão. A Figura 70 mostra a distribuição do tamanho de gotas desta emulsão, cujo $d[0,9] = 42,1 \mu\text{m}$ antes do primeiro ponto e $d[0,9] = 43,7 \mu\text{m}$ após o último ponto medido.

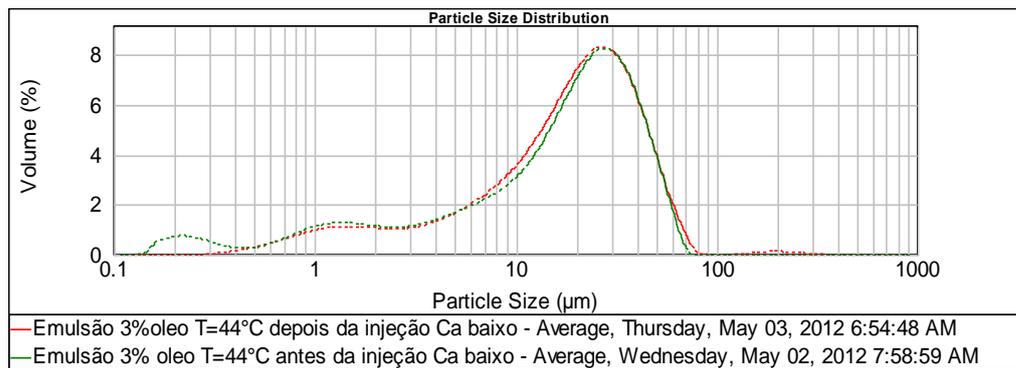


Figura 70 Distribuição do tamanho de gota da emulsão O-W com $Co = 3\%$ - efeito do número de capilaridade 1

Esta emulsão será usada para a medida da primeira curva de permeabilidade relativa para um Ca menor. A Tabela 23 mostra os pontos desta curva. Foram escolhidos de forma a deixá-los bem distribuídos na curva e, também, respeitando o tempo de estabilidade da emulsão. A Figura 71 mostra o comportamento da pressão entre os pontos 2 e 7.

Tabela 23 Pontos da curva de permeabilidade relativa emulsão (3% óleo e $d[0.9] = 43,7 \mu\text{m}$) e óleo

Ponto	Fluido injetado	Vazão (ml/min)	Pressão (psi)	Saturação (%)	Permeabilidade Relativa
1	Óleo	0,40	4,30	81,03	0,933
	Solução Salina	0		18,97	0
2	Óleo	0,30	4,81	70,92	0,626
	Solução Salina	0,10		29,08	0,001
3	Óleo	0,24	4,34	70,10	0,555
	Solução Salina	0,16		29,90	0,002
4	Óleo	0,18	3,56	69,10	0,508
	Solução Salina	0,22		30,90	0,004
5	Óleo	0,12	2,97	67,53	0,406
	Solução Salina	0,28		32,47	0,006
6	Óleo	0,06	2,14	65,71	0,281
	Solução Salina	0,34		34,29	0,01
7	Óleo	0	1,01	53,35	0
	Solução Salina	0,40		46,65	0,024

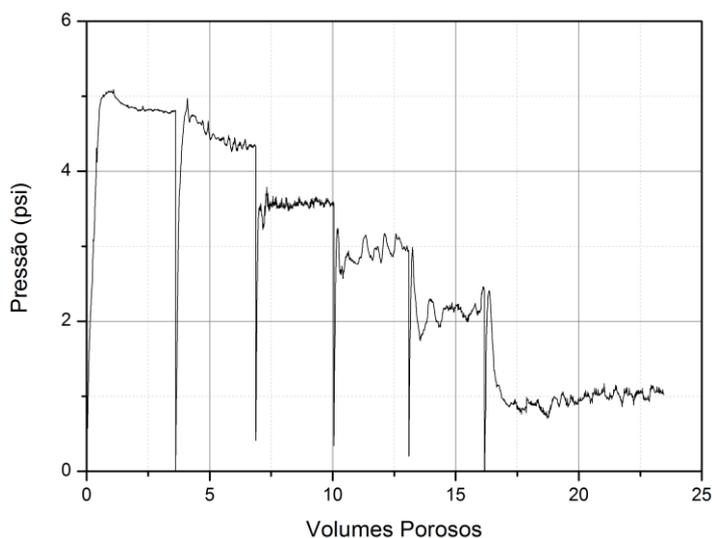


Figura 71 Comportamento do diferencial de pressão na injeção de emulsão e óleo – efeito do número de capilaridade

A pressão estabilizou em valores próximos aos encontrados na Figura 58 (injeção de solução salina e óleo para amostra 2). No entanto, o comportamento

das curvas foi diferente. Esta última curva, após atingir o regime permanente, não oscilou da mesma forma. Esta questão da oscilação será comentada no item 6, quando o efeito do número de Capilaridade será comentado.

A Figura 72 mostra a curva de permeabilidade relativa do escoamento da emulsão ($d[0,9] = 43,7\mu\text{m}$) e óleo para $Ca = 1,2 \times 10^{-7}$. Juntamente com esta curva, o gráfico mostra a curva da solução salina e óleo apresentada no item 4.3.2.

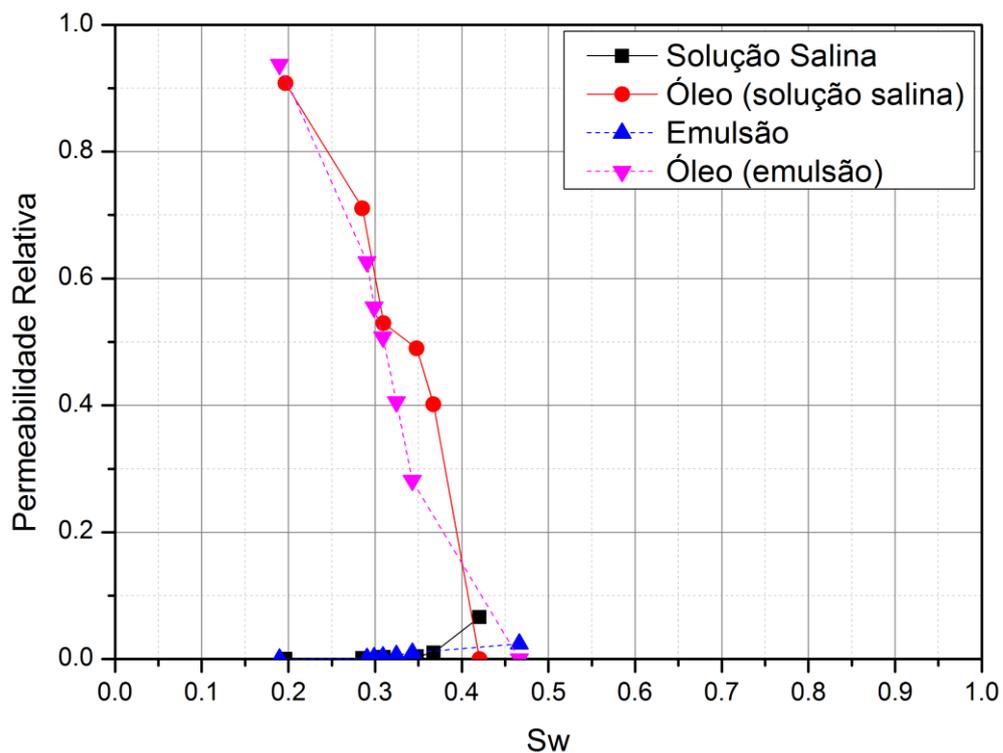


Figura 72 Curva de permeabilidade relativa da emulsão O-W ($Co = 3,0\%$ e $d[0,9] = 43,7\mu\text{m}$) e óleo

Apesar de diminuir a saturação de óleo residual, o comportamento da curva não foi bem o esperado. A emulsão, de fato, foi capaz de deslocar uma maior quantidade de óleo (diminuição da S_{or}), porém a mobilidade do óleo foi igual ou menor que a mobilidade vista na curva da solução salina. A mobilidade foi fluido deslocante, todavia, diminuiu.

A Tabela 24 apresenta as saturações mais importantes desta curva.

Tabela 24 Saturações relevantes da injeção de emulsão – efeito Número de Capilaridade (diâmetro de gota pequeno)

Saturação conata de solução salina (S_{wc})	18,97%
Saturação de óleo residual (S_{or})	53,35%

Enquanto que a solução salina recuperou apenas 27,8% do óleo presente na amostra, a emulsão foi capaz de recuperar 34,2%, apenas 0,7 pontos percentuais menos que no caso com número de capilaridade mais elevado.

Para a próxima etapa, óleo foi injetado a 0,4 ml/min na amostra, alcançando a saturação conata de solução salina de 23,81%. A permeabilidade relativa do óleo para este primeiro ponto é de 87,27%.

Para a sequência da curva, uma nova emulsão foi preparada no Ultra-Turrax por 2,5 minutos com uma rotação de 13500 rpm. A distribuição do tamanho de gotas, cujo $d[0,9] = 91,4 \mu\text{m}$ antes da injeção e $d[0,9] = 357,3 \mu\text{m}$ após a injeção, se encontra na Figura 73. Apesar do tamanho de gotas ter variado bastante nesta emulsão, a distribuição de tamanhos de gota mostra apenas uma maior concentração de gotas maiores que 200 μm na parte superior do cilindro de acrílico, enquanto que na parte inferior a existência de tais gotas é quase nula. É importante ressaltar que, quanto maiores forem as gotas, mais forte é o efeito gravitacional sobre elas.

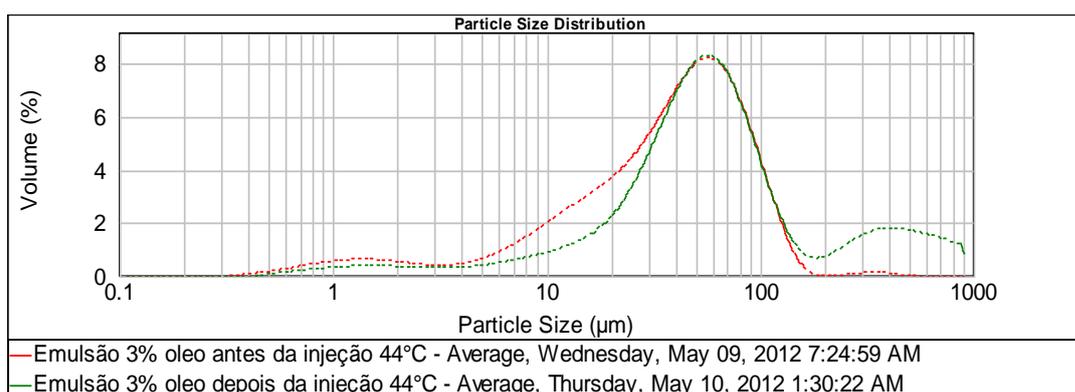


Figura 73 Distribuição do tamanho de gota da emulsão O-W com $Co = 3\%$ - efeito número de capilaridade 2

Os mesmos pontos usados na primeira curva com Ca menor serão usados para medir a próxima curva. A Tabela 25 mostra os pontos medidos enquanto que a Figura 74 mostra o comportamento da pressão entre os pontos 2 e 7.

Tabela 25 Pontos da curva de permeabilidade relativa emulsão (3% óleo e $d[0.9] = 357,3 \mu\text{m}$) e óleo

Ponto	Fluido injetado	Vazão (ml/min)	Pressão (psi)	Saturação (%)	Permeabilidade Relativa
1	Óleo	0,40	4,60	76,19	0,873
	Solução Salina	0		23,81	0
2	Óleo	0,30	4,94	61,72	0,610
	Solução Salina	0,10		38,28	0,001
3	Óleo	0,24	4,56	60,47	0,528
	Solução Salina	0,16		39,53	0,002
4	Óleo	0,18	3,60	60,25	0,502
	Solução Salina	0,22		39,75	0,004
5	Óleo	0,12	2,72	59,03	0,443
	Solução Salina	0,28		40,97	0,006
6	Óleo	0,06	1,85	57,36	0,326
	Solução Salina	0,34		42,64	0,011
7	Óleo	0	0,77	49,81	0
	Solução Salina	0,40		50,19	0,032

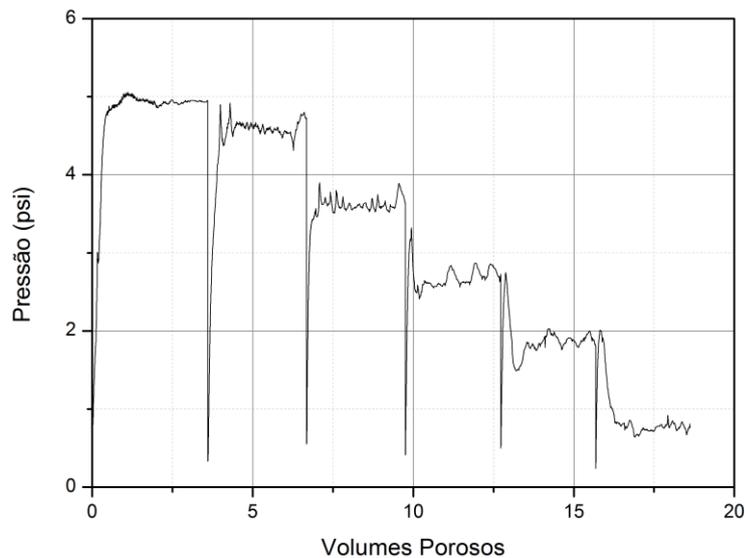


Figura 74 Comportamento do diferencial de pressão na injeção de emulsão e óleo – efeito do número de capilaridade 2

A Figura 75 mostra a curva de permeabilidade relativa do escoamento da emulsão ($d[0,9] = 357,3\mu\text{m}$) e óleo para $Ca = 1,2 \times 10^{-7}$. Juntamente com esta curva, o gráfico mostra a curva da solução salina e óleo apresentada no item 4.3.2. Já a Tabela 26 apresenta as principais saturações desta curva.

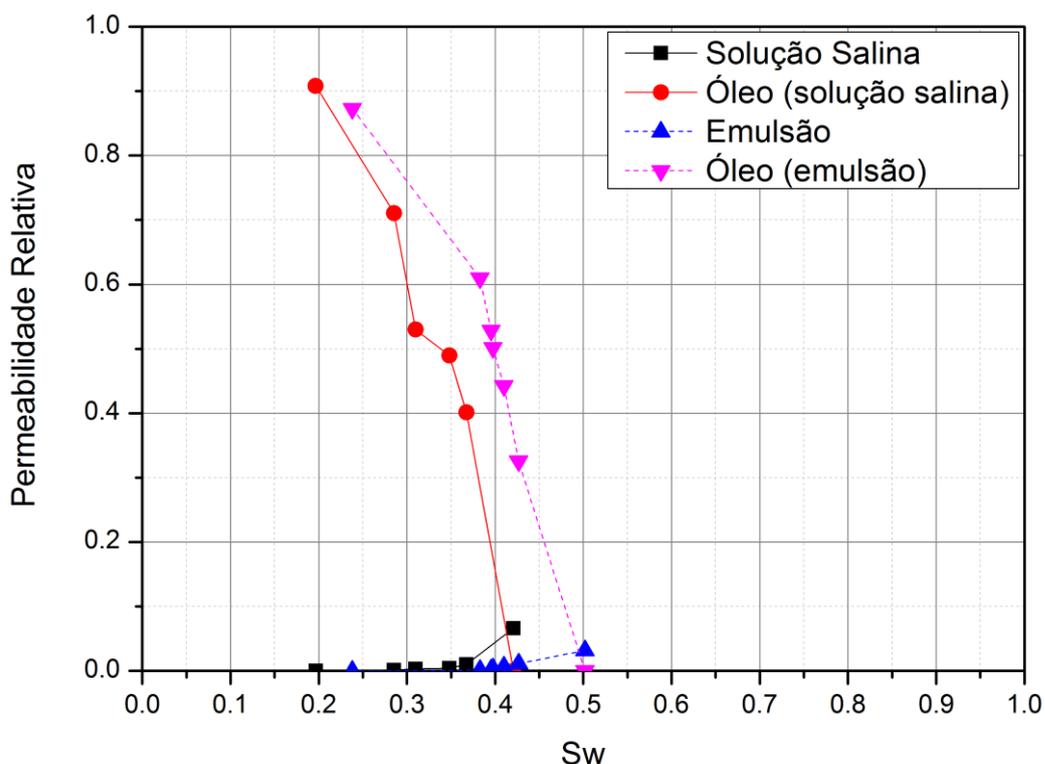


Figura 75 Curva de permeabilidade relativa da emulsão O-W ($Co = 3,0\%$ e $d[0,9] = 357,3\mu\text{m}$) e óleo

Tabela 26 Saturações relevantes da injeção de emulsão – efeito número de capilaridade (diâmetro de gota grande)

Saturação conata de solução salina (S_{wc})	23,81%
Saturação de óleo residual (S_{or})	49,81%

Com o incremento no tamanho de gotas da emulsão, a curva de permeabilidade relativa foi deslocada para a direita do gráfico, o que significa um aumento da mobilidade do óleo e uma diminuição na saturação de óleo residual. Além disso, da mesma forma que ocorreu com as outras curvas, a mobilidade da fase deslocante também diminuiu.

Esta emulsão foi capaz de deslocar 34,6% do óleo presente na amostra, valor muito próximo do volume de óleo deslocado com a emulsão de gota menor

para o mesmo Ca. Ainda assim, o efeito do tamanho de gota no número de capilaridade não foi o esperado. Um maior Ca representou em ambos os casos uma maior mobilidade do óleo e uma menor S_{or} , para os respectivos tamanhos de gota.

4.5. Análise de Incerteza

Este tópico apresenta as incertezas experimentais para o cálculo da permeabilidade relativa, que, conforme Equação 9, é função da vazão de injeção, da viscosidade do meio, do comprimento da amostra, da permeabilidade absoluta e do diferencial de pressão.

$$k_{rel} = \frac{q\mu L}{k_{abs}\Delta p} \quad \text{Equação 9}$$

A Equação 10 apresenta de que forma foi realizado o cálculo da incerteza para a permeabilidade relativa. O termo δ se refere à incerteza da grandeza medida.

$$\frac{\delta k_{rel}}{k_{rel}} = \sqrt{\left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta k_{abs}}{k_{abs}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2} \quad \text{Equação 10}$$

A variação da vazão pode ser considerada praticamente zero, já que a bomba usada é de seringa e de alta precisão. As medidas de viscosidade e do comprimento possuem incertezas muito baixas comparadas com os outros parâmetros (menos de 0,5%), logo será admitido que estas medidas, juntamente com a da vazão, são desprezíveis. Desta forma, resta calcular as incertezas do diferencial de pressão e da permeabilidade absoluta.

Foi estimada uma variação da permeabilidade absoluta em ± 250 mD, que equivale a uma variação de 11,8%. Em relação ao diferencial de pressão, foi verificada a maior variação relativa nas medidas de pressão para a primeira curva de permeabilidade relativa de emulsão e óleo ($C_o = 3,0\%$, $d[0,9] = 37,8 \mu\text{m}$ e $Ca = 6,1 \times 10^{-7}$). Esta variação equivale a aproximadamente 9,4%.

Desta forma, baseando-se na Equação 10, foi calculada uma incerteza experimental de 15,1% na medida de permeabilidade relativa.