

4

Quebra de gota em emulsões óleo-em-água no escoamento através de uma válvula agulha

4.1.

Introdução

No processo de recuperação de petróleo por injeção de água, na medida que aumenta o tempo de produção o corte de água atinge valores elevados. O petróleo é normalmente produzido em forma de emulsão, geralmente do tipo óleo-em-água [6]

Durante o transporte da emulsão, desde o fundo do poço até as instalações de superfície, as gotas de óleo maiores são quebradas devido às forças cisalhantes atingindo diâmetros na faixa de 10 μm a 1 mm [6]. Do mesmo modo, durante a passagem da mistura através de válvulas *choke*⁶, as gotas sofrem uma aceleração devido à redução da área efetiva para escoamento resultando numa queda de pressão (efeito Venturi) e alta dissipação de energia (zona de turbulência e aumento da taxa de cisalhamento sobre as gotas) que geram quebra de gota ainda maior. Geralmente, para o tratamento da mistura de fluidos produzidos são empregados separadores de fase. Os separadores mais sofisticados de tipo centrífugo conseguem separar gotas de até 5 μm [6]. Para emulsões com tamanhos de gota menores, os parâmetros de projetos destes equipamentos devem ser determinados em função da distribuição de diâmetro de gota da emulsão a ser tratada.

No intuito de estudar o mecanismo de quebra de gota de emulsões escoando em dispositivos similares a uma válvula *choke*, no presente trabalho foram desenvolvidos vários testes empregando uma válvula agulha. A seguir apresentamos uma descrição detalhada do trabalho realizado e os resultados obtidos.

⁶ A válvula *choke* é uma válvula de controle posicionada antes das instalações de superfície na qual é induzida uma queda de pressão a fim de ajustar a produção de petróleo.

4.2. Abordagem experimental

A bancada experimental utilizada para a obtenção dos resultados apresentados no presente capítulo foi desenvolvida no Laboratório de Microhidrodinâmica e Escoamento em Meios Porosos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC - Rio. Os testes foram realizados a uma temperatura de 23 °C, controlada pelo sistema de ar condicionado no laboratório.

Para os testes de quebra de gota em um escoamento através de uma válvula foi utilizado um sistema de tubulações no qual uma emulsão óleo-em-água escoava através de uma válvula agulha. As distribuições de diâmetro de gotas antes e depois da válvula foram medidas para diferentes condições.

A seguir apresentamos a abordagem experimental, que consistiu de três procedimentos principais: (i) preparação das fases da emulsão, (ii) formulação da emulsão e, (iii) escoamento e caracterização da distribuição de tamanho de gota da emulsão antes e depois da válvula agulha.

Finalmente, as dificuldades encontradas durante a abordagem experimental são discutidas na parte final do presente capítulo.

4.2.1. Preparação da fase contínua

Na formulação da fase contínua, preparamos uma solução aquosa do surfactante dodecil sulfato de sódio (SDS), com uma concentração equivalente a três vezes sua concentração micelar crítica ($CMC_{SDS} = 2,3 \text{ g/l}$). Na tabela 4.1 resumimos a composição da fase contínua.

Fase contínua	Água (Da torneira)
	6,9 g/l de SDS

Tabela 4.1 Composição da fase contínua.

Para o preparo da fase contínua colocamos a água em um tanque de armazenamento e adicionamos o surfactante. Realizamos a homogeneização da mistura utilizando o agitador mecânico Fisatom 722D até a completa dissolução do surfactante. A figura 4.1 mostra o processo de preparação da fase contínua.



Figura 4.1 Preparação da fase contínua.

A caracterização da fase contínua foi realizada através dos mesmos procedimentos descritos no capítulo 3. Na tabela 4.2, mostramos um resumo das propriedades da fase contínua determinadas mediante cada procedimento.

Fase contínua (23 °C)		
$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$\sigma \left(\frac{mN}{m} \right)$	$\mu (mPa \cdot s)$
999,2	31,2	1,0002

Tabela 4.2 Propriedades da fase contínua utilizada no estudo de quebra de gota através de uma válvula agulha.

4.2.2. Preparação da fase dispersa

Para avaliar o efeito da fase dispersa nas emulsões produzidas, foram utilizados três óleos minerais de diferente composição. As propriedades dos óleos, determinadas conforme os procedimentos descritos no capítulo 3, são apresentadas na tabela 4.3.

Fase dispersa (23 °C)	Tipo de óleo	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$\sigma \left(\frac{mN}{m} \right)$	$\mu \left(mPa \cdot s \right)$
	Tivela S 460	997,1	45,9	1190,54
	Esso Nuto	886,3	38,9	235,22
	Tivela S 150	996,7	40,1	450,01

Tabela 4.3 Propriedades das fases dispersas utilizadas no estudo de quebra de gotas através de uma válvula agulha.

4.2.3. Formulação da emulsão antes da passagem pela válvula agulha

Neste estudo foram preparadas sequencialmente três emulsões óleo-em-água que escoam através de uma válvula agulha.

Para o preparo de cada emulsão colocamos 95% em volume da fase contínua em um tanque e adicionamos 5% em volume da fase dispersa. Ambas fases são misturadas continuamente durante os testes para evitar a segregação gravitacional, mediante o uso do agitador mecânico Fisatom 722D. Para a mistura, foi empregada uma rotação relativamente baixa (190 RPM), com o intuito de obter na entrada do circuito hidráulico uma emulsão de gotas grandes, a fim de isolar o efeito da válvula agulha no processo de quebra de gotas durante a passagem da emulsão.

O procedimento anteriormente descrito foi realizado separadamente para cada óleo mineral apresentado na tabela 4.3.

4.2.4. Escoamento de emulsões através da válvula agulha

A bancada experimental empregada para a realização dos experimentos de quebra de gota através de uma válvula agulha é descrita na figura 4.2.

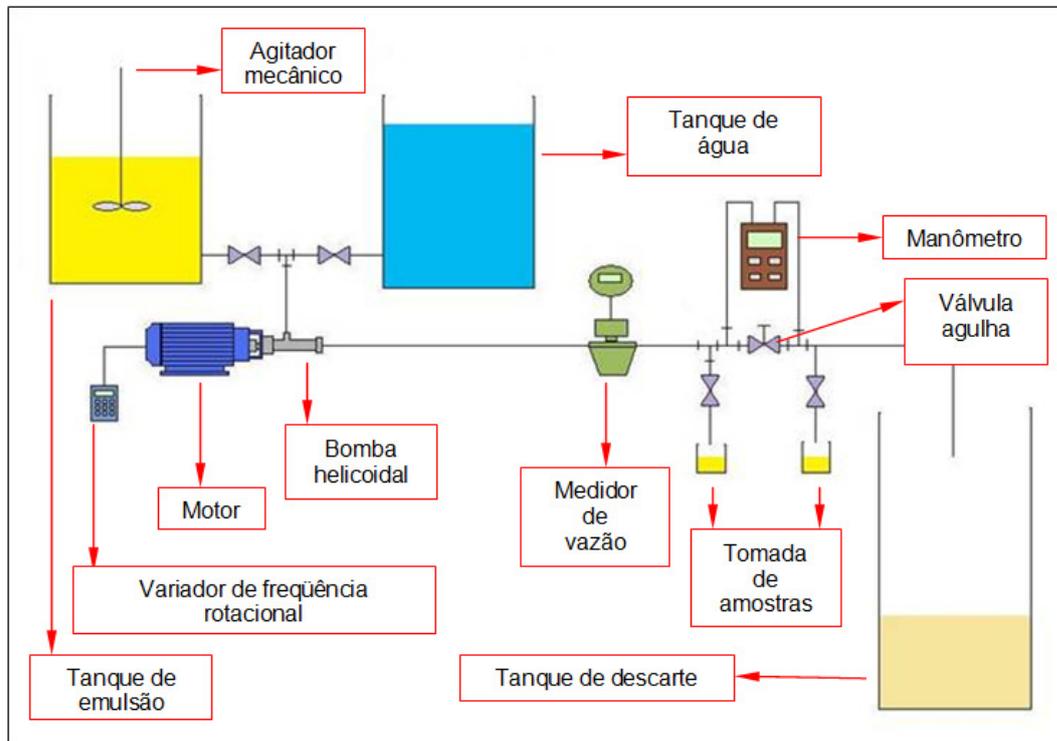


Figura 4.2 Esquema simplificado da bancada experimental.

Para a armazenagem das emulsões e da água utilizada para limpeza da linha e calibração do sistema, foram utilizados dois tanques ALPINA TERMOPLÁSTICOS de capacidade volumétrica de 60 l. Ambos tanques possuem na parte inferior válvulas de descarga que através de uma junção em T foram conectadas a sucção da bomba. Um terceiro tanque ALPINA TERMOPLÁSTICOS de capacidade volumétrica 1000 l foi utilizado para descarte das emulsões produzidas.

Para a circulação dos fluidos armazenados através do circuito foi utilizada tubulação de aço inox de diâmetro interior igual a 3,55 mm (diâmetro externo de 1/4"). Para fazer escoar os fluidos, foi utilizada uma bomba helicoidal marca AMBORETTO modelo DRX-15M de 0,5 HP e vazão nominal de 2,0 l/min. A vazão da bomba foi controlada através da variação de sua velocidade de rotação mediante o uso do inversor de frequência rotacional WEG CFW 08. Para a

determinação da vazão foi utilizado medidor de vazão e transmissor MICRO MOTION com sensores S/N 14107310 e 14102259 respectivamente. A queda de pressão na válvula agulha foi medida através de um manômetro de pressão diferencial digital DWYER SERIES 490 (exatidão 0,01 psi e $\Delta P_{\max} = 500 \text{ psi}$) colocado entre a saída e entrada da mesma como mostrado na figura 4.2.

Para facilitar a tomada de amostras foram colocadas duas válvulas de esfera de ¼” antes e depois da válvula agulha.

Uma vez descritos os principais materiais e equipamentos utilizados para a realização dos experimentos, descreveremos os procedimentos experimentais seguidos na realização de cada um dos testes. Nesta dissertação foram adotados dois métodos para avaliar o efeito das variáveis de operação no processo de quebra de gota. No primeiro método, obtemos as diferentes quedas de pressão na válvula agulha mudando a sua abertura e utilizando uma mesma vazão, método que na seqüência denominaremos de “Método 1”. No segundo método, fixamos as diferentes quedas de pressão na válvula agulha mantendo uma abertura na válvula agulha e variando a vazão, método que denominaremos de “Método 2”.

4.2.4.1.

Testes de escoamento de emulsões através da válvula agulha utilizando o Método 1

O Método 1 consistiu em controlar a queda de pressão na válvula agulha mudando a sua abertura e mantendo a vazão constante. No desenvolvimento dos experimentos do Método 1 foram utilizados dois fluidos: emulsão e água. A emulsão foi utilizada para o estudo da quebra de gota e a água para controlar as mudanças das aberturas de válvula além da limpeza do sistema. A seguir mostramos os passos realizados para o desenvolvimento dos testes.

1. Fixamos a vazão que será mantida constante para diversas posições de abertura de válvula.
2. Regulamos a abertura da válvula em uma posição.
3. Fazemos escoar água e anotamos a queda de pressão com este fluido (ΔP_o).
4. Trocamos o escoamento de água por emulsão, e registramos o novo valor da queda de pressão através da válvula (ΔP).

5. Coletamos as amostras das emulsões antes e depois da válvula agulha para a respectiva caracterização.
6. Trocamos o escoamento de emulsão por água para limpeza do sistema.
7. Fechamos a válvula agulha para incrementar a queda de pressão
8. Repetimos os passos 3 – 7 até atingir a máxima queda de pressão (23 psi) com a vazão inicial de escoamento.
9. Nos testes seguintes, incrementamos a vazão e repetimos os passos 1 – 8 descritos acima para registrar as quedas de pressão. As mudanças de vazões foram realizadas até chegar à vazão nominal da bomba helicoidal.

Para a análise do efeito da vazão, queda de pressão na válvula agulha e tipo de óleo na distribuição de diâmetro de gota das emulsões produzidas, repetimos todo o procedimento descrito anteriormente para as condições mostradas nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 onde observamos todos os valores de quedas de pressão e vazões para as emulsões preparadas com os três óleos minerais utilizados em cada experimento.

Vazão $\left(\frac{l}{min}\right)$	Experimento #	ΔP_o (psi) (Fixado com água)	ΔP (psi) (Medido com emulsão)
0,5	1	2,00	4,10
	2	3,00	6,30
	3	4,00	8,50
	4	5,00	9,60
1,0	5	2,00	2,15
	6	3,00	3,19
	7	4,00	4,50
	8	5,00	6,0
1,5	9	3,00	3,53
	10	4,00	4,58
	11	5,00	5,76
	12	10,00	10,80
2,0	13	5,00	5,75
	14	6,00	6,80
	15	7,00	7,89

Tabela 4.4 Condições experimentais para análise de quebra de gotas da emulsão formada com óleo Tivela S 460 através de uma válvula agulha utilizando o Método 1.

Vazão $\left(\frac{l}{\text{min}}\right)$	Experimento #	ΔP_o (psi) (Fixado com água)	ΔP (psi) (Medido com emulsão)
0,5	1	2,00	2,20
	2	3,00	3,25
	3	5,00	6,10
	4	10,00	10,82
1,0	5	2,00	2,11
	6	5,00	5,34
	7	10,00	11,80
1,5	8	3,50	3,70
	9	7,00	7,70
	10	11,00	11,48
2,0	11	6,00	6,90
	12	11,50	12,20
	13	15,50	18,90

Tabela 4.5 Condições experimentais para análise de quebra de gotas da emulsão formada com óleo Esso Nuto através de uma válvula agulha utilizando o Método 1.

Vazão $\left(\frac{l}{\text{min}}\right)$	Experimento #	ΔP_o (psi) (Fixado com água)	ΔP (psi) (Medido com emulsão)
0,5	1	2,00	3,02
	2	5,00	5,72
	3	10,00	10,88
	4	15,00	17,14
	5	20,00	22,20
1,0	6	2,00	2,30
	7	5,00	5,44
	8	10,00	10,75
	9	15,00	16,42
	10	20,00	21,20
1,5	11	3,50	4,00
	12	7,00	7,20
	13	20,00	21,75
2,0	14	6,00	6,60
	15	13,00	14,40
	16	21,00	23,00

Tabela 4.6 Condições experimentais para análise de quebra de gotas da emulsão formada com óleo Tivela S 150 através de uma válvula agulha utilizando o Método 1.

4.2.4.2.

Testes de escoamento de emulsões através da válvula agulha utilizando o Método 2

O Método 2 consistiu em controlar a queda de pressão na válvula mudando a vazão para uma determinada posição da válvula. Vander Zande [6] realizou um estudo utilizando este procedimento. As restrições utilizadas foram de dois tipos: placas com diferentes diâmetros de orifício e diferentes aberturas de uma válvula agulha. A emulsão utilizada foi de concentração volumétrica de fase dispersa de 0,1%. Neste estudo foram coletadas e caracterizadas amostras de emulsão antes e depois das restrições. Uma característica importante do experimento do Van der Zande foi o controle da distribuição de diâmetro de gota das emulsões antes da passagem pelas diferentes restrições, o que em nossos experimentos não foi possível conseguir. Essa dificuldade para controlar o diâmetro de gota da fase dispersa foi resolvida por Van der Zande [6] mediante a utilização de uma bomba adicional de óleo com a que injeta gotas de fase dispersa de diâmetros controlados numa vazão de água.

Foram utilizados como principais parâmetros o $d(0,95)$ que é o diâmetro máximo de gota de 95% do volume da fase dispersa da emulsão analisada e a taxa de dissipação de energia. O trabalho de Van der Zande correlacionou estes dois parâmetros através de uma relação exponencial.

No presente estudo desenvolvemos um procedimento experimental similar ao do Van der Zande, onde controlamos a área efetiva para escoamento dos fluidos através da regulagem do obturador de uma válvula agulha em diferentes posições, proporcionando diferentes diâmetros de orifício. Para cada posição do obturador de válvula agulha fizemos escoar emulsões a diferentes vazões. A seguir mostramos os passos realizados para o desenvolvimento dos testes.

1. Utilizando uma vazão inicial de emulsão e uma abertura inicial de válvula fixamos uma queda de pressão na válvula agulha.
2. Coletamos as amostras das emulsões antes e depois da válvula agulha para a respectiva caracterização de diâmetro de gota.
3. Modificamos a queda de pressão aumentando a vazão, mantendo a posição da válvula fixa.
4. Mais uma vez coletamos as amostras das emulsões antes e depois da válvula agulha para a respectiva caracterização.

5. Nos seguintes testes, depois de ter utilizado a máxima queda de pressão com a abertura inicial, a fechamos mais um pouco e repetimos os passos 1 – 4 descritos acima para diferentes vazões. As mudanças de abertura da válvula foram realizadas levando em conta a capacidade máxima do manômetro e os efeitos de *flashing* e cavitação. O efeito *flashing* acontece quando na zona depois de válvula torna-se uma zona de alta velocidade e a pressão diminui a um valor tão baixo que o ar dissolvido em condições normais sai da solução formando bolhas de ar as quais ocupam parte da área de escoamento na restrição e conseqüentemente a velocidade da fase líquida se incrementa [6]. Do mesmo modo, a cavitação é um processo similar ao *flashing*, mas neste caso as bolhas são de vapor já que a pressão na válvula agulha decresce até valores abaixo da pressão de vapor da água.

Para a análise do efeito da vazão e queda de pressão na válvula agulha na distribuição de diâmetro de gota das emulsões produzidas repetimos o procedimento descrito anteriormente utilizando o óleo Tivela S 150 e as condições experimentais mostradas na tabela 4.7.

Vazão $\left(\frac{l}{min}\right)$	Experimento #	ΔP_o (psi) (Fixado com emulsão)	ΔP (psi) (Fixado com emulsão)
0,50	1	0,85	0,85
1,00	2		3,59
1,50	3		8,10
2,00	4		13,62
0,50	5	1,90	1,90
1,00	6		7,90
1,50	7		19,55
2,00	8		40,50
0,50	9	4,40	4,40
1,00	10		18,00
1,50	11		40,00
1,90	12		65,00
0,50	13	10,00	10,00
1,00	14		37,50
1,50	15		78,00
1,70	16		105,00
0,50	17	45,00	45,00
0,85	18		120,00
0,95	19		150,00

Tabela 4.7 Condições experimentais para análise de quebra de gotas da emulsão formada com óleo Tivela S 150 através de uma válvula agulha utilizando o Método 2.

4.2.5.

Caracterização da distribuição de tamanho de gota das emulsões

A caracterização das amostras de emulsão coletadas antes e depois da válvula agulha foi realizada mediante o Mastersizer 2000 seguindo o procedimento descrito no capítulo três. No total caracterizamos 126 amostras de emulsões correspondentes às condições de operação descritas nas tabelas 4.4 a 4.7.

4.2.6.

Dificuldades encontradas na abordagem experimental

A seguir descrevemos como superamos vários problemas encontrados durante o desenvolvimento dos testes experimentais assim como também várias recomendações para estudos futuros nesta linha de pesquisa.

Uma das dificuldades nos experimentos foi a segregação gravitacional das fases da emulsão no tanque de armazenamento. Por essa razão utilizamos um agitador mecânico para manter o óleo distribuído no tanque.

Outra dificuldade foi a falta de controle do diâmetro de gota da fase dispersa no tanque de armazenamento. Por outro lado, no intuito de tentar controlar o diâmetro da fase dispersa utilizamos uma rotação relativamente baixa (190 RPM) com o objetivo de obter gotas grandes que permitam observar o efeito de quebra de gotas na válvula agulha. Porém, nessa rotação poderia ter acontecido possíveis quebras de gotas no tanque de armazenamento dificultando o controle do diâmetro de gota da fase dispersa.

Outra dificuldade em relação à falta de controle do diâmetro de gota da fase dispersa antes de válvula agulha é devida aos efeitos dos esforços de cisalhamento exercidos sobre as emulsões na passagem e recirculação destas através da bomba helicoidal, sendo estes efeitos maiores a medida que incrementamos a pressão de saída da bomba por fechamento da abertura da válvula agulha.

Uma limitação encontrada durante o desenvolvimento dos testes foi o valor máximo limite de quedas de pressão fixadas na válvula agulha. Não foi possível trabalhar com quedas de pressão maiores a 160 psi devido ao efeito de *flashing* e cavitação. Observamos isto na formação de espumas na tomada das amostras onde o ar dissolvido saiu das emulsões.

Outra limitação encontrada foi a inicialização do circuito já que todos os equipamentos eram ligados e desligados manualmente, tomando muito cuidado na importante manipulação das válvulas que controlam a circulação dos fluidos em cada método utilizado. Também tomamos cuidado para manter a sucção da bomba helicoidal com fluido de trabalho para evitar possíveis danos.

É importante mencionar a relevância de padronizar o procedimento experimental nos testes de laboratório já que é bem conhecido que as emulsões são muito sensíveis aos métodos de preparo. Portanto, neste trabalho tomamos cuidado em seguir metodicamente o mesmo procedimento na formulação e preparação das fases e das emulsões com o intuito de garantir repetitividade nos resultados e possibilitar a comparação entre os mesmos.

4.3. Resultados experimentais

4.3.1. Resultados experimentais obtidos com o Método 1

Nesta seção apresentamos os resultados experimentais das emulsões obtidas mediante o Método 1. Inicialmente apresentamos a distribuição de diâmetro de gota da fase dispersa de várias das emulsões coletadas antes e depois da válvula agulha. A seguir apresentamos uma análise do diâmetro médio $d(0,5)$ e da superfície específica da fase dispersa em função das variáveis de operação e da taxa de dissipação de energia. Em termos do comportamento da distribuição de diâmetro de gota os resultados foram muito parecidos, por tanto mostramos por simplicidade apenas os resultados correspondentes a duas das condições experimentais avaliadas.

Nas figuras 4.3 e 4.4, apresentamos a sobreposição das distribuições de diâmetro de gota das amostras coletadas antes e depois da válvula agulha para as condições experimentais 9 e 13 da tabela 4.7. Além disso, mostramos na parte superior esquerda das figuras os valores de diâmetro médio de gota $d(0,5)$. Utilizamos as cores vermelha e verde para as distribuições de diâmetro de gota antes e depois da válvula agulha respectivamente.

Observamos que todas as distribuições de diâmetro de gota foram bimodais. O diâmetro médio de gotas $d(0,5)$ das amostras coletadas antes da válvula agulha

foi maior que das amostras depois da mesma evidenciando quebra das gotas devido a passagem pela válvula. No entanto, tivemos uma parcela das gotas da fase dispersa que quase não mudou de diâmetro. Finalmente, concluímos que na passagem pela válvula as gotas são quebradas significativamente. A seguir apresentamos uma análise para quantificar o efeito das variáveis de operação no processo de quebra de gotas.

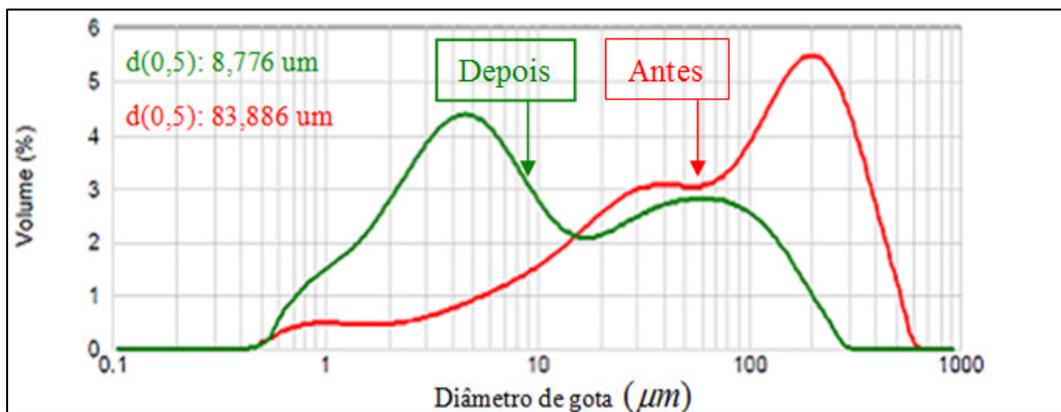


Figura 4.3 Distribuição de tamanho de gota antes e depois da válvula de agulha para a emulsão formada com o óleo Tivela S 150 a uma vazão de 1,0 l/min e queda de pressão fixada com água na válvula agulha de 15,0 psi.

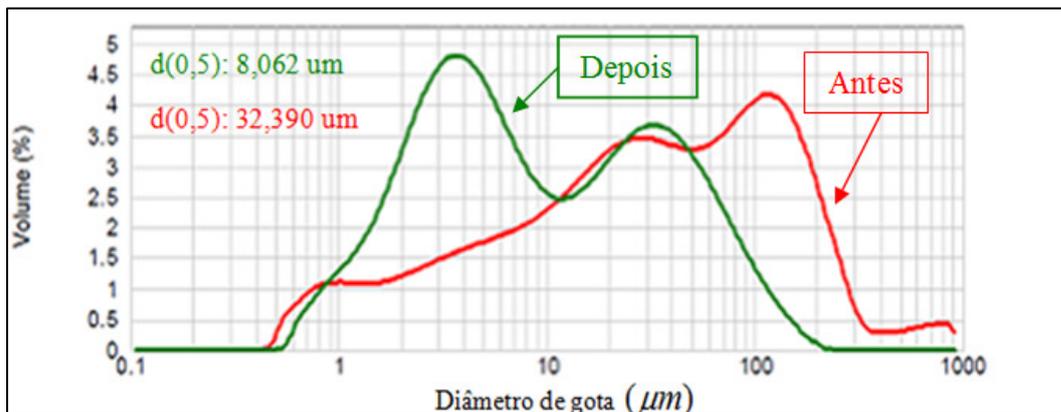


Figura 4.4 Distribuição de tamanho de gota antes e depois da válvula de agulha para a emulsão formada com o óleo Tivela S 150 a uma vazão de 1,5 l/min e queda de pressão fixada com água de 20,0 psi.

Para a análise do diâmetro médio de gota $d(0,5)$ e da superfície específica da fase dispersa das emulsões produzidas em função dos parâmetros de operação, computamos a taxa de dissipação de energia \dot{W}_e na válvula agulha através da equação:

$$\dot{W}_e = Q \cdot \Delta P \quad (4-1)$$

Onde, Q é a vazão injetada pela bomba helicoidal e ΔP a queda de pressão na válvula agulha.

Na figura 4.5 apresentamos os resultados em escala logarítmica do diâmetro médio de gota da fase dispersa $d(0,5)$ antes da válvula agulha em função da taxa de dissipação de energia calculada através da equação (4-1), para o óleo Tivela S 150 para as condições experimentais descritas na tabela 4.6.

Observamos que o diâmetro médio de gota da fase dispersa $d(0,5)$ antes da passagem pela válvula agulha não é influenciado pelo incremento da queda de pressão na mesma. Por outro lado, observamos a diminuição do diâmetro médio de gota das emulsões coletadas antes da válvula agulha com o aumento da vazão. Os resultados obtidos nos induzem a afirmar que o diâmetro de gota da fase dispersa antes da passagem pela válvula agulha é unicamente função da vazão. Esta dependência pode estar associada à rotação da bomba. No entanto, não foi possível conferir esta hipótese devido à falta de controle da distribuição do diâmetro médio de gota antes da passagem pela válvula agulha (no tanque de armazenamento e bomba).

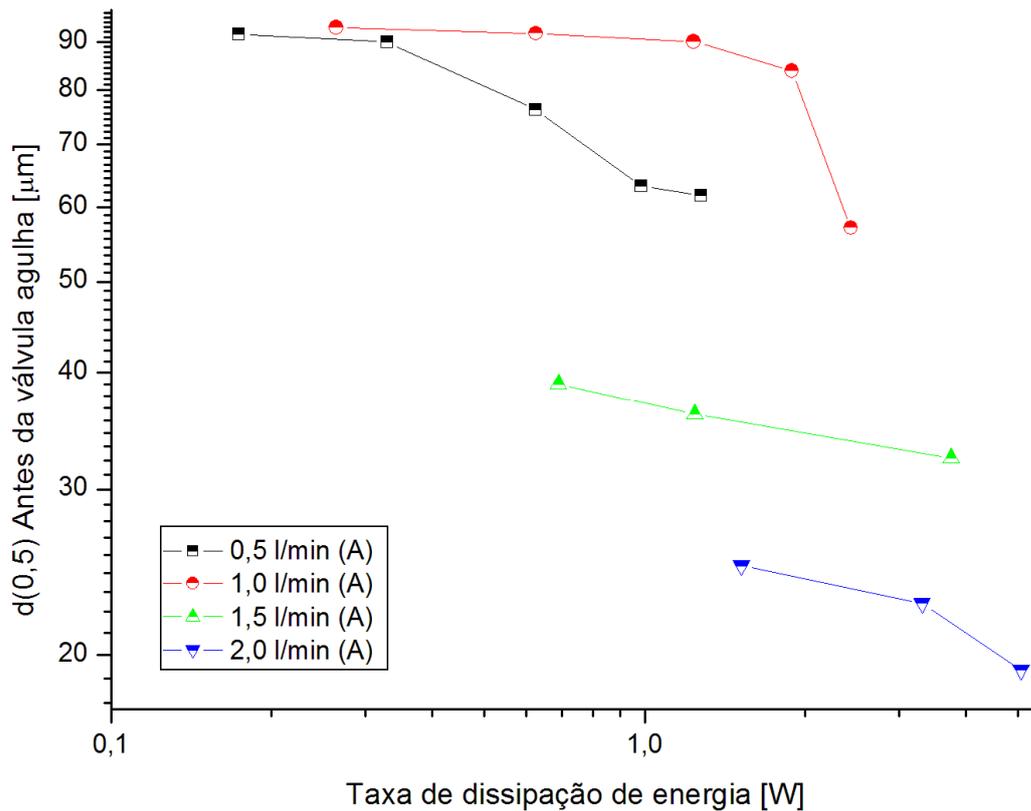


Figura 4.5 Diâmetro médio de gota da fase dispersa coletada antes da válvula agulha em função da taxa de dissipação de energia para o óleo Tivela S 150.

Na figura 4.6 apresentamos os resultados em escala logarítmica do diâmetro médio de gota da fase dispersa $d(0,5)$ das emulsões coletadas depois da válvula agulha em função da taxa de dissipação de energia para o óleo Tivela S 150 para as condições experimentais da tabela 4.6.

O comportamento das curvas indica o aumento do diâmetro médio de gota da fase dispersa $d(0,5)$ na medida em que incrementamos a vazão. Este comportamento é contrário ao esperado. Observamos que podemos obter para um mesmo valor de taxa de dissipação de energia três valores de diâmetro médio de gota. Isto é devido à que a taxa de dissipação de energia depende ao mesmo tempo da vazão e da queda de pressão, podendo-se obter o mesmo valor de taxa de dissipação de energia tanto para altas quedas de pressão e baixas vazões como para baixas quedas de pressão e altas vazões. Portanto, concluímos que o diâmetro médio de gota $d(0,5)$ não é função da taxa de dissipação de energia, conseqüentemente esse parâmetro não é adequado para avaliar o efeito da válvula agulha sobre o diâmetro de gota da fase dispersa. Nesse último resultado

encontramos uma grande diferença com o trabalho do Van der Zande [6] quem encontrou boas correlações entre o diâmetro de gota da fase dispersa $d(0,95)$ e a taxa de dissipação de energia. Porém devemos considerar que varias das condições operacionais correlacionadas por Van der Zande não foram utilizadas nessa dissertação.

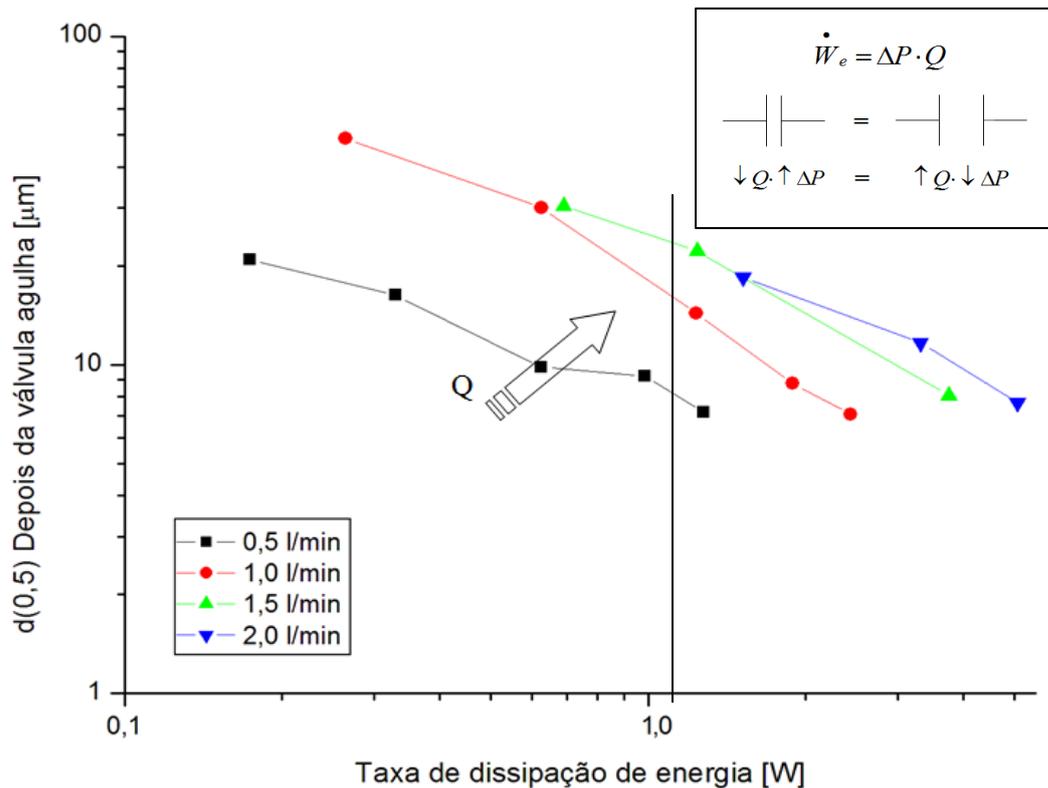


Figura 4.6 Diâmetro médio de gota da fase dispersa coletada depois da válvula agulha em função da taxa de dissipação de energia para óleo Tivela S 150.

Na figura 4.7 apresentamos a superfície específica da fase dispersa das emulsões coletadas depois da válvula agulha em função da taxa de dissipação de energia para o óleo Tivela S 150 (condições experimentais da tabela 4.6).

Observamos que para um valor fixo de taxa de dissipação de energia, a superfície específica aumenta com a diminuição da vazão. Partindo destes resultados observamos que a taxa de dissipação de energia não descreve adequadamente o processo de quebra de gota em função da superfície específica. Esse resultado é análogo ao caso da figura 4.6 no qual a taxa de dissipação de energia depende ao mesmo tempo tanto da vazão como da queda de pressão.

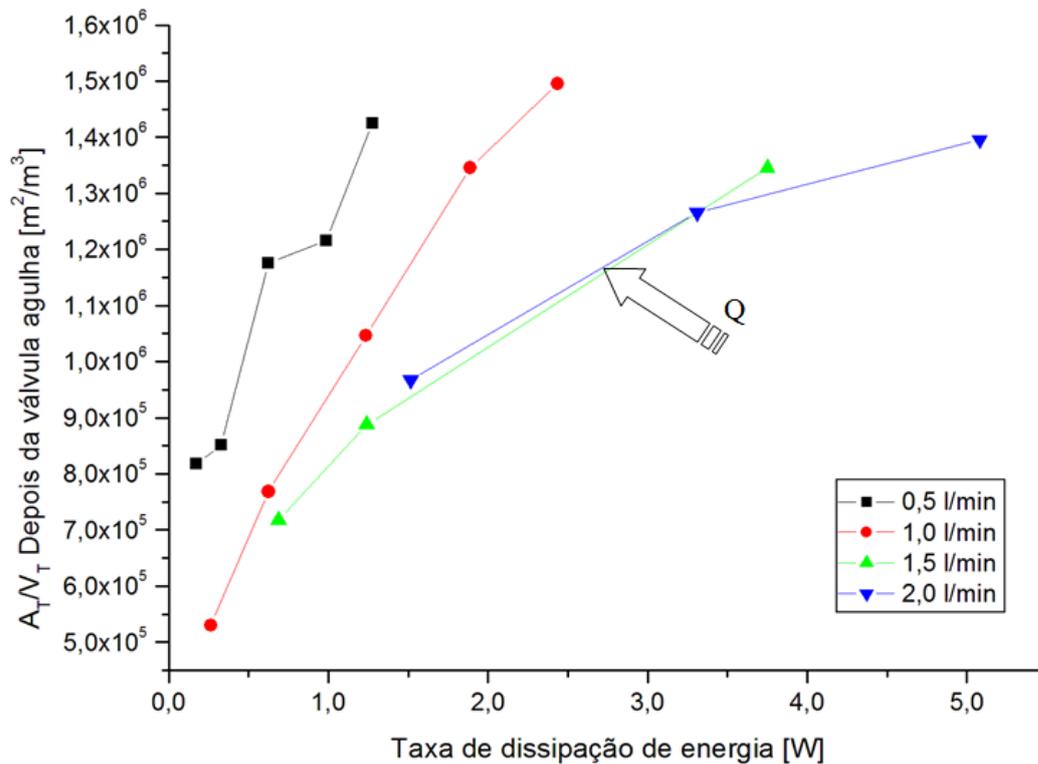


Figura 4.7 Superfície específica em função da taxa de dissipação de energia para óleo Tivela S 150.

A figura 4.8 apresenta os resultados da superfície específica da fase dispersa coletada depois da válvula agulha em função da queda de pressão para o óleo Tivela S 150 para as condições experimentais descritas na tabela 4.6. Nesse caso, observamos que para todas as curvas temos uma relação de proporcionalidade direta entre a superfície específica e a queda de pressão na válvula agulha. Observamos também que o incremento da queda de pressão devido ao fechamento da válvula agulha para cada vazão fixa influencia fortemente o processo de quebra de gota originando o aumento da superfície específica. Os resultados mostram que o efeito da vazão no diâmetro de gota depois da válvula agulha é quase desprezível. Observamos que para as diferentes vazões não houve um incremento significativo de área específica. Portanto, foi mostrada a forte influência da queda de pressão a qual por sua vez é fortemente influenciada pela abertura da válvula e pela vazão.

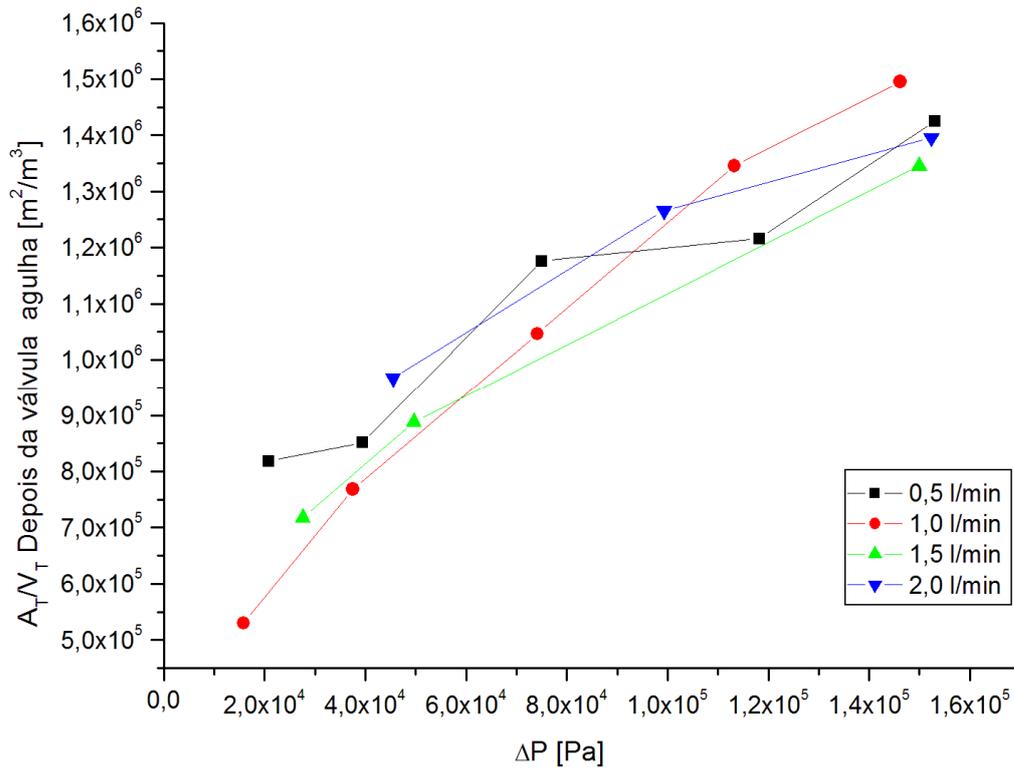


Figura 4.8 Superfície específica em função da queda de pressão para óleo Tivela S 150.

4.3.2.

Resultados experimentais obtidos com o Método 2

Analogamente ao método 1, para o método 2 o comportamento das distribuições de diâmetro de gota das emulsões coletadas antes e depois da válvula foram bimodais e muito similares. Inicialmente apresentamos a distribuição de diâmetro de gota da fase dispersa das emulsões coletadas antes e depois da válvula agulha. A seguir apresentamos uma análise do diâmetro médio $d(0,5)$ e da superfície específica da fase dispersa em função das variáveis de operação e da taxa de dissipação de energia.

Nas figuras 4.9 e 4.10 apresentamos a sobreposição das distribuições de diâmetro de gota das amostras coletadas antes e depois da válvula agulha para as condições experimentais 10 e 15 da tabela 4.7. Mostramos na parte superior esquerda das figuras os valores de diâmetro médio de gota $d(0,5)$ da fase dispersa. Nessas figuras foram utilizadas as cores vermelha e verde para as distribuições de diâmetro de gota antes e depois da válvula agulha respectivamente. No método 2, o efeito de quebra de gota originado pela válvula agulha qualitativamente foi exatamente o mesmo ao método 1 mas, com a diferença que as gotículas de fase

dispersa coletadas depois da válvula foram menores. Essa diferença pode atribuir-se à maior faixa de quedas de pressão atingidas com o método 2.

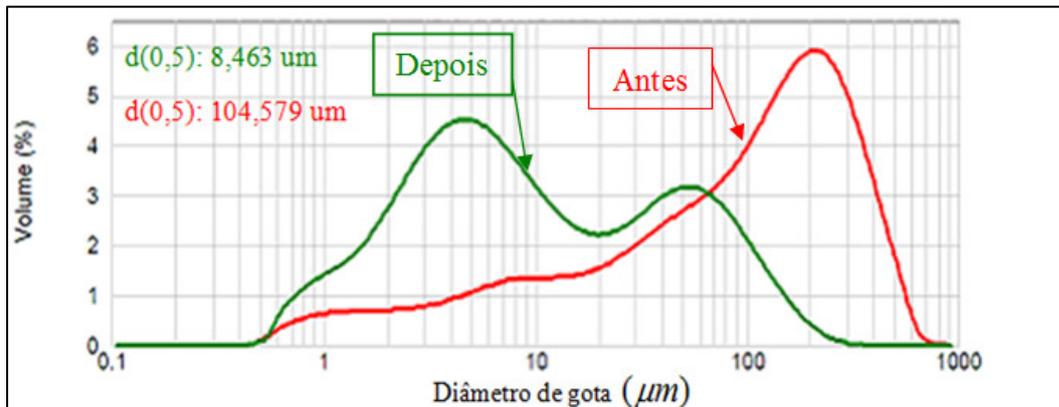


Figura 4.9 Distribuição de diâmetro de gota das emulsões coletadas antes e depois da válvula agulha para emulsão formada com o óleo Tivela S 150 a uma vazão de 1,0 l/min e uma queda de pressão inicial de 4,0 psi.

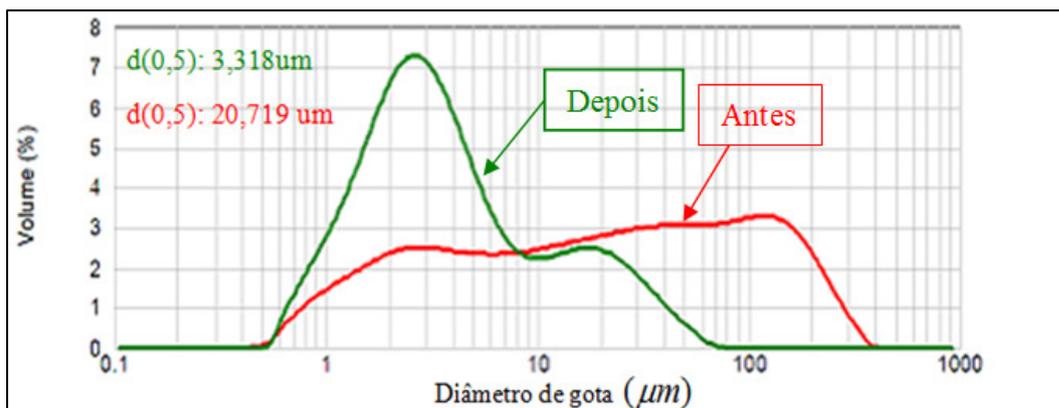


Figura 4.10 Distribuição de diâmetro de gota das emulsões coletadas antes e depois da válvula agulha para emulsão formada com o óleo Tivela S 150 a uma vazão de 1,5 l/min e uma queda de pressão inicial de 10,0 psi.

A figura 4.11 apresenta o diâmetro médio de gota $d(0,5)$ da fase dispersa coletada antes da válvula agulha em função da vazão. A posição da válvula é caracterizada pela queda de pressão ΔP_0 gerada na válvula agulha para o escoamento de emulsão com a menor vazão utilizada para todos os experimentos. Cada curva caracteriza o diâmetro de gota da emulsão para diferentes aberturas da válvula agulha em função da vazão. Em todas as curvas podemos observar a diminuição do diâmetro médio de gota da fase dispersa com o aumento da vazão. Analogamente às observações realizadas no método 1, os resultados obtidos nos

induzem a afirmar que o diâmetro de gota da fase dispersa antes da passagem pela válvula agulha é unicamente função da vazão, no entanto, não foi possível conferir esta hipótese devido à falta de controle da distribuição do diâmetro médio de gota antes da passagem pela válvula agulha (no tanque de armazenamento e bomba). Por outro lado, observamos também que para um valor fixo de vazão, os resultados mostram que mesmo para altas quedas de pressão a influencia no diâmetro médio das gotas foi muito pouca.

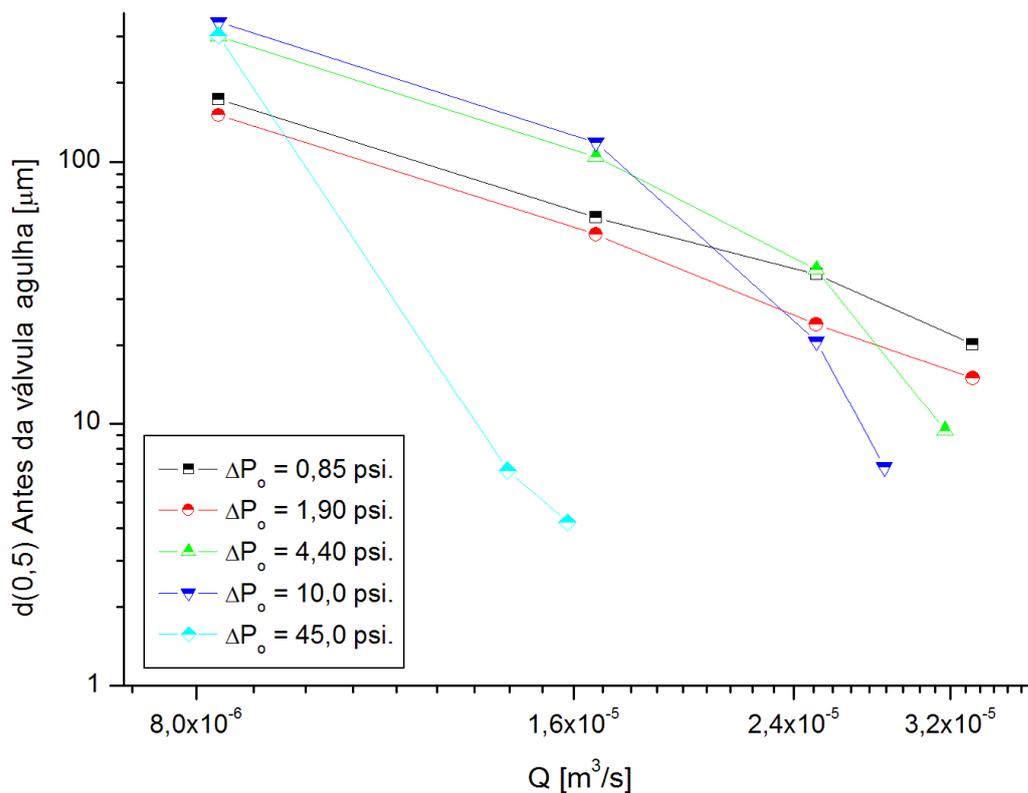


Figura 4.11 Diâmetro de médio de gota $d(0,5)$ antes da válvula agulha em função da vazão.

A figura 4.12 apresenta a superfície específica da fase dispersa coletada depois da válvula agulha em função da queda de pressão para o óleo Tivela S 150 para as condições experimentais descritas na tabela 4.7. Podemos observar a grande influencia da queda de pressão na válvula agulha sobre a superfície específica das gotas mediante a tendência das curvas se sobreporem mostrando que a superfície específica foi unicamente função da queda de pressão. Por tanto, podemos concluir que a queda de pressão é o parâmetro determinante para avaliar o processo de quebra de gota na válvula agulha. Os resultados obtidos com o

Método 2 atingiram faixas maiores de quedas de pressão, o que permitiu observar mais claramente o comportamento assintótico de superfície específica da fase dispersa.

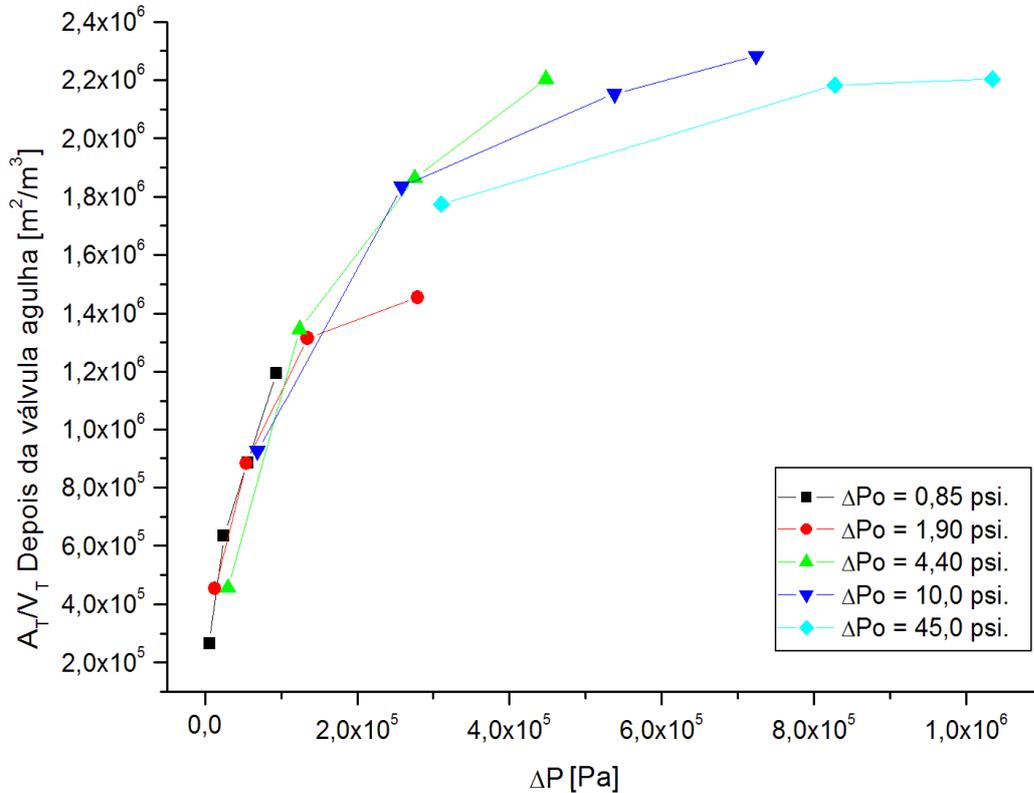


Figura 4.12 Superfície específica em função da queda de pressão na válvula agulha.

Na figura 4.13 observamos os resultados em escala logarítmica do diâmetro médio de gota $d(0,5)$ da fase dispersa coletada depois da válvula agulha em função da taxa de dissipação de energia para o óleo Tivela S 150 para as condições experimentais descritas na tabela 4.7.

O maior diâmetro médio de gota da fase dispersa $d(0,5)$ foi obtido na menor taxa de dissipação de energia. Podemos observar que o diâmetro médio $d(0,5)$ se aproxima de um valor assintótico para altos valores da taxa de dissipação de energia

Observamos em todas as curvas uma relação de proporcionalidade inversa entre o diâmetro médio da fase dispersa $d(0,5)$ e a taxa de dissipação de energia. Nesse gráfico o resultado foi análogo ao obtido com o Método 1, encontramos diferentes valores de diâmetro médio de gota para um mesmo valor de taxa de dissipação de energia indicando que esse parâmetro não é adequado para a análise

do processo de quebra de gota. Resultado contrário ao obtido no estudo do Van der Zande [6] quem correlaciona bem o diâmetro de gota da fase dispersa com a taxa de dissipação de energia. Na seqüência, avaliamos independentemente o diâmetro médio de gota $d(0,5)$ da fase dispersa coletada depois da válvula agulha em função da vazão e da queda de pressão.

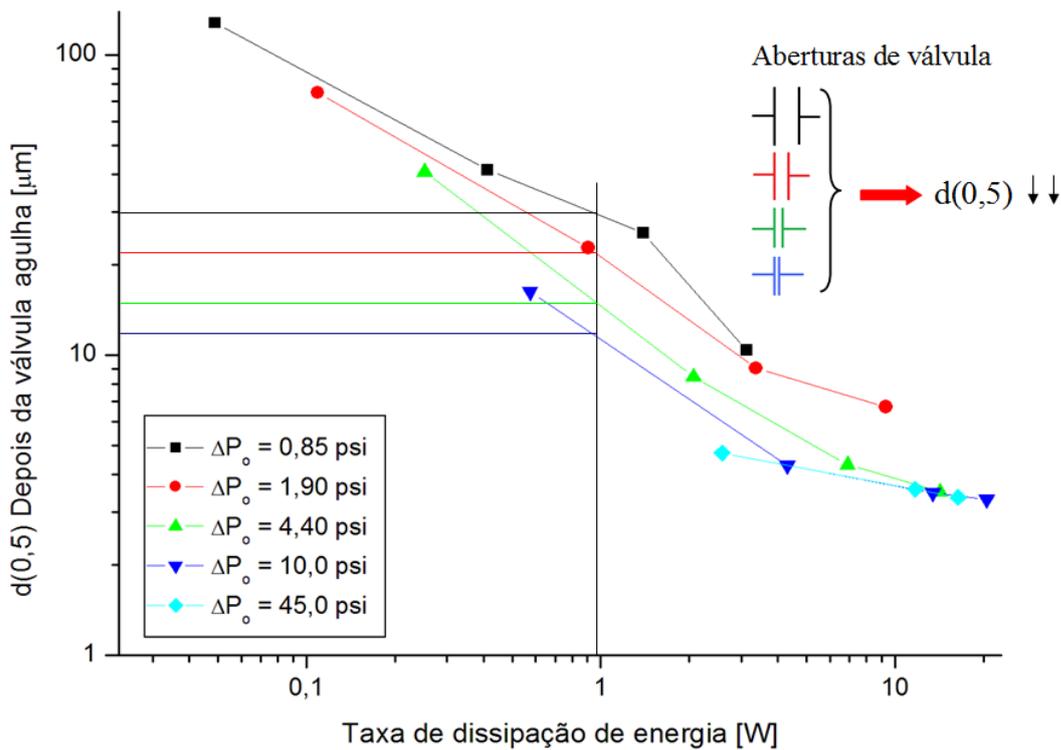


Figura 4.13 Diâmetro de gota da fase dispersa depois da válvula agulha em função da taxa de dissipação de energia.

Na figura 4.14 apresentamos os resultados em escala semi logarítmica do diâmetro de gota da fase dispersa coletada depois da válvula de agulha em função da vazão para o óleo Tivela S 150 para as condições experimentais descritas na tabela 4.7. Observamos em todas as curvas uma relação de proporcionalidade inversa entre o diâmetro médio da fase dispersa $d(0,5)$ e a vazão. Para as menores aberturas de válvula e escoamento de altas vazões fixadas obtivemos um valor de diâmetro médio de gota $d(0,5)$ com tendência assintótica. O comportamento é muito similar às curvas da figura 4.13. Observamos também nesses resultados vários valores de diâmetro médio de gota para um mesmo valor de vazão o que indica que esse também não foi o parâmetro adequado de avaliação do processo de quebra de gota.

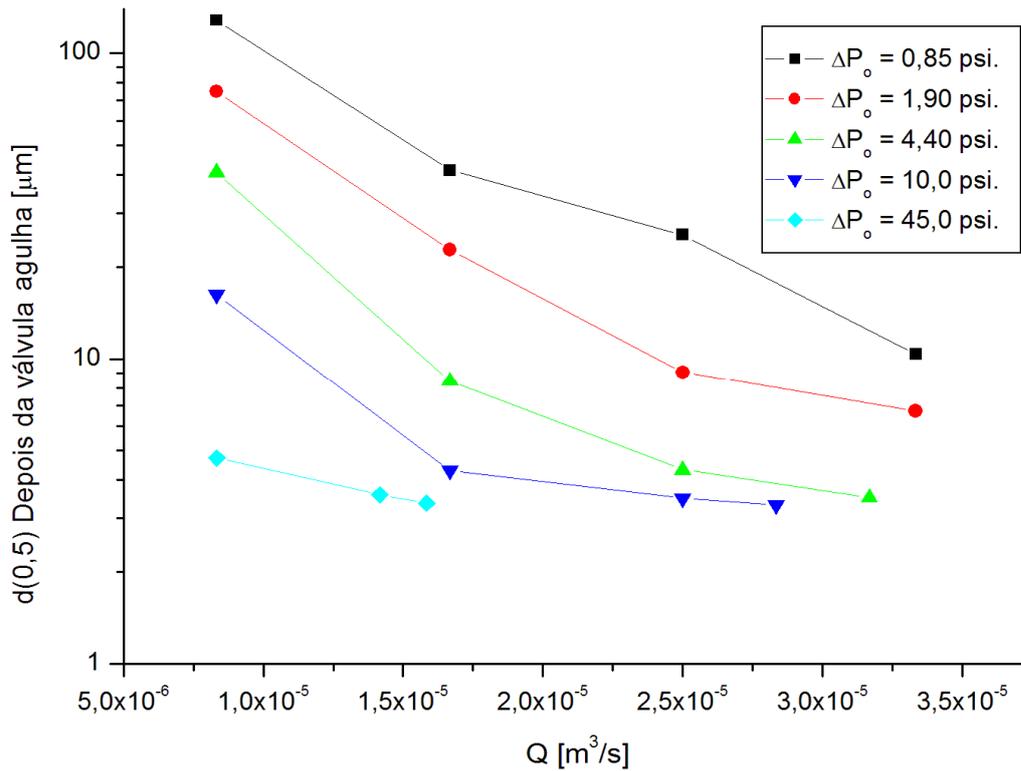


Figura 4.14 Diâmetro de gota da fase dispersa depois da válvula agulha em função da vazão.

A figura 4.15 apresenta os resultados em escala semi logarítmica do diâmetro de gota da fase dispersa $d(0,5)$ depois da válvula agulha em função da queda de pressão para o óleo Tivela S 150 para as condições experimentais descritas na tabela 4.7. Na figura mostramos o resultado mais importante dessa dissertação. Observamos que todos os pontos correspondentes a diferentes condições experimentais se alinham em uma única só curva mostrando que o diâmetro médio de gota $d(0,5)$ da fase dispersa foi unicamente função da queda de pressão. Isto significa que independentemente da abertura da válvula agulha ou da vazão que escoar através dela, a resposta de diminuição de diâmetro médio de gota $d(0,5)$ da fase dispersa é unicamente resposta da combinação desses dois parâmetros. Além disso, uma característica muito significativa que também mostrou esse resultado foi o comportamento assintótico para altos valores de quedas de pressão onde o diâmetro médio de gota da fase dispersa permanece estável. Este comportamento assintótico inicia-se em um valor crítico de queda de pressão tal como se mostra na figura.

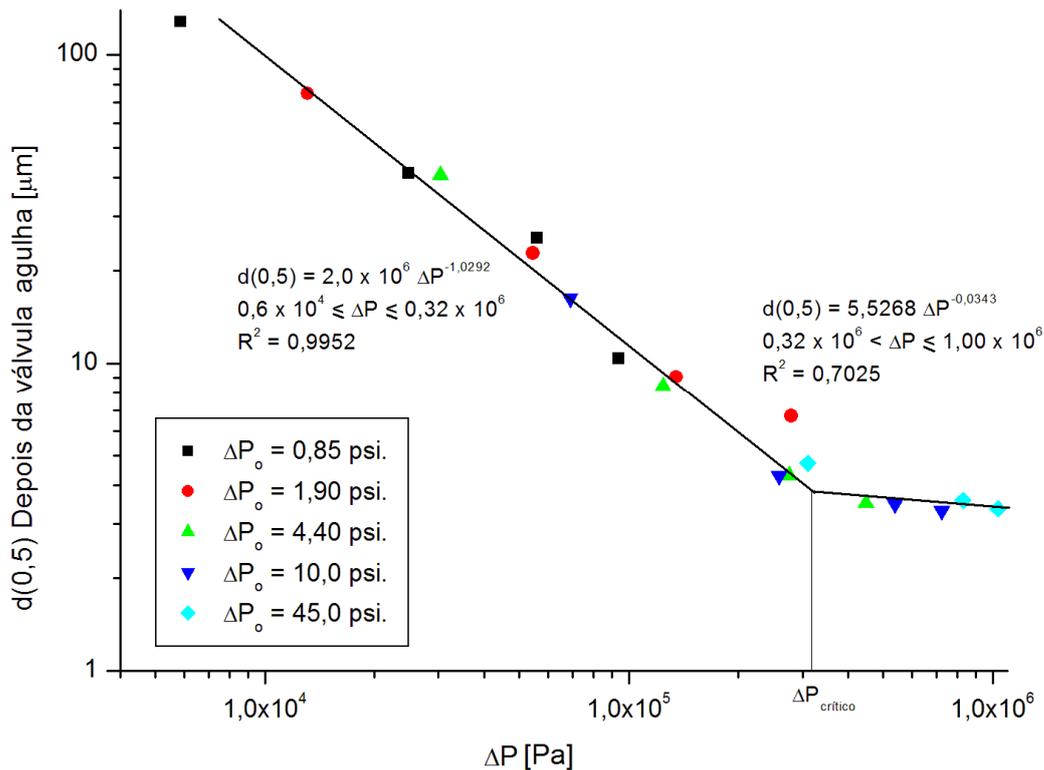


Figura 4.15 Diâmetro médio de gota da fase dispersa $d(0,5)$ coletada depois da válvula agulha em função da queda de pressão para o óleo Tivela S 150 utilizando o Método 2.

Na figura 4.16 apresentamos os resultados em escala logarítmica do diâmetro médio de gota da fase dispersa coletada depois da válvula agulha em função da queda de pressão utilizando ambos métodos para o óleo Tivela S 150 para as condições experimentais descritas nas tabelas 4.6 e 4.7. Os resultados mostram que o comportamento do diâmetro médio de gota $d(0,5)$ foi muito próximo para ambos os métodos. A diferença mais importante foi o intervalo de quedas de pressão coberto por cada método. Observamos que com o Método 2 cobrimos um intervalo maior de quedas de pressão o que permitiu observar a tendência assintótica do diâmetro médio de gota. Podemos concluir que o diâmetro médio de gota $d(0,5)$ da fase dispersa é unicamente função da queda de pressão na válvula agulha.

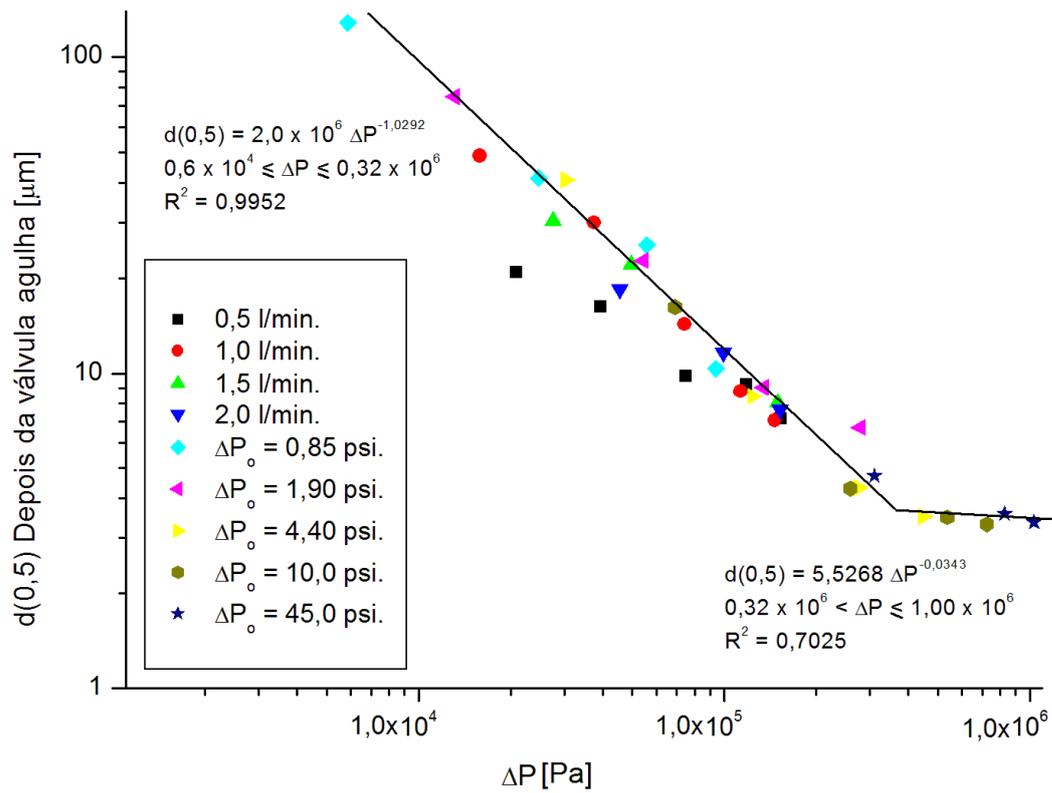


Figura 4.16 Diâmetro médio de gota em função da queda de pressão utilizando os Métodos 1 e 2.

4.4. Comentários finais

Foram preparadas diferentes emulsões óleo-em-água para escoar através de uma válvula agulha com o objetivo de estudar a influência de vários dos parâmetros experimentais que afetam o diâmetro de gota das emulsões produzidas: vazão, abertura de válvula e queda de pressão na válvula agulha. Os resultados mostraram uma relação inversa entre o diâmetro médio $d(0,5)$ da fase dispersa e a queda de pressão na válvula agulha, e que o diâmetro médio de gota $d(0,5)$ atinge um valor assintótico para altas quedas de pressão. Do mesmo modo, observamos uma boa correlação de proporcionalidade direta entre a queda de pressão na válvula e a área específica da fase dispersa a qual também atinge valores assintóticos nos mais altos valores de queda de pressão utilizados. Por outro lado, os resultados também mostraram uma variação do diâmetro médio de gota $d(0,5)$ em relação à taxa de dissipação de energia, mas observamos que este não foi o parâmetro adequado para analisar o processo de quebra de gota das emulsões. Os resultados de diâmetro médio de gota depois da válvula agulha em função da queda de pressão obtidos pelos dois métodos avaliados mostram uma forte correlação entre estes dois parâmetros levando-nos a concluir que o tamanho de gota das emulsões produzidas é fortemente influenciado pela queda de pressão na válvula agulha.

Finalmente, recomendamos para trabalhos futuros o estudo do efeito da natureza e concentração do surfactante bem como o efeito da relação de viscosidades das fases da emulsão sobre o diâmetro de gota da fase dispersa.