

4 Resultados

O foco deste trabalho foi estudar os mecanismos de formação de emulsões o/a em uma junção micro-fluídica T com seção oval, pela formação de gota no mecanismo confinado (gota maior do que a largura do canal), já proposto por outros autores para junções micro-fluídicas T com seção retangular. Porém, este estudo não abordou a formação de gota não confinada (gota menor do que a largura do canal) porque não foi observada.

Para gerar a maior quantidade de dados, foram variadas as razões de vazões de injeção, as razões de viscosidades e as tensões interfaciais entre fases, assim foram obtidos sete sistemas diferentes com alguma variável comum que permitisse fazer comparações entres os sistemas. A análise destes resultados permitiu determinar o efeito sobre o tamanho de gota, pela influência das vazões, das viscosidades e das tensões interfaciais dos fluidos imiscíveis injetados separadamente. Assim, as razões das vazões (Q_d/Q_c), das viscosidades (μ_d/μ_c) e as variáveis adimensionais como o número de capilaridade da fase dispersa Ca_d e da fase contínua Ca_c mostraram ter grande influência no processo. Desta forma foi utilizado o número de capilaridade Ca_c , definido no capítulo 2, para descrever a influência de forças viscosas e forças capilares sobre a formação de gota em sistemas não confinados e em sistemas confinados com seções retangulares, fazendo uma diferenciação importante de como, apesar de descrever o mesmo efeito, ele atua de diferente forma se comparamos com o presente estudo de formação confinada em seções ovais.

Para uma melhor descrição dos resultados, foi feita uma separação dos mecanismos de quebra observados em cada sistema. Assim, analisou-se primeiro o mecanismo chamado de *squeezing*, observado para toda a faixa de vazões explorada nos seis primeiros sistemas e para baixas vazões no último sistema. Neste caso, é proposta uma relação empírica que descreve, de forma aproximada, o tamanho de gota formada em junções micro-fluídicas T com seções ovais. Esta relação se diferencia das relações propostas na literatura, para junções micro-

fluídicas T com seções retangulares, principalmente pelos efeitos das velocidades de fases durante o processo de formação de gota.

Finalmente, descreve-se o mecanismo *jetting* que foi observado para médias e altas vazões no último sistema estudado.

Na tabela (4.1), é apresentado o resumo das propriedades principais dos fluidos utilizados para os sete sistemas avaliados.

Sistema	Fase	Descrição	Referência	Propriedades @ 23°C			
				Viscosidade	Massa específica	Tensão superficial	Tensão interfacial ²
				(mPa.s)	(g/cm ³)	(mN/m)	(mN/m)
N° 1	Disp.	Óleo Mineral OP3	Inst. Pesq. Tecnológicas	3.40	0.7860	24.8	47.5
	Cont.	Água		0.94	0.9974	72.3	
N° 2	Disp.	Óleo Velocite N°6	Exxon Mobil	16.90	0.8537	22.0	50.3
	Cont.	Água		0.94	0.9974	72.3	
N° 3	Disp.	Óleo Mineral OP3	Inst. Pesq. Tecnológicas	3.40	0.7860	24.8	9.0
	Cont.	Água com surfactante ¹		0.97	0.9987	33.8	
N° 4	Disp.	Óleo padrão OP3	Inst. Pesq. Tecnológicas	3.40	0.7860	24.8	9.3
	Cont.	Água com surf. ¹ (40%) + Glicerina (60%)		12.47	1.163	34.1	
N° 5	Disp.	Óleo Velocite N°6	Exxon Mobil	16.90	0.8537	22.0	11.8
	Cont.	Água com surfactante ¹		0.97	0.9987	33.8	
N° 6	Disp.	Óleo Velocite N°6	Exxon Mobil	16.90	0.8537	22.0	12.1
	Cont.	Água com surf. ¹ (40%) + Glicerina (60%)		12.47	1.163	34.1	
N° 7	Disp.	Óleo Talpa 30	Shell	438.13	0.9086	32.3	1.5
	Cont.	Água com surfactante ¹		0.97	0.9987	33.8	

¹ : Dodecil sulfato de sódio utilizado para todos os sistemas em 2 CMC \approx 2.3 g/L de água.

² : A tensão interfacial foi calculada segundo a regra de Antonoff [45].

Tabela 4.1: Tabela resumo das propriedades principais dos fluidos utilizados nos sete sistemas avaliados.

A figura (4.1) mostra o tamanho de gota como função da razão de vazões dos fluidos injetados para os sete sistemas estudados. A técnica de formação de gotas por fluxo cruzado, na junção de micro canais em T de seção oval, produziu emulsões monodispersas em todos os sistemas estudados. A tendência geral de todas as medições experimentais, feitas nesta junção, concorda bem com a tendência geral dos experimentos estabelecidos na literatura para os casos de junção micro-fluídica T de seção retangular [27, 34, 45, 46, 47].

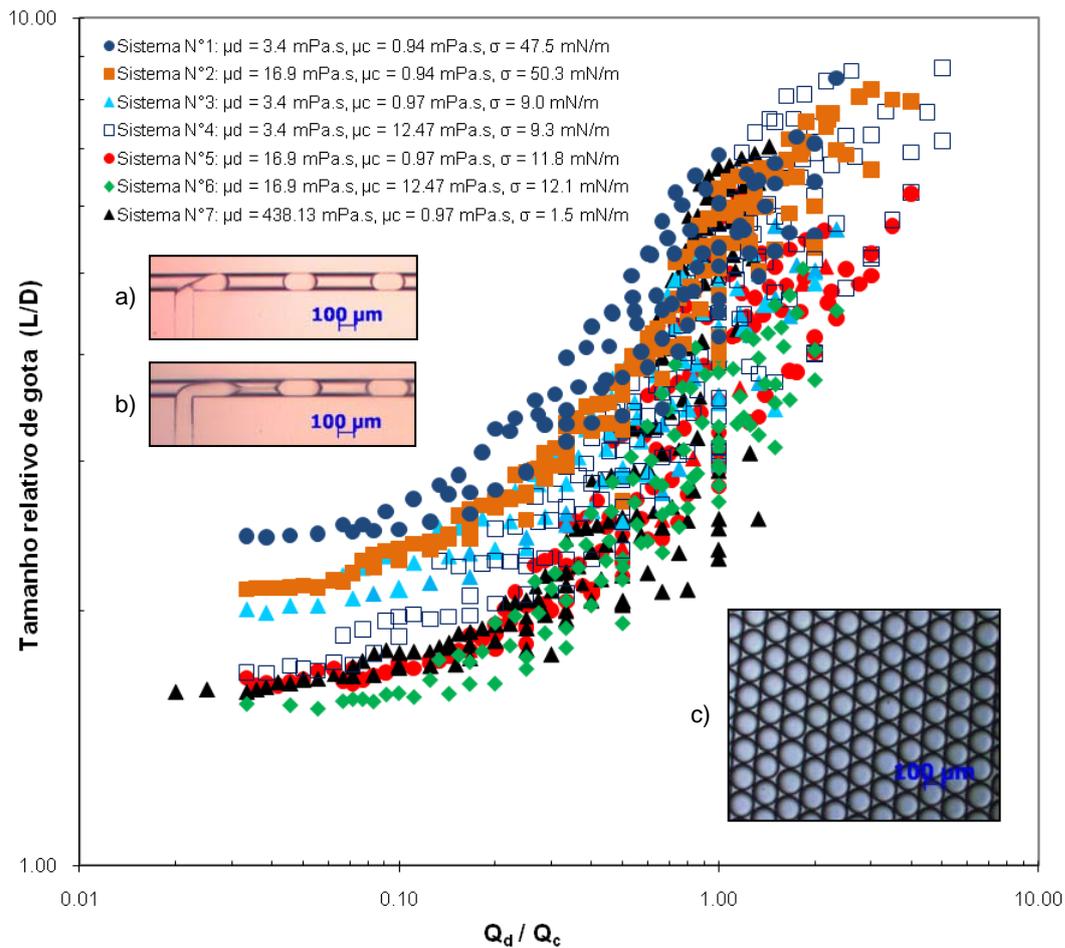


Figura 4.1: Tamanho de gota em função da razão de vazões dos fluidos injetados para os sete sistemas estudados. a) Regime observado de estrangulamento ou *squeezing* nos sistemas N°1 - N°6. b) Regime observado tipo jato ou *jetting* no sistema N°7 (médias e altas vazões de injeção da fase dispersa). c) Emulsão formada (o/a) foi monodispersa em todos os sistemas.

4.1. Análise dos dados obtidos

Os dados da figura (4.1) são analisados de maneira conveniente, para um melhor entendimento dos mecanismos de formação e dos efeitos das vazões, das viscosidades e das tensões interfaciais dos fluidos no tamanho das gotas formadas. Desta forma, descrevem-se primeiro os sistemas onde foi observado o mecanismo de formação do tipo *squeezing* e, ao final o sistema onde o mecanismo de formação foi do tipo *jetting*.

4.1.1. Formação de gotas no mecanismo “squeezing”

Este mecanismo foi observado e descrito por Garstecki *et. al.* [27] para formação de gotas em junções micro-fluídicas T de seção retangular (ver capítulo 2). Este tipo de mecanismo também foi observado na junção micro-fluídica T de seção oval utilizada no presente trabalho. A figura (4.2) apresenta um esquema deste tipo de quebra de gota:

Quebra confinada tipo “Squeezing”

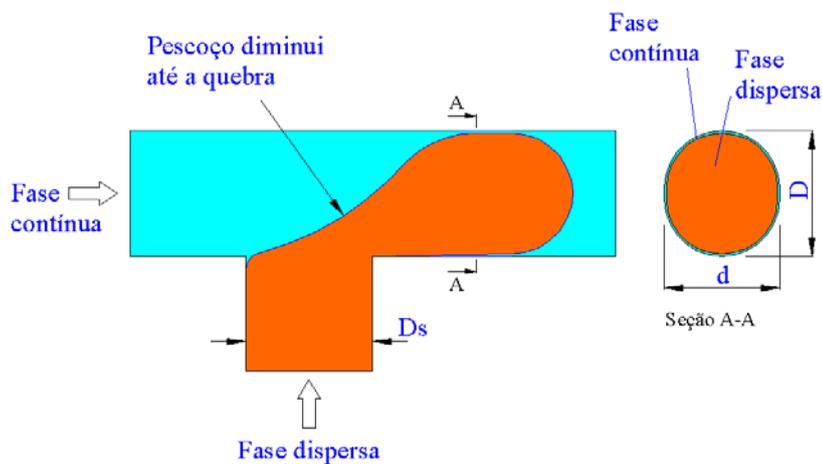


Figura 4.2: Mecanismo de quebra chamado de *squeezing*. A quebra se produz pela diminuição do pescoço da gota em formação, pelo bloqueio do fluxo da fase contínua no canal principal que faz incrementar sua pressão antes da interface.

A sequência de figuras (4.3) até (4.8) mostra as diferentes etapas no processo de formação de gota nos sistemas N°1 até N°6, onde só foi observado a quebra do tipo *squeezing* que é representado pelas figuras para vazões de $Q_d=0.05$ ml/h e $Q_c=0.05$ ml/h, isto é $Q_d/Q_c=1$.

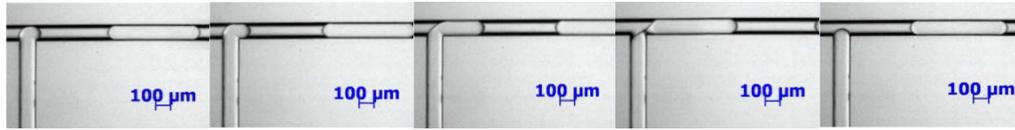


Figura 4.3: Formação de gota observada no sistema N°1 para $Q_d=0.05$ ml/h e $Q_c=0.05$ ml/h ($\mu_d=3.4$ mPa.s, $\mu_c=0.94$ mPa.s, $\sigma=47.5$ mN/m, $\mu_d/\mu_c=3.61$). $L=560.49$ μm , $L_{\text{mín}}=532.86$ μm , $L_{\text{máx}}=597.32$ μm . $\Delta t=80$ ms.

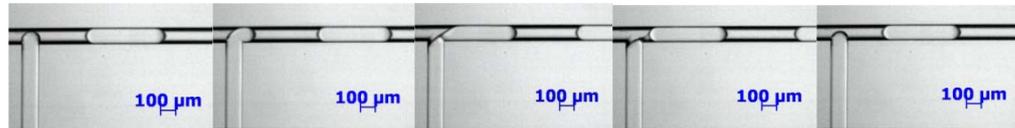


Figura 4.4: Formação de gota observada no sistema N°2 para $Q_d=0.05$ ml/h e $Q_c=0.05$ ml/h ($\mu_d=16.9$ mPa.s, $\mu_c=0.94$ mPa.s, $\sigma=50.3$ mN/m, $\mu_d/\mu_c=17.97$). $L=572.89$ μm , $L_{\text{mín}}=546.76$ μm , $L_{\text{máx}}=603.82$ μm . $\Delta t=80$ ms.

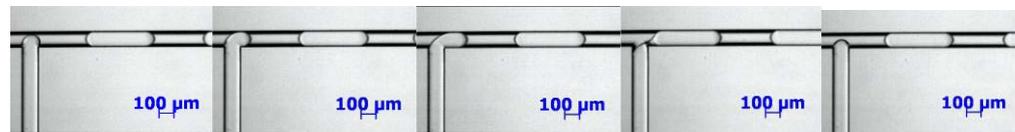


Figura 4.5: Formação de gota observada no sistema N°3 para $Q_d=0.05$ ml/h e $Q_c=0.05$ ml/h ($\mu_d=3.4$ mPa.s, $\mu_c=0.97$ mPa.s, $\sigma=9.0$ mN/m, $\mu_d/\mu_c=3.5$). $L=442.40$ μm , $L_{\text{mín}}=425.19$ μm , $L_{\text{máx}}=456.38$ μm . $\Delta t=60$ ms.



Figura 4.6: Formação de gota observada no sistema N°4 para $Q_d=0.05$ ml/h e $Q_c=0.05$ ml/h ($\mu_d=3.4$ mPa.s, $\mu_c=12.47$ mPa.s, $\sigma=9.3$ mN/m, $\mu_d/\mu_c=0.27$). $L=390.83$ μm , $L_{\text{mín}}=379.24$ μm , $L_{\text{máx}}=403.75$ μm . $\Delta t=60$ ms.

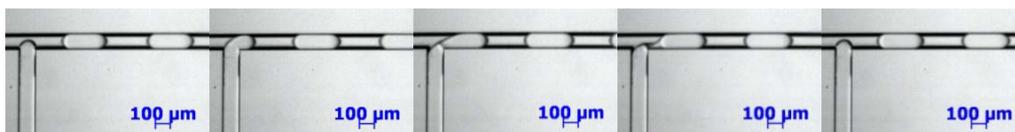


Figura 4.7: Formação de gota observada no sistema N°5 para $Q_d=0.05$ ml/h e $Q_c=0.05$ ml/h ($\mu_d=16.9$ mPa.s, $\mu_c=0.97$ mPa.s, $\sigma=11.8$ mN/m, $\mu_d/\mu_c=17.41$). $L=356.44$ μm , $L_{\text{mín}}=347.01$ μm , $L_{\text{máx}}=363.59$ μm . $\Delta t=50$ ms.

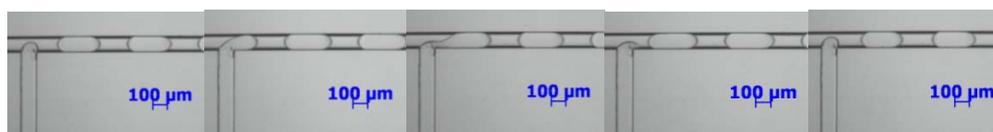


Figura 4.8: Formação de gota observada no sistema N°6 para $Q_d=0.05$ ml/h e $Q_c=0.05$ ml/h ($\mu_d=16.9$ mPa.s, $\mu_c=12.47$ mPa.s, $\sigma=12.1$ mN/m, $\mu_d/\mu_c=1.36$). $L=326.11$ μm , $L_{\text{mín}}=318.05$ μm , $L_{\text{máx}}=334.84$ μm . $\Delta t=50$ ms.

4.1.2.

Influência das variáveis controladas:

4.1.2.1.

Efeito das vazões dos fluidos injetados

Apresentam-se os resultados para os seis sistemas avaliados para vazões de fase contínua que vão de 0.01 ml/h até 0.15 ml/h, e para vazões fixas de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h. Nestas vazões fixas de fase dispersa, foram observados nos seis casos um comportamento decrescente do tamanho de gota para valores crescentes da vazão da fase contínua. Este comportamento tem duas zonas distintas em todos os casos, porém estas zonas estão, para cada sistema, sobre faixas de diferentes vazões de fase contínua injetada. Uma primeira zona onde o tamanho de gota cai com o aumento da fase contínua, e outra onde o tamanho de gota permanece quase constante. A faixa de vazões de fase contínua onde o tamanho de gota caiu, foi pequena para as vazões fixas de fase dispersa de 0.01 ml/h e maior para as vazões, também fixas, de 0.05 e 0.09 ml/h.

Foi também observado um comportamento crescente do tamanho de gota para valores crescentes de fase dispersa.

As figuras (4.9) até (4.14) mostram o tamanho de gota como função da vazão injetada de fase contínua para diferentes vazões injetadas de óleo. Estes gráficos correspondem aos sistemas estudados N°1 até N°6.

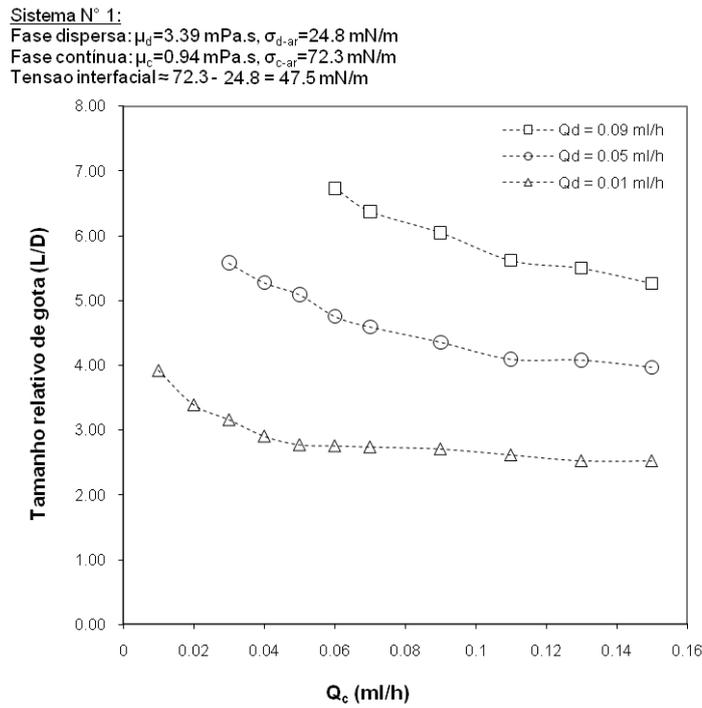


Figura 4.9: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para três diferentes vazões de fase dispersa correspondente ao sistema N°1.

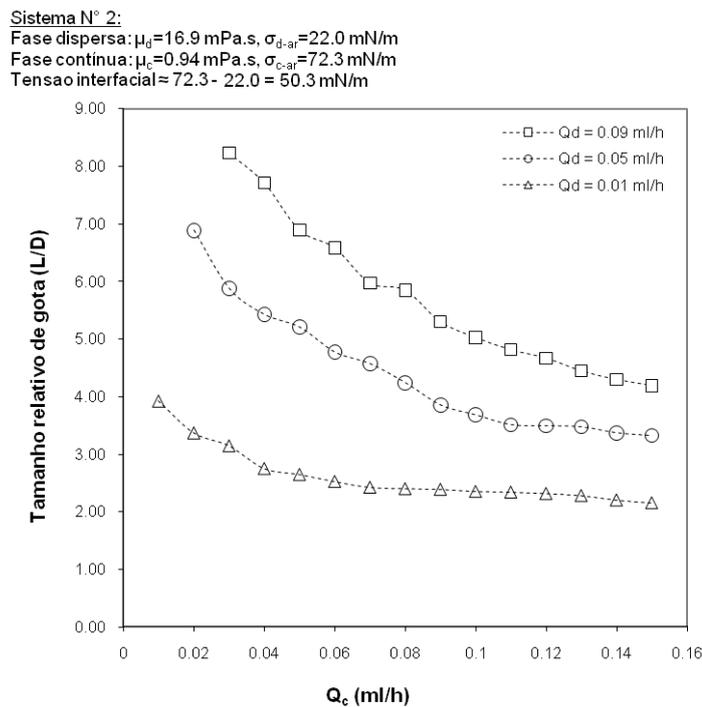


Figura 4.10: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para três diferentes vazões de fase dispersa correspondente ao sistema N°2.

Sistema N° 3:
 Fase dispersa: $\mu_d=3.39$ mPa.s, $\sigma_{d-ar}=24.8$ mN/m
 Fase contínua: $\mu_c=0.97$ mPa.s, $\sigma_{c-ar}=33.8$ mN/m
 Tensão interfacial $\approx 33.8 - 24.8 = 9.0$ mN/m

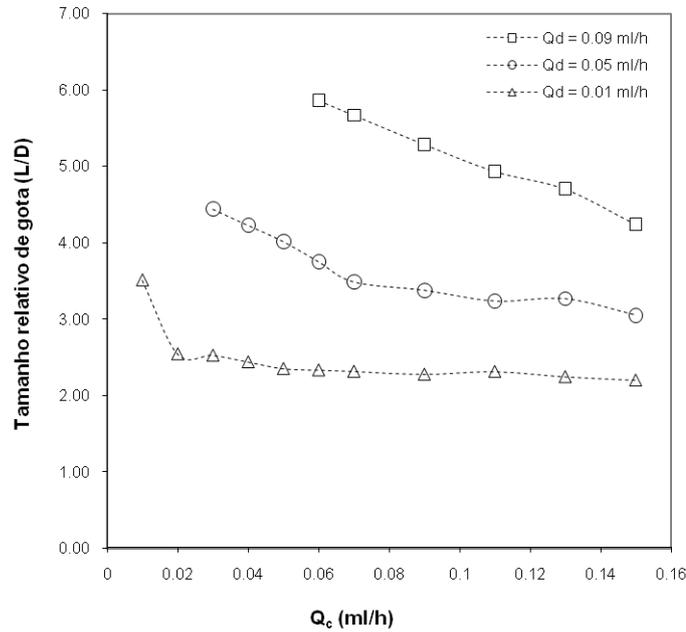


Figura 4.11: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para três diferentes vazões de fase dispersa correspondente ao sistema N°3.

Sistema N° 4:
 Fase dispersa: $\mu_d=3.39$ mPa.s, $\sigma_{d-ar}=24.8$ mN/m
 Fase contínua: $\mu_c=12.47$ mPa.s, $\sigma_{c-ar}=34.1$ mN/m
 Tensão interfacial $\approx 34.1 - 24.8 = 9.3$ mN/m

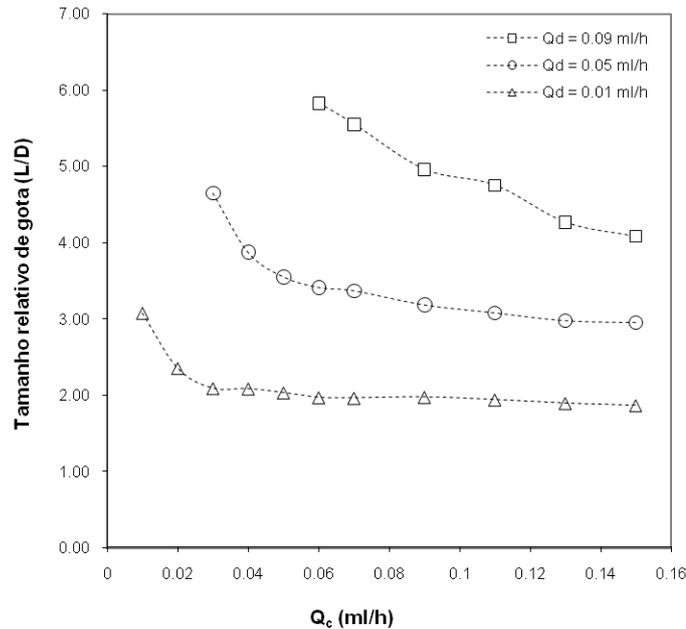


Figura 4.12: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para três diferentes vazões de fase dispersa correspondente ao sistema N°4.

Sistema N° 5:
 Fase dispersa: $\mu_d=16.9$ mPa.s, $\sigma_{d-ar}=22.0$ mN/m
 Fase contínua: $\mu_c=0.97$ mPa.s, $\sigma_{c-ar}=33.8$ mN/m
 Tensão interfacial $\approx 33.8 - 22.0 = 11.8$ mN/m

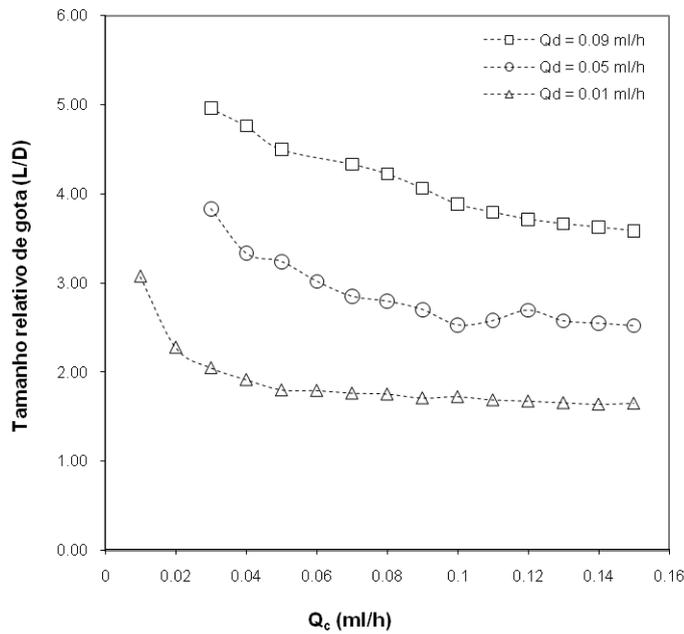


Figura 4.13: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para três diferentes vazões de fase dispersa correspondente ao sistema N°5.

Sistema N° 6:
 Fase dispersa: $\mu_d=16.9$ mPa.s, $\sigma_{d-ar}=22.0$ mN/m
 Fase contínua: $\mu_c=12.47$ mPa.s, $\sigma_{c-ar}=34.1$ mN/m
 Tensão interfacial $\approx 34.1 - 22.0 = 12.1$ mN/m

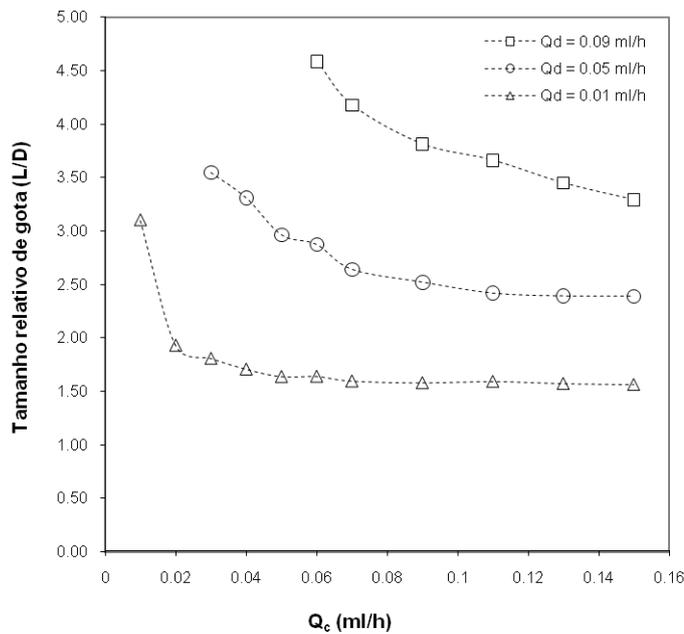


Figura 4.14: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para três diferentes vazões de fase dispersa correspondente ao sistema N°6.

O comportamento observado do tamanho de gota em função das vazões injetadas de fase contínua e dispersa pode ser avaliado analisando o mecanismo de formação de gota na junção. Segundo o observado nos sistemas N° 1 até N° 6, o mecanismo foi do tipo *squeezing*, ou seja, quebra na junção pelo estrangulamento do pescoço devido ao incremento da pressão da fase contínua a montante da junção, pelo bloqueio do canal principal, tal como foi descrito com maior detalhe no capítulo 2.

Deste modo, os resultados estabelecem que o tamanho de gota é inversamente proporcional com a vazão da fase contínua injetada, o qual pode ser explicado considerando que a vazão da fase contínua é a responsável do incremento da pressão *squeezing* que provoca a quebra da gota. Assim para vazões altas, o tempo de estrangulamento é menor, a gota quebra em menos tempo e, o tempo de crescimento se reduz formando gotas cada vez de menor tamanho.

O tamanho constante que é atingido claramente nas vazões fixas da fase dispersa de 0.01 e 0.05 ml/h, é consequência da influência da geometria do dispositivo micro-fluídico que controla o grau de confinamento das gotas [47].

Aqui é importante mencionar o que foi estabelecido no capítulo 3 sobre o fato da diferença da seção dos canais da junção micro-capilar T, que é do tipo retangular na literatura e do tipo elíptico neste trabalho. A diferença pode ser muito grande quando são analisados os efeitos viscosos que provoca a alta velocidade da fase contínua ao redor de uma gota em formação. A literatura reporta que a quebra é por efeitos viscosos [43] e também por um mecanismo que combina efeitos viscosos e bloqueio do canal principal [27]. Neste estudo não foi observado uma grande influência dos efeitos viscosos da fase contínua sobre a gota em formação. Foi observado que para se produzir a quebra tem que acontecer primeiro o bloqueio do canal principal, o que fixa também um tamanho mínimo da gota formada, que concorda bem com os resultados encontrados.

No caso das vazões maiores de fase dispersa a tendência é similar, tendo uma faixa onde o tamanho diminui fortemente e uma faixa onde a diminuição é fraca. Mas como a velocidade da fase dispersa é maior, ela estabelece um tamanho de gota maior do que as atingidas na mesma faixa de vazões de fase contínua quando foram injetadas baixas vazões de fase dispersa.

Como é de se esperar o tamanho de gota é proporcional à vazão da fase dispersa injetada, já que ela sempre contribui para o crescimento da gota.

4.1.2.2. Efeito da viscosidade da fase dispersa

Para poder estabelecer um efeito comparativo da influência da viscosidade da fase dispersa no tamanho de gota, apresenta-se casos nos quais se têm, nas mesmas condições, diferentes fases dispersas para uma mesma fase contínua.

São apresentados casos avaliados para vazões de fase contínua que vão de 0.01 ml/h até 0.15 ml/h, comparando o tamanho de gota de duas fases dispersas com diferentes viscosidades. Isso foi feito para cada vazão fixa de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h.

As figuras (4.15) até (4.20) mostram o tamanho da gota como função da vazão injetada de uma mesma fase contínua para duas fases dispersas com diferentes viscosidades. As três primeiras relacionadas com uma mesma fase contínua de viscosidade 0.97 mPa.s e, as três seguintes também com uma outra fase contínua, de viscosidade 12.47 mPa.s.

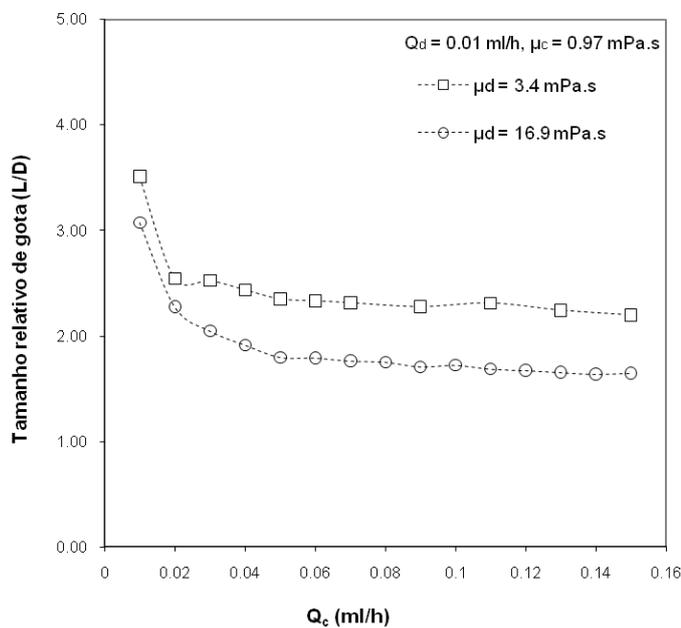


Figura 4.15: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para duas fases dispersas com diferentes viscosidades. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.01$ ml/h e $\mu_c=0.97$ mPa.s.

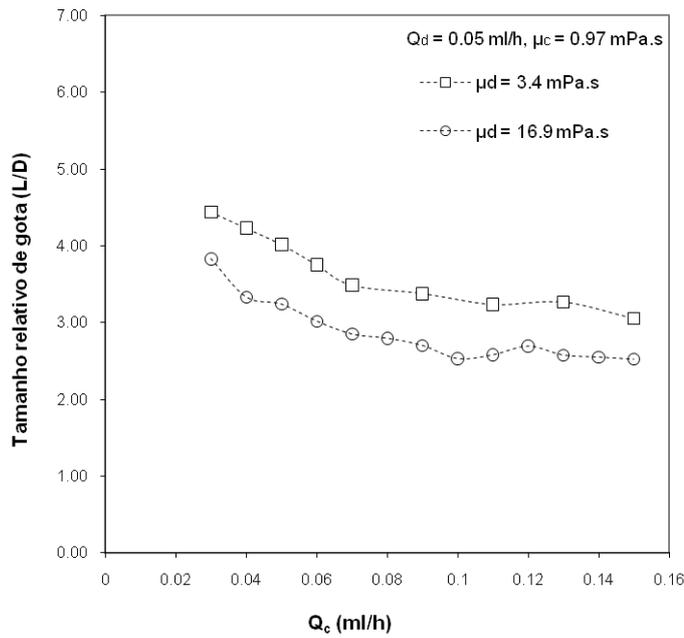


Figura 4.16: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para duas fases dispersas com diferentes viscosidades. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.05$ ml/h e $\mu_c=0.97$ mPa.s.

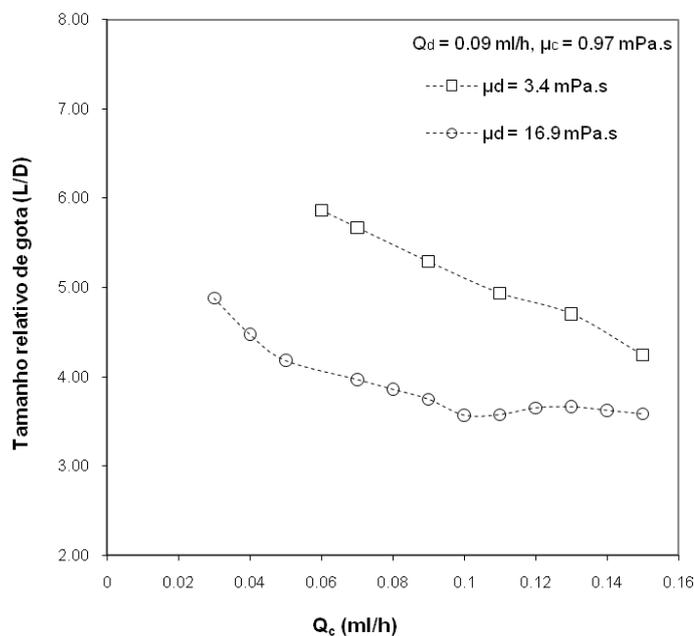


Figura 4.17: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para duas fases dispersas com diferentes viscosidades. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.09$ ml/h e $\mu_c=0.97$ mPa.s.

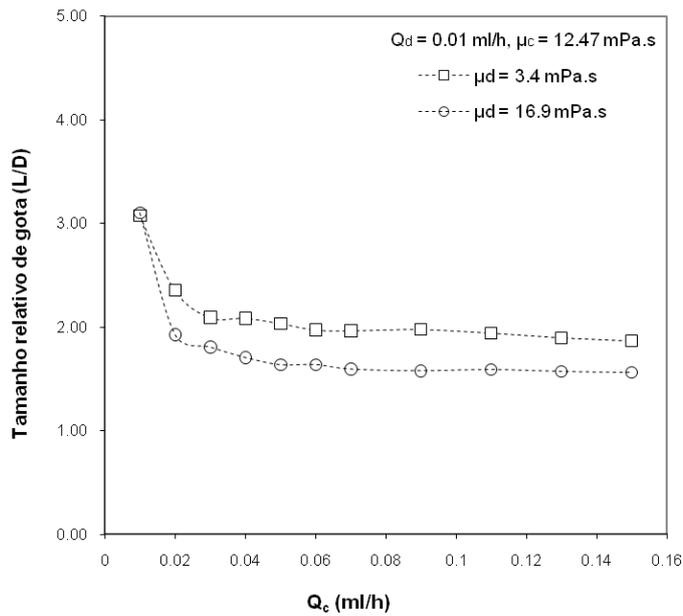


Figura 4.18: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para duas fases dispersas com diferentes viscosidades. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.01$ ml/h e $\mu_c=12.47$ mPa.s.

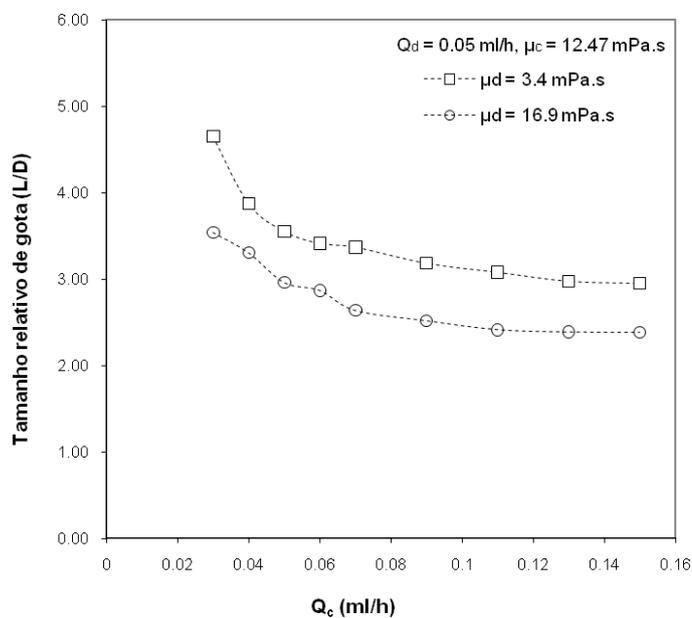


Figura 4.19: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para duas fases dispersas com diferentes viscosidades. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.05$ ml/h e $\mu_c=12.47$ mPa.s.

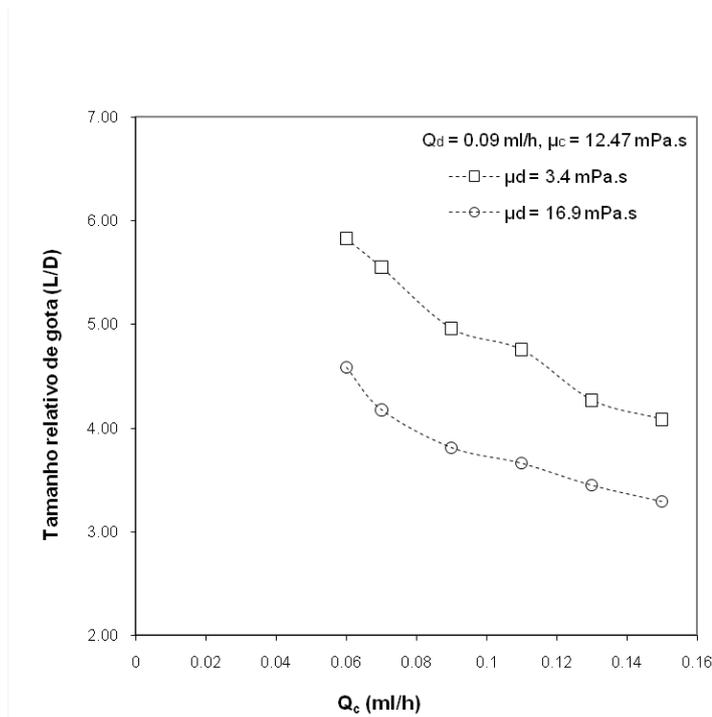


Figura 4.20: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para duas fases dispersas com diferentes viscosidades. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.09$ ml/h e $\mu_c=12.47$ mPa.s.

O comportamento decrescente e constante de cada curva foi analisado como efeito das vazões no item anterior. Aqui são analisados os efeitos quando as curvas são comparadas entre si.

Neste caso foi observado um comportamento que estabelece que o tamanho de gota é maior quanto menor for a viscosidade da fase dispersa, ou seja, o tamanho é inversamente proporcional à viscosidade da fase dispersa, para as mesmas condições e vazões de injeção.

Também aqui pode ser feito uma análise do mecanismo de formação de gota na junção para determinar a influência no tamanho final dela.

A literatura mostra [64] que a viscosidade da fase dispersa desenvolve uma função importante na estabilização e crescimento da gota, mas não tem efeito sobre o tamanho final [19]. Assim, o tamanho de gota é calculado como uma função só do número de capilaridade do fluxo da fase contínua [29]. Esta tendência é distintiva para um ambiente fluídico de co-fluxo, ou seja, um ambiente sem confinamento que é bem diferente do presente caso.

Segundo Zhao e Middelberg *et. al.* [48], a influência das viscosidades das fases contínua e dispersa sobre o tamanho de gota é dependente da geometria do canal e suas propriedades encontrando, por exemplo, que em micro-canais retos, o tamanho de gota é fortemente influenciado pela viscosidade da fase dispersa [65]. Assim quando a viscosidade da fase dispersa é menor que um valor crítico (100 mPa.s), o tamanho de gota decresce com o incremento da viscosidade, enquanto que para viscosidades maiores o tamanho se incrementa fracamente [48].

Sendo esta penúltima condição a que concorda bem com os resultados encontrados.

4.1.2.3. Efeito da viscosidade da fase contínua

Como na sub-seção anterior, aqui são avaliadas nas mesmas condições, diferentes fases contínuas para uma mesma fase dispersa.

São apresentados casos para vazões de fase contínua que vão de 0.01 ml/h até 0.15 ml/h, comparando o tamanho de gota de casos que utilizaram uma mesma fase dispersa com duas fases contínuas com diferentes viscosidades. Isso foi feito para cada vazão fixa de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h.

As figuras (4.21) até (4.26) mostram o tamanho de gota como função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes viscosidades para uma mesma fase dispersa. As três primeiras relacionadas com uma mesma fase dispersa de viscosidade 3.4 mPa.s e, as três seguintes também com uma mesma fase dispersa de viscosidade 16.9 mPa.s.

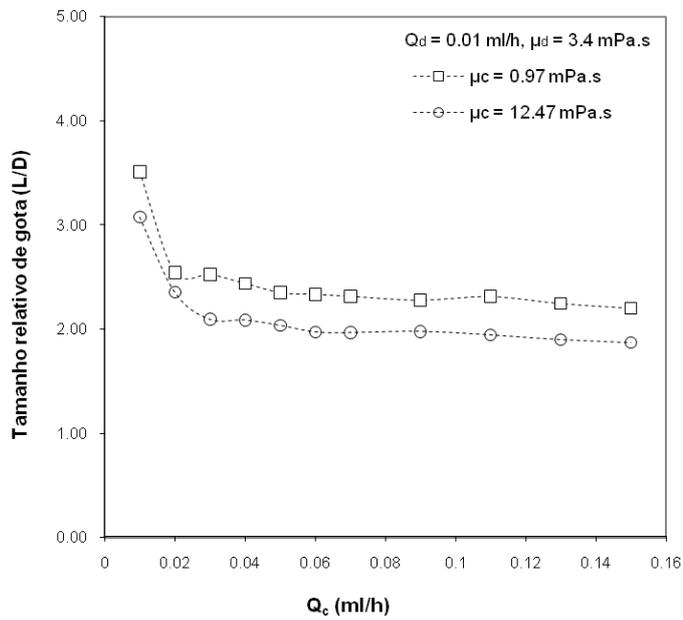


Figura 4.21: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.01$ ml/h e $\mu_d=3.4$ mPa.s.

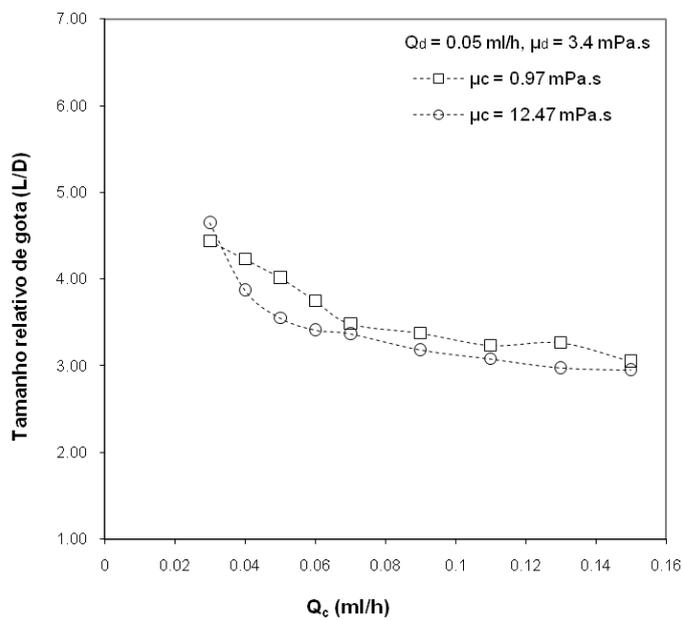


Figura 4.22: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.05$ ml/h e $\mu_d=3.4$ mPa.s.

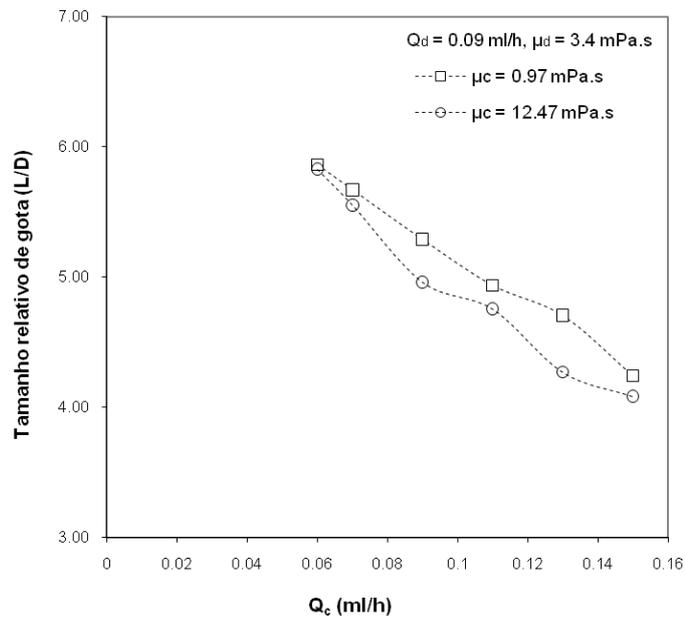


Figura 4.23: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.09$ ml/h e $\mu_d=3.4$ mPa.s.

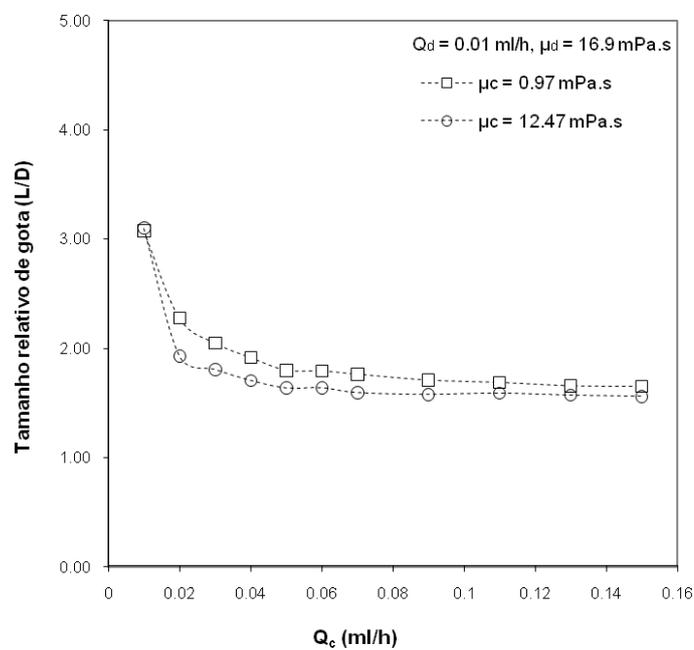


Figura 4.24: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.01$ ml/h e $\mu_d=16.9$ mPa.s.

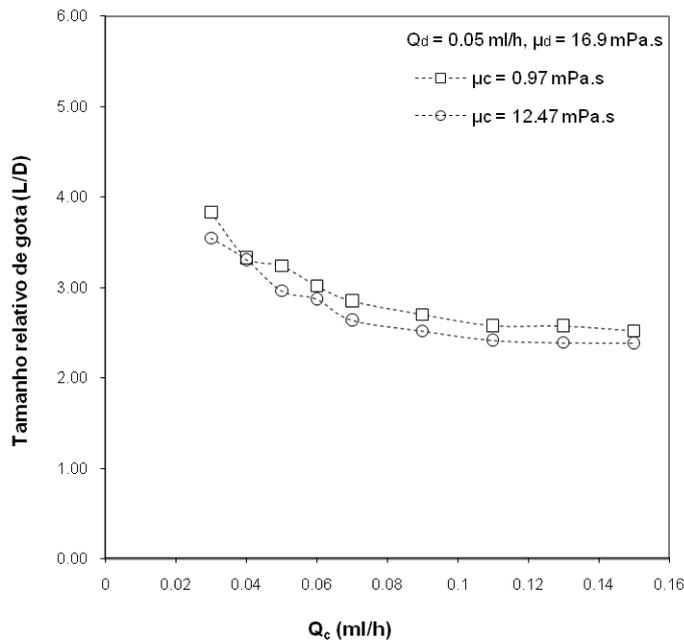


Figura 4.25: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d = 0.05 \text{ ml/h}$ e $\mu_d = 16.9 \text{ mPa.s}$.

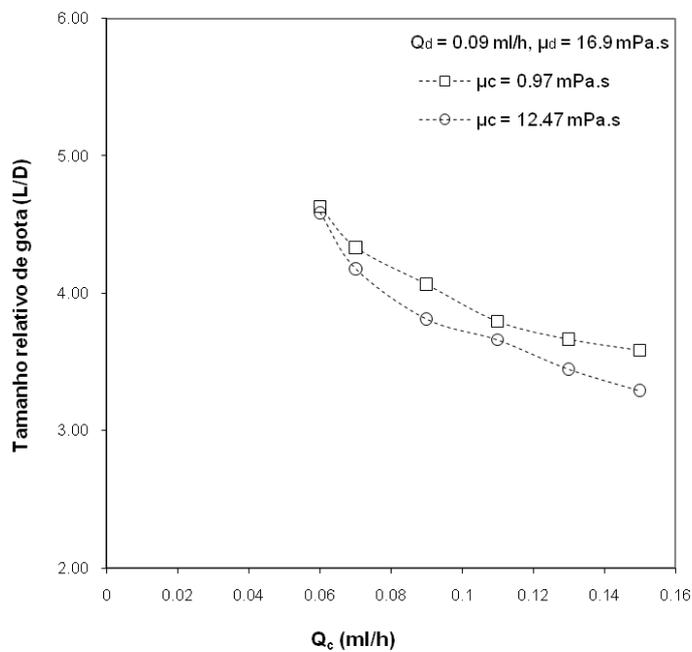


Figura 4.26: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d = 0.09 \text{ ml/h}$ e $\mu_d = 16.9 \text{ mPa.s}$.

Neste caso o comportamento observado estabelece que o tamanho de gota é maior quanto menor for a viscosidade da fase contínua, para as mesmas condições e vazões de injeção.

Analisando o mecanismo de formação de gota na junção pode se estabelecer o seguinte: como a fase contínua é a fase molhante, ela faz um filme sobre as paredes da junção micro-fluídica atuando como um lubrificante para as gotas formadas. Assim, durante a formação de gota, se a viscosidade da fase contínua for relativamente alta, o crescimento é afetado de forma negativa sendo que é mais difícil para a gota se deslocar através de um fluido viscoso (esforços cisalhantes são aplicados no sentido contrário ao crescimento da gota em formação). Ocorre o contrário para uma fase contínua de baixa viscosidade. Desta forma, pode-se estabelecer que o tamanho de gota é inversamente proporcional à viscosidade da fase contínua.

Este ponto é importante porque a informação da literatura (para micro canais com seções retangulares) estabelece que alta viscosidade da fase contínua favorece a quebra da gota gerando gotas pequenas, devido ao fato que esforços cisalhantes são aplicados no sentido do crescimento da gota em formação, superando as forças estabilizadoras da forma da gota devida à tensão interfacial [45]. Esta diferença importante na formação de gota pode ser explicada principalmente pela diferença entre as seções retangulares e ovais. Geralmente nas seções retangulares, depois do bloqueio do canal principal (sempre que este exista), a velocidade da fase contínua ao redor da gota (nos cantos onde se acelera) sempre é maior do que a velocidade da interface em formação [42]. Assim, uma maior viscosidade da fase contínua sempre exerce maiores tensões cisalhantes e deformação para “quebrar” o crescimento da gota durante a formação gerando gotas pequenas [15, 43, 45].

No caso de uma seção oval, o efeito de aceleração da fase contínua ao redor da gota em formação é mínimo dado que o bloqueio do canal principal pela gota é quase total. A fase contínua só pode escoar pelo filme fino na parede do canal, e sua velocidade, neste caso, é menor que a velocidade de crescimento da gota [42].

4.1.2.4. Efeito da tensão interfacial

Para estabelecer um efeito comparativo da influência das tensões interfaciais das fases no tamanho de gota, são apresentados casos nos quais foram produzidas diferenças nas tensões interfaciais, mantendo invariáveis as demais propriedades, para duas fases contínuas com uma mesma fase dispersa.

Estes casos foram avaliados para vazões de fase contínua que vão de 0.01 ml/h até 0.15 ml/h, comparando o tamanho de gota de casos que utilizaram uma mesma fase dispersa com duas fases contínuas diferenciadas só pelo uso de surfactante. Isso foi feito com a finalidade de manter as viscosidades e poder comparar só o efeito das tensões interfaciais. A análise foi considerada para cada vazão fixa de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h.

As figuras (4.27) até (4.32) mostram o tamanho de gota como função da vazão injetada de duas fases contínuas com viscosidades idênticas e diferentes tensões interfaciais para uma mesma fase dispersa. As três primeiras relacionadas com uma mesma fase dispersa de viscosidade 3.4 mPa.s e, as três seguintes também com uma mesma fase dispersa de viscosidade 16.9 mPa.s.

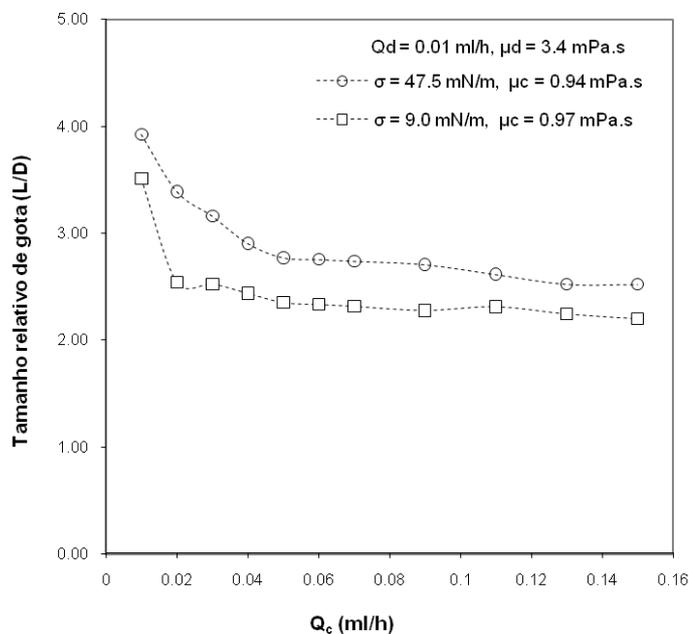


Figura 4.27: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes tensões interfaciais e similares viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.01$ ml/h e $\mu_d=3.4$ mPa.s.

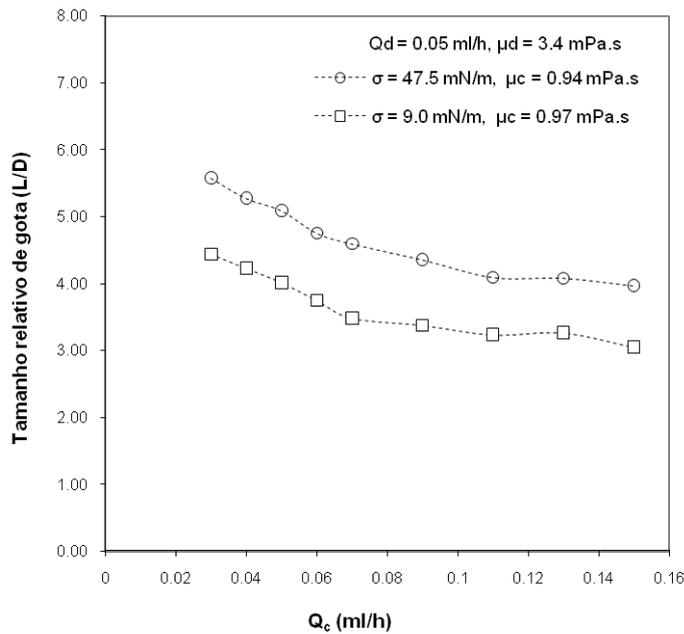


Figura 4.28: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes tensões interfaciais e similares viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.05 \text{ ml/h}$ e $\mu_d=3.4 \text{ mPa.s}$.

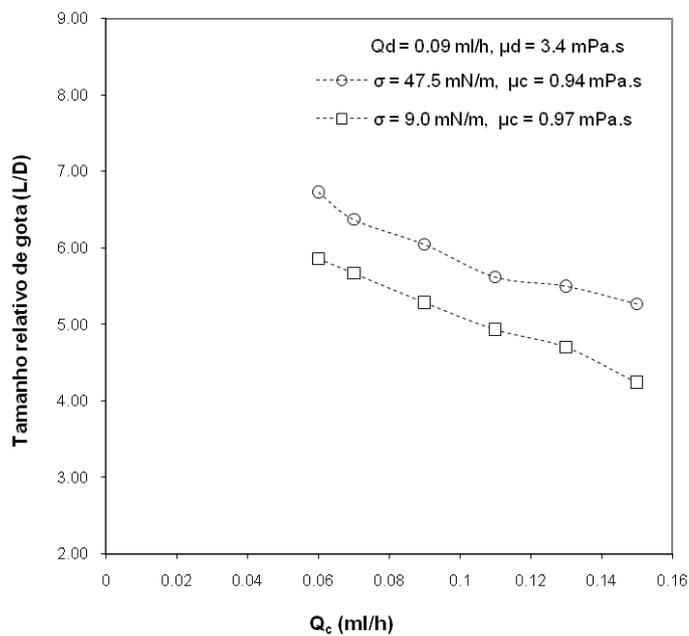


Figura 4.29: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes tensões interfaciais e similares viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.09 \text{ ml/h}$ e $\mu_d=3.4 \text{ mPa.s}$.

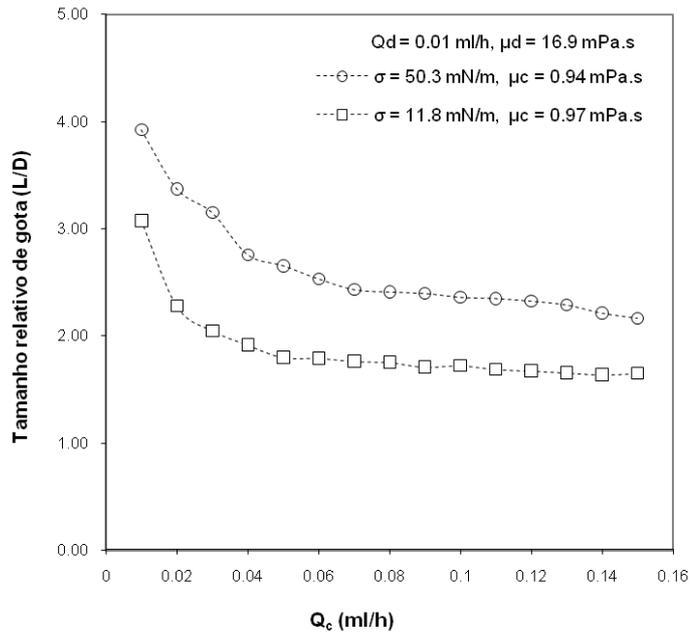


Figura 4.30: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes tensões interfaciais e similares viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d = 0.01 \text{ ml/h}$ e $\mu_d = 16.9 \text{ mPa.s}$.

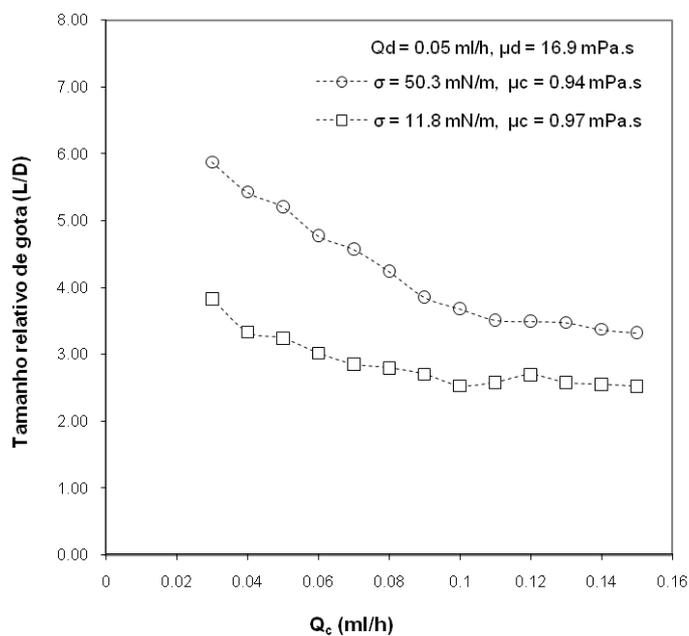


Figura 4.31: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes tensões interfaciais e similares viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d = 0.05 \text{ ml/h}$ e $\mu_d = 16.9 \text{ mPa.s}$.

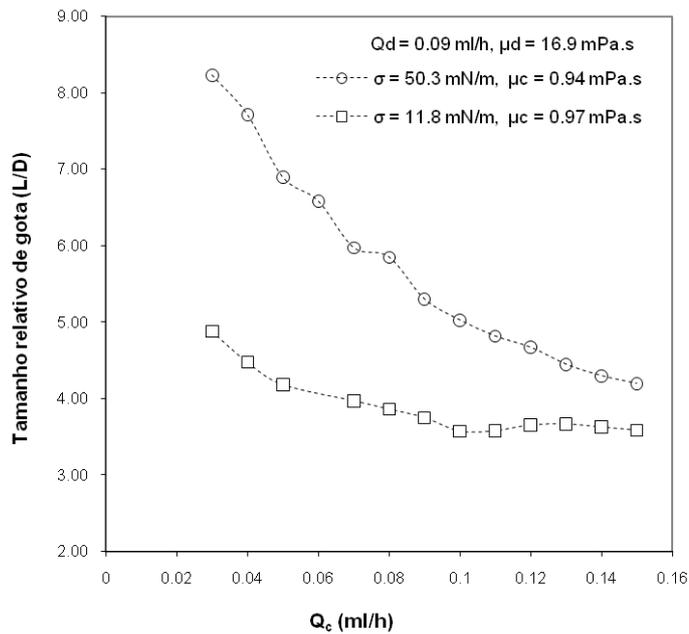


Figura 4.32: Tamanho de gota em função da vazão injetada de duas fases contínuas com diferentes tensões interfaciais e similares viscosidades para uma mesma fase dispersa. Medições comparativas para a vazão fixa de fase dispersa $Q_d=0.09$ ml/h e $\mu_d=16.9$ mPa.s.

Neste caso o comportamento observado estabelece que o tamanho da gota produzida é maior quanto maior for a tensão interfacial entre as fases, para as mesmas condições, viscosidades e vazões de injeção. Foi observado também, a diferença dos outros casos, que as gotas formadas foram menos monodispersas.

Analisando o mecanismo de quebra na junção, pode-se estabelecer através da figura (4.33), o seguinte:

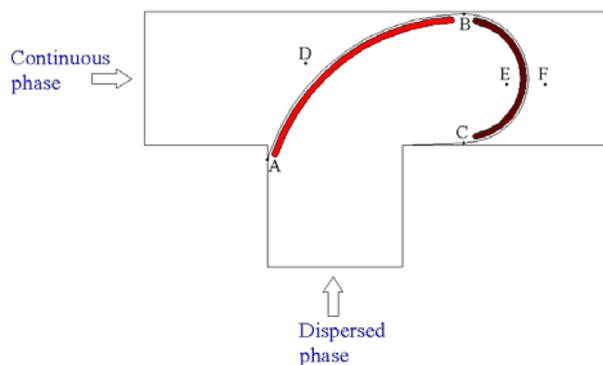


Figura 4.33: Desenho que mostra as duas partes da interface da gota, estabelecida pelo confinamento do canal principal da junção.

Segundo a figura, no momento de crescimento e bloqueio, têm-se duas interfaces (AB e BC) definidas pela pressão capilar.

Na formação de gota, a pressão capilar da interface AB se opõe à força do incremento da pressão no ponto D (pelo bloqueio do canal e a contínua injeção da fase contínua) fazendo crescer o tempo que toma esta interface diminuir até a quebra (tempo de estrangulamento). Desta forma, ela controla o tempo de estrangulamento favorecendo ou não o crescimento da gota. Assim, nas mesmas vazões de injeção de fases, a maior “resistência” desta interface gerará gotas maiores do que no caso com menor tensão interfacial, devido a um maior tempo de estrangulamento e, em consequência, também um maior tempo para o crescimento da gota. Este detalhe sugere que o tamanho de gota é proporcional com a tensão interfacial entre fases. O crescimento da gota, por outro lado, é uma função direta da vazão injetada de fase dispersa.

A pressão capilar na interface BC atua como um estabilizador da forma da gota. A gota tende sempre a se manter na forma de maior estabilidade (forma esférica), assim sendo que o deslocamento é dado na direção à jusante da junção (sentido positivo), ela oferece uma resistência no sentido contrário (sentido negativo) para conseguir a estabilidade da gota em formação [60]. Neste caso ocorre um efeito similar ao da interface AB, no sentido que uma maior tensão interfacial vai se opor ao crescimento da gota, sugerindo que o tamanho é inversamente com a tensão interfacial entre fases.

Os dados experimentais obtidos mostram que, apesar da diferença, o efeito da interface BC não é comparável ao da interface AB.

Garstecki *et. al.* [27] fizeram uma análise das interfaces AB e BC durante a formação de gota em junções micro-fluídicas T de seção retangular, estabelecendo que a força resultante devido às pressões capilares destas interfaces, estabiliza a dinâmica da quebra de gota quando comparada às forças desestabilizadoras dos efeitos viscosos que atuam sobre a gota em formação, obtendo-se uma força resultante que se opõe à deformação.

4.1.2.5. Efeito do número de capilaridade

São apresentados casos para vazões de fase contínua que vão de 0.01 ml/h até 0.15 ml/h, comparando o tamanho de gota em função do número de capilaridade da fase contínua, dos casos que utilizaram fases dispersas com diferentes viscosidades para uma mesma fase contínua e dos casos que utilizaram uma mesma fase dispersa para fases contínuas com diferentes viscosidades. O objetivo é tentar uma correlação empírica para os dados obtidos. Isso foi feito para cada vazão fixa de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h.

As figuras (4.34) e (4.35) mostram o tamanho da gota de diferentes fases dispersas como função do número de capilaridade para uma mesma fase contínua em cada caso. Para o primeiro caso, a viscosidade de fase contínua foi de 0.97 mPa.s e, para o segundo, a viscosidade de fase contínua foi de 12.47 mPa.s.

Assim também as figuras (4.36) e (4.37) mostram o tamanho de gota de uma mesma fase dispersa, em cada caso, como função do número de capilaridade de diferentes fases contínuas. Para o primeiro caso, a viscosidade de fase dispersa foi de 3.4 mPa.s e, para o segundo, a viscosidade de fase dispersa foi de 16.9 mPa.s.

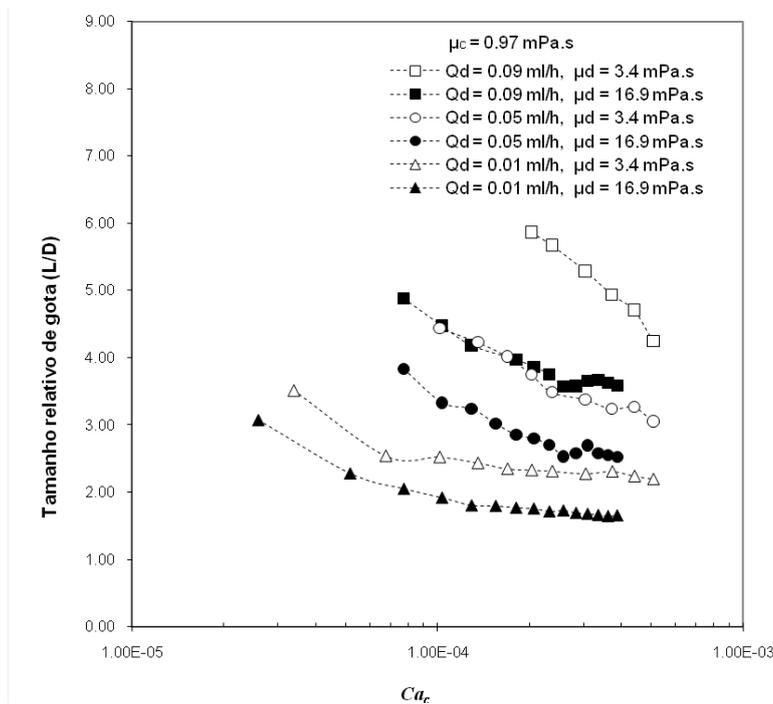


Figura 4.34: Tamanho de gota em função do número de capilaridade de duas fases dispersas com diferentes viscosidades para uma mesma fase contínua. Medições comparativas para vazões de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h e $\mu_c=0.97 \text{ mPa.s}$.

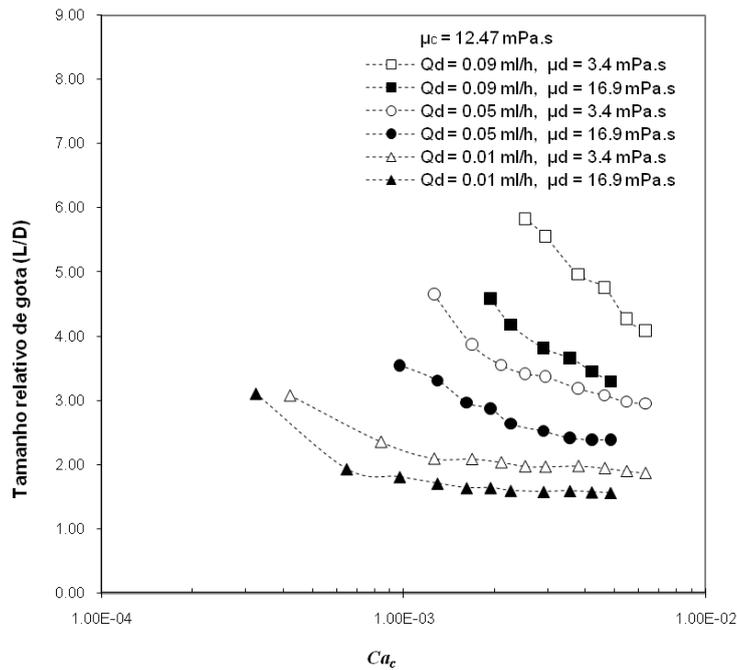


Figura 4.35: Tamanho de gota em função do número de capilaridade de duas fases dispersas com diferentes viscosidades para uma mesma fase contínua. Medições comparativas para as vazões fixas de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h e $\mu_c=12.47$ mPa.s.

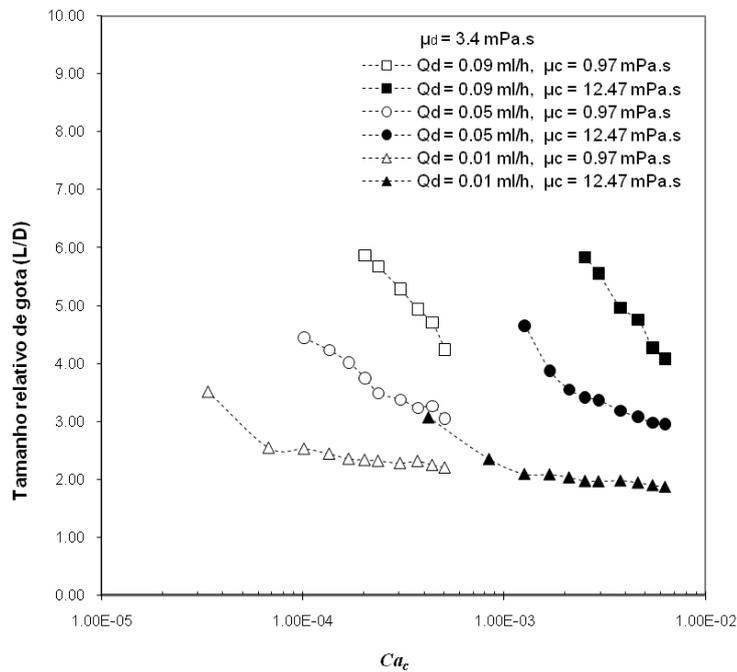


Figura 4.36: Tamanho de gota em função do número de capilaridade de uma mesma fase dispersa para duas fases contínuas com diferentes viscosidades. Medições comparativas para as vazões fixas de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h e $\mu_d=3.4$ mPa.s.

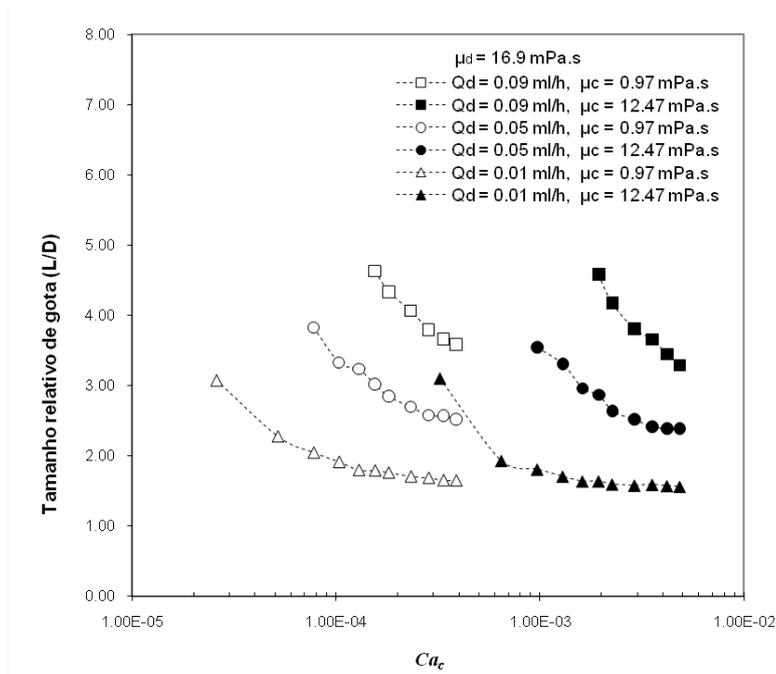


Figura 4.37: Tamanho de gota em função do número de capilaridade de uma mesma fase dispersa para duas fases contínuas com diferentes viscosidades. Medições comparativas para as vazões fixas de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h e $\mu_d=16.9$ mPa.s.

Nos quatro casos apresentados, o comportamento observado mostrou que o tamanho de gota decresce a medida que o número de capilaridade aumenta.

Uma diferença importante é estabelecida pelo grau com que o número de capilaridade afeta o tamanho de gota. Foram observadas para as vazões de fase dispersa de 0.01 e 0.05 ml/h que o decrescimento do tamanho de gota apresenta duas faixas diferenciadas, uma onde o tamanho de gota cai fortemente e outra onde o tamanho permanece quase constante. Isso não foi observado para a vazão de 0.09 ml/h de fase dispersa, na qual a influência do número de capilaridade no tamanho de gota foi sempre forte.

Aqui existe uma diferença importante em função do tipo de seção da junção micro-fluídica. Como foi estabelecido antes, a existência de um filme lubrificante de fase contínua em um micro-canal de seção circular implica que a gota deve se mover mais rápido do que esta fase no filme lubrificante [42, 66]. Sendo assim, é a gota a que exerce esforços cisalhantes sobre o filme como foi estabelecido quando foram analisados os efeitos da viscosidade da fase contínua.

Em um micro-canal de seção retangular o quadro é modificado e, neste caso a gota move-se com menor velocidade do que a fase contínua ao redor da gota [42]. Assim, a fase contínua que flui no filme lubrificante e na parte dos cantos da seção do canal, é a que exerce esforços cisalhantes sobre a gota em formação [42, 67, 68].

Esta diferença é importante porque faz com que o número de capilaridade e suas variáveis, apesar de conseguir o mesmo efeito, atuem de diferente forma no processo de formação de gota em junções micro-fluídicas T. No caso de seções retangulares, velocidades e viscosidades altas da fase contínua geram maiores esforços cisalhantes ao redor da gota em formação, e no balanço de forças são mais representativas que as forças interfaciais que impedem a quebra, produzindo portanto a quebra e as menores gotas. Isto é confirmado por Xu *et. al.* [45], que reportam também que o tamanho de gotas não confinadas decresce com maior influência do número de capilaridade do que as gotas confinadas (na formação de gotas confinadas, o efeito do bloqueio parcial do canal principal diminui os efeitos viscosos que provocam a fase contínua).

Neste caso, onde o bloqueio do canal principal de seção oval é quase total, as variáveis atuam de forma diferente. Primeiro, a alta velocidade da fase contínua diminui o tempo de estrangulamento do pescoço da gota em formação até a quebra. Nesse tempo a gota cresce menos do que poderia ter crescido para velocidades menores de fase contínua. Deste modo, ela favorece a formação de gotas pequenas como no caso de seções retangulares, mas com um mecanismo de ação diferente.

Segundo, a alta viscosidade da fase contínua atua ao redor da gota em formação freando o crescimento dela. A fase contínua molha a parede do canal fazendo um filme entre a parede e a gota em formação e, como foi dito antes para o caso de seções circulares, tem velocidade menor do que a gota exercendo assim esforços cisalhantes em direção contrária ao caso de seções retangulares. Essa ação dificulta o crescimento da gota e favorecem também a formação de gotas pequenas. Desta forma, aqui também a viscosidade da fase contínua produz o mesmo efeito como no caso de seções retangulares, mas com um mecanismo de ação diferente.

A tensão interfacial atua nos dois casos, favorecendo o crescimento da gota como foi estabelecido antes.

É importante ressaltar esta diferença porque existe literatura que reporta o tamanho de gota como uma função do número de capilaridade, sem fazer diferença alguma de como as variáveis influenciam no processo de formação de gota.

Muitos trabalhos, no caso de seções retangulares, reportam que o tamanho de gota é uma função do número de capilaridade definido pelas variáveis da fase contínua [19], sem ter em conta a vazão e viscosidade da fase dispersa. No presente trabalho, observou-se experimentalmente que esses parâmetros têm uma considerável influência no tamanho final da gota.

As figuras (4.34) e (4.35) confirmam esta influência sendo que apresentam diferentes tamanhos de gota para uma mesma faixa de número de capilaridade, com a particularidade que a vazão e viscosidade da fase dispersa são diferentes mostrando, como foi dito antes, que essas variáveis são um fator importante para a formação de gotas em junções micro-fluídicas T de seção oval.

No caso de seções retangulares, o número de capilaridade (Ca_c) define bem o comportamento quando as gotas formadas são maiores que a largura do canal relacionadas ao *squeezing* (com fraca influência do Ca_c), ou no caso quando são menores que a largura do canal relacionadas ao *dripping* (com forte influência do Ca_c) [29, 45].

Um resultado importante da literatura é a obtenção de uma formulação empírica baseada em uma análise de escala muito simples, que descreve o tamanho da gota gerada em uma junção micro-fluídica T de seção retangular constante no regime *squeezing* (ver capítulo 2). Neste trabalho foi considerado um modelo alternativo para uma junção micro-capilar T de seção oval constante que pode descrever, de forma aproximada e com algumas restrições, o tamanho de gota formado neste tipo de dispositivos micro-fluídicos.

4.1.2.6.

O modelo alternativo

Seguindo o modelo de quebra de gota em uma junção micro-fluídica T de seção retangular [27] e levando em conta uma junção micro-fluídicas T de seção oval constante, foi considerado um modelo alternativo para descrever o tamanho de gota formado neste último sistema. Neste caso foi considerado que a formação

de gota acontece em três etapas quando dois líquidos imiscíveis são injetados na junção T.

A primeira quando o fluxo da fase dispersa do canal secundário entra no canal principal bloqueando o fluxo da fase contínua. Nesse momento o comprimento da gota em formação d_i é uma quantidade da ordem da largura do canal D , como representado na figura (4.38a).

A segunda etapa corresponde ao crescimento da gota a jusante da junção pelo incremento da pressão a montante e pela contínua injeção da fase dispersa. Como é uma seção oval, a gota em formação deixa sem espaço livre a área ao redor dela e então a fase contínua puxa o volume da fase dispersa que entra no canal principal contribuindo também no crescimento da gota, conforme esquematizado na figura (4.38b). Durante esse processo a gota cresce a uma taxa igual a soma das velocidades médias das duas fases: $u_{crescimento} \approx u_d + u_c = (Q_d + Q_c) / A_{seção}$. Nesta etapa também se produz o estrangulamento do pescoço que forma a gota na junção. A espessura do pescoço d_p decresce a uma taxa que é aproximadamente igual com a velocidade média do fluxo da fase contínua $u_{squeeze} \approx Q_c / A_{seção}$. A etapa termina quando o pescoço quebra, como é mostrado na figura (4.38c). Uma terceira etapa corresponde a retração da fase dispersa depois da quebra devido à pressão capilar, dando início a um novo ciclo. Deste modo, o tamanho de gota pode ser calculado considerando o tamanho inicial da primeira etapa mais o tamanho que a gota cresce no tempo que tarda o pescoço decrescer até a quebra como foi descrito na segunda etapa. Assim $t_{crescimento} = t_{squeezing} = d_i / u_{squeeze}$. Ao final o comprimento da gota é $L \approx d_i + (d_p / u_{squeeze})(u_{crescimento}) = d_i + d_p(Q_{disp} / Q_{cont} + 1)$, ou na forma adimensional como expressado na equação (4.1):

$$L / D = \alpha + \beta \left(\frac{Q_d}{Q_c} + 1 \right) \quad (4.1)$$

Onde $\alpha = d_i / D$ e $\beta = d_p / D$ são considerados de ordem unitária devido à hipótese que considera a forma da interface da gota em formação em duas etapas: (i) no bloqueio do canal principal onde $d_i \approx D$ e, (ii) antes de iniciar o estrangulamento do pescoço onde $d_p \approx D$, como é mostrado na figura (4.38b).

O processo é repetitivo e uniforme em condições estáveis, produzindo emulsões monodispersas.

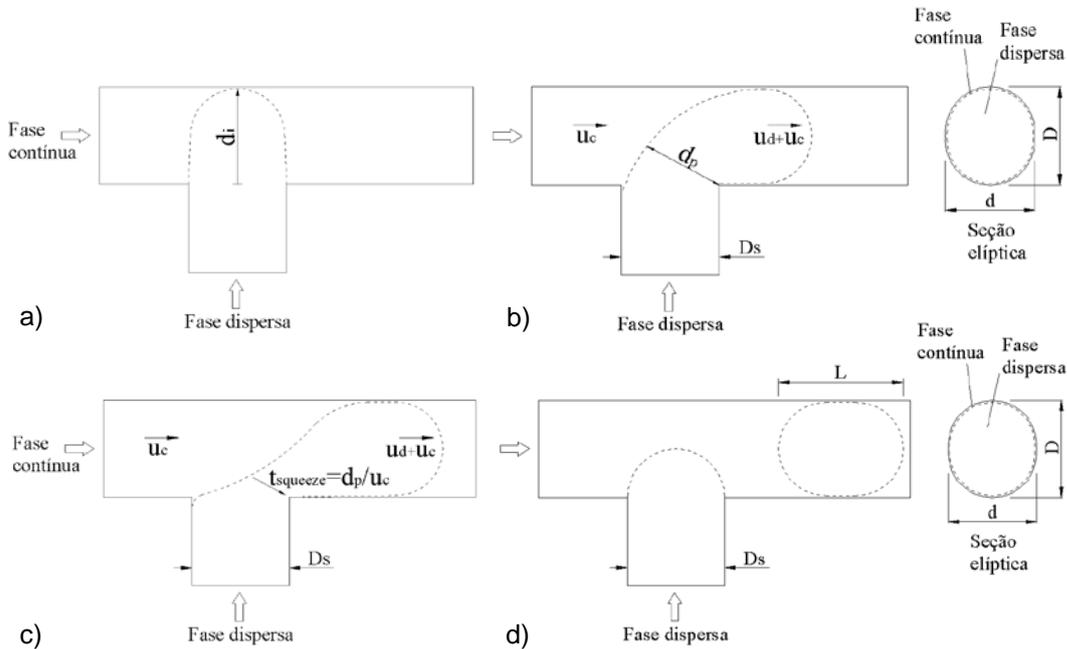


Figura 4.38: a) A fase dispersa bloqueia o canal, o tamanho da gota é d_i . b) A gota cresce na direção à jusante, a razão de $u_{crescimento} \approx u_d + u_c = (Q_d + Q_c)/A_{seção}$. c) O pescoço decresce a razão de $u_{squeeze} \approx Q_c/A_{seção}$. d) Quando o pescoço quebra, o tamanho de gota é $L \approx d_i + (d_p/u_{squeeze})(u_{crescimento}) = d_i + d_p(Q_d/Q_c + 1)$, e na forma adimensional: $L/D = 1 + (Q_d/Q_c + 1)$.

4.1.2.7.

Comparação dos dados experimentais com o modelo empírico

As figuras (4.39) até (4.44) mostram o tamanho de gota como uma função da razão de vazões dos fluidos injetados para os seis sistemas estudados. Aqui são apresentadas comparações entre os dados obtidos nos testes experimentais e os modelos simples propostos para as junções micro-fluídicas T de seção retangular (literatura) e de seção oval (presente trabalho):

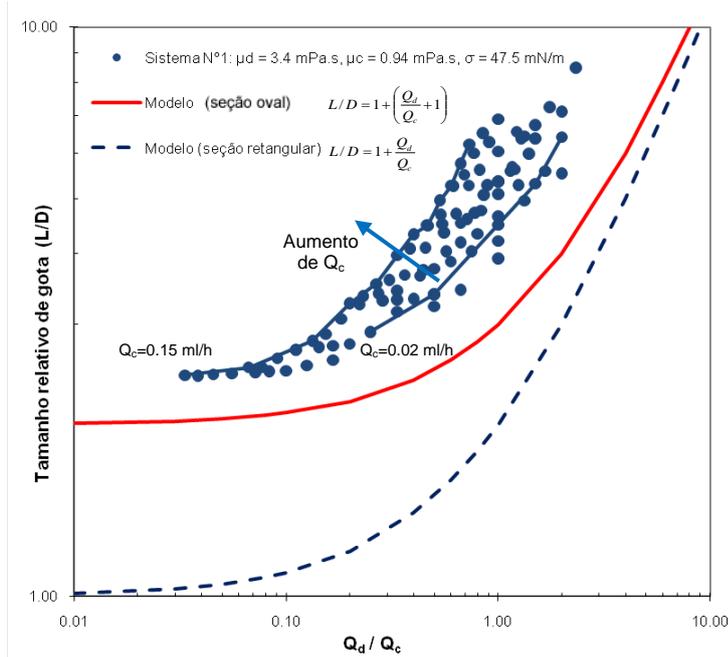


Figura 4.39: Tamanho de gota em função da razão de vazões dos fluidos injetados. São apresentadas as comparações dos dados experimentais e os modelos escalares simples para o sistema N°1.

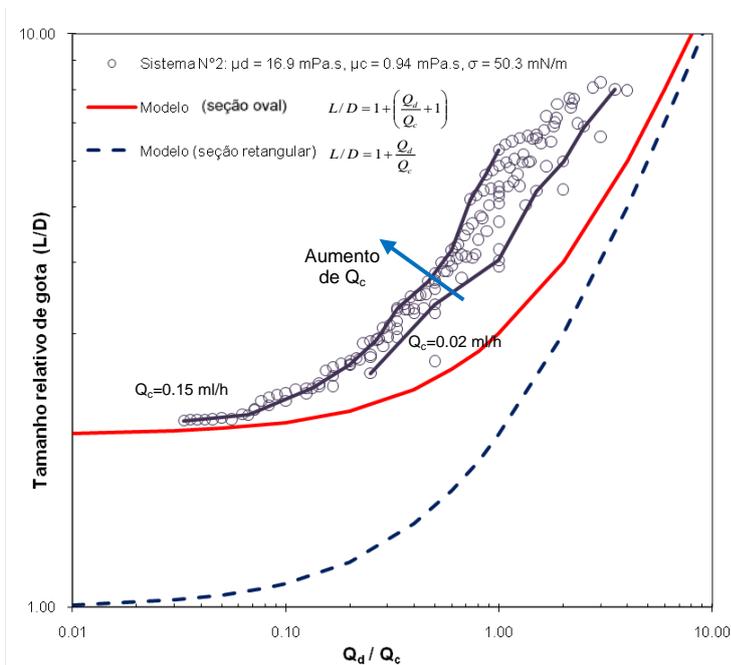


Figura 4.40: Tamanho de gota em função da razão de vazões dos fluidos injetados. São apresentadas as comparações dos dados experimentais e os modelos escalares simples para o sistema N°2.

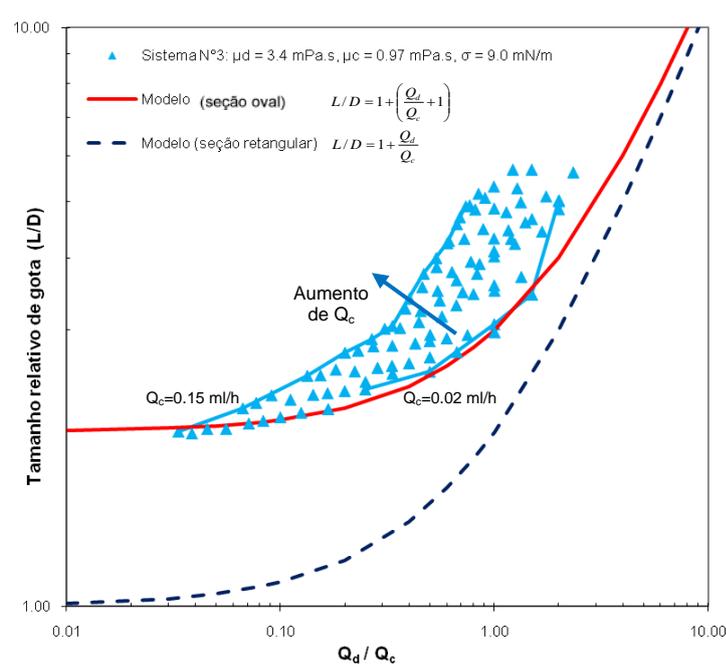


Figura 4.41: Tamanho de gota em função da razão de vazões dos fluidos injetados. São apresentadas as comparações dos dados experimentais e os modelos escalares simples para o sistema N°3.

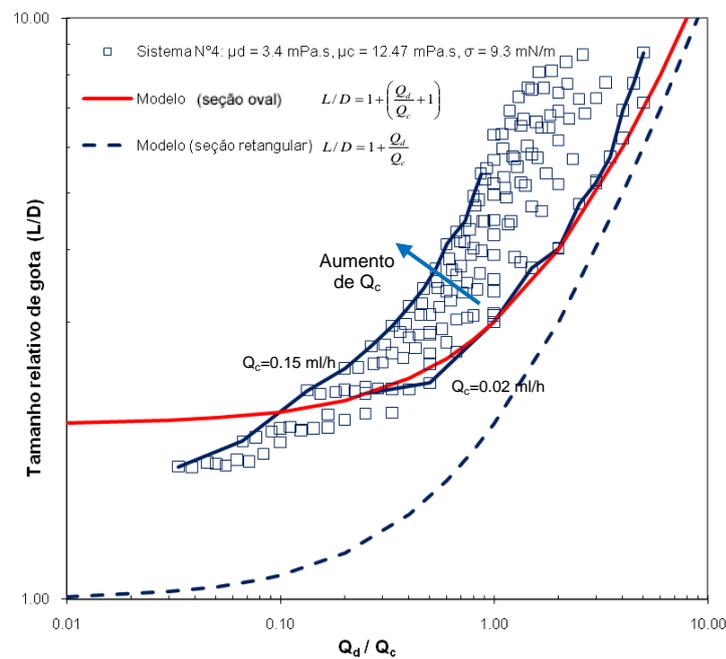


Figura 4.42: Tamanho de gota em função da razão de vazões dos fluidos injetados. São apresentadas as comparações dos dados experimentais e os modelos escalares simples para o sistema N°4.

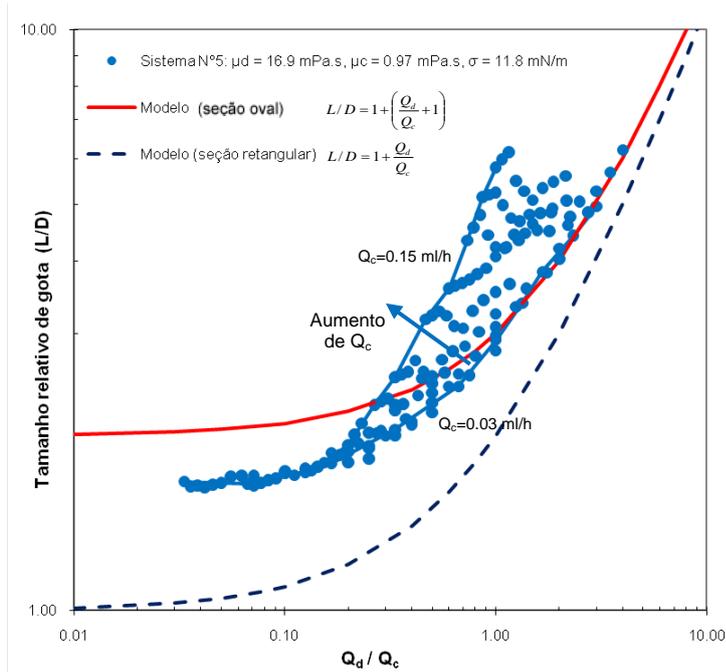


Figura 4.43: Tamanho de gota em função da razão de vazões dos fluidos injetados. São apresentadas as comparações dos dados experimentais e os modelos escalares simples para o sistema N°5.

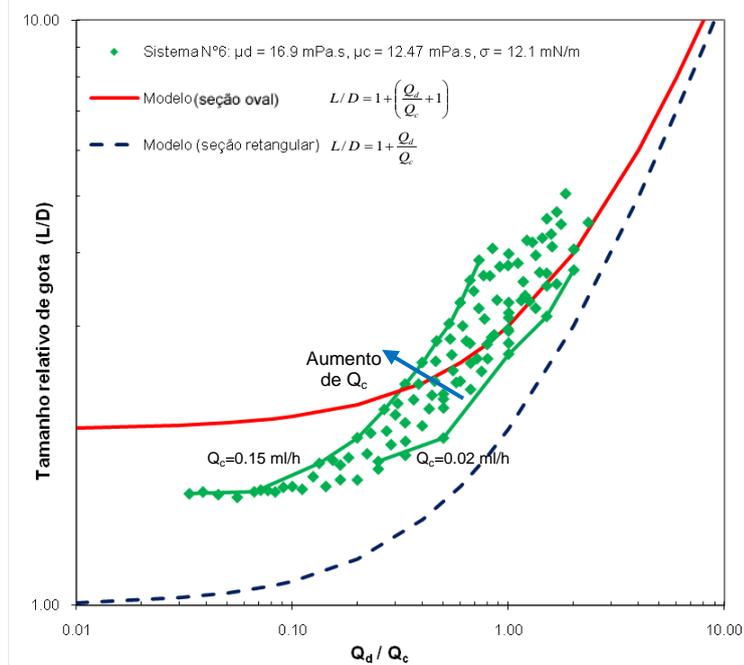


Figura 4.44: Tamanho de gota em função da razão de vazões dos fluidos injetados. São apresentadas as comparações dos dados experimentais e os modelos escalares simples para o sistema N°6.

As figuras anteriores mostram que o modelo proposto descreve um comportamento mais próximo aos dados experimentais do que o modelo proposto para seções retangulares, embora não considere os efeitos das propriedades dos fluidos que influem no tamanho de gota como foi mostrado na seção anterior estabelecendo, portanto uma diferença importante para os dois sistemas.

A literatura estabelece que no caso de seções retangulares, os dados experimentais podem ser descritos através da curva do modelo $L/D=1+Q_d/Q_c$. No entanto, os testes experimentais do presente trabalho mostram que o conjunto de dados não poderia ser descrito só em função da razão de vazões Q_d/Q_c , tendo em conta que estes dados estabelecem diferentes curvas para cada vazão fixa de fase contínua.

4.1.3. Formação de gotas no mecanismo tipo jato

Este mecanismo foi e descrito por diferentes autores para formação de gotas em junções micro-fluídicas T de seção retangular (ver capítulo 2). Neste trabalho também foi observado este tipo de formação.

Aqui, a diferença principal, se compararmos com os seis sistemas estudados na seção anterior, foi a alta viscosidade da fase dispersa utilizada (438.13 mPa.s). No mecanismo *squeezing* as viscosidades das fases dispersas foram relativamente baixas (3.4 mPa.s e 16.9 mPa.s).

A figura (4.45) apresenta um esquema deste tipo de quebra de gota:

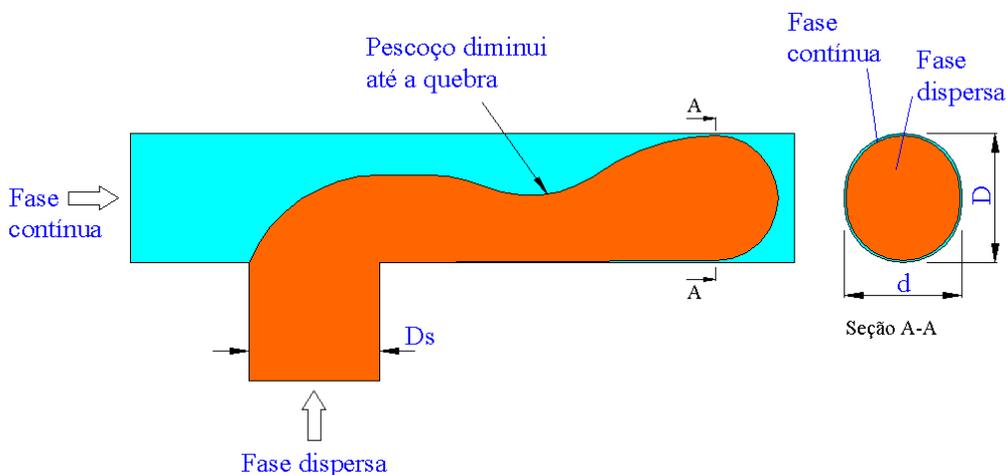


Figura 4.45: Mecanismo de quebra chamado de jato ou *jetting*. A quebra se produz de um jato de fase dispersa que está fora da junção. É uma forma de quebra combinada *squeezing*-instabilidade capilar, ou seja, a perturbação é iniciada pela diminuição do pescoço que se forma depois do bloqueio do fluxo da fase contínua no canal principal que faz incrementar a pressão a montante da interface. Esta perturbação gera uma instabilidade capilar do tipo *Plateau-Rayleigh* que acelera o processo de quebra iniciado pelo *squeezing*.

A sequência de figuras (4.46) até (4.48) mostram as diferentes etapas no processo de formação de gota no sistema estudado N°7. Foi observado por um lado a quebra do tipo *squeezing* para baixas vazões de injeção de fase dispersa, representado na figura para vazões de $Q_d=0.01$ ml/h e $Q_c=0.03$ ml/h; e por outro a quebra do tipo *jetting* para médias e altas vazões de injeção de fase dispersa, representado na figura para vazões de $Q_d=0.04$ ml/h e $Q_c=0.07$ ml/h, e $Q_d=0.07$ ml/h e $Q_c=0.08$ ml/h.

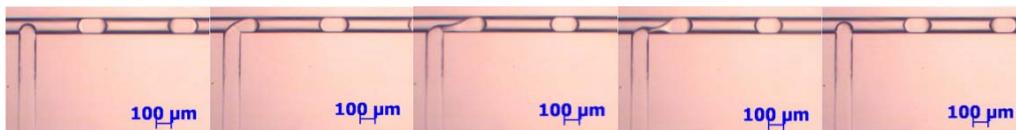


Figura 4.46: Formação de gota observada no sistema N°7 para $Q_d=0.01$ ml/h e $Q_c=0.03$ ml/h ($\mu_d=438.13$ mPa.s, $\mu_c=0.97$ mPa.s, $\sigma=1.5$ mN/m, $\mu_d/\mu_c=451.33$). $L=214.33$ μm , $L_{\text{mín}}=203.51$ μm , $L_{\text{máx}}=228.23$ μm . $\Delta t=150$ ms.

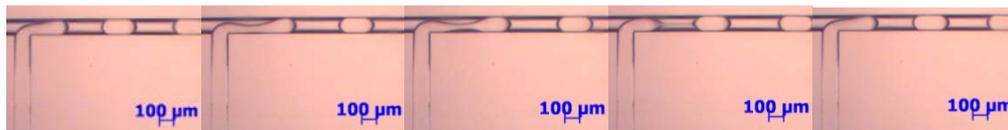


Figura 4.47: Formação de gota observada no sistema N°7 para $Q_d=0.04$ ml/h e $Q_c=0.07$ ml/h ($\mu_d=438.13$ mPa.s, $\mu_c=0.97$ mPa.s, $\sigma=1.5$ mN/m, $\mu_d/\mu_c=451.33$). $L=269.68$ μm , $L_{\text{mín}}=253.39$ μm , $L_{\text{máx}}=280.54$ μm . $\Delta t=50$ ms.

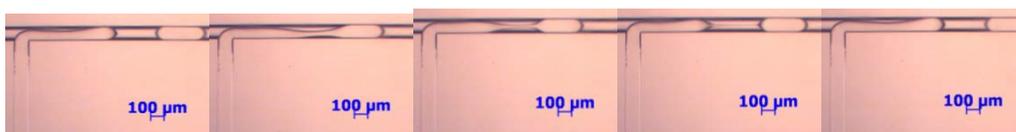


Figura 4.48: Formação de gota observada no sistema N°7 para $Q_d=0.07$ ml/h e $Q_c=0.08$ ml/h ($\mu_d=438.13$ mPa.s, $\mu_c=0.97$ mPa.s, $\sigma=1.5$ mN/m, $\mu_d/\mu_c=451.33$). $L=392.65$ μm , $L_{\text{mín}}=372.45$ μm , $L_{\text{máx}}=413.31$ μm . $\Delta t=40$ ms.

A figura (4.49) mostra o tamanho de gota como uma função da razão de vazões dos fluidos injetados. Apresentam-se as curvas onde foram observados os mecanismos de quebra tipo *squeezing* e tipo *jetting*.

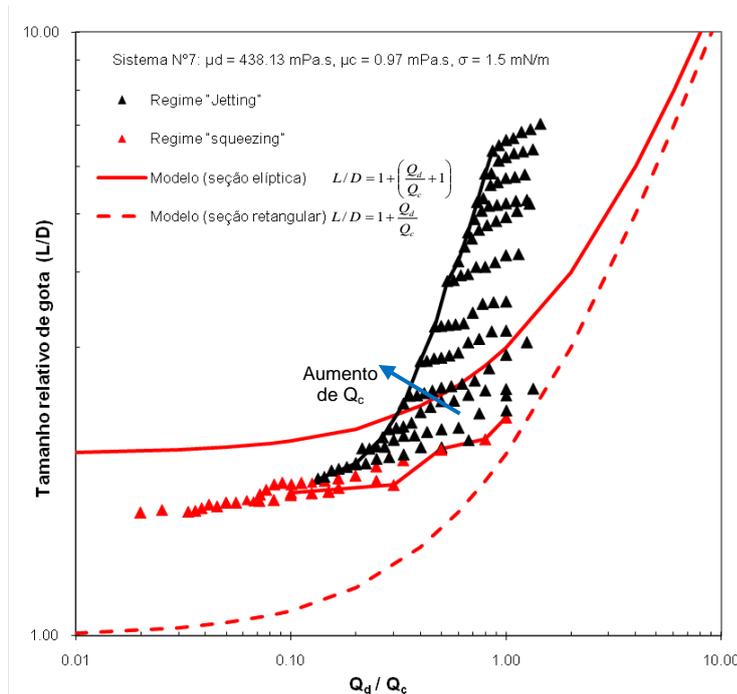


Figura 4.49: Tamanho de gota em função da razão de vazões dos fluidos injetados. São apresentados os regimes de formação de gota e as comparações (em vermelho) dos dados experimentais e os modelos escalares simples.

4.1.3.1.

Descrição do mecanismo observado:

A quebra de gota pelo mecanismo tipo jato foi observada para médias e altas vazões de injeção da fase dispersa. Neste caso, devido à alta viscosidade da fase dispersa, a vazão da fase contínua tinha que atingir um valor perto da vazão de fase dispersa ($Q_c \approx Q_d$) para poder deslocá-la e permitir a formação de gotas, caso contrário o sistema micro-fluídico era enchido só pela fase dispersa até o bloqueio total para a injeção de fase contínua. Assim neste caso só foi possível atingir razões $Q_d/Q_c \approx 1$, não maiores.

A formação de gota neste regime começa com um jato de fase dispersa que penetra na fase contínua que alimenta o canal principal, e se desloca na direção à jusante da junção.

Nesta etapa, a cabeça do jato bloqueia o canal principal e então, a pressão a montante deste bloqueio começa se incrementar devido a alimentação da fase contínua formando um “pescoço” que se adelgaça até a quebra acontecer.

Uma particularidade foi observar que o estrangulamento do pescoço da fase dispersa não é só do lado de maior volume da fase contínua, ao contrário ocorre um estrangulamento quase simétrico ao redor do pescoço formado no início do bloqueio. Este detalhe é similar ao fenômeno de formação de gotas observado por instabilidade capilar em um jato cilíndrico de líquido quando é submetido a uma perturbação externa. Esta instabilidade também é conhecida como instabilidade *Plateau-Rayleigh* (ver capítulo 2).

No sentido das observações feitas, este mecanismo de formação de gota pode ser considerado como uma combinação dos mecanismos *squeezing*-instabilidade capilar, ou seja, a perturbação que requer a instabilidade é iniciada pela diminuição do pescoço que se forma depois do bloqueio do fluxo da fase contínua no canal principal que faz incrementar a pressão a montante da interface. Esta perturbação gera uma instabilidade capilar do tipo *Plateau-Rayleigh* que acelera o processo de quebra iniciado pelo *squeezing*. As figuras (4.47) e (4.48) mostram a sequência deste mecanismo.

4.1.3.2. Influência das variáveis controladas:

Este mecanismo de formação foi observado só no sistema N° 7, quando foi utilizado como fase dispersa um óleo de alta viscosidade. Não foram desenvolvidos mais sistemas com dita particularidade e então se tem uma limitação para poder fazer comparações como foi feito no caso do mecanismo *squeezing* (por exemplo, de viscosidades e tensões interfaciais). Assim aqui só foi descrito de forma geral, o comportamento do tamanho de gota ao variar as razões das vazões das fases injetadas e qual é a dependência deste comportamento em função do número de capilaridade Ca_c .

4.1.3.3. Efeito das vazões dos fluidos injetados

Apresenta-se o sistema N°7 avaliado para vazões de fase contínua que vão de 0.01 ml/h até 0.15 ml/h, e para vazões fixas de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h. Para estas vazões fixas de fase dispersa, foi observado um comportamento decrescente do tamanho de gota para valores crescentes de fase contínua similar ao observado no mecanismo *squeezing*. Este comportamento tem duas zonas distinguíveis. Uma primeira zona onde o tamanho de gota cai com o aumento da fase contínua, e outra onde o tamanho de gota permanece quase constante (isso não foi observado para $Q_d=0.09$ ml/h). A faixa de vazões de fase contínua onde o tamanho de gota cai, foi pequena para as vazões de fase dispersa de 0.01 e 0.05 ml/h e maior para a vazão de 0.09 ml/h.

Por outro lado, existe um comportamento crescente do tamanho de gota para valores crescentes de fase dispersa.

A figura (4.49) correspondente ao sistema estudado N°7, mostra o tamanho de gota como função da vazão injetada de fase contínua para as vazões injetadas de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h.

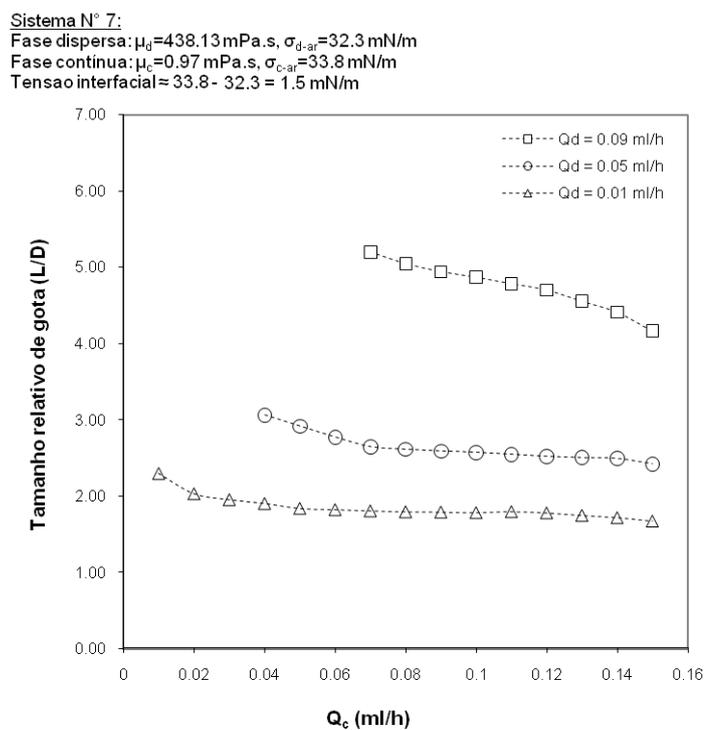


Figura 4.50: Tamanho de gota em função da vazão de fase contínua injetada para três diferentes vazões de fase dispersa correspondente ao sistema N°7.

O comportamento observado do tamanho de gota em função das vazões injetadas de fase contínua e dispersa pode ser avaliado analisando o mecanismo de formação de gota produzida fora da junção. Segundo o observado no sistema, a quebra de gota é pelo adelgaçamento do pescoço formado imediatamente depois do bloqueio do canal principal devido ao incremento da pressão a montante deste bloqueio.

Assim os resultados estabelecem que o tamanho de gota é inversamente proporcional com a vazão da fase contínua injetada, o qual pode ser explicado considerando que a vazão da fase contínua é a responsável do incremento da pressão que provoca a quebra da gota. Assim para vazões altas o tempo *squeezing* fica menor, a gota quebra em menos tempo e o tempo de crescimento se reduz formando gotas cada vez menores.

É importante mencionar, assim como no caso *squeezing*, que as seções dos canais da junção micro-fluídica T são muito importantes (oval ou retangular), porque estabelecem uma diferença grande quando são analisados os efeitos viscosos que provoca a alta velocidade da fase contínua ao redor de uma gota em formação. Neste caso a informação na literatura sobre estudos neste campo é limitada para fazer comparações. De Menech *et. al.* [29] apresentaram um modelo numérico deste tipo de mecanismo para junções micro-fluídicas T com seção retangular, mas só estabeleceu informação geral, afirmando que a quebra acontecia em altas vazões de fluxo, baixa tensão interfacial, altos número de capilaridade, e pelos efeitos viscosos da fase contínua que fazia aparecer este tipo de mecanismo em baixo número de Reynolds, tendo em conta que outros autores associam o *jetting* a efeitos inerciais [21].

Neste trabalho não foi observado uma grande influência dos efeitos viscosos da fase contínua sobre a gota em formação. Pelo contrario, foi observado que para produzir a quebra tem que acontecer primeiro o bloqueio do canal principal parecido ao mecanismo *squeezing*, com a diferença que o bloqueio ocorre a jusante da junção.

As vazões fixas de fase dispersa de 0.01 e 0.05 ml/h atingiram, para as médias e altas vazões de fase contínua, um tamanho de gota constante. Este tamanho foi maior para a maior vazão injetada de fase dispersa porque as duas variáveis têm um comportamento diretamente proporcional. Na vazão de 0.09 ml/h de fase dispersa não foi atingido um tamanho de gota constante na faixa

explorada. As limitações dos equipamentos não permitiram verificar se as altas vazões de fase dispersa também atingem um tamanho de gota constante.

Como é de se esperar, o tamanho de gota é proporcional com a vazão da fase dispersa injetada, tendo em conta que ela sempre favorece o crescimento da gota.

4.1.3.4. Efeito do número de capilaridade

A figura (4.50) mostra o comportamento do tamanho de gota da fase dispersa de alta viscosidade (438.13 mPa.s) em função do número de capilaridade. A faixa de fase contínua vai de 0.01 ml/h até 0.15 ml/h, e a análise é feita para as vazões fixas de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h.

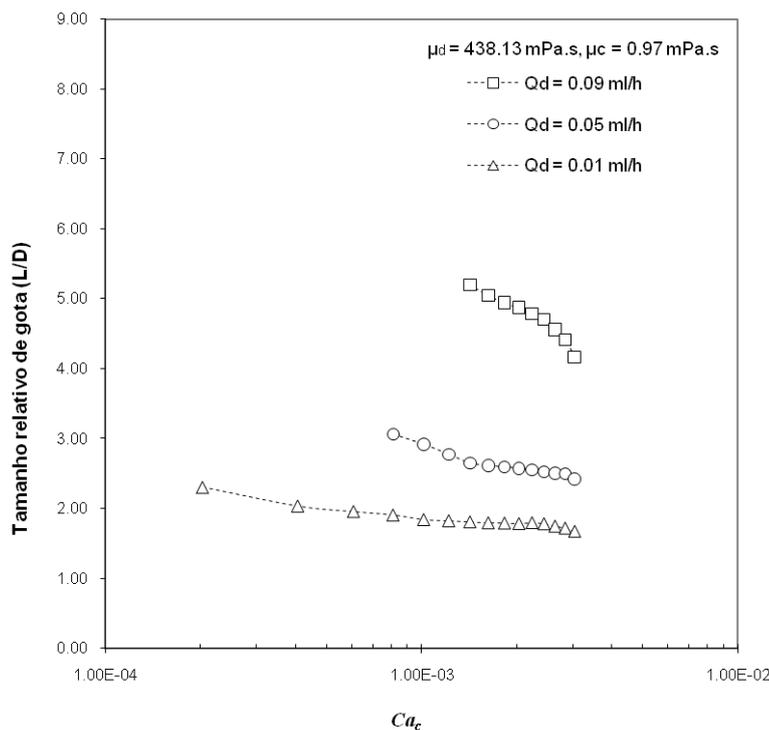


Figura 4.51: Tamanho de gota em função do número de capilaridade. Medições comparativas para as vazões fixas de fase dispersa de 0.01, 0.05 e 0.09 ml/h.

Nas três vazões fixas de fase dispersa analisadas, o comportamento observado mostrou que o tamanho de gota decresce quando o número de capilaridade se incrementa. A diferença é marcada pelo grau em que esta variável

afeta o tamanho de gota. Para baixas vazões (0.01 ml/h), o número de capilaridade tem pouca influência porque o tamanho diminui fracamente. Ao contrario para altas vazões (0.09 ml/h), a influência é maior porque o tamanho cai fortemente. No caso de vazões médias (0.05 ml/h), tem-se um comportamento intermediário.

Como já foi estabelecido antes, o tipo de seção da junção micro-fluídica T pode gerar grandes diferenças nos fenômenos que envolvem a formação de gotas no mecanismo *jetting*. Assim, como no caso *squeezing*, aqui acontece uma situação parecida com o número de capilaridade e suas variáveis. Isso porque apesar de conseguir o mesmo efeito, elas atuam de diferente forma no processo de formação de gotas em junções micro-fluídicas T com seções diferentes.

Pode ser descrito de forma similar ao caso *squeezing*, que no caso de seções retangulares, velocidades e viscosidades altas da fase contínua geram maiores esforços cisalhantes ao redor da gota em formação, e no balanço de forças são mais representativas do que as forças interfaciais que impedem a quebra, produzindo portanto as menores gotas.

Neste caso onde o bloqueio do canal principal é total, as variável atuam de forma diferente. Por um lado, a alta velocidade da fase contínua diminui o tempo de adelgaçamento do pescoço da gota em formação, e em combinação com a instabilidade observada, aceleram a quebra. Assim a gota, neste tempo, cresce menos do que poderia ter crescido para velocidades de fase contínua baixa, favorecendo a formação de gotas pequenas.

Por outro lado, a alta viscosidade da fase contínua atua ao redor da gota em formação freando o crescimento dela. A fase contínua molha a parede do canal principal fazendo um filme entre a parede e a gota em formação, e como foi dito na análise do mecanismo *squeezing* para seções circulares, esta fase tem velocidade menor do que a gota exercendo assim esforços cisalhantes em direção contrária ao caso de seções retangulares, dificultando assim seu crescimento e favorecendo também a formação de gotas pequenas.

A tensão interfacial atua favorecendo os maiores tamanhos de gota de forma similar ao mecanismo *squeezing*.

A informação na literatura em relação ao regime de formação *jetting* é insuficiente, seria bom desenvolver diferentes experimentos para estabelecer como as variáveis influem neste mecanismo de formação de gotas e tal vez formular assim um modelo escalar como foi feito no caso *squeezing*. Isso,

considerando que não foi encontrado na literatura formulações para prever o tamanho da gota gerada neste mecanismo em junções micro-capilares T, seja com seção oval ou retangular. Assim, estudos nessa direção poderiam ser feitos em trabalhos futuros, tendo em conta a importância do entendimento das emulsões através do entendimento da formação de gotas, para a vanguardista área da E&P de petróleo.