

4 Resultados e discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia experimental descrita no Capítulo 3, assim como as discussões correspondentes.

Os pontos foram medidos em duplicata, sendo cada amostra analisada três vezes. A partir dos pontos medidos calculamos suas médias e desvios padrões.

4.1. Análise Geral das Medidas de Distribuição de Tamanho de Gotas:

As figuras de distribuição de tamanhos de gotas das emulsões, obtidos no Mastersizer, mostram que, ao passar pelo dispositivo, altera-se a distribuição de diâmetros, mas não é criada uma distribuição bi-modal. Por este motivo, concluímos que a utilização do D_{50} , o valor médio dos diâmetros, seria apropriada para representação das análises.

Na Figura 4-1, vemos a distribuição de diâmetros de gotas da amostra 25 (na entrada do dispositivo) e amostra 27 (na saída do dispositivo) medidos com vazão de 0,5 l/min, 300 rpm e espaçamento entre os discos de 0,1 mm. Pode-se observar o deslocamento do módulo de distribuição do tamanho de gotas.

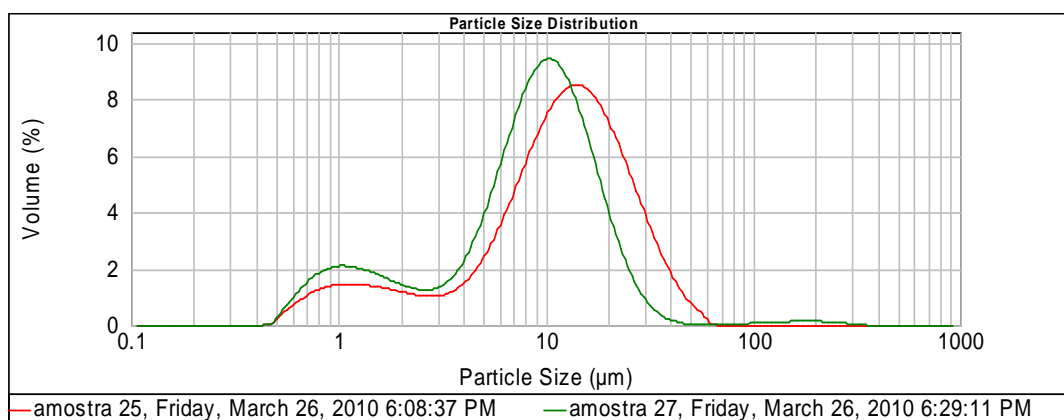


Figura 4-1 - Distribuição dos diâmetros de gotas na entrada e na saída do dispositivo.

4.2. Dados Medidos

A Tabela 4-1 lista as condições experimentais medidas para as variações de espaçamento entre os discos (h), vazão (Q) e rotação (rpm) do dispositivo e os respectivos valores medidos para D_s , D_e e calculados para D_s/D_e juntamente com seus valores máximo e mínimo observados.

h (mm)	Q (l/min)	rpm	D_s (10^{-6} m)	D_s máx (10^{-6} m)	D_s mín (10^{-6} m)	D_e (10^{-6} m)	D_e máx (10^{-6} m)	D_e mín (10^{-6} m)	D_s/D_e
0.1	0.5	0	30.431	31.151	29.817	28.174	29.597	27.188	1.08
		300	19.912	20.424	19.494	29.230	30.102	28.756	0.68
		600	21.371	22.925	20.602	28.119	28.581	27.818	0.76
		1000	25.922	26.506	25.153	30.665	31.642	29.963	0.85
		1300	27.091	27.568	26.741	32.894	33.815	31.841	0.82
	1	0	41.432	43.675	39.084	45.924	49.602	43.109	0.90
		300	41.217	42.922	40.198	49.856	55.259	46.416	0.83
		600	33.477	35.457	31.052	48.994	50.936	46.747	0.68
		1000	50.704	52.279	49.351	59.285	63.652	56.891	0.86
		1300	48.286	50.380	47.365	59.825	61.481	58.482	0.81
	1.5	0	62.778	66.220	60.319	66.598	68.748	64.331	0.94
		300	41.912	45.378	36.670	56.983	59.461	53.990	0.74
		600	49.364	50.657	47.187	60.695	69.171	53.249	0.81
		1000	53.435	60.977	50.312	68.111	79.000	59.526	0.78
		1300	53.394	61.659	43.017	54.819	62.790	49.171	0.97
0.5	0.5	0	41.442	43.663	39.539	41.315	46.829	38.696	1.00
		300	33.180	39.247	27.940	40.594	43.500	39.529	0.82
		600	41.380	42.813	39.336	44.548	46.574	42.031	0.93
		1000	50.366	56.248	46.573	45.566	47.519	44.092	1.11
		1300	32.967	35.663	32.268	38.261	40.733	35.840	0.86
	1	0	69.744	75.128	63.960	64.589	67.815	58.750	1.08
		300	51.495	56.948	48.070	66.173	73.408	61.530	0.78
		600	32.205	33.475	30.980	40.326	42.127	38.767	0.80
		1000	35.324	36.180	34.518	41.511	41.779	41.082	0.85
		1300	32.967	35.663	32.268	38.261	40.733	35.840	0.86
	1.5	0	38.417	39.789	37.116	44.146	51.217	40.979	0.87
		300	94.146	98.616	89.964	102.693	110.400	92.624	0.92
		600	71.942	77.739	67.344	76.368	84.275	68.408	0.94
		1000	38.193	38.896	37.529	39.566	41.813	38.318	0.97
		1300	44.234	46.078	42.023	45.138	46.327	44.237	0.98
1	0.5	0	34.464	35.811	32.809	29.790	31.072	28.632	1.16
		300	30.792	36.221	25.478	33.527	37.973	30.410	0.92
		600	29.137	31.819	23.187	28.723	29.440	27.620	1.01
		1000	26.887	30.512	23.629	27.946	30.375	26.397	0.96
		1300	28.055	30.954	26.765	28.386	29.155	27.843	0.99
	1	0	34.020	35.352	31.879	33.211	34.103	32.393	1.02
		300	21.271	22.167	20.474	41.328	44.954	38.462	0.51
		600	41.393	45.314	39.283	52.041	71.040	46.744	0.80
		1000	40.522	43.758	37.285	52.463	58.856	49.111	0.77
		1300	54.208	62.137	46.748	58.151	64.966	48.199	0.93
	1.5	0	72.844	86.350	57.696	82.372	92.661	71.575	0.88
		300	58.290	62.933	55.264	72.147	78.063	67.589	0.81
		600	59.691	61.192	57.520	67.643	70.605	61.949	0.88
		1000	62.776	66.816	57.707	65.452	71.028	61.184	0.96
		1300	64.078	73.752	53.247	41.393	76.591	60.925	0.96
3.5	0.5	0	44.652	47.323	43.510	51.510	57.957	48.461	0.87
		300	19.043	20.767	17.174	18.757	19.943	16.376	1.02
		600	68.420	72.186	65.609	68.675	71.272	66.106	1.00
		1000	12.965	13.272	12.625	12.096	12.513	11.802	1.07
		1300	51.991	54.645	48.488	47.482	56.220	39.541	1.09
	1	0	104.274	116.831	98.748	109.939	159.469	93.234	0.95
		300	23.273	24.224	22.633	23.466	24.940	22.321	0.99
		600	116.162	119.631	113.826	117.592	131.221	106.446	0.99
		1000	25.843	37.129	19.474	26.327	26.947	25.331	0.98
		1300	83.633	87.058	81.048	85.039	111.301	71.772	0.98
	1.5	0	48.153	60.310	40.981	47.274	48.605	43.763	1.02
		300	24.301	25.069	23.325	25.496	26.788	24.705	0.95
		600	71.223	73.562	67.844	73.031	76.604	71.152	0.98
		1000	121.816	127.513	118.300	127.842	135.500	119.718	0.95
		1300	57.186	60.877	51.130	61.948	69.573	55.292	0.92

Tabela 4-1 - Valores de D_s , D_e medidos e D_s/D_e calculado para cada ponto experimental.

A Figura 4-2 exibe os diâmetros de entrada medidos, variando os parâmetros analisados: vazão, rotação e espaçamento entre os discos do dispositivo, na ordem em que foram executadas as medições. Não é possível observar um comportamento constante, ou o seguimento de alguma tendência. Observa-se que os diâmetros aumentam conforme o nível no tanque diminui. As medidas não foram realizadas todas no mesmo dia.

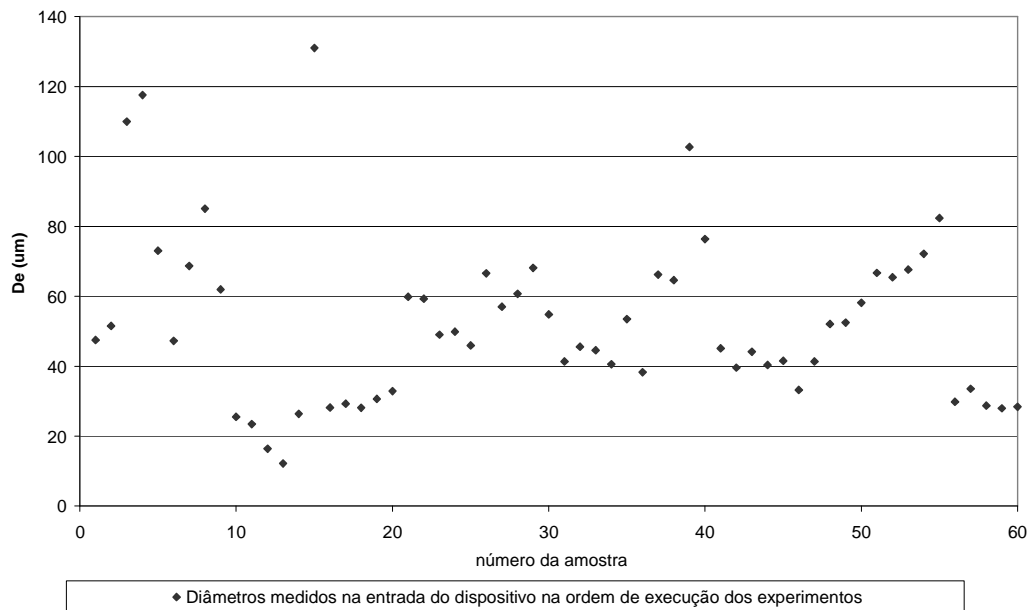


Figura 4-2 - Diâmetros de entrada em função da ordem de execução das medições.

Era esperado que as medidas dos diâmetros da emulsão na entrada do dispositivo experimental fossem aproximadamente constantes. No entanto, isto não foi verificado. A emulsão no tanque possuía visível facilidade de segregação e o nível do tanque não permaneceu constante ao longo do experimento. A emulsão apresentou variação nos diâmetros na entrada do dispositivo experimental a depender do seu nível no tanque. Por este motivo, em todas as análises, buscou-se estabelecer relação entre os diâmetros de saída (D_s) e de entrada (D_e), comparando as duas medidas ou a razão entre elas, definida como a variável D_s / D_e .

As Figura 4-4 a Figura 4-9 foram traçadas baseando-se na razão D_s / D_e . Este parâmetro, quando menor do que a unidade, indica que houve redução do diâmetro médio nas gotas da emulsão e, quando maior que a unidade, indica que houve coalescência das mesmas. As Figuras Figura 4-10, Figura 4-11 e Figura 4-13 mostram o comportamento de D_s , no eixo das abscissas, em função

de D_e , utilizado para o cálculo dos números adimensionais no eixo das ordenadas.

4.3. Parâmetros adimensionais estudados para análise dos dados medidos:

Foi feita análise em função do tempo de residência das emulsões no interior dos discos rotativos. Buscou-se verificar se, haveria um tempo mínimo a partir do qual não seriam verificadas alterações na relação D_s/D_e .

Os tempos de residência (t_R) foram calculados em função da vazão e do volume resultante a depender do espaçamento entre os discos:

$$t_R = \frac{V}{Q} = \frac{\pi D^2 \cdot h}{4Q} \quad (4.1)$$

O valor do número de Reynolds foi calculado com o intuito de verificar se o escoamento se encontrava em regime laminar ou turbulento.

Calculamos o número de Reynolds, antes que a emulsão entrasse no dispositivo, na mangueira de $\frac{1}{4}$ pol como definido na equação 4.2, considerando as vazões utilizadas:

$$Re_{mangueira} = \frac{\rho U_{mangueira} D_{mangueira}}{\mu} \quad (4.2)$$

A massa específica da emulsão, ρ , é calculada, conforme a equação abaixo, em função da massa específica do óleo e da fase contínua (água acrescida de surfactante) e suas frações volumétricas utilizadas no preparo da mesma.

$$\rho = 0,05 \cdot \rho_o + 0,95 \cdot \rho_{fc} \quad (4.3)$$

$$\rho = 0,05 \cdot 930,1 + 0,95 \cdot 999,2 = 995,7 \frac{Kg}{m^3}$$

A viscosidade μ da emulsão foi calculada de acordo com a equação (2.2) considerando o caso estudado com fase dispersa igual a 5% volume/ volume (v/v). Esta equação prevê boa aproximação para a viscosidade da emulsão considerando a fase dispersa como esferas rígidas.

$$\mu = \mu_{fc} \cdot (1 + 2,5\phi) \quad (4.4)$$

$$\mu = 1,0002 \cdot (1 + 2,5 \cdot 0,05) = 1,1253 mPa.s$$

A velocidade do escoamento na mangueira $U_{mangueira}$ foi calculada em função da área transversal da mangueira de $\frac{1}{4}$ de polegada, A e das vazões estudadas como

$$U_{mangueira} = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{mangueira}^2} \quad (4.5)$$

No interior dos discos, reescrevemos o número de Reynolds considerando o escoamento composto por duas componentes: a primeira correspondendo ao deslocamento da emulsão a partir extremidade do disco em direção ao centro do mesmo, independente da rotação, que foi denominada aqui movimento de translação; a segunda correspondendo ao deslocamento do fluido quando o disco apresenta movimento de rotação denominado neste trabalho movimento de rotação. Calculamos o número de Reynolds do escoamento usando a velocidade total (hipotenusa do triângulo retângulo cujos catetos são cada uma das parcelas descritas), como na equação 4.6 abaixo

$$Re = \frac{\rho \sqrt{U_{med}^2 + W_{med}^2} D_h}{\mu} \quad (4.6)$$

O diâmetro hidráulico D_h foi calculado como mostrado abaixo na equação 4.7:

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot h}{(2\pi R + h)} \quad (4.7)$$

A velocidade de translação média foi escrita como

$$U_{med} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot R} \quad (4.8)$$

e a velocidade angular média

$$W_{med} = \bar{\omega} R \quad (4.9)$$

Assim, definimos o número de Reynolds como:

$$Re = \frac{\rho \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi R h}\right)^2 + (\bar{\omega} R)^2} D_h}{\mu} \quad (4.10)$$

Podemos ainda definir

$$UW = \sqrt{U_{med}^2 + W_{med}^2} \quad (4.11)$$

e reescrever o número de Reynolds como:

$$Re = \frac{\rho \cdot UW \cdot D_h}{\mu} \quad (4.12)$$

Esta forma de cálculo considerando o movimento composto de uma componente de translação e outra de rotação será adotada para todos os parâmetros do estudo.

A partir daí, podemos calcular a taxa de cisalhamento a que estaria sujeita o escoamento ao passar pelos discos.

Consideramos a taxa de cisalhamento composta pelas componentes devido aos movimentos de translação, aqui denominada taxa de cisalhamento de translação ($\dot{\gamma}_{translação}$), e de rotação, aqui denominada taxa de cisalhamento de rotação ($\dot{\gamma}_{rotação}$).

Calculamos a taxa de cisalhamento de translação no interior dos discos partindo do escoamento laminar entre placas paralelas e prevendo que esta varia com o raio do dispositivo, conforme descrição abaixo:

$$\dot{\gamma}_{translação} = \dot{\gamma}_{translação}(r) \quad (4.13)$$

portanto, para o cálculo do valor médio de $\dot{\gamma}_{translação}$ temos

$$\overline{\dot{\gamma}_{translação}} = \frac{1}{R} \int_{R_i}^{R_f} \dot{\gamma}_{translação}(r) dr \quad (4.14)$$

De acordo com Fox (2001) o perfil de velocidade laminar na sessão transversal entre duas placas paralelas (Figura 4-3) pode ser escrito como:

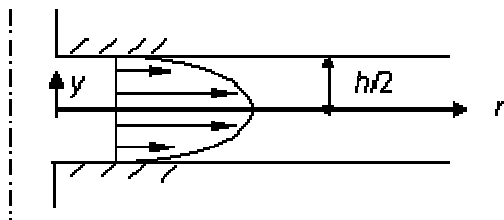


Figura 4-3 - perfil de velocidades no escoamento laminar em placas paralelas.

$$u(y) = U_{máx} \left[1 - \left(\frac{y}{h/2} \right)^2 \right] \quad (4.15)$$

Ainda segundo Fox (2001)

$$U_{máx} = \frac{3}{2} U_{med} \quad (4.16)$$

Podemos, portanto, escrever $\dot{\gamma}_{translação}$ como:

$$\left| \dot{\gamma}_{translação} \right| = \frac{du}{dy} = \frac{12 \cdot U_{med}}{h^2} y \quad (4.17)$$

E, fazendo

$$y = \frac{h}{2} \quad (4.18)$$

Temos $\dot{\gamma}_{\text{translação}}$:

$$\left| \dot{\gamma}_{\text{translação}} \right| = \frac{6 \cdot U_{\text{med}}}{h} \quad (4.19)$$

Podemos então calcular a taxa média de cisalhamento atuando entre os discos como:

$$\overline{\dot{\gamma}_{\text{translação}}} = \frac{1}{R} \int_{Ri}^{Rf} \dot{\gamma}_{\text{translação}}(r) dr = \frac{3Q}{\pi R h^2} \int_{Ri}^{Rf} \frac{dr}{r} \quad (4.20)$$

E, portanto

$$\overline{\dot{\gamma}_{\text{translação}}} = \frac{3 \cdot Q}{\pi \cdot R \cdot h^2} \cdot \ln \frac{Rf}{Ri} \quad (4.21)$$

A taxa de cisalhamento devido ao movimento de rotação foi calculada como:

$$\dot{\gamma}_{\text{rotação}} = \frac{\overline{\omega R}}{h} \quad (4.22)$$

Portanto

$$\dot{\gamma}_{\text{rotação}} = \frac{W_{\text{med}}}{h} \quad (4.23)$$

Para cálculo da taxa de cisalhamento total, utilizamos a expressão

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_{\text{rotação}}^2 + \dot{\gamma}_{\text{translação}}^2} \quad (4.24)$$

Após a comparação das medidas de diâmetros das gotas com as taxas de cisalhamento, passou-se a buscar um número adimensional que permitisse que todos os resultados obtidos apresentassem uma tendência em conjunto.

A primeira verificação foi em função do número de Reynolds. Para padronização com os demais números adimensionais, o número de Reynolds foi recalculado como:

$$\text{Re} = \frac{\rho_{fc} \cdot UW \cdot D_h}{\mu_{fc}} \quad (4.25)$$

Outros grupos adimensionais foram utilizados para comparação com os resultados. O número de Capilaridade, Ca , faz o balanço entre as forças viscosas, que tendem a quebrar as gotas, e a tensão interfacial da emulsão, que representa as forças de restauração. Utilizamos para o cálculo de Ca a equação 4.26, de acordo com a definição de Janssen (2000):

$$Ca = \frac{\mu \cdot U}{\sigma} . \quad (4.26)$$

O número de Capilaridade é muito utilizado quando a viscosidade da fase contínua é dominante, o qual não é o caso deste estudo. No entanto a comparação é feita a título de ilustração. No caso deste experimento foi calculado considerando rotação e translação de acordo com a expressão abaixo:

$$Ca = \frac{\mu_{fc} \cdot UW}{\sigma} . \quad (4.27)$$

A tensão interfacial entre as fases contínua e dispersa da emulsão, σ , foi calculada como a diferença entre as tensões superficiais medidas para o óleo e para a fase contínua (equação 4.28).

$$\sigma = \sigma_o - \sigma_{fc} . \quad (4.28)$$

O seguinte grupo adimensional utilizado é o número de Weber, utilizado quando os efeitos da viscosidade da fase contínua não são preponderantes. Representa a razão entre as forças de inércia, neste caso as forças externas que causam as deformações das gotas, e as forças internas de restauração, a tensão superficial. É definido como:

$$We = \frac{\rho U^2 L}{\sigma} , . \quad (4.29)$$

que, neste estudo foi escrito como:

$$We = \frac{\rho_{fc} \cdot UW^2 \cdot D_h}{\sigma} . \quad (4.30)$$

Por fim foi feita avaliação dos resultados em função do número de Froude, significativo para escoamentos com efeitos de superfície livre. O número de Froude observa a relação entre as forças de inércia e de gravidade e é definido como:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} . \quad (4.31)$$

Considerando que o escoamento se processa sob o efeito do campo centrífugo e que a centrifugação é um dos métodos utilizados para desestabilizar emulsões e favorecer a coalescência de suas gotas, é interessante substituir o efeito do campo gravitacional pelo centrífugo no número de Froude. A comparação com este adimensional buscou, portanto, verificar a influência do campo centrífugo devido ao movimento de rotação do disco na coalescência das gotas da emulsão.

Foi considerado que a atuação da gravidade seria análoga ao campo centrífugo provocado pela rotação do dispositivo. A velocidade angular do escoamento foi retirada do cálculo da velocidade global, pois está sendo considerada no termo de aceleração. Reescrevemos o Número de Froude como:

$$Fr = \frac{\left(\frac{Q}{2\pi R h} \right)}{\omega \cdot R} = \frac{U_{med}}{W_{med}}, \quad (4.32)$$

que passa a ser a relação entre as velocidades de translação e rotação do escoamento.

Muitos trabalhos encontrados na literatura utilizam estes grupos adimensionais da partícula, ou seja, consideram o diâmetro médio da partícula como o comprimento característico no cálculo dos números adimensionais. Também foram feitas as mesmas comparações com números adimensionais, considerando agora o diâmetro das gotas a montante do dispositivo, D_e , como comprimento característico.

Neste caso, o número de Reynolds da gota é definido como:

$$Re_g = \frac{\rho_{fc} \cdot U \cdot W \cdot D_e}{\mu_{fc}} \quad (4.33)$$

Da mesma forma, podemos escrever o número de Weber como:

$$We_g = \frac{\rho_{fc} \cdot U \cdot W^2 \cdot D_e}{\sigma} \quad (4.34)$$

Fazemos uma comparação com os estudos de anteriores de quebra de gotas em tanques. Apesar de diferir do experimento realizado, foi o caso de maior semelhança encontrado na literatura.

O cálculo do valor de We_{crit} , de acordo com a equação 2.10 (Janssen, 2001), indica:

$$We_{crit} = 0,5 \quad (4.35)$$

Que equivale ao valor do número de Weber, a partir do qual, não haveria mais ruptura das gotas, pois estas atingiriam seu tamanho final.

A seguir, foi calculado We_T , considerando o diâmetro do disco interno do dispositivo:

$$We_T = \frac{\rho_{fc} N^2 D^3}{\sigma}, \quad (4.36)$$

O objetivo era tentar correlacionar o diâmetro de gota na saída, D_s , com este parâmetro, como feito por Zhou e Kresta, 1998, conforme a seguinte relação:

$$\frac{D_s}{D} \propto (We_T)^{-3/5} \quad (4.37)$$

Por fim, o número de Froude da gota foi escrito como na Equação 4.38. Desta vez, como o termo $\bar{\omega}R$ saiu cálculo do denominador, foi incluído no cálculo da velocidade global.

$$Fr_g = \frac{UW}{\bar{\omega} \cdot D_e} \quad (4.38)$$

Estes grupos adimensionais, taxa de cisalhamento e tempo de residência foram os parâmetros calculados para tentar estabelecer relação com os diâmetros medidos no experimento. Os resultados obtidos e seus respectivos gráficos são mostrados no subitem a seguir.

4.4. Resultados

Os valores calculados para o tempo de residência (equação 4.1) encontram-se na Tabela 4-2 a seguir. Observa-se que o mesmo independe da rotação do dispositivo.

Q (l/min)	tempo de residência (s)			
	h (mm)			
	0.1	0.5	1.0	3.5
0.5	0.21	1.06	2.12	7.42
1.0	0.11	0.53	1.06	3.71
1.5	0.07	0.35	0.71	2.47

Tabela 4-2 - Tempo de residência dos fluidos no interior do dispositivo experimental.

A Figura 4-4 apresenta os resultados de D_s/D_e em função destes valores do tempo de residência.

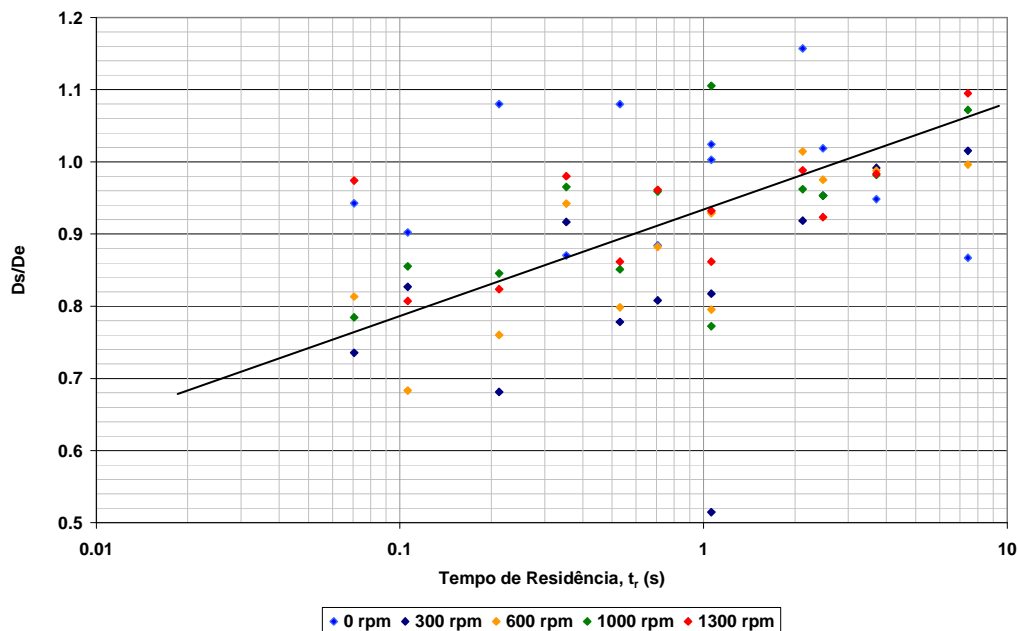


Figura 4-4 - D_s/D_e medidos e seus respectivos tempos de residência no interior do dispositivo experimental.

Não foi observado tempo mínimo para alteração no diâmetro de saída em relação ao de entrada. De maneira geral, quanto menor o tempo de residência, maior a alteração da razão entre as medidas, conforme mostrado na reta traçada na Figura 4-4. Os menores tempos ocorrem nas maiores vazões e nos menores espaçamentos entre os discos, resultando nas maiores taxas de cisalhamento.

O número de Reynolds calculado a montante da entrada do dispositivo indica que o escoamento se encontra em padrão laminar (Tabela 4-3):

Q (l/min)	U (m/s)	$Re_{mangueira}$
0.5	0.26	39.29
1.0	0.53	78.59
1.5	0.79	117.88

Tabela 4-3 Número de Reynolds, antes da entrada do fluido no dispositivo experimental, calculado para as três vazões estudadas.

O número de Reynolds para o escoamento da emulsão também foi calculado no interior dos discos e, de acordo com os resultados obtidos, pode-se verificar que o escoamento encontra-se no regime laminar (Tabela 4-4).

<i>H (mm)</i>	<i>Q (l/min)</i>	<i>RPM</i>	<i>Re devido à rotação</i>	<i>Re devido à translação</i>	<i>Re</i>
0.0001	0.5	0	0.0000	0.0626	0.0626
		300	0.2084	0.0626	0.2176
		600	0.4168	0.0626	0.4215
		1000	0.6947	0.0626	0.6975
		1300	0.9031	0.0626	0.9053
	1	0	0.0000	0.1251	0.1251
		300	0.2084	0.1251	0.2431
		600	0.4168	0.1251	0.4352
		1000	0.6947	0.1251	0.7059
		1300	0.9031	0.1251	0.9118
	1.5	0	0.0000	0.1877	0.1877
		300	0.2084	0.1877	0.2805
		600	0.4168	0.1877	0.4572
		1000	0.6947	0.1877	0.7196
		1300	0.9031	0.1877	0.9224
0.0005	0.5	0	0.0000	0.0625	0.0625
		300	1.0403	0.0625	1.0422
		600	2.0807	0.0625	2.0816
		1000	3.4678	0.0625	3.4683
		1300	4.5081	0.0625	4.5085
	1	0	0.0000	0.1249	0.1249
		300	1.0403	0.1249	1.0478
		600	2.0807	0.1249	2.0844
		1000	3.4678	0.1249	3.4700
		1300	4.5081	0.1249	4.5098
	1.5	0	0.0000	0.1874	0.1874
		300	1.0403	0.1874	1.0571
		600	2.0807	0.1874	2.0891
		1000	3.4678	0.1874	3.4728
		1300	4.5081	0.1874	4.5120
0.001	0.5	0	0.0000	0.0623	0.0623
		300	2.0763	0.0623	2.0772
		600	4.1525	0.0623	4.1530
		1000	6.9208	0.0623	6.9211
		1300	8.9971	0.0623	8.9973
	1	0	0.0000	0.1247	0.1247
		300	2.0763	0.1247	2.0800
		600	4.1525	0.1247	4.1544
		1000	6.9208	0.1247	6.9220
		1300	8.9971	0.1247	8.9980
	1.5	0	0.0000	0.1870	0.1870
		300	2.0763	0.1870	2.0847
		600	4.1525	0.1870	4.1567
		1000	6.9208	0.1870	6.9234
		1300	8.9971	0.1870	8.9990
0.0035	0.5	0	0.0000	0.0617	0.0617
		300	7.1909	0.0617	7.1912
		600	14.3818	0.0617	14.3820
		1000	23.9697	0.0617	23.9698
		1300	31.1606	0.0617	31.1607
	1	0	0.0000	0.1234	0.1234
		300	7.1909	0.1234	7.1920
		600	14.3818	0.1234	14.3824
		1000	23.9697	0.1234	23.9700
		1300	31.1606	0.1234	31.1609
	1.5	0	0.0000	0.1850	0.1850
		300	7.1909	0.1850	7.1933
		600	14.3818	0.1850	14.3830
		1000	23.9697	0.1850	23.9704
		1300	31.1606	0.1850	31.1612

Tabela 4-4 - Número de Reynolds de acordo com as condições experimentais indica escoamento laminar também no interior dos discos.

A partir daí, pudemos calcular a taxa de cisalhamento a que estaria sujeita o escoamento ao passar pelos discos.

De acordo com as vazões e os espaçamentos entre os discos, obtivemos os seguintes resultados, exibidos na Tabela 4-5, para as taxas de cisalhamento de translação:

Q (l/min)	taxa de cisalhamento (s^{-1})			
	h (mm)			
	0.1	0.5	1.0	3.5
0.5	45810	1832	458	37
1.0	91620	3665	916	75
1.5	137430	5497	1374	112

Tabela 4-5 Taxas de cisalhamento quando consideramos apenas o movimento de translação.

As taxas de cisalhamento de rotação independem da vazão e, de acordo com as rotações e espaçamentos, foram calculados os seguintes valores exibidos na Tabela 4-6:

Rotação (rpm)	taxa de cisalhamento (s^{-1})			
	h(mm)			
	0.1	0.5	1.0	3.5
0	0	0	0	0
300	11781	2356	1178	337
600	23562	4712	2356	673
1000	39270	7854	3927	1122
1300	51051	10210	5105	1459

Tabela 4-6 Taxas de cisalhamento aplicadas ao escoamento considerando apenas o movimento de rotação.

Pode-se observar, comparando as Tabelas 4.5 e 4.6, que as ordens de grandeza variam muito de acordo com o caso estudado. Além disso, com exceção do caso em que a rotação do disco interno é nula e os espaçamentos pequenos, as taxas de cisalhamento devido à rotação possuem ordens de grandeza bem superiores às taxas de cisalhamento devido à translação.

A Figura 4-6 exibe os pontos experimentais medidos em função da taxa de cisalhamento total, considerando os movimentos de translação e rotação. Não é possível observar uma tendência definida no comportamento exibido na Figura 4-5. No entanto, de uma maneira geral, verificam-se valores decrescentes de D_s/D_e com o aumento da taxa de cisalhamento, conforme mostrado pela reta traçada. Menores valores de h produzem maiores taxas de cisalhamento ocasionando maiores reduções na distribuição do tamanho de gotas.

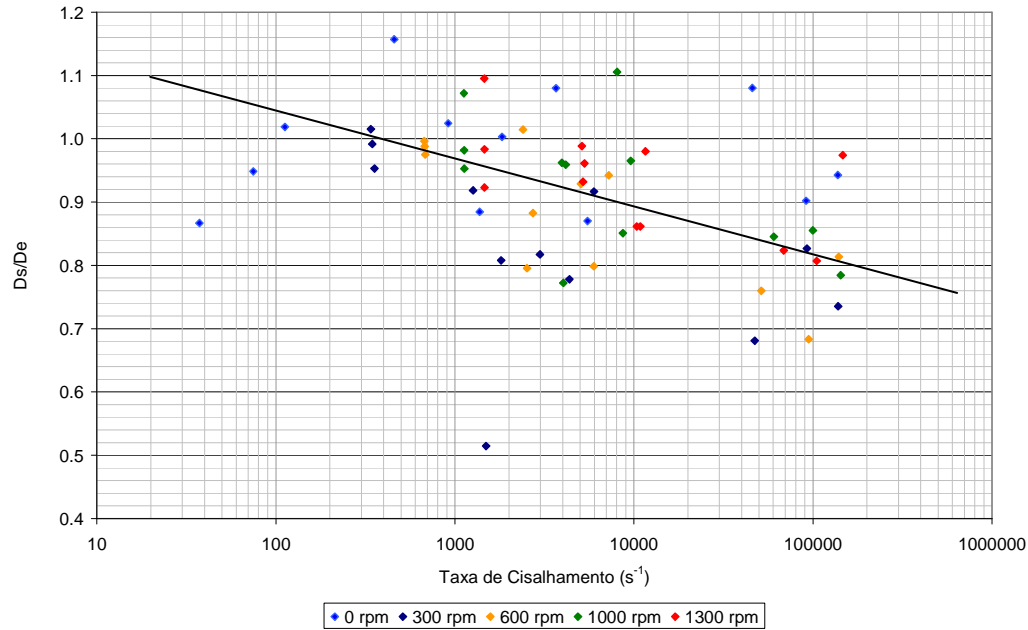


Figura 4-5 - D_s/D_e em função de suas taxas de cisalhamento.

Os resultados D_s/D_e em comparação com o número de Reynolds (Equação 4.23) são exibidos na Figura 4-6:

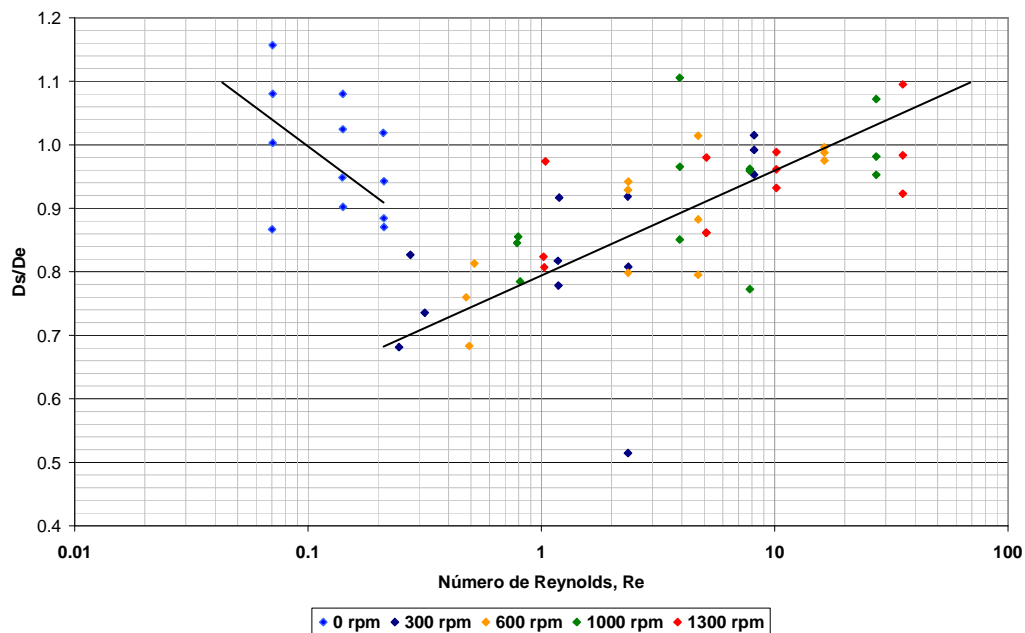


Figura 4-6 - Resultados de D_s/D_e em função dos respectivos números de Reynolds.

Devido à diferença na ordem de grandeza dos valores de Reynolds obtidos considerando rotação e translação, quando conjugamos os dois movimentos temos a predominância ora de um, ora de outro. É possível observar dois comportamentos distintos na Figura 4.7:

- Nos pontos cujos valores no número de Reynolds são inferiores a 0,22 correspondem às situações nas quais a rotação era nula e predominou o movimento de translação. Nestes pontos, o aumento do número de Reynolds corresponde ao aumento da velocidade e da taxa de cisalhamento de translação levando a menores valores de D_s/D_e ;
- Nos demais pontos, valores crescentes do número de Reynolds correspondem a maiores razões D_s/D_e , indicando que, nas situações em que o dispositivo encontrava-se dotado de rotação, esta compensava as taxas de cisalhamento aplicadas. Nestes casos, as forças inerciais evitavam a redução da DTG.

Quando comparadas com o número de Capilaridade (Equação 4.27) as razões D_s/D_e exibem o comportamento conforme mostrado na Figura 4-7.

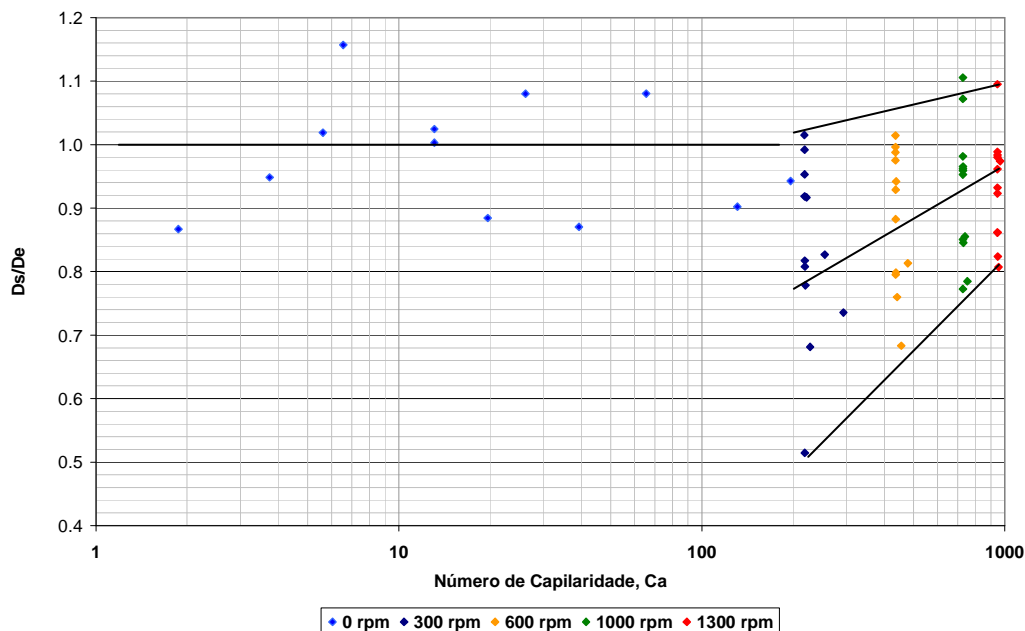


Figura 4-7 - Valores de D_s/D_e em função dos respectivos números de Capilaridade.

Não foi possível observar tendência entre os pontos sem rotação a depender de sua capilaridade. Para os demais, a velocidade de translação não contribuiu para diferenciar os pontos estudados, não sendo possível fazer grande distinção entre os pontos de mesma rotação. De uma maneira geral, maiores números de Capilaridade indicam maiores relações entre D_s/D_e com o aumento da rotação do dispositivo. Esta observação não está de acordo com a definição do número de Capilaridade onde a força de restauração das gotas, a tensão interfacial, encontra-se no denominador. No entanto, este estudo não tem

como efeito dominante a viscosidade da fase contínua, condição que torna apropriada a comparação com o número de Capilaridade.

Os resultados de D_s/D_e em função do número de Weber (Equação 4.30) podem ser vistos na Figura 4-8. Apresentam comportamento similar ao da Figura 4-6, no qual a comparação é feita com o número de Reynolds.

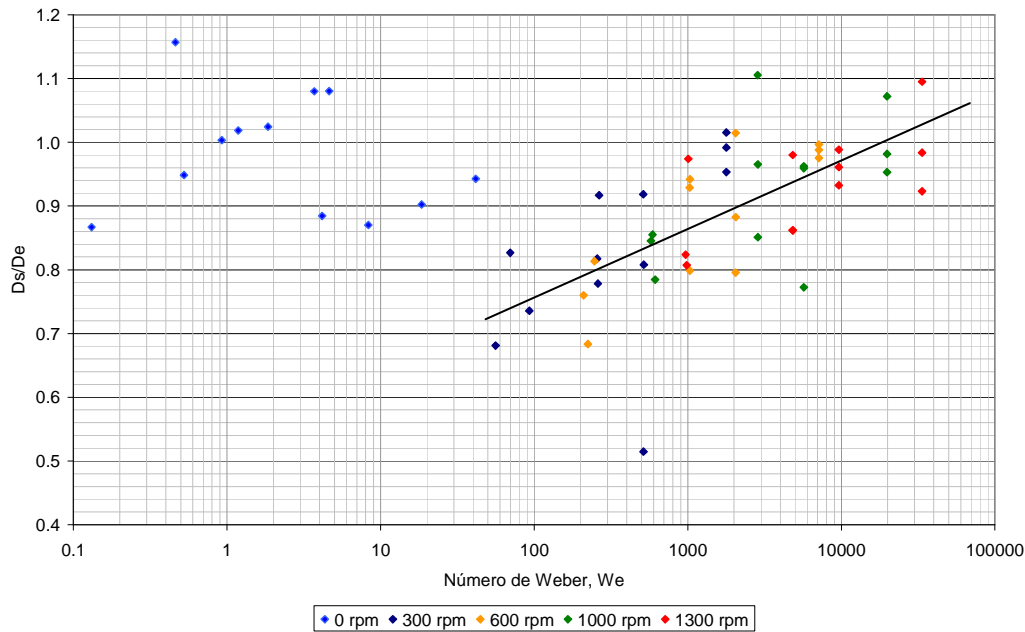


Figura 4-8 D_s/D_e em função do Número de Weber.

Assim como em comparação com o número de Reynolds, valores crescentes do número de Weber resultam em maiores razões D_s/D_e . As forças inerciais, sendo predominantemente oriundas de rotação, auxiliam a manutenção do diâmetro médio das gotas ao invés de tender a deformá-los.

A Figura 4-9 a seguir exhibe os resultados obtidos quando comparamos as razões D_s/D_e com o número de Froude (Equação 4.32). Neste caso, os pontos nos quais $\varpi = 0$ não puderam ser calculados.

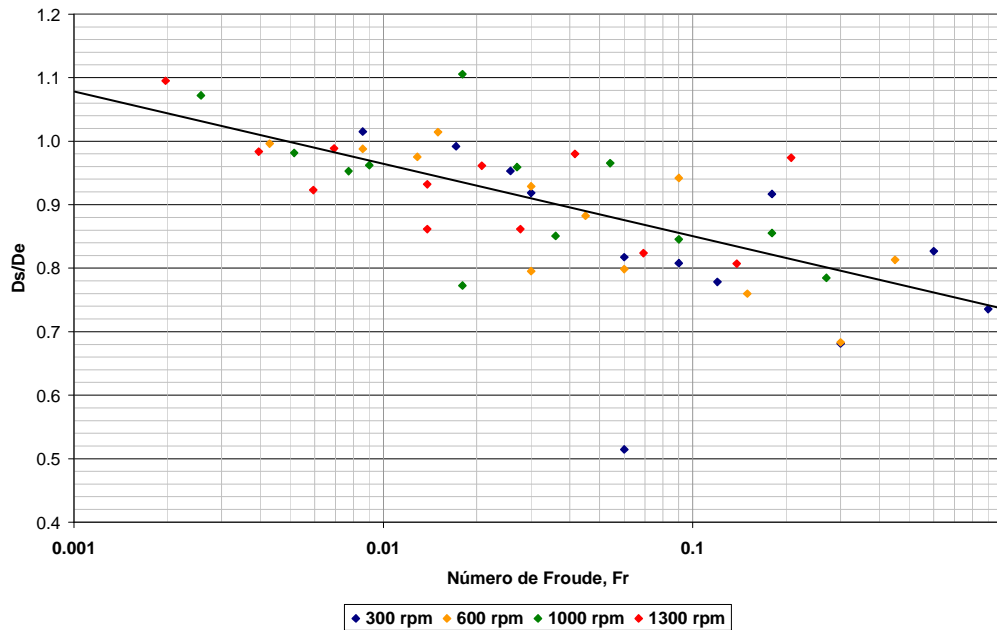


Figura 4-9 Valores de D_s/D_e e os respectivos números de Froude.

Menores valores do número de Froude indicam a preponderância do campo centrífugo resultando em maiores valores de D_s/D_e , como observado na Figura 4-9. Maiores valores no número de Froude ocorreram nos pontos de menor espaçamento entre os discos ($h = 0,1$ mm), nos quais foram observadas maiores taxas de cisalhamento e menor atuação do campo centrífugo. O número de Froude foi o grupo adimensional que apresentou melhores resultados para comparação com os valores de D_s/D_e .

As análises a seguir mostram Figuras análogas às exibidas anteriormente, porém considerando como comprimento característico para o cálculo destes números adimensionais o diâmetro médio medido à montante do dispositivo experimental, D_e . O eixo das abscissas foi substituído por D_s mantendo assim a relação entre D_s e D_e .

A Figura 4-10 a seguir exibe os valores de D_s em função dos Re_g calculados:

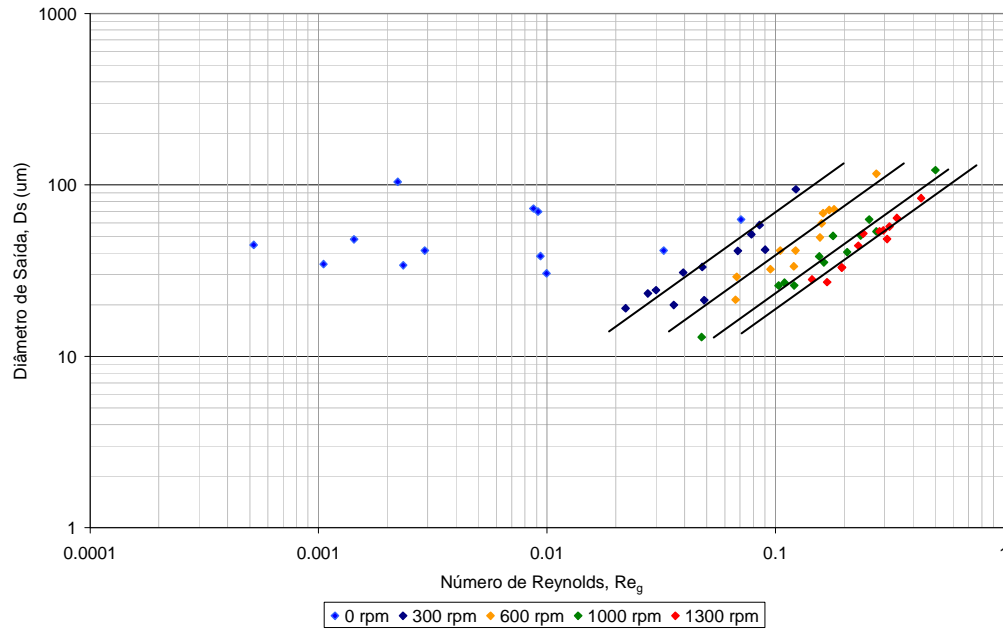


Figura 4-10 – D_s em função do número de Reynolds.

Podemos observar que as medidas realizadas nas mesmas rotações se alinham em retas. Para uma mesma rotação, maiores valores do número de Reynolds resultam em maiores D_s mostrando que, o aumento das forças inerciais, devido principalmente ao aumento de rotação, evita a redução dos diâmetros das gotas.

Em comparação com o número de Weber da gota, os valores de D_s são apresentados na Figura 4-11.

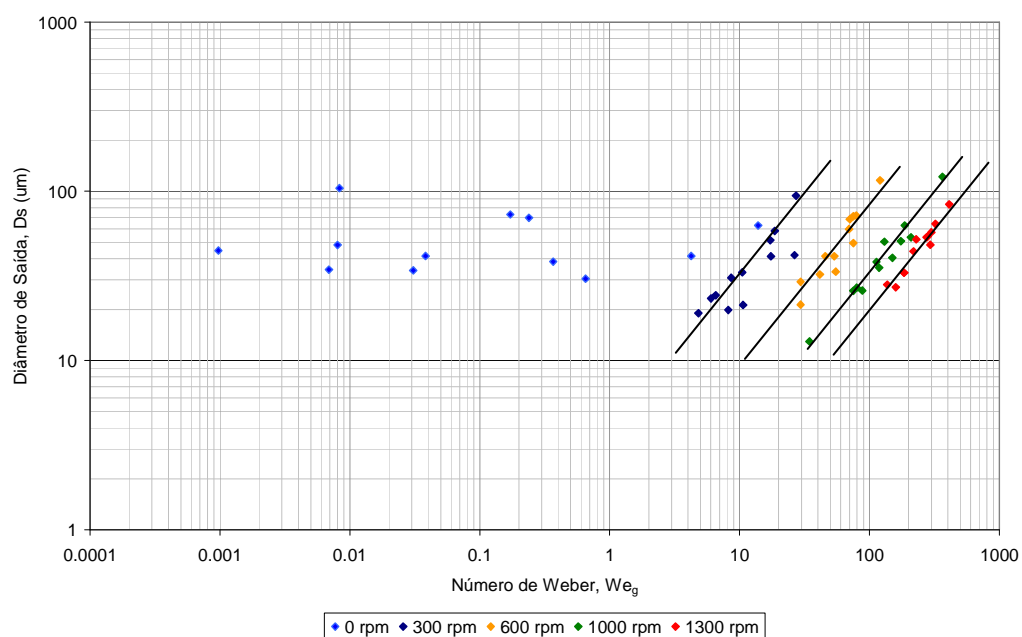


Figura 4-11 - D_s em função do número de Weber.

De forma análoga ao resultado apresentado para o número de Reynolds, observamos que as medidas realizadas nas mesmas rotações se alinham em retas e, para uma mesma rotação, maiores valores do número de Weber resultam em maiores D_s , refletindo a manutenção dos diâmetros das gotas na emulsão com o aumento das forças inerciais

A Figura 4-12 exibe os resultados obtidos quando comparamos as dimensões das gotas com as dimensões do disco interno do dispositivo e as condições experimentais, em comparação com os estudos de Janssen (2001) e Zhou e Kresta (1998). Da mesma forma que não foi atingido o valor de We_{crit} , não houve estabilização do tamanho das gotas em $d_{máx}$. Por este motivo, não foi possível estabelecer uma relação no gráfico entre os diâmetros das gotas e as condições experimentais.

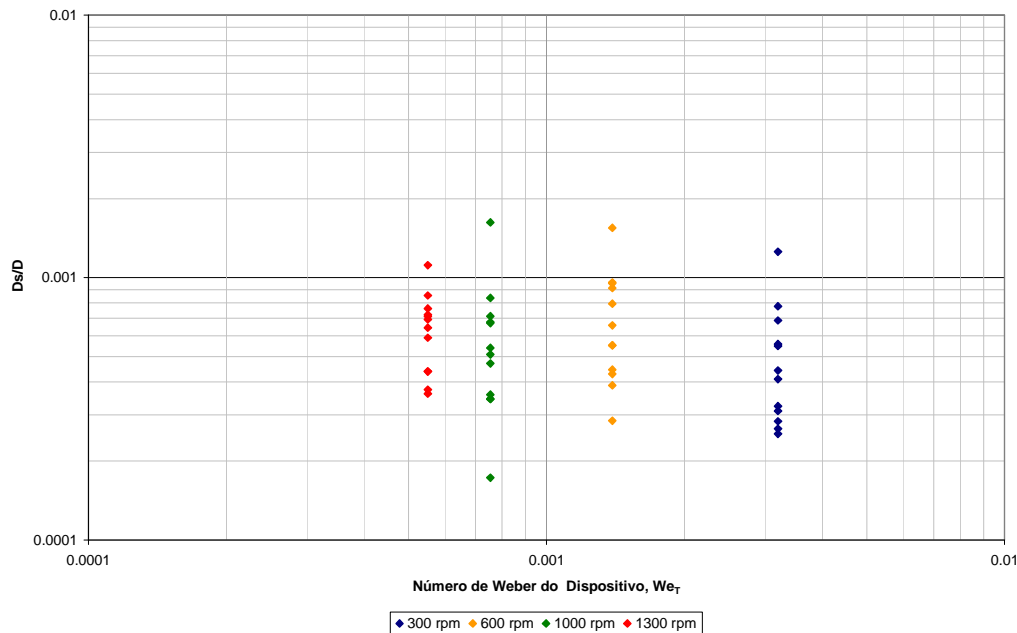


Figura 4-12 - D_s/D em função do número de Weber do dispositivo.

A última comparação feita, os valores de D_s em função de seus respectivos Fr_g são exibidos na Figura 4-13.

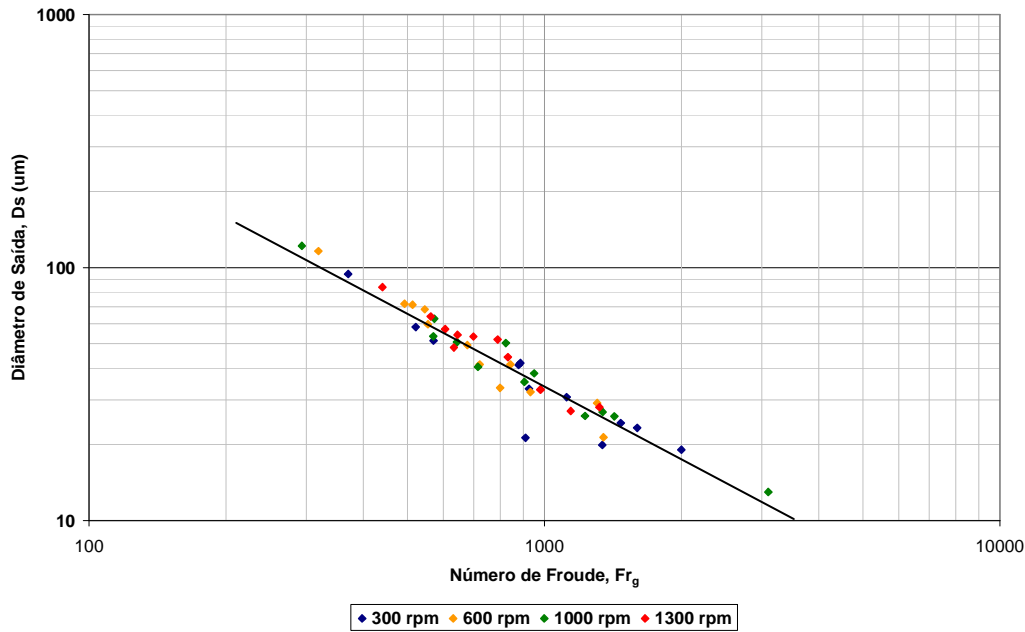


Figura 4-13 - Valores de D_s em função do número de Froude calculado para a gota.

Nesta figura, conseguimos alinhar todos os pontos medidos em uma única reta log-log. A tendência da reta é de redução do valor de D_s com o aumento de Fr_g . Podemos escrever a correlação da reta log-log como:

$$D_s = \frac{UW}{\omega} \cdot D_e^{-1} \quad (4.39)$$

Expandindo-se as variáveis, podemos reescrever como:

$$D_s = \frac{\sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi R h}\right)^2 + (\omega R)^2}}{\omega} \cdot D_e^{-1}. \quad (4.40)$$

Nos casos em que, no cálculo da velocidade, a parcela correspondente à rotação for muito maior que a parcela correspondente à translação, podemos desprezar esta segunda e reescrever a relação acima como

$$D_s \propto \bar{R} \cdot D_e^{-1}, \quad (4.41)$$

Ou ainda, de forma direta

$$\frac{D_s}{D_e} \propto \bar{R}. \quad (4.42)$$

Indicando que a razão entre os tamanhos das gotas na entrada e na saída do dispositivo será proporcional ao seu raio médio.