UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

FABRICIO SOARES DA SILVA

ESTUDO DE QUEBRA DE GOTAS DE DISPERSÕES DE ÁGUA EM ÓLEO FRENTE A QUEDAS DE PRESSÃO LOCALIZADAS

Rio de Janeiro

2019

FABRICIO SOARES DA SILVA

ESTUDO DE QUEBRA DE GOTAS DE DISPERSÕES DE ÁGUA EM ÓLEO, FRENTE A QUEDAS DE PRESSÃO LOCALIZADAS.

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências (DSc.).

Orientadores:

Prof. Dr. Ricardo de Andrade Medronho

Dr. Carlos Alberto Capela Moraes

RIO DE JANEIRO
2019

ESTUDO DE QUEBRA DE GOTAS DE DISPERSÕES DE ÁGUA EM ÓLEO FRENTE A QUEDAS DE PRESSÃO LOCALIZADAS.

FABRICIO SOARES DA SILVA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Ciências.

Examinada por:

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Escola de Química – UFRJ

Prof. Márcio Nele de Souza, D.Sc.
Escola de Química – UFRJ

Prof. Tânia Suaiden Klein, Ph.D.
Escola de Química – UFRJ

Prof. Cláudia Míriam Scheid, D.Sc.
DEQ – UFRRJ

João Batista Vianey da Silva Ramalho, D.Sc.
PETROBRAS/CENPES

Março – 2019

CIP - Catalogação na Publicação

S586e

Silva, Fabricio Soares da
Estudo de Quebra de Gotas de Dispersões de Água em Óleo Frente a Quedas de Pressão Localizadas / Fabricio Soares da Silva. -- Rio de Janeiro, 2019.
221 f.

Orientador: Ricardo de Andrade Medronho.
Coorientador: Carlos Alberto Capela Moraes.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2019.

1. Quebra de Gotas. 2. Dispersão Água em Óleo. 3. Queda de Pressão em Válvulas. 4. Fase Contínua Viscosa. 5. Distribuição de Tamanho de Gotas. I. Medronho, Ricardo de Andrade, orient. II. Moraes, Carlos Alberto Capela, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Celi e Devair, por terem abdicado de tantas coisas para nos dar uma educação de qualidade. Conseguimos! Este feito é muito simbólico para uma família que só foi conhecer uma universidade na minha geração. Agradeço ao meu irmão, Vitor e minha irmã, Letícia por serem e estarem presentes sempre que necessário. Aos meus tios e primos. Igualmente agradeço aos meus cunhados, Edson e Marcella. Ao meu sobrinho Arthur, agradeço a compreensão pela minha ausência nos últimos anos. Tenho certeza que um dia entenderá o porquê do sumiço do dindo.

Ao Prof. Ricardo Medronho, meu orientador, pela paciência e por ter me dado total liberdade e autonomia no desenvolvimento do trabalho. Agradeço pelas palavras em alguns momentos de dúvida. Ao meu co-orientador Capela, por ter sido meu grande amigo e mentor na PETROBRAS.

Um agradecimento especial ao Prof. Luiz Fernando Barca pela grande ajuda durante o desenvolvimento dessa tese. Tenho certeza de que o Barca deveria figurar como co-orientador dada toda a atenção que a mim foi dispensada. Nossas inúmeras discussões acompanhadas de vários cafés foram muito importantes.

Aos amigos do Núcleo de Separadores Compactos da UNIFEI, Érika, Thais, Elias, menino Fagner, Ade, Fernando, Isaac, Vitor e, em especial, ao Leandro, meu braço direito. Agradeço ao Fábio Kurokawa pelo auxílio nas simulações em CFD. Ao Prof. Marcos Aurélio, meus sinceros agradecimentos. Muito obrigado por toda a ajuda e por terem sido uma família nesses últimos anos, quando praticamente morei em Itajubá.

Agradeço aos amigos que tornaram essa jornada menos atroz, Norberto, Flávia, Jaime, Íris, Chrys, Rute, Stella, Rômulo, Vitão, Amália, Valderrama, Nathália, Addor, Guti, Zelda, Pedro Costa, Lívia, Juliana, Vinícius, Roddy, Amance, Cacá, Cidão, Léo, Vanzan, Guilherme, João, Leon, Armando, Raquel e Aline. Um agradecimento especial ao Maurício, que me apresentou uma janela quando todas as portas se fecharam, e à Roberta, que estava nessa janela, sendo fundamental para a conclusão desse projeto. Agradeço a Carol por ter me apoiado e incentivado no começo e ao longo dessa caminhada.

Por fim, agradeço a PETROBRAS pela oportunidade de realizar esse estudo e aos colegas da PETROBRAS, André, Érick, Robson, Leonardo, Thiago Anzai, Wilson Grava, Ramalho, Camila, Jorge, Bruno e Skinner, por estarmos sempre juntos nessa caminhada.

SUMÁRIO DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras gregas

β – Razão entre diâmetro do orifício e da tubulação.
Δ – Diferença.
γ – Taxa de cisalhamento.
ε - Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa.
Φ – Fração volumétrica de fase dispersa na fase contínua.
λ – Tamanho de vórtice turbulento.
μ – Viscosidade dinâmica.
ν – Viscosidade cinemática.
ρ – Massa específica.
σ - Tensão Interfacial.
Θ – Deformação.
τ – Tensão externa a gota.

Sumário de abreviaturas e siglas

ºAPI – Grau API.
A – Área.
ANP – Agência Nacional de Petróleo.
BSW – Teor de água e sedimentos em óleo (basic sediments and water).
C – Constante.
Ca – Número de capilaridade.
CFD – Fluidodinâmica computacional.
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.
d – Diâmetro.
d_{max} – máximo tamanho de gota que resiste a quebra.
$D_{entrada}$ – Diâmetro de entrada na singularidade.
$D_{saída}$ – Diâmetro de saída na singularidade.
d_{95} – Diâmetro no qual 95% das partículas, em volume, estão contidas.
$[d]_{32}$ – Diâmetro médio de Sauter.
$d_{v\ 0.5}$ – Diâmetro no qual 50% das partículas, em volume, estão contidas.
DTG – Distribuição de tamanho de gotas.
E – Gradiente de voltagem.
$\dot{E}$ – Taxa de dissipação de energia.
f – Coeficiente de fricção – fator de atrito.
F – Força de atração.
g – Aceleração devido ao campo gravitacional.
G – Taxa de cisalhamento.
HLB – Balanço hidrofílico/lipofílico.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.
L – Comprimento.
N - Número
P – Pressão.
P_L – Pressão de Laplace.
PA – Percentual de Alteração.
Per – Perímetro molhado.
Q – Vazão.
r – Raio de curvatura.
R – Razão de viscosidade.
Re – Número de Reynolds.
RPM – Rotações por minuto.
S – Distância entre gotas.
t – Tempo.
T – Temperatura.
TGA – Análise Termogravimétrica.
TO – Tratador Eletrostático.
TOG – Teor de óleos e graxas.
u – Velocidade local do escoamento turbulento.
u' – Flutuação de velocidade local.
U – Velocidade média do escoamento.
UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.
v – volume.
V – Velocidade de sedimentação das gotas.
W – Potência.
We – Número de Weber.
∇V – Gradiente de velocidade.

SUMÁRIO DE SUBSCRITOS

a – Água.
act – Tempo de atuação.
c – Contínua.
crítico – crítico.
d – Dispersa.
D – Relativo à Davies
dis – dissipação.
h – hidráulico.
H – Relativo à Hinze.
i – Referente ao impelidor.

inercial – inercial.
k – Kolmogorov.
m – Mistura.
médio – médio.
max – Máximo.
min – Mínimo.
o – Orifício.
p – potência.
PS – Relativo a Percy e Sleicher.
perm – permanente.
quebra – relacionado a quebra.
t – tubulação.
v – Volume.
V – Relativo à Vankova.
visc – Viscoso.
0.9 – Relacionado ao $d_v0.9$ - Diâmetro no qual 90% das partículas, em volume, estão contidas.
0.5 – Relacionado ao $d_v0.5$ - Diâmetro no qual 50% das partículas, em volume, estão contidas.
3.2 – Relacionado ao diâmetro de Sauter.
4.3 – Relacionado ao diâmetro em base momento/volume.
95 – Relacionado ao d_v95 - Diâmetro no qual 95% das partículas, em volume, estão contidas.

ÍNDICE DE FIGURAS E QUADROS

Figura 1 - Sistema típico de Processamento Primário. (Adaptado de Husveg *et al.*, 2009) 5
Figura 2 - Válvula *choke* tipo *plug*-gaiola - Retirado de brochura National Oil Varco (2018) 7
Figura 3 - Comparação entre os experimentos com baixas concentrações de fase dispersa com o modelo de Hinze (1955); Adaptado de Simmons e Azzopardi (2001). 25
Figura 4 - Cálculo de diâmetros médios, adaptada de Rawle, 2015 48
Figura 5 - Comparação de medidas em base numérica, de área superficial e volumétrica (adaptada de Treviranus, 2013) 49
Figura 6 - Desenho esquemático dos quatro fenômenos da dispersão luminosa: absorção, difração, refração e reflexão. Adaptada de Setekleiv e Svendsen (2014) 53
Figura 7 - Vista geral da bancada de testes 56
Figura 8 - Curvas de operação da bomba com o conjunto rotor/estator HD10 (Weatherford, 2019) 57
Figura 9 - Curvas de operação da bomba com o conjunto rotor/estator HD15 (Weatherford, 2019) 57
Figura 10 - Curvas de operação da bomba com o conjunto rotor/estator HD20 (Weatherford, 2019). 58
Figura 11 - Dv 0,5 gerado no giclê de 0,5 mm em função da perda de carga (ΔP) na válvula agulha de refinamento. 59
Figura 12 - Dv 0.5 gerado no giclê de 0,6 mm em função da perda de carga (ΔP) na válvula agulha de refinamento. 60
Figura 13 - À esquerda: Diluidor instalado no banco de testes; À direita: Reservatório de óleo mineral USP e bomba para diluição de amostra para leitura *at-line* do tamanho das gotas. 62
Figura 14 - Vista da bancada de testes: reservatórios na linha de dreno. 63
Figura 15 - À esquerda aquecedores de água e de óleo e, à direita, Bomba HD20 e centrífuga OSD6-Westfalia utilizadas no tratamento (operação *dewatering*) do óleo que era reutilizado. 63
Figura 16 - Esquema da bancada de teste. Fonte: Elaboração própria. 64
Figura 17 - Malvern Mastersizer 2000. 65
Figura 18 - Insitec, da Malvern Instruments. 68
Figura 19 - Aparato diluidor da Malvern. Adaptado de brochura comercial- INSITEC LIQUID STREAM SIZE ANALYZER (2017). 68
Figura 20 - Vazão fornecida pela bomba de diluente, a 15 Hz, *versus* pressão do sistema. 69
Figura 21 - Influência da diluição na transmitância do sinal no Insitec. 70

Figura 22 - Tensiômetro de anel e placa, modelo K9. 70
Figura 23 - Viscosímetro Stabinger SVM 3000 da Anton Paar..... 71
Figura 24 - KF Titrino Plus 870 da Methron. 72
Figura 25 - Vista explodida da seção de testes (à esquerda) e da seção de testes montada (à direita). 73
Figura 26 - Configuração gaveta (à esquerda), e globo (à direita). 73
Figura 27 – Viscosidade Vs Temperatura do Óleo Marlim. 74
Figura 28 – Massa Específica do Óleo Marlim Vs Temperatura. 74
Figura 29 - Testes de estabilidade de dispersão com Marlim, Neutro Leve e mistura Marlim e Neutro Leve. 76
Figura 30 - Estabilidade da dispersão do óleo de Marlim, 50%/50% de concentração das fases. 78
Figura 31 - Variação da viscosidade do óleo mineral EmcaPlus 200 em função da dosagem do tensoativo Alkest O80M. 78
Figura 32 - Tensão interfacial do óleo mineral em função da concentração de tensoativo. 79
Figura 33 - Ensaios de estabilidade do óleo mineral dopado com diferentes concentrações de tensoativo. 79
Figura 34 - Comparativo entre curvas de estabilização do óleo de Marlim e óleo mineral dopado com tensoativo. 80
Figura 35 - Tensão interfacial em função da temperatura, do óleo mineral Emcaplus 200 com várias dosagens de tensoativo. 81
Figura 36 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados. 88
Figura 37 - Variação de PAmédio entre os níveis testados, para a temperatura e a queda de pressão. 89
Figura 38 - Vista isométrica do modelo para a geometria globo. 96
Figura 39 - Vista frontal do modelo para a geometria globo. 96
Figura 40 - Detalhe da haste do modelo para a geometria globo. 97
Figura 41 - Vista isométrica do modelo para a geometria gaveta. 97
Figura 42 - Vista frontal do modelo para a geometria gaveta. 98
Figura 43 - Detalhe da haste do modelo para a geometria gaveta. 98
Figura 44 - Malha para o modelo da válvula globo. 98
Figura 45 - Malha para o modelo da válvula gaveta. 99
Figura 46 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta com canal livre. 100
Figura 47 - Dissipação da energia cinética turbulenta para ponto de baixa viscosidade (12cP): $\triangle P$ = 3bar (acima); $\triangle P$ = 9bar (abaixo), para o caso da geometria gaveta. 101
Figura 48 - Dissipação da energia cinética turbulenta para o ponto central (19cP), para o caso da geometria gaveta. 102

Figura 49 - Desenho esquemático da zona de dissipação da energia cinética turbulenta, para o caso da geometria gaveta. Fonte: Elaboração própria. 103
Figura 50 - Dissipação da energia cinética turbulenta para os casos simulados: ΔP = 3 bar e 12 cP (acima); ponto central (centro); ΔP = 9 bar e 12 cP (abaixo), para o caso da geometria globo. 104
Figura 51 - Deformação versus tempo de gotas entre 20 e 100 micrômetros e 25000 e 250000 W/Kg de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa..... 106
Figura 52 - Tempo necessário para quebra e tempo de atuação dos vórtices para o caso mais difícil de ocorrer quebra (σ 25mN/m e ε 25.000W/Kg). 106
Figura 53 - Tempo necessário para quebra e tempo de atuação dos vórtices para o caso mais fácil de ocorrer quebra (σ 15mN/m e ε 250.000W/Kg). 107
Figura 54 – DTG típica dos Ensaios em branco, com hastes recuadas: não há quebra de gotas significativas. 108
Figura 55 - Resíduos de d_{max} medido com o Malvern Mastersizer 2000. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma..... 112
Figura 56 - Resíduos de d_{max} medido com o malvern Mastersizer 2000, após remoção dos fatores estatisticamente não significantes. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma. 113
Figura 57 – Resíduos de d_{max} medido com o malvern Mastersizer 2000, após exclusão dos *outliers.* (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.. 116
Figura 58 - Resíduos dos pontos medidos com o Insitec. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma. 117
Figura 59 - Resíduos de d_{max} medidos com o Insitec, após exclusão dos fatores não significantes estatisticamente e dos *outliers*. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma. 120
Figura 60 - Resíduos de d_{max}, a baixa concentração, medidos com o Malvern Mastersizer 2000, ajustados ao modelo baseado na teoria de Hinze. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma. 122
Figura 61 - Resíduos dos pontos medidos com o Insitec a baixa concentração. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma. 123

Figura 62 - Resíduos dos pontos a alta concentração medidos com o Malvern Mastersizer 2000. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.. 124
Figura 63 - Resíduos dos pontos, a alta concentração, medidos pelo Insitec. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma. 125
Figura 64 - Médias dos pontos experimentais com 5% de concentração da fase dispersa + ponto central, medidas com Malvern Mastersizer 2000..... 128
Figura 65 - Médias dos pontos experimentais com 5% de concentração da fase dispersa + ponto central, medidas com Insitec. 129
Figura 66 - Médias dos pontos experimentais com 5% de concentração da fase dispersa + ponto central. 129
Figura 67 - Comparação de modelos de quebra aos resultados experimentais a baixa concentração de fase dispersa. 130
Figura 68 - Médias dos pontos experimentais com 10% de concentração da fase dispersa + ponto central, medidas com Malvern Mastersizer 2000..... 132
Figura 69 - Médias dos pontos experimentais com 10% de concentração da fase dispersa + ponto central, medidas com Insitec. 132
Figura 70 - Médias dos pontos experimentais com 10% de concentração da fase dispersa + ponto central, com ambas as técnicas de medida. 133
Figura 71 - Comparação de modelos de quebra aos resultados experimentais a alta concentração de fase dispersa, mais o ponto central (7,5%). 134
Figura 72 - Comparação do modelo viscoso com pontos experimentais a baixa concentração de fase dispersa..... 135
Figura 73 - Comparação do modelo viscoso com pontos experimentais a alta concentração de fase dispersa..... 135
Figura 74 - Indicação dos volumes considerados para o volume de dissipação para a geometria globo: v_{dis} = 2.v1 + v2 + 3.v3. 139
Figura 75 - Resultados experimentais a baixa concentração, medidos com Mastersizer 2000, segregados por propriedades físico-químicas para a geometria globo. 140
Figura 76 - Pontos experimentais a baixa concentração medidos com o Insitec, divididos por propriedades físico-químicas para a geometria globo..... 141
Figura 77 - Pontos experimentais divididos por técnica de medida de DTG para a geometria globo..... 141
Figura 78 - Aplicação dos modelos de quebra de gotas turbulento para os pontos de baixa concentração de água em óleo, para a geometria globo. 142
Figura 79 - Pontos experimentais com geometria globo a alta concentração + ponto central, medidos com o Malvern Mastersizer 2000. 143
Figura 80 - Pontos experimentais da geometria globo com alta concentração + ponto central, medido com o Insitec..... 144

Figura 81 - Comparativo dos pontos experimentais a alta concentração da fase dispersa para ambas as técnicas de medição para a geometria globo. 144
Figura 82 - Ajuste dos modelos de quebra aos pontos de maior concentração para a geometria globo. 145
Figura 83 - Modelo turbulento viscoso para pontos de baixa concentração da fase dispersa + ponto central para a geometria globo. 146
Figura 84 - Modelo turbulento viscoso para alta concentração da fase dispersa + ponto central para a geometria globo. 146
Figura 85 – Variação de d_{max} com ε para ambas as geometrias (baixa concentração de fase dispersa). 148
Figura 86 - Pontos Variação de d_{max} com ε para ambas as geometrias (alta concentração de fase dispersa). 150
Figura 87 - Comparação do modelo de Hinze com os pontos experimentais de Silva *et al.* (2005). 152

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanhos de gota relacionados com taxa de dissipação de energia (adaptado de Davies, 1985). 19
Tabela 2 - Revisão bibliográfica de Simmons e Azzopardi (2001), adaptado, sobre a determinação de distribuição de tamanho de gotas. 25
Tabela 3 - Definições de diâmetro de partículas – Adaptada de Allen, 1997. 46
Tabela 4 - Definição dos diâmetros médios (adaptada de Allen, 1997) 47
Tabela 5 - Lista dos principais equipamentos do Banco Gerador de emulsões. ... 61
Tabela 6- Tensão interfacial do óleo Marlim..... 75
Tabela 7 - Propriedades física do EmcaPlus a 20°C..... 76
Tabela 8 - Propriedades físicas do óleo EmcaPlus 200 em função da temperatura 77
Tabela 9 - Matriz de testes exploratórios. 85
Tabela 10 - Resultados brutos dos experimentos exploratórios..... 86
Tabela 11 - Efeitos estimados dos fatores em PAmédio, excluindo-se o ponto 5. 87
Tabela 12 - Cálculos de dissipação de energia cinética turbulenta, Reynolds no orifício e escala de Kolmogorov. 91
Tabela 13 - Matriz de testes planejada por geometria. 94
Tabela 14 - Pontos extras em ΔP intermediário por geometria. 94
Tabela 15 - Propriedades do fluido: Óleo mineral EMCAPLUS 200..... 96
Tabela 16 - Análise de variância dos pontos medidos pelo Malvern Mastersizer. 111
Tabela 17 - Análise de variância dos pontos experimentais medidos pelo Malvern Mastersizer após retirada dos fatores não significativos estatisticamente. 113
Tabela 18 - Análise de variância dos pontos experimentais medidos pelo Malvern Mastersizer após remoção de *outliers*..... 114
Tabela 19 - Análise de variância dos pontos experimentais medidos pelo Insitec. 117
Tabela 20 - Análise de variância dos pontos experimentais medidos pelo Insitec após remoção dos fatores não significativos estatisticamente. 118
Tabela 21 - Análise de variância dos pontos medidos com o Insitec, após remoção dos fatores principais viscosidade e tensão interfacial, e remoção de *outliers.* Em seguida, tabela de VIF. 119
Tabela 22 - Médias dos resultados da geometria gaveta. 126
Tabela 23 - Pontos extras realizados apenas para as condições de alta tensão interfacial e viscosidade. 126
Tabela 24 – Tabela resumo dos fatores calculados para a geometria gaveta. ... 127
Tabela 25 - Médias dos resultados geometria globo. 137
Tabela 26 - Resultados médios dos testes complementares geometria globo e seus respectivos desvios..... 138

Tabela 27 - Valores dos parâmetros calculados para a média dos pontos da geometria globo..... 139
Tabela 28 - Dados experimentais de Silva *et al.* (2005) e valores calculados da dissipação da energia cinética turbulenta e dos vórtices de Kolmogorov. 151

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Equação da taxa de dissipação de energia por unidade de massa 7
Equação 2 - Equação de Stokes 8
Equação 3 - Equação da força de atração entre gotas quando expostas a um campo elétrico 12
Equação 4 - Equação de Laplace 14
Equação 5 - Equação de pressão de Laplace para gotículas esféricas 14
Equação 6 - Expressão das tensões viscosas 14
Equação 7 - Número de Weber 15
Equação 8 - Weber como número de capilaridade 15
Equação 9 - Equação das flutuações de velocidade local em escoamento turbulento 16
Equação 10 - Relação entre a flutuação de velocidade local, taxa de dissipação e tamanho de vórtice turbulento 16
Equação 11 - Número de Weber crítico 17
Equação 12 - Equação das flutuações de velocidade quando em turbulência isotrópica, proposta por Hinze 17
Equação 13 - Modelo de previsão de tamanho máximo de gotas, proposto por Hinze 17
Equação 14 - Modelo de previsão de tamanho máximo de gotas, proposto por Davies 18
Equação 15 - Definição do tamanho do vórtice de Kolmogorov 19
Equação 16 - Modelo de previsão de tamanho máximo de gotas, quebra turbulenta viscosa 20
Equação 17 - Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta em tubulações . 21
Equação 18 - Modelo de previsão de tamanho máximo de gotas em tubulações. 21
Equação 19 - Modelo de previsão de tamanho máximo de gotas em tubulações para gotas acima da escala integral 22
Equação 20 - Modelo de previsão de tamanho máximo de gotas, proposto por Sleicher 23
Equação 21 - Modelo de previsão de tamanho máximo de gotas considerando coalescência, proposto por Brauner 24
Equação 22 - Equação de deformação por cisalhamento 26
Equação 23 - Número de potência 30
Equação 24 - Número de Reynolds 30
Equação 25 - Modelo de quebra de gotas devido a aceleração em orifício, Percy & Sleicher 31
Equação 26 - Expressão de deformação em função do tempo 34
Equação 27 - Expressão de deformação em tempo tendendo ao infinito 34
Equação 28 - Equação do tempo necessário para ocorrência de quebra 34

Equação 29 - Equação do tempo de vida de um vórtice turbulento 34
Equação 30 - Definição de Percentual de Alteração 40
Equação 31 - Definição de Percentual de Alteração médio 40
Equação 32 - Expressão de ajuste empírico de Mlynek e Resnick 43
Equação 33 - Modelo empírico para pontos medidos com o Malvern Mastersizer 2000 - Geometria Gaveta 115
Equação 34 - Modelo empírico para pontos medidos com o Malvern Mastersizer 2000 - Geometria Globo 115
Equação 35 - Modelo empírico para pontos medidos com o Insitec, Geometria Gaveta 120
Equação 36 - Modelo empírico para pontos medidos com o Insitec, Geometria Globo 120
Equação 37 - Modelo ajustado, baseado na teoria de Hinze, para baixas concentrações de fase dispersa e medição com Malvern 122
Equação 38 - Modelo ajustado, baseado na teoria de Hinze, para baixas concentrações de fase dispersa e medição com Insitec 123
Equação 39 - Modelo ajustado, baseado na teoria de Hinze, para altas concentrações de fase dispersa e medição com Malvern 123
Equação 40 - Modelo ajustado, baseado na teoria de Hinze, para altas concentrações de fase dispersa e medição com Insitec 124

Sumário

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Processamento Primário de Petróleo 3
1.2. Válvulas *Choke* 6
1.3. Separadores Gravitacionais 8
1.4 Tratadores Eletrostáticos 10
1.5. Objetivos da Tese 12
1.5.1. Objetivos Específicos 13
2. TEORIA 14
2.1. Quebra de Gotas 14
2.2. Quebra de Gotas em Escoamento Laminar 15
2.3. Quebra de Gotas em Escoamento Turbulento 16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
3.1. Quebra de Gotas em Tubulações 21
3.2. Quebra de Gotas em Misturadores Estáticos 26
3.3. Quebra de Gotas em Vasos Agitados e Rotores e Estatores 28
3.4. Quebra de Gotas em Orifícios 31
3.5. Considerações Sobre os Estudos Realizados até o Momento 44
4. MEDIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS 45
4.1. Técnicas de Medição de Tamanho de Partículas 49
4.2. Medição de DTG por Difração de Raios Laser 53
5. MATERIAIS E MÉTODOS 55
5.1. Bancada de Testes 55
5.2 – Métodos Analíticos 65
5.2.1 – Medição de Distribuição de Tamanho de Gotas (DTG) 65
5.2.2 – Medição de Tensão Interfacial 70
5.2.3 – Medição de Viscosidade e Massa Específica 71
5.2.4 – Medição de Teor de Água em Óleo 71
5.3. Singularidade da Seção de Testes 72
5.4. Escolha do Óleo Modelo e suas Propriedades 73
5.5. Procedimento Experimental na Bancada de Teste 81
5.6. Planejamento dos Experimentos 82

5.6.1. Experimentos Exploratórios (Óleo de Marlim) 83
5.6.2 Resultados e Discussão (Experimentos Exploratórios) 85
5.6.3. Conclusões Parciais dos Experimentos Exploratórios 91
5.6.4 Planejamento de Experimentos com Óleo Modelo 92
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 95
6.1 Simulações Usando CFD 95
6.1.1 Condições de Contorno 95
6.1.2 Casos Simulados 99
6.1.3 Geometria Gaveta 100
6.1.4 Geometria Globo 103
6.2 Avaliação do Tempo de Quebra 105
6.3 Testes em Branco 108
6.4 Análise Estatística das Variáveis e Construção de Modelos 109
6.4.1 Modelo Empírico 109
6.4.1.1 Modelo Empírico – Medidas com o Malvern Mastersizer 2000 110
6.4.1.2 Modelo Empírico – Medidas Tomadas pelo Insitec 116
6.4.2 Modelos Baseados na Teoria de Hinze 121
6.4.2.1 Baixa Concentração 121
6.4.2.2 Alta Concentração 123
6.5 Resultados Geometria Gaveta 125
6.5.1 Conclusões da Geometria Gaveta 136
6.6 Resultados Geometria Globo 137
6.6.1 Conclusões da Geometria Globo 147
6.7 Resultado das Geometrias Agregadas 148
6.8 Validação do Modelo Baseado em Hinze 150
7 CONCLUSÕES 153
Referências Bibliográficas 157
Anexo A - Desenhos Executivos da Singularidade 167
Anexo B – Simulações Numéricas dos Pontos Ensaiados 172
Anexo C - Dados Brutos dos Pontos Experimentais 195
Anexo D – Curvas de DTG dos Experimentos Exploratórios 206

Resumo da Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química/UFRJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Ciências.

ESTUDO DE QUEBRA DE GOTAS DE DISPERSÕES DE ÁGUA EM ÓLEO FRENTE A QUEDAS DE PRESSÃO LOCALIZADAS

Fabricio Soares da Silva

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Dr. Carlos Alberto Capela Moraes

As instalações de produção de petróleo têm válvulas (*choke* e controle) para controlar a produção e proteger os equipamentos a jusante contra sobrepressurização. O escoamento do fluido por essas válvulas é responsável pela quebra das gotas e pela formação de emulsões de difícil tratamento. O conhecimento dos fenômenos que relacionam as grandezas do escoamento através dessas válvulas e as propriedades dos fluidos com a quebra de gotas dessas emulsões é, portanto, importante para o adequado dimensionamento e operação das instalações de processamento. A maioria dos estudos de quebra de gotas está relacionada ao escoamento em tubulações ou vasos agitados e, apenas mais recentemente, alguns estudos concentraram-se em investigar o efeito da queda de pressão localizada no processo de quebra de gotas. O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo experimental de quebra de gotículas em dispersões de água em óleo em dispositivos com queda de pressão localizada, alinhado ao cenário de produção de óleo (quebra em válvulas *choke* e em válvulas entre estágios de separação). Para isso, foi construído um aparato capaz de simular uma válvula gaveta e uma globo. Foram sintetizadas dispersões, com diferentes viscosidades, tensões interfaciais e concentrações de água em óleo, que foram bombeadas através do aparato a diferentes quedas de pressão. Para avaliar a quebra de gotas dessas dispersões, a distribuição do tamanho das gotas foi medida por difração de raios laser. Verificou-se que todos os diâmetros máximos experimentais (d_{max}) encontravam-se acima da escala de Kolmogorov.

Simulações em CFD foram realizadas, com o objetivo de definir a zona de dissipação, para cada geometria do aparato. Para modelar o fenômeno de quebra, três diferentes modelos de quebra de gotas, que relacionam as propriedades físicas do óleo e grandezas do escoamento com os diâmetros das gotas, foram comparados com os resultados experimentais. Os resultados mostram que d_{max} diminui com o aumento da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ε) de acordo com a relação $dmax \propto \varepsilon^{-0,4}$, em concentrações baixas da fase dispersa. Observou-se que o aumento da concentração da fase dispersa aumenta o d_{max}, provavelmente devido à supressão da turbulência e/ou fenômeno de coalescência. O modelo de Hinze (1955) não conseguiu prever os resultados experimentais. Através de uma regressão multivariada dos pontos experimentais, um novo modelo (baseado no modelo de Hinze) foi proposto, de forma unificada para ambas as geometrias. Esse modelo foi validado contra pontos experimentais de petróleo bruto e apresentou boa predição, especialmente para casos de alta dissipação de energia, mesmo com a viscosidade e densidade da fase contínua fora da faixa estudada nesta tese.

Palavras-chave: Quebra de gotas, Queda de pressão em válvulas, Dispersão água em óleo, Fase contínua viscosa, Distribuição de tamanho de gotas.

Abstract of a Doctoral Thesis presented to the Postgraduate Program in Chemical and Biochemical Process Engineering of the School of Chemistry/UFRJ as partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Science

STUDY OF BREAKAGE OF DROPS IN DISPERSIONS OF WATER IN OIL FACE TO LOCALIZED PRESSURE DROPS

Fabricio Soares da Silva

Supervisors: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Dr. Carlos Alberto Capela Moraes

Oil production facilities have *choke*/control valves to control production and protect downstream equipment against over pressurization. The flow through these valves is responsible for droplets break up and the formation of emulsions which are difficult to treat. The knowledge of the phenomena that relate the flow quantities through these valves and the fluids properties with the droplet break up of these emulsions is therefore important for the proper design and operation of the processing facilities. The majority of droplet break up studies is related to pipe flow or agitated vessels and, just more recently, some studies focused on investigating the localized pressure drop effect in droplet break up process. The aim of this work was to perform an experimental study of water in oil dispersion droplets break up, with localized pressure drop, aligned to oil production scenario (break up in choke valves and in separation inter-stage valves). To accomplish that, an apparatus capable to simulate a gate and a globe valve was constructed. Dispersions with different viscosities, interfacial tensions and watercuts were synthesized and passed through the apparatus at different pressure drops. To evaluate the droplet break up of these dispersions, the droplet size distribution was measured by laser light scattering. It was verified that all experimental maximum diameters (d_{max}) were above Kolmogorov length scale. CFD simulations were performed, aiming to define the dissipation zone for each valve-like apparatus geometry. To model the break up phenomenon, three different break up models, that relate the fluid

properties and the flow quantities with the droplets diameters, were compared with the experimental results. The results show that d_{max} decreases with the increase of energy dissipation rate (ε) according to the relation $d_{max} \propto \varepsilon^{-0.4}$, at dispersed phase low concentration. It was observed that increasing the dispersed phase concentration increases d_{max}, probably due to turbulence suppression and/or coalescence phenomenon. The Hinze (1955) model failed to predict the experimental results. By applying a multivariate regression of experimental points, a new model was proposed, unified for both geometries. This model was validated against crude oil experimental points and good prediction was observed, especially for cases of high energy dissipation, even with the viscosity and density of the continuous phase out of this thesis studied range.

Keywords: Droplet break up, Pressure drop in valves, Water in oil dispersion, Viscous continuous phase, Drop size distribution.

1. INTRODUÇÃO

A exploração do petróleo com fins industriais e comerciais teve seu início em meados do século XIX. O marco inicial foi a perfuração de um poço, em 1859, pelo coronel Edwin L. Drake, no estado da Pensilvânia, Estados Unidos (Lucchesi, 1998).

A destilação do petróleo trouxe produtos substituintes dos usualmente utilizados à época, na iluminação, como o óleo de baleia e o querosene obtido a partir do carvão (Thomas, 2001). No Brasil, a demanda por esses produtos não era grande devido à distribuição irregular da população (Lucchesi, 1998).

As primeiras buscas por petróleo no Brasil datam do império, quando o então imperador concedeu permissão para pesquisa e lavra de carvão e folhelhos betuminosos (1858) e turfa e petróleo (1864) na região de Ilhéus, na Bahia (Lucchesi, 1998).

Historicamente, pode-se separar a exploração de petróleo no Brasil em três fases: A fase pré-PETROBRAS; a fase de monopólio da PETROBRAS; e a fase iniciada após a Nova Lei do Petróleo, onde houve a flexibilização do monopólio estatal. A fase do monopólio da Petrobras pode se dividir em quatro momentos: Terrestre (1954 a 1968); Marítima – Plataforma rasa (1969 a 1974); Bacia de Campos – Plataforma rasa (1975 – 1984); Bacia de Campos – águas profundas (1985 – 1997) (Milani *et al.,* 2001).

Uma nova fase da exploração do Petróleo no Brasil se iniciou em 2006/2007. Segundo Silva (2011), em meados de 2006 foram iniciadas as pesquisas acerca de novos campos localizados em uma camada geológica ultra-profunda chamada de Pré-sal. Já em 2007, foi anunciada a descoberta do campo de Tupi, tendo seu primeiro óleo sido extraído em 2008.

Novos campos na camada Pré-sal vêm sendo anunciados sucessivamente desde então. Em 2016 a produção no Pré-sal ultrapassou a marca de um milhão

de barris produzidos por dia. Em 2017, pela primeira vez, a produção na camada Pré-sal foi superior à produção na camada do chamado Pós-sal. Este fato ratifica a vocação do País em ambiente *offshore*, e também aumenta a importância de algumas áreas de pesquisa.

A expansão dos limites exploratórios no País traz desafios em várias áreas do conhecimento. Uma dessas áreas é o Processamento Primário de Petróleo, que engloba todos os processos de separação, tratamento e especificação dos fluidos produzidos para utilização comercial ou descarte. Segundo Freitas (2007), o processamento, quando *onshore*, se mostra menos desafiador pela ausência de restrições quanto à área física a ser ocupada (*footprint*) por vasos separadores. Muitas unidades em terra se utilizam de grandes tanques de armazenamento, com tempos de residência podendo chegar a dias.

Segundo Oliveira (2000), além da economicidade e eficiência do tratamento *offshore*, preza-se por tecnologias compactas, devido às restrições de peso e espaço. Portanto, o projeto dos equipamentos deve ser feito de tal forma a obter um compromisso entre estes fatores. Kokal (2002) ratifica que a estratégia de separação deve ser avaliada individualmente, de acordo com as características de cada corrente de produção.

O presente trabalho se insere neste contexto, pois se trata de um estudo sobre o comportamento das dispersões geradas durante a produção do petróleo, correlacionando, experimentalmente, as propriedades físico-químicas do óleo com o diâmetro máximo de gotas geradas em perdas de carga localizadas. Este estudo poderá vir a servir de base para futuros projetos de separadores utilizados no Processamento Primário de Petróleo.

Neste capítulo serão abordados os conceitos básicos acerca do processamento primário de petróleo, alguns de seus equipamentos principais, princípios de funcionamento e problemas associados ou gerados por estes equipamentos.

1.1. Processamento Primário de Petróleo

O Processamento Primário de Petróleo tem o intuito de promover a separação dos fluidos produzidos de um reservatório produtor de petróleo (óleo, gás, água e, eventualmente, sedimentos sólidos), de forma a que essas distintas fases possam ser obtidas com um grau de pureza adequado ao manuseio subsequente. No início da produção de um campo produtor obtém-se óleo com gás em solução. À medida que o campo é produzido, além das fases oleosa e gasosa, um aumento gradual de água salina, existente no reservatório produtor, é percebido. Esta água poderá ser oriunda do próprio reservatório produtor, bem como do processo de aumento de recuperação de petróleo, através da injeção de água do mar ou reinjeção de água produzida (Brasil *et al.*, 2012).

O projeto de uma planta de processamento primário é pautado nas características dos fluidos produzidos, levando-se em conta uma análise técnico-econômica. Esta planta poderá ser simples, efetuando apenas a separação óleo/água/gás, ou mais complexa incluindo o condicionamento e a compressão do gás, o tratamento do óleo e o tratamento da água para descarte ou reinjeção (Thomas *et al.*, 2001).

O sistema de produção de petróleo começa na cabeça do poço, onde se encontra a árvore de natal, que consiste em um conjunto de válvulas, que têm o objetivo de controlar a produção dos fluidos. Nesse equipamento ocorre a maior queda de pressão localizada entre o reservatório e a unidade de produção (Brasil *et al.*, 2012), quando em completação seca. Quando a completação é dita molhada, isto é, com a utilização de árvores de natal molhadas (ANM), a perda de carga localizada na válvula de controle de produção na cabeça do poço (denominada no jargão de produção de *choke*) é considerada a principal responsável pela formação de emulsões óleo/água.

Segundo Kokal (2002), a emulsão gerada na produção dos campos de óleo pode apresentar gotas desde 0,1µm (emulsões severas), até gotas maiores que 50 µm (emulsões mais leves).

Conforme a produção de água aumenta, métodos de elevação artificial de petróleo são utilizados visando à manutenção da produção. Entre estes métodos estão o bombeio centrífugo submerso (utilização de uma bomba centrífuga submersa no poço, para bombeio do fluxo multifásico) e o *gas lift* (injeção de gás na coluna do poço produtor para provocar a elevação dos fluidos produzidos) (Oliveira, 2010). Estes também são, entre outros, fatores responsáveis por formações de emulsão, já que podem gerar elevadas turbulências localizadas, cisalhando a mistura multifásica. Uma das estratégias para minimizar a formação de emulsão é a injeção, via *gas lift*, de desemulsificante, que começa a atuar nos fluidos em escoamento, impedindo a formação de emulsões estáveis e quebrando emulsões já formadas, o que aumenta consideravelmente a quantidade de água livre no fluido produzido.

Ao chegar à unidade estacionária de produção, os fluidos produzidos devem ser separados. Esta separação se dá em um conjunto de vasos separadores (bifásicos ou trifásicos) com diferentes funções e diferentes pressões de operação. Os separadores trifásicos gravitacionais são responsáveis pela separação do gás e da água livre. A fração de água ainda emulsionada na fase oleosa deverá ser separada em unidades de desidratação (tratadores eletrostáticos), de forma que o óleo atinja as especificações quanto à salinidade e teor de água máximos para exportação.

Já a água produzida deve ser tratada de forma a atingir as especificações mínimas para o descarte no mar, segundo legislação vigente. Essa legislação determina que a média mensal do teor de óleos e graxas (TOG) no efluente não deve exceder 29mg/L, podendo atingir valores máximos diários de 42mg/L (Resolução CONAMA 393/2007). A Figura 1 mostra um esquemático de um típico sistema de Processamento Primário.

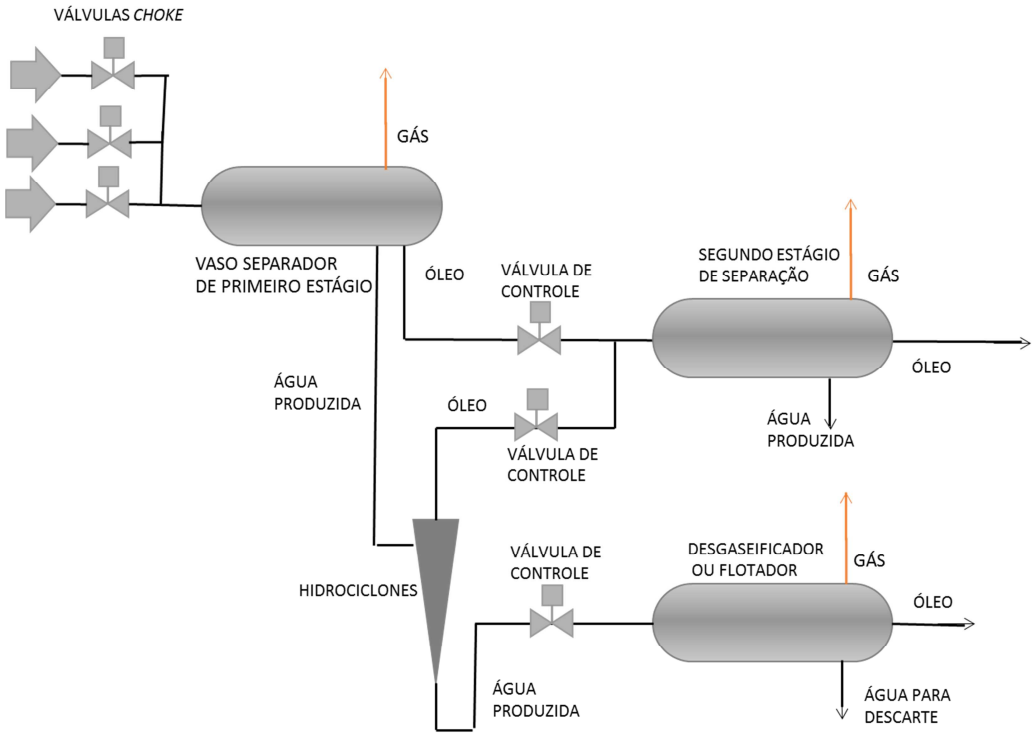


Figura 1 - Sistema típico de Processamento Primário. (Adaptado de Husveg *et al.*, 2009)

Segundo Rego (2008), os sistemas típicos de tratamento de água contam com equipamentos de separação que se utilizam do campo gravitacional e centrífugo. São exemplos os hidrociclones, flotadores e tubos de despejo. A água tratada é descartada no mar, caso apresente TOG dentro da especificação CONAMA, e o óleo é recolhido em um vaso de recuperação de óleo, sendo posteriormente devolvido ao processo.

Além do descarte de água, existe a possibilidade de reinjeção da água produzida no reservatório, com o intuito de promover uma maior recuperação de óleo. Para este fim, a água deverá passar por outros tipos de tratamentos químicos, físicos e físico-químicos, de modo a se reduzir ao máximo a possibilidade de causar dano ao reservatório e, consequentemente, perda de produção de óleo e gás.

1.2. Válvulas *Choke*

Diversos pesquisadores têm confirmado as pesquisas de Hinze (1955) que associam elevadas taxas de dissipação da energia cinética turbulenta, em sistemas bifásicos, com a produção de gotículas dispersas de pequeno diâmetro. Os equipamentos que apresentam maiores taxas de dissipação de energia são aqueles que produzem elevadas perdas de carga localizadas na corrente de fluidos, ou seja, válvulas ou, genericamente, orifícios de restrição ao escoamento.

Vários tipos de válvulas são utilizados nas unidades de produção de petróleo. Elas têm a função de controlar vazão, pressão e nível e, durante sua operação, impõem restrições ao escoamento (Husveg *et al.*, 2009). Acredita-se que o maior formador de emulsões e de diminuição no tamanho de gotas no escoamento do fluido produzido até a unidade de produção é a perda de carga localizada que ocorre em *chokes* de produção, particularmente quando operados muito restringidos, ou seja, produzindo elevada perda de carga localizada.

A função de um *choke* (Figura 2) é regular a vazão oriunda do poço e controlar a produção de maneira a garantir uma produção eficiente, evitando um aparecimento precoce de água de produção devido à formação de cones de água próximo aos canhoneados.

Pode-se pontuar também a função de proteção dos equipamentos a jusante da válvula, através da quebra de pressão do fluido de produção, visando compatibilizar a pressão dos equipamentos subsequentes com a pressão da corrente produzida (Moraes *et al.*, 2009). Ao provocar uma perda de carga localizada, o *choke* promove a quebra de gotas existente no sistema disperso gerado durante o escoamento das fases produzidas, pois dissipa a energia presente no escoamento de forma turbulenta. O resultado dessa dissipação de energia turbulenta são emulsões estáveis e de difícil tratamento.

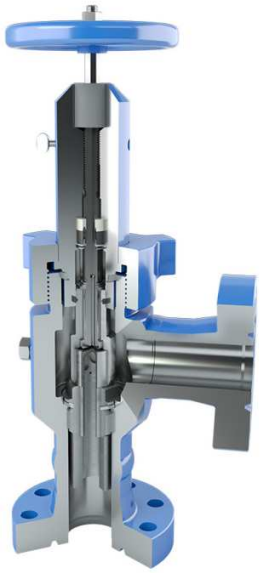


Figura 2 - Válvula *choke* tipo *plug*-gaiola - Retirado de brochura National Oil Varco (2018)

A quebra de gotas em restrições é um fenômeno complexo: o escoamento passa por uma região de intensa turbulência, seguida por uma zona de forte recirculação, onde a taxa de dissipação de energia é muito alta (Kwakernaak *et al.,* 2007). A taxa de dissipação de energia ($\dot{E}$) é igual à diferença de pressão permanente (ΔP_{perm}) multiplicada pela vazão (Q). A energia turbulenta é dissipada na forma de calor em um volume de dissipação (v_{dis}). Este volume de dissipação pode ser expresso como uma área (A), multiplicada por um comprimento de dissipação (L), arbitrados. A massa de fluido pode ser obtida pela multiplicação do volume pela densidade da fase contínua (ρ_c) (Husveg *et al.*, 2009). Portanto, a taxa média de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa (ε) pode ser descrita pela Equação 1:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\dot{E}}{\boldsymbol{\rho_c\, A\, L}} = \frac{\Delta \boldsymbol{P_{perm}\, Q}}{\boldsymbol{\rho_c\, A\, L}} \qquad \text{Equação 1}$$

A partir da Equação 1, pode-se perceber que quanto maior a perda de carga imposta pela válvula, maior será o valor de dissipação turbulenta da energia. Isto pode se dar tanto por uma menor área de passagem a uma dada vazão, quanto por um incremento de vazão a uma dada área de passagem (Moraes *et al.*, 2009).

1.3. Separadores Gravitacionais

Segundo Brasil *et al.* (2012), o projeto de vasos separadores gravitacionais se baseia na sedimentação das gotas e no equilíbrio líquido-vapor. A velocidade de sedimentação das gotas de água no óleo é regida pela equação de Stokes, que indica a velocidade terminal de uma partícula, no regime de Stokes (número de Reynolds da partícula menor que 0,4). A equação de Stokes (Equação 2) é apresentada, onde V é a velocidade de sedimentação da gota; ρ_d e ρ_c são as massas específicas das fases dispersa e contínua, respectivamente; μ_c é a viscosidade da fase contínua; d é o diâmetro da gota e g é a aceleração devido ao campo gravitacional.

$$V = \frac{(\rho_c - \rho_d) g\, d^2}{18 \mu_c} \qquad \text{Equação 2}$$

Percebe-se, a partir da Equação 2, que o diâmetro da gota dispersa é um fator preponderante na sua velocidade terminal. Ao aumentar o diâmetro das partículas, aumenta-se a velocidade terminal da gota e, naturalmente, facilita-se a separação água-óleo (Arnold e Stewart, 1999). Por outro lado, uma diminuição no tamanho das partículas fatalmente irá dificultar, ou até inviabilizar, a separação, visto que partículas muito pequenas começam a apresentar movimento Browniano.

A passagem dos fluidos produzidos por restrições, tubulações, bombas, causam um grande cisalhamento, provocando a diminuição das gotas de água dispersas no óleo. Esse fenômeno é ainda mais severo em perdas de carga localizadas, onde a taxa de dissipação da energia do escoamento é elevada.

Pode-se afirmar que em equipamentos de separação, onde o maior interesse está focado nas gotículas de menor diâmetro (mais difíceis de separar), a equação de Stokes (Equação 2) é válida. As variáveis que influenciam numa separação gravitacional são, portanto: tamanho das gotas, diferença entre as densidades da fase contínua e dispersa, e viscosidade da fase contínua. A viscosidade pode ser reduzida pelo aumento da temperatura. A densidade, em

geral, sofre alteração pouco significativa com as condições operacionais de temperatura e pressão.

O dimensionamento de vasos separadores gravitacionais trifásicos (que separam gás, óleo e água) deve considerar a velocidade máxima permitida ao gás, levando-se em conta o tempo de retenção necessário para que as gotas de líquido carreadas pela corrente gasosa sedimentem e, ainda, um tempo de residência para o líquido que possibilite a saída das bolhas de gás dispersas nesse líquido. Entretanto, como pode ser observado da equação de Stokes (2), a separação líquido-líquido é mais lenta do que a separação gás-líquido, devido à menor diferença de densidade entre os dois primeiros, relativamente aos dois últimos e, assim, muito provavelmente, o critério preponderante – depende das vazões de cada fase considerada – será a separação líquido/líquido (óleo-água).

Portanto, o dimensionamento do separador considera também o tempo de retenção ao líquido, necessário para que uma gota de determinado diâmetro, de uma fase dispersa na outra fase líquida contínua, se desloque no separador, pela ação da gravidade, atingindo a camada contínua de sua respectiva fase. Gotas maiores que a utilizada nesse dimensionamento, ou que venham a atingir esse tamanho devido à coalescência, tenderão a ser separadas.

O projeto dos separadores e do número de estágios de separação tem o objetivo de maximizar a produção e minimizar o gasto energético de compressão (Arnold e Stewart, 1999; Manning e Thompson, 1995). Deve considerar as características do campo de produção, propriedade dos fluidos, pressão e vazões de produção, temperatura, razão gás-óleo (RGO), diâmetro de gotas e outras variáveis (Lockhart *et al.*, 1987; Manning e Thompson, 1995). Quanto maior o número de estágios, maior quantidade de componentes leves serão estabilizados na fase líquida (Arnold e Stewart, 1999; Lockhart *et al.*, 1987).

Estágios subsequentes operam em pressões menores. Sendo assim, além da quebra de pressão no *choke*, mencionada anteriormente, existe uma redução de pressão entre estágios de separação. Esse ΔP (correspondente à diferença de

pressão dos vasos a montante e a jusante) é realizada por válvulas de controle (de nível, no caso de fase contínua líquida ou de pressão, no caso de fase contínua gás) e, portanto, também é um gerador de quebra de gotículas, dificultando a separação da fase dispersa no estágio de separação subsequente.

1.4 Tratadores Eletrostáticos

Os separadores gravitacionais do primeiro estágio de separação são responsáveis pela remoção do gás livre (gás em equilíbrio termodinâmico com o óleo na pressão e temperatura de operação do separador), água livre (água, já separada do óleo, escoando como uma fase contínua – ou em grandes bolsões – na tubulação que alimenta o separador) e óleo livre (óleo, já separado da água, escoando como uma fase contínua – ou em grandes bolsões – na tubulação que alimenta o separador). As três fases contínuas, que são separadas nos separadores gravitacionais, podem conter e, em geral contêm, contaminação residual sob a forma dispersa, das demais fases. Essa contaminação corresponde às ineficiências dinâmicas do próprio separador de primeiro estágio. Assim, o gás contém uma névoa de diminutas gotículas de líquido (óleo e água), o líquido pode conter diminutas bolhas de gás, o óleo contém diminutas gotículas de água e a água contém diminutas gotículas de óleo. Dos sistemas dispersos acima mencionados, aquele que apresenta maiores dificuldades para os processos de separação subsequentes, é a dispersão de gotículas de água em óleo, como é de se esperar da equação de *Stokes*, já que menor diferença de densidade entre os fluidos é aquela entre óleo e água e a maior viscosidade da fase contínua é, em geral, a do óleo. Além disso, a estabilidade das emulsões de água em óleo é aumentada pela existência de emulsionantes naturais no óleo.

Existem formas de melhorar a eficiência dos equipamentos de separação, aí incluídos os separadores gravitacionais. Algumas dessas formas são: 1) utilização de aditivos químicos (desemulsificantes, anti-espumantes, corretores de pH, etc.), que contribui para deslocar os surfactantes naturais; 2) aquecimento dos fluidos a serem separados, que reduz a viscosidade dos mesmos, desestabiliza emulsões e quebra a espuma; 3) emprego de internos nos equipamentos de

separação (extratores de névoa, placas coalescedoras, etc.). Essas formas são empregadas para melhorar o desempenho global da planta de processamento primário, levando à obtenção de fases mais isentas de contaminantes. Entretanto, por melhor que seja o desempenho dos separadores gravitacionais, mesmo com o emprego dos métodos acima citados é, em geral, difícil atingir-se a remoção total da água residual emulsionada no óleo, que permita a especificação requerida para essa corrente de óleo efluente do separador (teores de água menores que 0,5%). Para que se obtenha essa corrente especificada, outros tipos de separadores devem ser empregados, tais como centrífugas, tratadores eletrostáticos, dentre outros. O equipamento mais empregado, para essa finalidade, na indústria de produção de petróleo em geral e também na Petrobras, é o tratador eletrostático.

O tratador eletrostático (TO) é um grande vaso dotado de eletrodos, com grande tempo de residência para o líquido e que se utiliza de campo elétrico para aumentar a coalescência das gotículas de água na fase contínua, óleo (Eow e Ghadiri, 2002). Segundo Arnold e Stewart (1999), quando um líquido não condutivo (óleo), contendo uma fase dispersa condutiva (água salina), é submetido a um campo elétrico, três fenômenos físicos ocorrem: polarização e alinhamento das gotículas de água, causando sua coalescência; atração das gotículas pelo eletrodo; e enfraquecimento do filme dos emulsificantes da interface da gota, facilitando a coalescência em caso de colisão das gotas.

Basicamente, um tratador eletrostático funciona da seguinte maneira: a alimentação da dispersão ocorre na região próxima aos eletrodos, onde o campo elétrico é aplicado e ocorre a coalescência das gotas de água dispersas. Com o crescimento das gotas, a separação água-óleo pela ação da gravidade, no regime de Stokes (visto anteriormente), fica muito mais rápida. O recolhimento do óleo tratado é feito pelo topo (Cunha, 2008). Já a água separada é recolhida pelo fundo do equipamento, seguindo para o sistema de tratamento de água.

Alguns fatores influenciam no processo de eletrocoalescência, quais sejam: intensidade e natureza do campo elétrico; frequência da corrente elétrica, forma e

onda do campo elétrico, condições de escoamento, características dos eletrodos, tempo de residência, entre outros (Cunha, 2008).

A Equação 3 rege a atração entre gotas de água quando expostas a um campo elétrico. Esta equação explicita a dependência do tamanho de gotas (d) na força de atração (F). As outras variáveis que influenciam na força de atração são distância entre as gotas (S) e gradiente de voltagem (E). O outro termo (C) é a constante do sistema (Arnold e Stewart, 1999).

$$\boldsymbol{F} = \frac{\boldsymbol{C}\,\boldsymbol{E}^2\,\boldsymbol{d}^6}{\boldsymbol{S}^4} \qquad \text{Equação 3}$$

Como antes mencionado, existe uma diferença de pressão entre primeiro e segundo estágio de separação e a perda de carga é em sua maior parte fornecida pela válvula de controle de nível dos vasos separadores trifásicos. Esta perda de carga localizada pode ser suficiente para redução dos diâmetros de gota de água dispersa no óleo, dificultando ainda mais o tratamento do óleo que ao sair dos TOs deve estar especificado para venda. Segundo Freitas (2007), a Portaria Conjunta ANP-INMETRO 01 (de Junho de 2000) indica a especificação do petróleo para envio às refinarias nacionais, deverá ter BS&W menor que 1% v/v e salinidade inferior a 285mg/L. Para exportação, o óleo deve apresentar BS&W inferior a 0,5% v/v.

1.5. Objetivos da Tese

O objetivo principal do trabalho, aqui proposto, será a obtenção de um banco de dados experimentais do fenômeno de quebra de gotas de um óleo modelo com suas propriedades físico-químicas controladas (tensão interfacial e viscosidade), frente à passagem por quedas de pressão localizadas. À luz dos modelos clássicos de quebra de gotas, objetiva-se obter correlações que prevejam o máximo diâmetro de gotas que resistem à quebra, para servir de subsídio em futuras melhorias nas boas práticas do dimensionamento de vasos separadores, utilizados no processamento primário de petróleo, para a promoção da separação água-óleo.

1.5.1. Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito da viscosidade do óleo na quebra de gotas;
- Investigar de que forma a concentração (teor de água) influencia na quebra de gotas (BSWs, variando entre 5% e 10%);
- Verificar a influência da tensão interfacial óleo/água na quebra de gotas;
- Avaliar a influência da queda de pressão localizada na quebra de gotas;
- Investigar a influência da geometria do elemento dissipador de energia cinética turbulenta na distribuição de tamanho de partículas;
- Testar modelos de quebra de gotas clássicos contra os resultados experimentais;
- Correlacionar as variáveis significativas de modo a obter um modelo que descreva o diâmetro máximo de gotas que resistem à quebra frente a quedas de pressão localizadas;
- Testar a robustez das correlações obtidas;
- Fornecer dados que possam vir a melhorar os procedimentos de dimensionamento de vasos separadores;
- Propor soluções para diminuição dos efeitos das variáveis na quebra de gotas.

2. TEORIA

Neste capítulo a teoria sobre o fenômeno de quebra de gotas será abordado. As forças atuantes no processo de quebra de gotas serão descritas e alguns modelos de quebra, a depender do regime de escoamento serão apresentados.

2.1. Quebra de Gotas

Uma gota dispersa em uma fase contínua está sujeita a forças exercidas por essa fase contínua que a envolve e que agem em sua superfície. Estas tensões (normais e tangenciais) deformam a interface da gota e são causadas pelo escoamento do fluido contínuo que a circunda (Lemenand, 2003 e Moraes, 2009). A força por unidade de área que se opõe à deformação, conhecida como pressão de Laplace (P_L), é proporcional à tensão interfacial (σ) e inversamente proporcional aos raios de curvatura da interface (r_1 e r_2), Equação 4 (Walstra, 1993). Em se tratando de uma gotícula esférica, $r_1 = r_2 = d/2$, gera-se a Equação 5, onde d é o diâmetro da gota (Moraes, 2009).

$$\boldsymbol{P_L = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)} \qquad \text{Equação 4}$$

$$\boldsymbol{P_L = \frac{4\sigma}{d}} \qquad \text{Equação 5}$$

A terceira força por unidade de área atuante no processo de deformação e quebra está relacionada com as tensões viscosas (σ_{visc}), geradas internamente a gota, pelo gradiente de velocidade externo (fase contínua), que, segundo a teoria de Hinze (1955), pode ser descrito pela expressão a seguir, onde μ_d é a viscosidade da fase dispersa, τ é a tensão externa e ρ_d é a densidade da fase dispersa:

$$\boldsymbol{\sigma_{visc} = \frac{\mu_d}{d}\sqrt{\frac{\tau}{\rho_d}}} \qquad \text{Equação 6}$$

As tensões viscosas e a tensão interfacial da gota se opõem a tensão externa no processo de quebra. Desta forma, presume-se que para que haja a

quebra de gotas, a tensão externa (imposta pelo escoamento da fase contínua) deve suplantar as tensões, interfacial e viscosa, somadas (Hinze, 1955;).

Desta forma, a quebra de gotas pode ser caracterizada e quantificada por um número adimensional, podendo incluir ou não o efeito da viscosidade da gota dispersa (Lemenand, 2003). O grupo adimensional denominado número de Weber (Equação 7) é a razão entre a força deformante aplicada pela fase contínua à gotícula e a tensão interfacial que resiste à deformação da gota. Quanto maior for o número de Weber, maior será a tensão externa comparada com a tensão interna, até que em um valor crítico ($We_{crítico}$) a ruptura da gota ocorrerá (Hinze, 1955 e Lemenand *et al.*, 2003).

$$We = \frac{\tau \ d}{\sigma} \qquad \text{Equação 7}$$

2.2. Quebra de Gotas em Escoamento Laminar

Lemenand *et al.* (2003) fazem uma revisão do estudo de Taylor (1932 e 1934), que determina que a quebra de gotas em escoamento laminar é governada pela tensão de cisalhamento viscosa.

Segundo Walstra e Smulders (1998), quando as forças externas forem decorrentes de uma tensão viscosa, o número de Weber assume a forma da Equação 8 e pode ser denominado número de capilaridade (Ca), onde ∇V é o gradiente de velocidade no entorno da gota.

$$\boldsymbol{We = Ca = \frac{\nabla V \mu_c d}{\sigma}} \qquad \text{Equação 8}$$

O número de Weber crítico é dependente do regime de escoamento e da razão de viscosidades entre as fases dispersa e contínua: $R = \mu_d/\mu_c$, sendo que, para razões de viscosidade maiores que quatro ($R>4$), não há quebra de gota possível. Da mesma forma, para que ocorra quebra quando R possui valores muito próximos de zero, por exemplo, 0,01, uma grande taxa de cisalhamento é requerida. A quebra de gotas é favorecida quando $0,1<R<1,0$ (Karam e Bellinger,

1968; Grace, 1982; Walstra, 1993; Walstra e Smulders, 1998; Lemenand *et al.*, 2003).

2.3. Quebra de Gotas em Escoamento Turbulento

Para quebra de gotas em escoamento turbulento, as teorias de Kolmogorov e de Hinze dão as maiores contribuições. O escoamento turbulento é caracterizado pela presença de vórtices em diversas direções não previsíveis, que mudam constantemente, pela interação mútua. Isso faz com que a velocidade local instantânea do escoamento turbulento (u) varie de uma maneira caótica, ocasionando flutuações de velocidade local (u'), explicitado na Equação 9, onde U é a média temporal da velocidade instantânea (u). Porém, a média temporal destas flutuações (u') é igual a zero (Walstra, 1993; Moraes, 2009).

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \mathbf{U} \qquad \text{Equação 9}$$

O escoamento turbulento apresenta um amplo espectro de tamanhos de vórtices (λ). Vórtices maiores possuem maiores valores para u' e transferem energia cinética para vórtices menores, que, por conseguinte, apresentam maiores gradientes de velocidade. A flutuação de velocidade para um determinado tamanho de vórtice pode ser relacionada com a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa (ε) através da Equação 10 (Davies, 1985; Walstra, 1993; Walstra e Smulders, 1998; Lemenand, 2003).

$$\mathbf{u}' = (\boldsymbol{\varepsilon\lambda})^{1/3} \qquad \text{Equação 10}$$

O tamanho do menor vórtice é chamado escala de Kolmogorov (λ_k). Vórtices menores que esse são dissipados pela viscosidade do fluido, transformando a energia cinética dos mesmos em energia térmica. Os vórtices maiores que a escala de Kolmogorov são os responsáveis pela quebra de gotas (Walstra, 1993; Moraes, 2009). O maior diâmetro de gotas estável em uma emulsão é determinado pelo equilíbrio entre a pressão dinâmica gerada pelas flutuações turbulentas, que tende a deformar a gota, e a tensão interfacial que tende a mantê-la coesa. Desta forma, o número de Weber crítico assume a forma da Equação 11, onde $<u'^2>$ é a média do quadrado das flutuações da velocidade

entre dois pontos com distância equivalente a $d_{máx}$ (Hinze, 1955; Lemenand *et al.*, 2003; Moraes, 2009).

$$\mathbf{We_{crítico}} = \frac{\rho < u'^2 > d_{máx}}{\sigma} \qquad \text{Equação 11}$$

Hinze (1955) sugere que para o caso de uma turbulência isotrópica a maior contribuição para a energia cinética advém das flutuações na região de comprimento de onda onde a lei de distribuição de energia de Kolmogorov é válida. Dessa forma, $<u'^2>$ toma a forma da Equação 12, onde, citando Batchelor (1951), Hinze adota $C_1 \sim 2$.

$$< u'^2 > = C_1(\varepsilon d)^{2/3} \qquad \text{Equação 12}$$

Substituindo-se a equação (12) em (11), chega-se ao modelo proposto por Hinze para a previsão de diâmetro máximo de gotas que resistem à quebra devido aos vórtices turbulentos (Equação 13). Este modelo assume que a viscosidade do fluido disperso é desprezível e que o sistema disperso está bastante diluído (Hinze, 1955; Sleicher, 1962; Davies, 1985; Angeli e Hewitt, 2000; Lemenand *et al.*, 2003; Moraes, 2009).

$$d_{max} = C_H \varepsilon^{-0.4} \sigma^{0.6} \rho_c^{-0.6} \qquad \text{Equação 13}$$

Hinze (1955), em seu trabalho, aplicou seu modelo aos resultados experimentais de outro autor (Clay, 1940A e 1940B), considerando $d_{95} = d_{máx}$, onde d_{95} é o diâmetro tal que 95% do volume da fase dispersa está contido em partículas menores que ele, e chegou a um valor de constante $C_H = 0{,}725$, com desvio padrão de 0,315. A partir do trabalho de Hinze, diversos trabalhos experimentais de investigação do comportamento de dispersões, principalmente de óleo em água, começaram a ser desenvolvidos.

Hinze (1955) sugere que, quando a viscosidade da fase dispersa não puder ser desprezada, um grupo viscoso pode ser adicionado ao modelo ($\mu_d/\sqrt{\rho_d \sigma d}$). Sleicher (1962) argumenta que o grupo viscoso sugerido por Hinze está relacionado com a frequência natural de vibração da gota, e que esse grupo seria pequeno e pouco relevante. Sleicher (1962), então, sugere que as forças viscosas

importantes são as que se opõem às forças devido ao escoamento, que deformam a gota. O autor indica que essa força por unidade de área deve ser proporcional a $\mu_d U/\sigma$, onde U é a velocidade média do escoamento na tubulação.

Após o trabalho de Hinze, inúmeros outros artigos, relacionados com a investigação do comportamento de dispersões, foram publicados. Davies (1985) apresenta um trabalho em que relaciona diferentes equipamentos com o tamanho de gotas gerado a partir da dissipação da energia de forma turbulenta. Neste estudo um termo de correção da viscosidade da fase dispersa é acrescentado ao modelo proposto por Hinze em 1955. Diferentemente do que foi defendido por Sleicher (1962), Davies (1985) conclui que, ao invés da velocidade média do escoamento na tubulação, a flutuação de velocidade turbulenta (u') que deve ser considerada no termo viscoso. Por conveniência, o autor adicionou o grupo $\mu_d u'/d_{max}$ ao termo da pressão de Laplace, no modelo de Hinze. A previsão de $d_{máx}$ proposta por Davies, incluindo a viscosidade da fase dispersa como variável está apresentada na Equação 14.

$$\mathbf{d_{max} = C_D \left(\sigma + \frac{\mu_d\, u'}{4}\right)^{0,6} \rho_c^{-0,6}\, \varepsilon^{-0,4}} \qquad \text{Equação 14}$$

Em seu estudo, Davies (1985) calculou o $d_{máx}$ obtido de diferentes tipos de equipamentos, com diferentes taxas de dissipação de energia típicas, a partir do modelo proposto por Hinze, chegando a valores próximos entre os pontos experimentais e os previstos por este modelo. A Tabela 1 traz esta comparação e é interessante perceber o potencial de quebra de gotas que uma válvula homogeneizadora possui.

Os modelos descritos anteriormente são relacionados à quebra de gotas em regime turbulento na região inercial, onde as gotas dispersas são maiores que a escala de Kolmogorov (λ_k), definido pela Equação 15 (onde ν_c é a viscosidade cinemática da fase contínua), e são menores que os maiores vórtices contendo energia presentes no escoamento (λ_{max}), equivalentes a 10% do diâmetro da tubulação (Paolinelli e Yao – 2017). Nesses modelos, é esperado que a viscosidade da fase contínua não tivesse influência no fenômeno.

Tabela 1 - Tamanhos de gota relacionados com taxa de dissipação de energia (adaptado de Davies, 1985).

Tipo de equipamento	ε Típico (W/Kg)	u' Típico (m/s)	Escala de Kolmogorov (µm)	$d_{máx}$ calculado (µm)	$d_{máx}$ experimental (µm)	d_{min} experimental (µm)
Válvula homogeneizadora	$400x10^6$	12	0,22	0,7	~1	~0,5
Moinho coloidal	$0,44x10^6$	1,6	1,3	10,5	6	0,1
Liquid Whistle	$12x10^6$	3	0,5	2	2	<0,1
Impelidores de agitadores	$6x10^6$	0,2	3,6	70	50	12

$$\lambda_k = \left(\frac{\nu_c^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \qquad \text{Equação 15}$$

Walstra (1983 e 1993) indica que existem algumas exceções, onde o aumento da viscosidade da fase contínua influencia no tamanho das gotas geradas. Nesse caso, tensões de cisalhamento poderiam ser responsáveis por parte da quebra de gotas ocorridas.

Como mencionado anteriormente, Grace (1982) afirma que, para razões de viscosidade muito pequenas ou muito grandes, a quebra de gotas devido a escoamento cisalhante é improvável. No entanto, Stone (1994) explica que mudanças abruptas no tipo de escoamento também poderiam ser responsáveis pela quebra de gotas, por causa de sua relaxação após deformação. Isso pode acontecer, especialmente, quando a geometria do aparato muda substancialmente.

Karbstein and Schubert (1995) também reportam que é muito difícil produzir emulsões de fluidos com alta razão de viscosidade por simples escoamento cisalhante. Os autores afirmam que, em escoamento turbulento, as flutuações da velocidade local são responsáveis por deformações das gotas, formando protuberâncias e, portanto, causando quebra das mesmas. Essas flutuações da

velocidade local também podem levar a oscilações das gotas que podem acabar por rompê-las.

Cristini *et. al* (2003) e Vankova *et al.* (2007) descrevem em seu estudo um modelo de quebra de gotas em escoamento turbulento viscoso. Esse modelo foi estimado ao se comparar as tensões viscosas com a pressão capilar da gota (Pressão de Laplace, Equação 2). O modelo de previsão de quebra de gotas em escoamento viscoso está apresentado na Equação 16. A condição para que o modelo descrito seja válido é que as gotas geradas sejam menores do que a escala de Kolmogorov em escoamento turbulento. Para validação do modelo, foram testados diferentes níveis de viscosidade da fase contínua (água viscosificada com glicerina), tendo como fase dispersa um óleo mineral com viscosidade de 95 mPa.s.

$$\mathbf{d_{max.v}} = \mathbf{C_V \varepsilon^{-0,5}} \mu_{\mathbf{c}}^{\mathbf{-0,5}} \boldsymbol{\rho}_{\mathbf{c}}^{\mathbf{-0,5}} \boldsymbol{\sigma} \qquad \text{Equação 16}$$

Os estudos mencionados previamente, como os de Hinze (1955) e Davies (1985), foram precursores ainda de diversos outros estudos posteriores. Somente mais recentemente, alguns pesquisadores começaram a avaliar o fenômeno de quebra de gotas em quedas de pressão localizadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção uma breve revisão bibliográfica será apresentada, dividida em diferentes modalidades de estudo da quebra de gotas, dentre elas: em tubulações; em misturadores estáticos; em rotores e estatores; e em passagem por orifícios.

3.1. Quebra de Gotas em Tubulações

Um dos estudos pioneiros em quebra de gotas em tubulações utilizando as teorias de Hinze e Kolmogorov foi realizado por Kubie e Gardner (1976). Seu experimento avaliou a quebra de gotas de álcool isoamílico e acetato de n-butil em água e de água em acetato e álcool. Com a utilização de uma tubulação de 4m de comprimento e 17,2mm de diâmetro e utilizando medições fotográficas em diversos pontos, os autores puderam observar que o diâmetro da gota tendia a se estabilizar a partir de um ponto localizado a 3,75m da origem.

A partir da observação de d_{max} e por avaliar que o experimento se encontrava na região inercial, isto é, d_{max} maior que a escala de Kolmogorov e menor que a escala integral, os autores confrontaram seus resultados experimentais com o modelo de Hinze, mesmo sabendo que o escoamento em tubulações não são homogêneos e isotrópicos.

Em tubulações, o cálculo da dissipação da energia cinética turbulenta é proporcional à perda de pressão por fricção, sendo expresso em termos de fator de atrito de Fanning da tubulação (f), a velocidade média do escoamento U e o diâmetro do tubo d_t, conforme Equação 17.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{2fU^3}{d_t} \qquad \text{Equação 17}$$

Dessa forma, o modelo proposto por Hinze aplicado a tubulações toma a forma da Equação 18.

$$\left(\frac{\mathbf{d_{max}\,\rho_c\,U^2}}{\boldsymbol{\sigma}}\right)\left(\mathbf{f}\,\frac{\mathbf{d_{max}}}{\mathbf{d_t}}\right)^{2/3} = \mathbf{0,369} \qquad \text{Equação 18}$$

Adicionalmente, Kubie e Gardner (1976) utilizaram-se de resultados de outros autores (Sleicher,1962; e Paul e Sleicher, 1965) na avaliação do modelo de Hinze. Diferentemente do que ocorreu com os pontos experimentais de Kubie e Gardner, os pontos dos outros autores não tiveram aderência ao modelo. A explicação para tal foi que os d_{max} obtidos nos demais estudos eram superiores a escala integral (λ_{max}) e, portanto, não encontravam-se no intervalo de aplicabilidade do modelo de Hinze. Os autores sugeriram a aplicação da Equação 19 para esses casos.

$$\mathbf{f\,\frac{d_{max}\,\rho_c\,U^2}{\sigma} = 1,38} \qquad \text{Equação 19}$$

A exemplificação das fronteiras para aplicação dos modelos de quebra de gotas dado o tamanho obtido de d_{max} em comparação com a escala de Kolmogorov e integral foi uma grande contribuição do estudo de Kubie e Gardner (1976). A partir desse artigo, outros estudos de quebra de gotas em tubulações foram conduzidos por diversos autores.

Angelli e Hewitt (2000) apresentaram dados de distribuição de tamanho de gotas formadas através do escoamento de água e óleo (Querosene – EXXSOL D80). A técnica de medição adotada foi a gravação em vídeo viabilizada por um endoscópio instalado paralelamente à direção de escoamento horizontal.

A velocidade de escoamento da fase contínua foi variada de 1,1 a 1,7m/s em tubos de aço inox (24,3mm de diâmetro e 9,7m de comprimento), e acrílico (24mm de diâmetro e comprimento de 9,5m). A fase dispersa foi avaliada em concentrações de 3,4 até 9%, tendo ambas, água e óleo, como fase contínua a depender do ponto experimental.

Os autores relatam os poucos dados relacionados à quebra de gotas em tubos à época de seu estudo. Apresentam uma revisão da teoria de Hinze até o modelo proposto por Kubie e Gardner, Equações 18 e 19.

Adicionalmente, os autores apresentam um modelo proposto por Sleicher (1962) que inclui um grupo viscoso e onde fica explícita a independência do modelo com o diâmetro do tubo. Esse modelo está apresentado na Equação 20.

$$\left(\frac{d_{max}\rho_c U_c^2}{\sigma}\right)\left(\frac{\mu_c U_c}{\sigma}\right)^{0,5} = 38\left(1 + 0,7\left(\frac{\mu_c U_c}{\sigma}\right)^{0,7}\right) \quad \text{Equação 20}$$

Os resultados experimentais de Angelli e Hewitt (2000) foram confrontados com o modelo advindo de Hinze (1955), apresentado por Kubie e Gardner (1976). A previsão do modelo de Hinze foi sempre menor do que o observado experimentalmente, tanto para testes em tubo de acrílico quanto para o tubo de aço.

O modelo de Sleicher (1962) foi mais efetivo na previsão para tubo de aço. Já para tubo acrílico os resultados experimentais foram sempre superiores ao previsto. Isso é justificável uma vez que esse modelo não tem o fator de atrito em sua composição.

O modelo de Kubie e Gardner (1976) para $d_{max} > \lambda_{max}$ forneceu boas previsões para o tubo de acrílico onde a condição de d_{max} maior que a escala integral foi verdadeira. Para o tubo de aço, o modelo previu tamanho máximo de gotas próximas, porém maiores que as obtidas no experimento, comprovando a não aplicabilidade desse modelo quando operando na região inercial.

O estudo de Angelli e Hewitt (2000) trouxe como conclusão principal que o material da tubulação influencia demasiadamente a distribuição de tamanho de gotas gerada em escoamento. O tubo de aço teve maior influência deletéria, ou seja, gerando gotas de menores diâmetros. O resultado é justificado, pois a taxa de dissipação de energia é maior no tubo de aço, tendo em vista que a rugosidade do aço é maior do que a do acrílico, que pode ser considerado um tubo liso. A velocidade de escoamento e a natureza da fase contínua também afetaram a distribuição de tamanho de gotas medida experimentalmente. Foi apresentada também uma relação entre $d_{máx}$ e a velocidade da fase contínua.

Brauner (2001), em seu estudo sobre padrões de escoamento, faz uma revisão da teoria de quebra de gotas de Hinze, que leva em conta a presença de uma gota única. O autor sugere fatores de correção no modelo de Hinze de modo a considerar as frações volumétricas das fases presentes, o que amplia o uso do modelo além da aplicação para dispersões muito diluídas, Equação 21, onde C_H é uma constante e ϕ é a fração volumétrica das fases dispersa e contínua, e que considera que o fator de fricção $f = 0{,}046/Re_c^{0,2}$.

$$\left(\frac{d_{max}}{d_t}\right) = 7,61\, C_H^{0,6}\, We_c^{-0,6} Re_c^{0,08} \left(\frac{\Phi_d}{1-\Phi_d}\right)^{0,6} \left(1 + \frac{\rho_d}{\rho_c}\,\frac{\Phi_d}{1-\Phi_d}\right)^{-0,4} \qquad \text{Equação 21}$$

Simmons e Azzopardi (2001) analisaram a distribuição de tamanhos de gotas de uma mistura contendo querosene e uma solução aquosa de carbonato de potássio em uma tubulação de 63 mm de diâmetro, variando a velocidade do escoamento de 0,8 a 3,1m/s em fluxo horizontal e vertical. Foram utilizadas duas técnicas ópticas para medição do tamanho de gotas: a primeira utilizou um equipamento de reflexão de um feixe de laser focalizado (Partec 300C), que se mostrou adequado para medição de altas concentrações da fase dispersa (acima de 5%); a segunda utiliza a técnica de difração a laser (Malvern 2600), que tem sua eficácia comprovada quando a fase dispersa se apresenta em baixas concentrações.

Simmons e Azzopardi (2001) apresentaram também uma revisão bibliográfica sobre a determinação de distribuição de tamanho de gotas estudado por diferentes pesquisadores com variadas técnicas de medição. Um resumo das condições experimentais de cada estudo pode ser observado na Tabela 2.

Os resultados experimentais de vários dos estudos descritos na Tabela 2 foram bem representados pelo modelo de Hinze, como pode ser observado na Figura 3. É interessante observar que os resultados de Kurban *et al.,* cuja fase dispersa estava em maior concentração, apresentou discrepâncias na previsão de $d_{máx}$ pelo modelo de Hinze, tendo o modelo previsto valores abaixo do observado.

Tabela 2 - Revisão bibliográfica de Simmons e Azzopardi (2001), adaptado, sobre a determinação de distribuição de tamanho de gotas.

Autor	Diâmetro do tubo (m)	Tensão interfacial (N/m)	Viscosidade do óleo (Kg/ms)	Densidade do óleo (Kg/m3)	Concentração da fase dispersa (%vol)	Dispersão	Técnica de medição
El-Hamoutz e Stewart	0,025	0,038	0,00096	800	1	o/a	Malvern 2600 e Par-Tec 300
Karabelas	0,05	0,033	0,018	890	<1	a/o	Fotografia de gotas encapsuladas
Karabelas	0,05	0,03	0,00186	808	<1	a/o e o/a	Fotografia de gotas encapsuladas
Kubie e Gardner	0,017	0,0049	0,0048	828	<1	a/o e o/a	Fotografia das gotas dentro da tubulação
Kubie e Gardner	0,017	0,0145	0,0007	884	<1	a/o e o/a	Fotografia das gotas dentro da tubulação
Kurban *et al.*	0,025	0,017	0,0016	800	3,4 - 9,1	a/o	Fotografia usando boroscópio + sonda de condutividade
Angeli e Hewitt (2000)	0,025	0,017	0,0016	800	3,4 - 9,1	a/o	Fotografia usando boroscópio + sonda de condutividade
Su e Hanzevack (1988)	0,0508; 0,0762; 0,1016	n/a	0,0014; 0,0023	800	n/a	a/o	Processamento de imagem a laser
Simmons e Azzopardi (vertical)	0,063	0,01	0,0018	797	1,2 -3,3 (baixa); 6-42 (alta)	a/o	Malvern 2600 e Par-Tec 300C
Simmons e Azzopardi (horizontal)	0,063	0,01	0,0018	797	1,2 -3,3 (baixa); 6-42 (alta)	a/o	Malvern 2600 e Par-Tec 300C

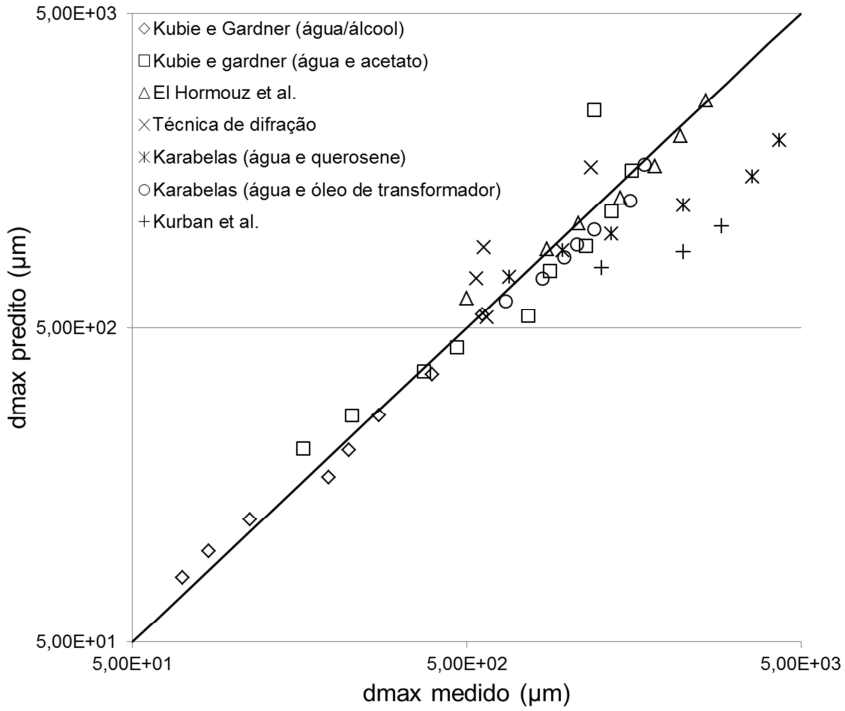


Figura 3 - Comparação entre os experimentos com baixas concentrações de fase dispersa com o modelo de Hinze (1955); Adaptado de Simmons e Azzopardi (2001).

Simmons e Azzopardi (2001) relatam que seus experimentos à baixa concentração de fase dispersa apresentaram boa aderência com a previsão de $d_{máx}$ pelo modelo de Hinze. Quando operando com altas concentrações da fase dispersa, o modelo de Hinze não foi adequado para descrever os resultados experimentais, tendo em vista que esse modelo considera apenas a ruptura das gotas, não levando em conta a coalescência, pois foi construído a partir de dados experimentais com baixa concentração da fase dispersa, onde a coalescência não é significativa. Os autores afirmam também a possibilidade de supressão da turbulência dado o aumento da concentração da fase dispersa.

O modelo de Brauner (2001), Equação 21, que prevê uma possibilidade de coalescência das gotas dispersas, também foi utilizado. Os resultados experimentais não puderam ser ajustados nem com o modelo de Hinze nem com o modelo de Brauner.

3.2. Quebra de Gotas em Misturadores Estáticos

Grace (1982) realizou um importante estudo, principalmente para a área de polímeros, de dispersões de fluidos altamente viscosos e imiscíveis, com a aplicação de misturadores estáticos nesses sistemas. Utilizou-se de experimentos tendo a fase contínua com viscosidades variando de 50 a 3000 poise, tensões interfaciais variando desde valores próximos a 0 mN/m a 25 mN/m, fase dispersa com viscosidades de 10^{-6} a 950 Poise e escoamentos extremamente laminares.

Seu trabalho acompanha a teoria de Taylor (1932 e 1934) e relata que a deformação da gota é proporcional a razão entre forças viscosas e a tensão interfacial, aqui sendo dada a essa relação à nomenclatura de Θ, Equação 22, onde G é a taxa de cisalhamento, r_d é o raio da gota e f(R) é uma função de razão de viscosidades sugerida por Taylor.

$$\mathbf{\Theta} = \frac{\mathbf{G\, r_d\, \mu_c\, f(R)}}{\boldsymbol{\sigma}} \quad ; \text{e} \quad \mathbf{f(R)} = \frac{\mathbf{19R-16}}{\mathbf{16R-16}}, \text{ onde } \mathbf{R} = \frac{\boldsymbol{\mu_d}}{\boldsymbol{\mu_c}} \qquad \text{Equação 22}$$

O autor sugere um mapa de Θ versus a razão de viscosidades da fase dispersa e contínua (chamado de R). A partir desse gráfico, Grace (1982) indica que há maior ocorrência de quebra de gotas e uma região onde 0,1<R<1, para esses casos, segundo experimentos de Mason (1961, *apud* Grace, 1982), $\Theta_{quebra} \propto 0,5 - 0,6$. Afirma também que razões de viscosidade altas, ou muito baixas, tendem a não provocar a quebra de gotas.

A partir das teorias de quebra apresentadas até o momento, Lemenand *et al.* (2003) trazem um estudo de emulsificação e avaliação da DTG em um misturadores estáticos. Em seu estudo, que teve a água como fase contínua e um óleo de vaselina como fase dispersa, em concentrações de até 15%, os autores apresentam uma técnica de micro-encapsulamento polimérico das gotas dispersas com posterior avaliação de DTG por meio de microscopia.

Lemenand *et al.* (2003) basearam seu estudo na correlação entre $d_{3.2}$ e $d_{máx}$, sendo interessante observar um pequeno aumento dos valores obtidos experimentalmente com o gradual aumento da fração dispersa. Relatam que esse fato foi mais pronunciado em concentrações acima de 10%, não sendo, no entanto, estatisticamente significativa. O aumento da concentração da fase dispersa teve influência na queda de pressão que se apresentou menor para frações de fase dispersa maiores, dado certo número de Reynolds. Esse fato foi explicado através do fenômeno de supressão da turbulência uma vez que a geometria do misturador estático é fixa.

Ao comparar os valores de d_{max} experimentais com os valores previstos pelo modelo de Hinze (usando $We_{crítico}$ da ordem da unidade), os autores perceberam que a utilização de valores de dissipação da energia cinética turbulenta máxima no modelo gera previsão inferior ao observado. Não obstante, a utilização da dissipação média gerou previsões acima do observado. Os autores sugerem, portanto, que a real dissipação da energia cinética turbulenta deve ser superior à média e inferior a máxima calculada.

3.3. Quebra de Gotas em Vasos Agitados e Rotores e Estatores

Stamatoudis e Tavlarires (1985) realizaram um estudo experimental para avaliação do efeito da viscosidade da fase contínua na distribuição de tamanho de gotas de dispersões em vasos agitados. A fase contínua utilizada foi aquosa com aumento da viscosidade adicionando glicerol (3,6 cP < μ_c < 223,1 cP). Já as fases dispersas estudadas foram o querosene (μ_d ~ 1,5 cP) e um óleo mineral (μ_d ~ 26,4 cP). O restante das propriedades físicas da fase contínua pouco variaram ao longo dos experimentos.

Os autores afirmam que o fenômeno de quebra e coalescência das gotas em vasos agitados é uma função do número de Reynolds do impelidor, sendo o escoamento laminar em Re<200 e turbulento em Re>10000. Entre esses valores o escoamento se encontra na faixa de transição entre regimes. Adicionalmente, o modelo de quebra e coalescência em vasos agitados, proposto pelos autores, está em função da velocidade rotacional e diâmetro do impelidor, diâmetro do vaso, das características dos fluidos e de um coeficiente de inclinação da curva (lei de potência) que relaciona energia fornecida ao impelidor com seu número de Reynolds.

Todos os experimentos do referido estudo foram realizados em regime transicional ou turbulento, tendo o impelidor velocidades entre 200 e 550 rpm. A concentração da fase dispersa foi de 5% para o querosene e variou de 2,5 a 15% para o óleo mineral. Os resultados foram expressos em $d_{3.2}$ (método fotográfico), e medidas consideradas após tempo de estabilização que normalmente variou de 3 a 8 horas.

Os resultados para querosene como fase dispersa indicaram dois padrões de comportamento. Para rotações do impelidor inferiores a 325rpm, o $d_{3.2}$ de equilíbrio apresentou um crescimento com o aumento da viscosidade da fase contínua atingindo valor máximo e, depois, decaindo com incrementos adicionais da viscosidade da fase contínua. Em rotações superiores a 325rpm, observou-se

um ligeiro decaimento de $d_{3.2}$ na região de μ_c < 40 cP com posterior incremento e estabilização, com o aumento da viscosidade da fase contínua.

Parte dos efeitos observados nos experimentos com querosene também se repetiram nos experimentos com óleo mineral. Nesses experimentos a fração volumétrica de óleo foi um fator variável. Ficou evidente que o aumento da fração da fase dispersa impactou no aumento do diâmetro de equilíbrio observado. Esse fato foi justificado pela maior probabilidade de coalescência.

A grande diferença entre os experimentos com diferentes fases dispersas ficou evidenciada apenas na intensidade de redução do tamanho de gotas para uma mesma rotação do impelidor variando-se a viscosidade da fase contínua. Os $d_{3.2}$ obtidos com óleo mineral chegaram a apresentar redução superior a 50% do valor obtido com baixas viscosidades, enquanto que com querosene a redução de diâmetro foi menos pronunciada. Esse fato pode estar relacionado à razão de viscosidades entre fase dispersa e contínua, muito maior para o óleo mineral.

Rueger e Calabrese (2013A e B) estudaram dispersões de água em óleo em um rotor e estator, em sistemas diluídos (parte A) e verificando o efeito de uma fração maior da fase dispersa (parte B). Na primeira parte de seu estudo, Rueger e Calabrese mantiveram a fração volumétrica de água em óleo mineral viscoso em 0,1%. A viscosidade da fase contínua foi variada com controle de temperatura (18 a 153 cP), a tensão interfacial foi controlada pela adição de surfactante e os estudos foram conduzidos em regime laminar e turbulento.

Assim como afirmado por Stamatoudis e Tavlarires (1985), os autores indicam que o mecanismo de quebra de gotas em rotores e estatores são dependentes do regime de escoamento, do aparato de mistura e das propriedades dos fluidos. A determinação do regime de escoamento pode ser realizada pela observação da mudança de comportamento do gráfico do número de potência, N_p (Equação 23) versus o número de Reynolds (Equação 24). A partir do estudo de Padron (2001 e 2005), Rueger e Calabrese (2013A), a transição do regime de escoamento de laminar para turbulento se deu na região de Re ~ 1000.

$$\mathbf{N_p} = \frac{\mathbf{W}}{\rho_c U_i^3 d_i^5} \quad \text{, e} \qquad \text{Equação 23}$$

$$\mathbf{Re} = \frac{dU\rho_c}{\mu_c} \quad \text{, para rotores e estatores } \mathbf{Re} = \frac{\rho_c U_i d_i^2}{\mu_c} \qquad \text{Equação 24}$$

Onde W é a potência fornecida ao misturador, U_i é a velocidade do impelidor ou rotor, e d_i é o diâmetro do impelidor ou rotor.

Para os casos onde o escoamento se mostrou laminar, devido à escassez de dados experimentais nessa condição para rotores e estatores, os autores compararam seus resultados experimentais com a curva proposta por Grace (1982), previamente mencionada, e que leva em consideração a razão de viscosidades das fases dispersa e contínua em relação ao número Capilar crítico.

Os resultados de Rueger e Calabrese (2013A) usando uma correlação de $d_{3.2}$ com d_{max} mostraram uma maior dependência da razão de viscosidades que o apontado por Grace (1982), considerando que a quebra de gotas é simplesmente devido ao escoamento cisalhante.

Os autores apresentaram uma correlação semi-empírica que, diferentemente do que afirmou Grace (1982), se mostrou independente das propriedades da fase contínua. Uma avaliação posterior do modelo com redução da tensão interfacial indicou que apenas em baixíssimas tensões interfaciais, próximas da concentração micelar crítica, o modelo apresentava desvios.

Em escoamento turbulento, foi observado que os máximos diâmetros observados eram menores que a escala de Kolmogorov. Desta forma, os modelos de quebra na região inercial (apresentados inicialmente por Hinze) não poderiam ser aplicados, sendo mais aplicável o modelo de quebra da região sub-Kolmogorov por tensões inerciais, onde $d_{max}/D \sim (We\ Re)^{-1/3}$, o que se mostrou bastante adequado.

Em seu segundo estudo (Rueger e Calabrese, 2013B), analisa o efeito do incremento de fração volumétrica da fase dispersa nos diâmetros resultantes de quebra em escoamento laminar e turbulento (mesmas condições do estudo anterior), com e sem a adição de surfactante. Ficou evidente o aumento gradual

de $d_{3.2}$ com o aumento da fração dispersa até 5% do total. Com a adição de surfactante, o mesmo padrão foi observado, apesar das gotas geradas serem efetivamente menores do que no ambiente sem tensoativo. Os autores reportaram uma tendência ao atingimento de um platô nos valores de diâmetro de gotas filhas, em experimentos com tensoativo e em frações volumétricas da fase dispersa acima de 10% até valores de 50%. Segundo os autores, isso ocorreu por conta de uma maior competição entre os fenômenos de quebra e coalescência dada à fração volumétrica presente e tamanho de gotas existentes.

3.4. Quebra de Gotas em Orifícios

Como já mencionado, a quebra de gotas em restrições é um fenômeno complexo: o escoamento passa por uma região de intensa turbulência, caracterizada por uma zona de elevada velocidade na restrição, seguida por uma zona de forte recirculação a jusante da mesma, onde a taxa de dissipação da energia é muito alta (Kwakernaak et al., 2007).

Percy e Sleicher (1983) propuseram um modelo (Equação 25) onde sugerem que a aceleração do fluido e, portanto, a variação de pressão na entrada de um orifício, seria a responsável pela quebra de gotas. Seus experimentos foram realizados com baixas concentrações de fase orgânica dispersa em água, passando por orifícios de diferentes diâmetros. O termo d_o é o diâmetro do orifício. A constante C_{PS} que melhor ajustou os pontos experimentais de Percy e Sleicher foi igual a 3,1.

$$\mathbf{d_{max}} = \mathbf{C}_{PS}\left(\frac{\mathbf{d_o.\sigma}}{\mathbf{\Delta P_{max}}}\right)^{\mathbf{1/2}} \qquad \text{Equação 25}$$

Um dos trabalhos pioneiros na introdução dos problemas relacionados à quebra de gotas nos sistemas de produção de petróleo foi apresentado por van der Zande *et al.* (1998A). Neste trabalho, o enfoque dado foi na formação de emulsões do tipo óleo em água, principalmente em campos maduros, onde o BSW (*Basic Sediments & Water*, ou seja, teor de água e sedimentos no óleo) pode ser de até 95% em campos ainda produtivos.

Os autores contextualizam seu estudo indicando que o tamanho das gotas de óleo em água, provenientes de um poço de alto BSW, devem ser da ordem de dezenas de micrômetros até milímetros. Desta forma, entre o fundo do poço e o sistema de separação há um ou mais pontos de quebra de gotas e que o local mais provável de ser o responsável é no *choke* de produção (van de Zande *et al.,* 1998A, 1999A e 1999B).

Van der Zande *et al.* (1998A) realizaram vários experimentos onde uma dispersão óleo em água com distribuição de tamanho de gotas controlada foi submetida à passagem por um orifício. Foram utilizados dois óleos minerais diferentes e orifícios com diâmetros de passagem variados. Os diâmetros de gotas à montante e jusante do orifício foram medidos com a utilização do medidor de tamanho de partículas Malvern Particle Sizer.

Neste trabalho, os autores chegam a interessantes conclusões quanto à influência do tamanho de gotas a montante do orifício na distribuição de gotas a jusante. Relatam que a quebra se dá por dois mecanismos, um dependente do tempo de exposição aos vórtices (quanto menor o diâmetro da gota maior o tempo de exposição para que haja quebra), e outro dependente da taxa de dissipação da energia (gotas grandes requerem menos taxa de dissipação para quebrar do que gotas pequenas). Ficou exposto também a não homogeneidade da turbulência após o orifício restritivo (van der Zande *et al.*, 1998A).

A influência da viscosidade da fase dispersa também foi discutida por van der Zande *et al.* (1998A). Ficou evidente que quanto maior a viscosidade da fase dispersa, maiores as gotas após a restrição, em comparação com viscosidades menores. Uma gota sofrendo uma tensão cisalhante tenderá a se deformar menos quanto maior for sua viscosidade. Posto isso, pode-se concluir que uma gota de fluido com maior viscosidade terá uma menor probabilidade de sofrer ruptura do que uma gota de fluido de menor viscosidade quando sujeita a uma mesma tensão cisalhante.

Adicionalmente, van der Zande *et al.* (1998A) concluíram que a geometria da restrição também é muito influente na quebra de gotas, uma vez que esta determinará a distribuição e característica dos vórtices turbulentos, bem como o tempo a que uma gota estará submetida à deformação e possível quebra.

Em trabalho posterior, van der Zande *et al.* (1999), utilizaram-se de dados experimentais de dispersões de óleo mineral em água (3 viscosidades) e n-heptano em água, frente à quebra em orifício restritivo para tentar relacionar com diferentes modelos propostos por autores anteriores.

Os dados de d_{95} ~ d_{max} estável foram confrontados com os previstos pelos modelos de Hinze (1955), Davies (1985), Das (1996) *apud* van der Zande (1999) e Calabrese *et al.* (1986). Nenhum dos modelos clássicos foi capaz de descrever os resultados experimentais obtidos.

Van der Zande *et al.* (1999) decidiram, portanto, incluir um fator de correção próprio na equação original proposta por Hinze em 1955. Esta constante de proporcionalidade estaria relacionada apenas com a viscosidade da fase dispersa, uma vez que nenhuma das outras variáveis foi modificada. Como em seu estudo anterior, ficou evidenciado que a viscosidade da fase dispersa tem influência na quebra de gotas e que quanto maior é esta viscosidade, maiores gotas são geradas.

Em sua tese, defendida em data posterior, van der Zande (2000), estendeu a discussão sobre o tempo necessário para quebra de uma gota sujeita a forças dissipativas da energia cinética turbulenta. Sua discussão parte do modelo de Voigt, que contrasta a resistência à deformação de uma gota frente a tensões externas. Nesse modelo são consideradas três forças atuantes sobre uma gota. As forças que tendem a manter a gota coesa estão relacionadas com a viscosidade da gota e com uma relação entre a tensão interfacial e o diâmetro da gota. A força por unidade de área externa seria uma tensão, que no caso de quebra de gotas em escoamento turbulento, seria proporcional a pressão dinâmica, que tende a deformar a gota. Essa deformação pode ser vista como um

parâmetro adimensional Θ, relacionado com o diâmetro da gota e função do tempo (t), e que pode ser entendido como um aumento da área interfacial da mesma, Equação 26, onde C_2 e C_3 são constantes.

$$\boldsymbol{\Theta(t) = \frac{1}{C_2}\frac{d\,\tau_{inercial}}{\sigma}\left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\frac{C_3\,(d\,\mu_d)}{\sigma}}\right)\right)} \qquad \text{Equação 26}$$

Na equação de Θ, $\tau_{inercial}$ pode ser descrito como a pressão dinâmica do escoamento atuando na superfície da gota. Com essa equação é possível se verificar o tempo necessário para uma gota se deformar ao máximo. No limite de tempo t →∞, ter-se-á a máxima deformação por tamanho de gota. A expressão ficaria da seguinte forma:

$$\boldsymbol{\Theta(\infty) = \frac{1}{C_2}\frac{d\,\tau_{inercial}}{\sigma} = \frac{1}{C_2}\frac{\varepsilon^{2/3}d^{3/5}\rho_c}{\sigma}} \qquad \text{Equação 27}$$

Analogamente à teoria de Hinze (1955), Van de Zande (2000) indica que existirá um $\Theta_{crítico}$ onde a quebra da gota acontecerá, caso o tempo de exposição à dissipação da energia seja o suficiente. O autor aplicou para $\Theta_{crítico}$ o explicitado por Das (1996, apud van der Zande, 2000) cujo valor era a unidade. Da mesma forma, todas as constantes foram igualadas a um. A partir da Equação 26, o tempo necessário para quebra da gota pode ser obtido, Equação 28.

$$\boldsymbol{t_{quebra} = \frac{C_3}{C_2\Theta_{crítico}}\frac{d\,\mu_d}{\sigma}\ln\left(\frac{\tau_{inercial}}{\tau_{inercial} - C_2\Theta_{crítico}\frac{\sigma}{d}}\right)} \qquad \text{Equação 28}$$

Novamente, $\tau_{inercial}$ pode ser escrito como pressão dinâmica e pode-se considerar que os vórtices com maior energia para quebra de gotas serão da ordem do diâmetro da gota em questão. O tempo de vida de um vórtice pode ser descrito segundo a Equação 29. Esse é o tempo de atuação do vórtice sobre a gota (t_{act}) e, portanto, fica claro que é necessário que $t_{act} > t_{quebra}$ para haver quebra.

$$\boldsymbol{t_{act} = C_4\left(\frac{d^2}{\varepsilon}\right)^{1/3}} \qquad \text{Equação 29}$$

Após experimentos com óleos minerais como fase dispersa e com geometrias de dissipação diferentes e similares, uma conclusão que van der Zande (2000) chegou foi que a quebra de gotas ocorre, predominantemente, na zona de dissipação à jusante do orifício, diferentemente do que foi defendido por Percy e Sleicher (1983).

A partir de medidas de pressão em vários pontos na zona de dissipação, van der Zande (2000) verificou que a pressão era recuperada, portanto atingindo o valor de ΔP_{perm}, em distancias variando de 5 a 7 vezes o raio da tubulação, em tubulação com diâmetro similar a esse estudo. Estudos anteriores (Teyssandier e Husain, 1987 *apud* van der Zande, 2000; e Morrison *et al.,* 1993) para maiores diâmetros de tubulação indicavam que essa distância poderia ser maior chegando a medir até 12 vezes o raio do tubo. Essa informação é importante para que se defina o volume de dissipação da energia cinética turbulenta no qual as gotas estarão sujeitas a quebra.

Em artigo de van de Zande (1999A), a distância da zona de dissipação considerada para cálculo da energia dissipada havia sido estipulada em 2,5 vezes o diâmetro da tubulação (baseado em estudo anterior de Morrison *et al.* (1993). Em sua tese, após simulações numéricas, van der Zande chega à conclusão que o comprimento da zona de dissipação tende a aumentar conforme o aumento do diâmetro do orifício, para tubulações de maior calibre. Para tubulações de 4,5mm, esse comprimento seria mais ou menos constante, da ordem de 4 vezes o diâmetro da tubulação ($4{,}1d_t$).

Assim como na teoria primeiramente descrita por Hinze, o autor chegou a uma relação entre d_{max} e dissipação da energia cinética turbulenta descrita por um modelo de lei de potência, da ordem de $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,4}$, mesmo em altas viscosidades da fase dispersa.

Baseado nos recentes estudos de van der Zande, Janssen *et al.* (2001) realizaram experimentos de quebra de gotas, porém com fase contínua oleosa. Seu estudo experimental consistiu em verificar a emulsificação de salmoura em

dois tipos de óleos diferentes ao passarem por um orifício. Os óleos escolhidos tinham características diferentes, sendo o primeiro leve e pouco viscoso (com pequeno conteúdo de asfaltenos), e o segundo mais pesado e viscoso (com alto teor de asfalteno).

O fato de trabalhar com fase contínua oleosa e de o aparato utilizado ter dimensões similares ao dessa tese, torna o estudo de Janssen *et al.* (2001) bastante interessante. A técnica de medida de tamanho de gotas foi a de microscopia. Foram testados BSWs de 30 e 50% e, para evitar coalescência das gotas, uma técnica de encapsulamento polimérico das gotas foi utilizada.

Os diâmetros médios de gotas obtidos foram comparados com a escala de Kolmogorov calculada. Para o óleo pouco asfaltênico, as gotas obtidas foram da ordem da escala de Kolmogorov, o que sugere que o modelo de quebra inicial foi inercial. Os autores comentam da possibilidade da coexistência dos dois mecanismos de quebra, o que ficou bastante evidente para o óleo asfaltênico, cujos diâmetros médios foram inferiores a escala de Kolmogorov calculada. O modelo clássico de Hinze (1955) não foi capaz de prever os diâmetros obtidos, tendo a previsão sido inferior em todos os casos.

Uma conclusão bastante importante do estudo de Janssen *et al.* (2001) está na relação entre o diâmetro obtido e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta média. A teoria de Hinze, como já mencionado, indica que o diâmetro de gota decai em uma relação de lei de potência com coeficiente de -0,4 com a dissipação da energia. Os autores indicam que esse coeficiente tende a aumentar com o aumento da concentração da fase dispersa. No estudo, foi relatado que para BSW de 30%, a relação foi de -0,3. Com o aumento da concentração para 50%, a relação aumentou para -0,1. A explicação dada para esse fato foi de que com o aumento da concentração da fase dispersa, ocorre uma supressão da turbulência, efeito já relatado por diversos outros autores.

Galinat *et al.*(2005) fizeram uma revisão bibliográfica referente ao estudo da quebra e distribuição de tamanho de gotas, comentando estudos em tanques

agitados, em escoamento turbulento em tubulações e, até, à jusante de restrições em tubulações. Revisaram, também, estudos de modelos de quebra inercial e distribuição de tamanho de gotas-filhas.

Em seu estudo experimental, Galinat *et al.* (2005) utilizaram dois fluidos como fase dispersa, com diferentes tensões interfaciais, mas sem alteração na viscosidade. O primeiro foi n-heptano e o segundo foi o próprio n-heptano aditivado com um corante vermelho, surfactante natural, responsável por uma mudança de tensão interfacial. A fase contínua utilizada foi água de abastecimento.

O banco de testes consistiu em um circuito de tubulações com uma restrição na seção transversal, em escoamento vertical. A quebra de gota foi estudada através da utilização de uma câmera de alta velocidade. Visualizou-se a quebra de várias gotas e suas respectivas gotas-filhas, bem como se visualizou a quebra de uma única gota.

O trabalho teve como conclusão que a distribuição de tamanho de gotas geradas a partir de uma quebra devido a uma restrição tem aspecto multimodal quando em baixos ou moderados números de Weber, o que é característica de uma quebra assimétrica. Já em altos números de Weber, a quebra se mostrou simétrica.

Apesar da complexidade do escoamento turbulento após a restrição, o processo de fragmentação das gotas pôde ser descrito satisfatoriamente através de um parâmetro de perda de carga máxima, como o que foi reportado por Percy e Sleicher (1983).

Em sua tese, Galinat (2005), com o mesmo aparato descrito anteriormente, estudou as quebras de gotas em escoamento vertical. A discussão de modelo de quebra baseado em queda de pressão foi abordada. Enquanto van der Zande (1998B) encontrou uma constante de proporcionalidade superior ao descrito por Percy e Sleicher (1983), equivalente a 5,4, para tubulações de 15 mm, a constante

observada por Galinat se aproximou da observada por Percy e Sleicher, equivalente a 3,1.

Van der Zande (1998B) atribui a mudança da constante de proporcionalidade devido ao tamanho das gotas geradas na restrição. Percy e Sleicher (1983) utilizaram gotas entre 400 e 1800μm, enquanto Zande usou gotas bem menores que esse range. Galinat (2005) utilizou gotas entre 2 e 3mm à montante do orifício.

Galinat (2005), a partir da observação de quebra de gota única, afirma que a maioria da quebra ocorre na zona de recirculação atrás do orifício e no jato gerado à jusante do mesmo. Isso confirma a teoria de van der Zande (2000) de que a aceleração do fluido a montante do orifício não é a responsável pela quebra das gotas. No entanto, Galinat adiciona que a deformação inicial dada à aceleração pode ter papel importante no fenômeno.

Ademais, a observação das fotografias geradas pela autora e pelo mapa do local exato de quebra da gota indica que o fenômeno ocorre nas vizinhanças à jusante do orifício, em distâncias não superiores a seis raios da tubulação. A maioria da quebra ocorreu em distâncias superiores a um diâmetro de tubulação, apesar de ter observado quebras ocorrendo nas imediações do orifício. A autora afirma que o diâmetro máximo de gotas gerado pode se relacionar com a dissipação da energia cinética turbulenta: em caso inercial $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,4}$; em caso de quebra turbulenta viscosa $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,5}$. Para o caso estudado por Galinat (2005), a quebra se deu devido aos vórtices turbulentos gerados na zona do jato formado, portanto, puramente inercial.

Galinat (2005) estudou também a quebra de gotas em fase contínua viscosificada com glicerina. Ao contrário do ocorrido nos sistemas não viscosos, a quebra das gotas levou uma distância maior para se iniciar. Quase a totalidade das gotas começa a quebrar após um diâmetro de distância do orifício. A autora afirma que essas diferenças no comportamento entre os dois sistemas sugerem primeiramente um efeito do número de Reynolds no tubo na estrutura do campo

hidrodinâmico a jusante do orifício. A distribuição dos locais de ruptura a jusante do orifício também sugere fortes heterogeneidades espaciais no fluxo. Entretanto, foi observado que a probabilidade global de quebra foi bastante similar para os casos com fase contínua viscosificada e não-viscosificada.

Galinat (2005) conclui que, no caso da mistura água-glicerol, pode-se considerar que as deformações sofridas na região perto do orifício são amortecidas, limitando assim a quebra nesta área, e adiando-a ainda mais a jusante no escoamento.

Silva *et al.* (2005), em um projeto de pesquisa da PETROBRAS, realizaram um estudo cujo foco era um maior entendimento acerca da aplicação de válvulas de mistura de tratadores eletrostáticos utilizados como dessalgadoras em refinarias de petróleo.

Para realização da dessalgação de petróleo, água é adicionada ao petróleo com o intuito de lavá-lo. Uma perda de carga é realizada através de uma válvula que tem a função de promover a mistura da dispersão de entrada e a água de lavagem (Mitre, *et al.*, 2014). Uma das consequências desta mistura é o aumento do teor de água dispersa.

O estudo de Silva *et al.* (2005) consistiu na avaliação da influência de diferentes fatores (ΔP, vazão, concentração de água e geometria do dispositivo de quebra), na distribuição de tamanho de gotas da dispersão de água em óleo (Albacora, óleo de médio °API segundo ANP), a jusante de um dispositivo. A mesma singularidade de seção quadrada utilizada por Silva *et* al (2005) foi restaurada e utilizada nesta tese.

A partir das leituras dos momentos médios entre entrada e saída (d_v 0,1; d_v 0,5; d_v 0,9; d_v 4,3; d_v 3,2) foi verificado o percentual de alteração (PA) destas medidas, dado pela Equação 30. O parâmetro de comparação utilizado para verificação da alteração ocasionada pela singularidade foi uma média aritmética entre PA 0,1 (percentual de alteração do d_v 0,1) e PA 0,5 (percentual de alteração do d_v 0,5). Essa média foi chamada de PA médio, dada pela Equação 31.

$$\mathbf{PA} = \mathbf{100} \times \left[(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{D_{saida}}}{\mathbf{D_{entrada}}})\right] \qquad \text{Equação 30}$$

$$\mathbf{PA_{médio}} = \frac{\mathbf{PA_{0,1}} + \mathbf{PA_{0,5}}}{\mathbf{2}} \qquad \text{Equação 31}$$

Os estudos foram realizados com planejamentos experimentais fatoriais completos, agregando-se fatores dois a dois, mantendo os outros fatores fixos, para que se pudessem obter as influências individuais dos fatores. Posteriormente, todos os dados foram compilados juntos de forma a verificar quais fatores sobreporiam em importância na quebra de gotas.

Silva *et al.* (2005), em seu estudo, determinaram que a queda de pressão abrupta em uma singularidade seria o fator mandatório, dentre os fatores investigados, na quebra de gotas. A vazão, por conseguinte, não teve influência significativa neste processo, dentro dos limites estudados pelo autor.

A concentração da fase dispersa tem influência a partir de um valor onde a coalescência de gotas começa a ocorrer. Com o aumento da concentração da fase dispersa, a população de gotas cresce e a probabilidade de ocorrer choques, e consequentemente coalescência, aumenta. Este fato já havia sido aventado por Simmons e Azzopardi (2001), que se utilizou da correlação de Brauner, que prevê a coalescência, e Hinze (1955) para equiparar com seus resultados experimentais à alta concentração. Nenhum dos modelos foi adequado.

A geometria do elemento dissipador se mostrou bastante influente. Os gradientes de velocidades, a formação de vórtices e os tipos e tamanhos de vórtices ocorrem em função da geometria a que o escoamento é sujeito. Pôde-se inferir, qualitativamente, que uma geometria tipo globo tem maior poder de quebra de gotas do que uma geometria tipo gaveta. Esta constatação é corroborada pelo estudo de van der Zande *et al.* (1998A) onde ficou evidente que a geometria do orifício utilizado nos experimentos era muito influente na quebra de gotas.

Mitre (2010) fez uma extensa revisão bibliográfica acerca dos modelos de quebra e coalescência de gotas já existentes, e empregou dados de distribuição

de tamanho de gotas obtidos experimentalmente por Silva *et al* (2005) para propor novos modelos que prevejam estes dois fenômenos.

Os dados experimentais foram obtidos pela passagem de uma mistura de água (teores de 8 e 15% em massa) em óleo (ρ=862 kg/m3) por um dispositivo restritivo variável que simula uma válvula de mistura de uma dessalgadora. A distribuição de tamanho de partículas foi feita com auxílio de um equipamento de espalhamento de luz (Malvern Mastersizer 2000), adaptado para receber a amostra diretamente da seção de testes, aumentando a representatividade da amostra.

Mitre (2010) utilizou dados de diâmetros de gotas em base numérica para tentar chegar a modelos de previsão de quebra e coalescência baseado em balanço populacional. Para a modelagem de quebra de gotas, baseou-se em dois modelos pré-existentes. Para mecanismos de quebras de gotas em condições inerciais, foi utilizado o modelo de Martínez-Bazán *et al.* (1999). Para mecanismos de quebra viscosa, isto é, na região sub-Kolmogorov, foi utilizado o modelo de Cristini *et al.* (2003).

Uma observação interessante feita por Mitre (2010) foi relacionada com a transição entre os mecanismos de quebra. O autor discute que a mudança de mecanismo não deve ser abrupta em tamanhos de gotas do tamanho da escala de Kolmogorov, e que, em regiões próximas desta escala, poderá ocorrer a coexistência dos mecanismos de quebra.

Fossen e Schumann (2017) fizeram um estudo experimental de quebra de gotas em fase contínua óleo e em fase contínua água. O *loop* de teste era de grandes capacidades, o que diferencia o estudo dos demais apresentados. As tubulações utilizadas tinham 100mm de diâmetro interno e a quebra de gotas se deu pela passagem do escoamento por uma válvula borboleta de mesmo diâmetro.

O fluxo a montante da restrição foi estabelecido de forma estratificada, com velocidade controlada para que não houvesse remistura ou quebra de gotas

devido ao escoamento. Os BSWs testados foram de 5, 30, 70 e 95% e foi utilizado um óleo mineral de baixa viscosidade. A tensão interfacial não foi controlada.

Os autores testaram vazões de até 20 m^3/h e quedas de pressão de até 1 bar operando em temperatura ambiente. Assim como reportado por Silva (2005), os autores chegaram à conclusão de que a vazão de operação não tinha grande influência no fenômeno de quebra de gotas quando as quedas de pressão eram relativamente altas, ou seja, a queda de pressão foi mandatória no fenômeno.

Dadas às baixas taxas de dissipação de energia testadas, as gotas geradas foram da ordem de centenas de micrômetros. Os autores utilizaram dois modelos para testar a previsão em relação aos seus dados experimentais. O modelo de quebra devido à aceleração no orifício apresentou erros médios de previsão de 25% aproximadamente, enquanto o modelo de quebra inercial apresentou erros médios de 20%. O modelo inercial apresentou, portanto, melhores respostas, tendo tido previsões superiores aos dados experimentais quando as gotas eram grandes. O maior erro de previsão do modelo inercial observado foi de 40%.

Mais recentemente, Paolinelli e Yao (2017), assim como os autores anteriores, realizaram experimentos de quebra de gotas com o objetivo de obter dados (hoje escassos) do fenômeno em uma escala industrial. Para tanto, um *loop* experimental com tubulações de 100 mm de diâmetro interno foi construído. A quebra de gotas foi dada por uma válvula globo de igual diâmetro, e a medição de DTG foi realizada em duas localizações, com a técnica PVM (*particle video microscopy*). Os experimentos foram realizados com fase contínua óleo (9 mPa.s) e solução aquosa salina (0,1%) como fase dispersa, com concentração variando de 0,5 a 16%. As quedas de pressão variaram de 0,62 a 1,65 bar e a tensão interfacial não foi manipulada, tendo o valor de 49 mN/m.

Os autores utilizaram a geometria da válvula globo para equipará-la com um orifício. Os diâmetros máximos obtidos experimentalmente foram sempre superiores à escala de Kolmogorov calculada. Os resultados foram apresentados

de forma segregada, uma vez que nos pontos acima de 6% a coalescência foi observada.

Foram testados quatro modelos de quebra na tentativa de descrever os dados experimentais, sendo eles: o modelo de Hinze (que subestimou os resultados em 12% em média); o modelo de Hesketh *et al.* (1987, *apud* Paolinelli e Yao, 2017), que adiciona um termo relativo às densidades das fases (que subestimou os resultados em 24% em média); um modelo proposto que leva em conta a frequência natural de ressonância da gota, e que tem formato similar ao modelo de Hinze (que superestimou os resultados em 10% em média); e o modelo de Percy e Sleicher (que superestimou os resultados em 30%).

Ao se analisar os resultados com maiores teores de fase dispersa, os autores exemplificam que os diâmetros máximos em dispersões com 15% de fase dispersa podem ser duas vezes maiores do que os diâmetros obtidos em condições muito diluídas. Não ficou claro para os autores se o responsável pelo aumento dos diâmetros máximos foi o fenômeno de coalescência ou de supressão da turbulência. O modelo de Hinze não apresenta nenhuma correção para maiores teores de fase dispersa e, portanto, falha bastante na previsão (principalmente acima de 6% de fase dispersa).

Os autores testaram então o modelo de Brauner (2001), que aplica um ajuste devido ao aumento de concentração da fase dispersa no modelo clássico de Hinze. Mesmo com a aplicação dessa correção, o modelo de Brauner (2001) subestimou os resultados em 30% em média. Um fator de multiplicação empírico ($f(\phi_d)$), proposto por Mlynek e Resnick (1972), equação 32, foi aplicado ao modelo de Hinze para tentar melhorar a previsão de diâmetro máximo, o que deu resultados aceitáveis.

$$\mathbf{f(\Phi_d) = (1 + 5,4\Phi_d)} \qquad \text{Equação 32}$$

3.5. Considerações Sobre os Estudos Realizados até o Momento

A maioria dos estudos realizados até o momento nesta área visa a descrever a distribuição de tamanho de gotas em escoamentos tanto horizontal quanto vertical, ou gerados em tanques pela ação de misturadores rotativos, normalmente com fluidos leves e pouco viscosos, não representativos com a realidade de produção de petróleo no Brasil. Além disso, os teores de fases em contato nesses experimentos, quase sempre consideraram percentuais reduzidos de uma das fases (fase dispersa).

Somente mais recentemente houve um interesse no estudo de quebra de gotas em orifícios e restrições, isto é, com dissipação de energia pontual e localizada. A carência de estudos com esse objetivo e a necessidade de estudar esse efeito em um cenário que se aproximasse mais à realidade da produção de petróleo no Brasil justifica esse estudo e foi o elemento motivador para sua realização.

Buscou-se, através de uma investigação experimental, entender o fenômeno de quebra de gotas em condições análogas aos sistemas reais de produção de petróleo, de forma que o aprendizado possa ser aplicado aos projetos da indústria do petróleo.

4. MEDIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS

Uma partícula pode ser definida como uma pequena porção de algum material (Xu, 2002). Devido à abrangência desta definição, limitar-se-ão, as partículas aqui abordadas, àquelas cujas dimensões estão na faixa entre nanômetros e milímetros, mais especificamente na faixa dos micrômetros. Segundo Allen (1997), uma partícula esférica homogênea pode ser definida unicamente por seu diâmetro. Existem outras partículas regulares como cubos ou tetraedros cujos tamanhos podem ser definidos por apenas uma dimensão.

No entanto, quando se tratam de partículas irregulares, mais de um número é necessário para descrever suas dimensões. Algumas maneiras de descrever uma partícula irregular podem ser vistas na Tabela 3. Estes artifícios correlacionam características da partícula original com figuras relacionadas, como esferas, círculos, áreas projetadas, distâncias equivalentes, dentre outras.

É importante salientar que toda a informação sobre a partícula estará condensada em apenas um número, o que pode gerar erros em seu dimensionamento, no caso de partículas irregulares (Allen, 1997). Um exemplo deste caso é o diâmetro de Feret, que traça paralelos entre as tangentes externas da partícula e, com isso, é afetado por sua orientação (Treviranus, 2013). Esses erros serão observados a depender da técnica de análise utilizada. No caso de dispersões de água em óleo e de óleo em água, a aproximação das gotas como esferas e sua caracterização através do diâmetro se mostra coerente.

Um sistema monodisperso de partículas é composto de partículas do mesmo tamanho, enquanto que um sistema polidisperso possui partículas de vários tamanhos. O sistema polidisperso se aproxima mais dos casos reais de dispersões de partícula. Uma distribuição de tamanho de partículas é obtida a partir das medidas relacionadas em um sistema polidisperso, e pode se apresentar sob a forma monomodal ou multimodal. Para melhor descrever esta distribuição, utilizam-se valores numéricos estatísticos com o propósito de melhor entender o grupo de valores individuais.

Tabela 3 - Definições de diâmetro de partículas – Adaptada de Allen, 1997.

Símbolo	Nome	Definição	Equação
d_v	Volume	Diâmetro da esfera com o mesmo volume da partícula	$V = \frac{\pi}{6} d_v^3$
d_s	Área Superficial	Diâmetro da esfera que tem a mesma área superficial que a partícula	$S = \pi d_s^2$
d_{sv}	Área Superficial - Volume	Diâmetro da esfera que tem a mesma razão entre área superficial e volume da partícula	$dsv = (\frac{d_v^3}{d_s^2})$
d_{St}	Stokes	Diâmetro da esfera que sedimenta, no regime de Stokes, com a mesma velocidade terminal que a partícula	$dSt = \sqrt{(\frac{18\mu U}{(\rho_d - \rho_c)g})}$
d_a	Área Projetada	Diâmetro de um círculo que tem a mesma área projetada da partícula em uma posição estável	
d_A	Peneira	Largura da mínima abertura através da qual a partícula pode passar	
d_F	Feret	Distância entre pares de tangentes paralelas traçadas na linha externa da partícula	
d_M	Martin	Tamanho da corda que divide a partícula em duas áreas iguais	

Dentre estes termos estatísticos, mencione-se a moda (o diâmetro mais frequente na distribuição), a mediana (que divide a distribuição em partes iguais), e a média (que representa o centro de gravidade da distribuição) (Allen, 1997; Xu, 2002). Quando se fala em média, a depender da técnica de caracterização utilizada e, consequentemente, em qual base está a medida obtida (número, área, volume, etc.), é possível encontrar diferentes médias para mesmos valores medidos. A Tabela 4 demonstra a definição dos diâmetros médios.

Tabela 4 - Definição dos diâmetros médios (adaptada de Allen, 1997)

Nome	Símbolo	Definição
Número/Comprimento	x_{NL}	$\frac{\sum x d_N}{\sum d_N}$
Número/Área	x_{NS}	$\sqrt{\left(\frac{\sum x^2 d_N}{\sum d_N}\right)}$
Número/Volume	x_{NV}	$\sqrt[3]{\left(\frac{\sum x^3 d_N}{\sum d_N}\right)}$
Comprimento/Área	x_{LS}	$\frac{\sum x^2 d_N}{\sum x d_N}$
Comprimento/Volume	x_{LV}	$\sqrt{\left(\frac{\sum x^3 d_N}{\sum x d_N}\right)}$
Área/Volume	x_{SV}	$\frac{\sum x^3 d_N}{\sum x^2 d_N}$
Momento/Volume	x_{VM}	$\frac{\sum x^4 d_N}{\sum x^3 d_N}$
Momento/Peso	x_{WM}	$\frac{\rho \sum x^4 d_N}{\rho \sum x^3 d_N}$

Tome-se como exemplo a Figura 4, em que três esferas com diâmetros medindo 1, 2 e 3µm tiveram sua média calculada baseada em número, área superficial, volume, etc. (Rawle, 2015). A escolha da base deverá ser pautada no equipamento utilizado e nas especificidades de cada processo. É possível fazer transformações entre as bases de forma que se possam comparar resultados entre diferentes técnicas de caracterização, mas não se deve negligenciar que os erros inerentes à técnica poderão ser magnificados.

$$X_{nl} = D[1,0] = \frac{1+2+3}{3} = \underline{2.00}$$ Número/comprimento

$$X_{ns} = D[2,0] = \sqrt{\frac{1+4+9}{3}} = \underline{2.16}$$ Número/superfície

$$X_{nv} = D[3,0] = \sqrt[3]{\frac{1+8+27}{3}} = \underline{2.29}$$ Número/volume

$$X_{ls} = D[2,1] = \frac{1+4+9}{1+2+3} = \underline{2.33}$$ Comprimento/superfície

$$X_{lv} = D[3,1] = \sqrt{\frac{1+8+27}{1+2+3}} = \underline{2.45}$$ Comprimento/volume

$$X_{sv} = D[3,2] = \frac{1+8+27}{1+4+9} = \underline{2.57}$$ Superfície/volume (diâmetro de Sauter)

$$X_{vm} = D[4,3] = \frac{1+16+81}{1+8+27} = \underline{2.72}$$ Volume/momento

Figura 4 - Cálculo de diâmetros médios, adaptada de Rawle, 2015

Cada técnica de caracterização terá como resposta uma distribuição de tamanhos de gota com base nos princípios de medição e detecção da mesma. É de suma importância que, ao se comparar resultados de uma mesma amostra analisada por diferentes técnicas, os termos estejam sob mesma base. Caso contrário, poderão ocorrer situações como a explicitada na Figura 5, onde temos a distribuição de partículas em base numérica, comparada com as distribuições volumétrica e de área superficial da mesma amostra.

Percebe-se que quando se trata de uma distribuição com base no número total de partículas, cada partícula tem importância idêntica na distribuição. O mesmo não ocorre quando a base é volumétrica ou em área superficial, quando partículas de maior volume/área tendem a ter maior influência na distribuição. É baseado no conhecimento das peculiaridades do processo que a técnica de caracterização deve ser escolhida, bem como o pós-processamento dos resultados obtidos. No caso de dispersões de água em óleo e, pensando em fenômenos de separação das fases e suas eficiências, pode-se concluir que o mais adequado seria empregar o diâmetro de Stokes (dSt). Entretanto, como a análise granulométrica empregando este diâmetro é muito demorada e não

existem equipamentos que o façam automaticamente, é comum medir-se a distribuição em volume.

	d = 1µm	d = 2µm	d = 3µm	d = 4µm
Volume (µm³)	0,52	4,19	14,14	33,51
área sup. (µm²)	3,14	12,57	28,27	50,26
dNL (%)	25,00	25,00	25,00	25,00
ds (%)	3,33	13,33	30,00	53,33
dv (%)	1,00	8,00	27,00	64,00

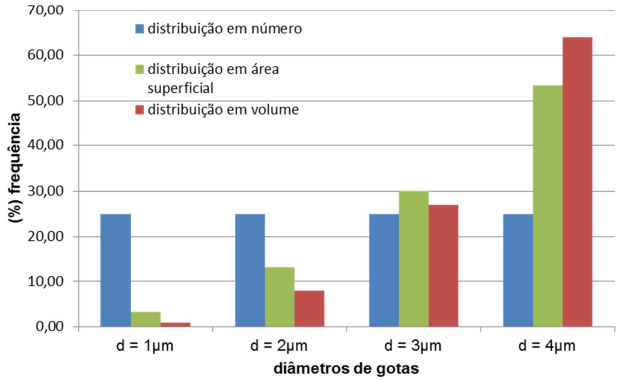


Figura 5 - Comparação de medidas em base numérica, de área superficial e volumétrica (adaptada de Treviranus, 2013)

4.1. Técnicas de Medição de Tamanho de Partículas

Esta seção trata de algumas diferentes técnicas de medição de tamanho de partícula, sejam elas sólidas, líquidas (gotas), ou gasosas (bolhas). São apresentadas suas aplicações e limitações.

Peneiramento: Esta técnica mede o diâmetro de peneira e é uma das técnicas mais antigas. O peneiramento tem como princípio o fracionamento da amostra de acordo com a abertura, usualmente quadrada, de sua tela, que se dá em duas dimensões. Tem aplicação em partículas sólidas de 38µm (400 *mesh* Tyler) até poucos centímetros, porém a depender do tamanho da abertura da

peneira, o erro pode chegar a 60%. Além disso, o peneiramento é altamente dependente da forma e orientação da partícula, o que pode colocar em uma mesma faixa de tamanhos, partículas de comprimento completamente diferentes (Rawle, 2015 e Xu, 2002). O resultado também é altamente dependente do tempo de operação, método e velocidade de peneiramento e propriedades das partículas (Rawle – 2015).

Sedimentação: Esta técnica mede o diâmetro de Stokes, dSt, e refere-se à velocidade de sedimentação das partículas em um líquido sob a ação de campo gravitacional ou centrífugo. É baseada na equação de Stokes, válida para partículas esféricas de pequeno diâmetro, isoladas em sedimentação lenta (*creeping flow*) em relação ao fluido que a cerca. Sendo assim, é válido para baixas concentrações, com restrições para partículas muito grandes, em que a própria turbulência gerada pela sedimentação inviabiliza seu uso (Xu, 2002). O método também não é aplicável para partículas muito pequenas, onde o movimento Browniano suplanta o movimento gravitacional de sedimentação. A faixa de utilização, portanto, está na faixa dos 2 a 100µm (Rawle, 2015).

A viscosidade do fluido que envolve a partícula (fase contínua) tem grande influência nesta técnica, de modo que a temperatura de análise deve ser bem controlada. Adicionalmente, a análise por sedimentação é demorada e tediosa, o que fez com que gradualmente fosse substituída por outras técnicas.

Coulter counter – Sensores elétricos: Inventado inicialmente para realização de contagem celular no sangue, este sensor tem como princípio a contagem de partículas que passam por uma zona onde o detector perceberá a diminuição de volume de eletrólito antes existente e que agora é ocupado pela partícula. Isto gera uma queda na condutância que é convertida em pulsos que, contabilizados, darão o número de partículas e seus respectivos volumes (Xu, 2002). Logo, esta técnica mede o diâmetro de volume, dv.

É aplicável para partículas de 0,4 a 1200µm, com a limitação de que a solução deverá necessariamente ser um eletrólito e com pequena concentração

de partículas perfeitamente suspensas no líquido (o que limita o tamanho de partículas densas) (Xu, 2002).

Análise de Imagens: Esta técnica mede o diâmetro da esfera de mesma área projetada que a partícula. Ela trabalha com a captura e processamento de imagens. A captura pode utilizar uma iluminação (microscopia ótica e/ou foto digital) ou bombardeamento de elétrons (microscopia eletrônica). Na microscopia ótica, tanto a luz transmitida ou refletida poderão ser usadas na captura da imagem, sendo que para partículas menores apenas microscópios utilizando luz polarizada são adequados. A depender do equipamento utilizado, são detectadas partículas de 0,001 até 200µm. É necessário realizar calibrações para todos os métodos utilizando microscopia (Xu, 2002).

Uma boa amostragem é importante para que a distribuição obtida seja fidedigna com a original. Amostras polidispersas tendem a não ser bem representadas por esta técnica. Entretanto, as desvantagens no uso desta técnica são óbvias: todas as informações são obtidas em duas dimensões (Xu, 2002).

Portanto, a orientação da partícula analisada irá influenciar drasticamente no resultado. Um avanço nesta técnica pode ser observado nos métodos holográficos, em que um segundo passo é dado gerando uma imagem 3D.

Análise Acústica: Utilizada em altas concentrações, as análises acústicas podem ser divididas em espectroscopia acústica e análise espectral eletroacústica. A primeira se baseia na atenuação de uma onda sonora em função de diversas frequências entre o transdutor emissor e receptor. Esta atenuação se deve a interação das ondas sonoras com o meio e com as partículas nele presentes (Xu, 2002; Treviranus, 2013).

Pode ser utilizada para partículas entre 0,01 e 1000µm, inclusive em altas concentrações. Entretanto, inúmeras propriedades mecânicas, de transporte e termodinâmicas devem obrigatoriamente ser fornecidas. Qualquer alteração nestas propriedades modifica e até inviabiliza o resultado (Xu, 2002). Essa técnica é utilizada no equipamento *inline* Opus da Sympatec.

Na segunda técnica, as ondas sonoras são geradas através de um campo elétrico alternado de alta frequência, que puxam a partícula para frente e para trás. Com base na medida do ângulo das ondas sonoras, é possível determinar a mobilidade dinâmica da partícula, desde que a concentração e densidade da mesma sejam conhecidas. A partir desta mobilidade, é possível extrair seu potencial zeta e a distribuição do tamanho das partículas. Esta técnica só é aplicável a partículas pequenas (0,1 - 100µm), carregadas e com densidade bem diferente da do meio (Xu, 2002).

Retroespalhamento de raios laser: Com faixa de aplicação da ordem de 1 a 1000 µm, tem como princípio a aplicação de um laser focado através de uma janela de medição. A aplicação de lentes rotativas em velocidade pré-determinada promove uma varredura da janela de medição. Quando o laser passa por uma partícula, o foco de luz é refletido, podendo ser detectado pelos elementos sensores detectores do equipamento. A largura do pulso detectado será diretamente proporcional ao tamanho da corda da partícula medida. A partir deste tamanho de corda, pode-se estatisticamente inferir o tamanho da partícula (Oliveira, 2010). Este é o princípio de funcionamento do Lasentec FBRM da Metler Toledo.

Difração de raios laser: Mede distribuições de tamanhos em volume. Possui uma grande faixa de aplicação, de 0,1 - 3000µm. Consiste na aplicação de um feixe de laser de grande intensidade sobre a amostra. O ângulo de difração desta luz será inversamente proporcional ao tamanho de partícula medida, ou seja, partículas pequenas geram grandes ângulos de difração da luz. (Rawle, 2015). A distribuição de tamanho de partículas é gerada em base volumétrica e, caso a densidade da partícula seja constante, esta distribuição é igual em base mássica. Esse é o princípio de funcionamento dos equipamentos Malvern Mastersizer 2000 (*off-line)* e Malvern Insitec (*online/atline)*, que será mais aprofundado em seção posterior.

Outras técnicas poderiam ser citadas como métodos cromatográficos, contagem de aerossóis submicrométricos, sorção a gás, etc. Por se tratarem de

métodos pouco usuais para o objetivo escolhido para este estudo, esses não serão aqui aprofundados.

4.2. Medição de DTG por Difração de Raios Laser

O princípio de funcionamento do *laser scattering* (difração de raios laser), se baseia nas teorias de Mie ou de Fraunhofer. Quando uma partícula recebe a incidência de uma fonte de laser monocromático, ocorre a criação de um padrão de difração (Setekleiv e Svendsen, 2014). Este padrão é gerado pois parte da luz é absorvida, parte é refratada, parte é difratada e uma última parte é transmitida (Allen, 1997). O ângulo de difração está intimamente relacionado com o tamanho da partícula, sendo que partículas pequenas geram grandes ângulos de difração. Na Figura 6, estão ilustradas as possibilidades de incidência da luz em uma gota.

A deconvolução do padrão de difração é baseada nas teorias de Mie ou de Fraunhofer, que leva em consideração que as partículas são oticamente homogêneas e esféricas. É necessário o conhecimento do índice de refração do fluido (Allen, 1997). Esse trabalho visa avaliar dispersões de água em óleo mineral. Sendo assim, a hipótese de que essas gotículas são esféricas é aceitável.

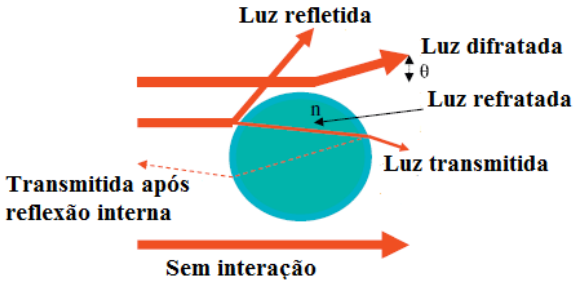


Figura 6 - Desenho esquemático dos quatro fenômenos da dispersão luminosa: absorção, difração, refração e reflexão. Adaptada de Setekleiv e Svendsen (2014)

Segundo Coupland e McClements (2001), medidas de distribuição de tamanho de gotas (DTG) por *laser light scattering* só podem ser realizadas em amostras com concentrações da fase dispersa muito diluídas. Setekleiv e Svendsen (2014) afirmam que sistemas dispersos com concentrações entre 0,001 até 1%, em volume, podem ser facilmente medidos por esta técnica. Testes

iniciais realizados neste trabalho indicaram que, mesmo com menor distanciamento entre as janelas de entrada e saída de luz (caminho ótico na amostra), no equipamento (gap), as transmitâncias de luz caíam drasticamente a partir de concentrações da fase dispersa acima de 2,5%, inviabilizando as medições.

Diante desta constatação e sabendo-se que ensaios off-line demandam muito tempo, entendeu-se que seria interessante a implementação e validação de um sistema de diluição de amostras para medição em linha de DTG, cuja construção e metodologia de operação serão abordadas em seção posterior.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos experimentais foram conduzidos no Laboratório de Separação de Fases do Núcleo de Separadores Compactos da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), devido à infraestrutura lá existente. Para delineamento da matriz de testes, utilizou-se de um software de planejamento de experimentos (Minitab) de modo a minimizar o número de pontos experimentais sem perder a qualidade dos dados gerados.

Nesta seção, todos os aspectos experimentais desenvolvidos serão explicitados. Primeiramente, será apresentada a bancada de testes e facilidades auxiliares na condução dos experimentos. A seguir, os métodos analíticos incluindo as técnicas e equipamentos de medição de tamanho de gotas serão apresentados e, após os métodos analíticos de DTG, a descrição da singularidade da seção de testes também será apresentada. Subsequentemente, será descrito o protocolo realizado para a escolha do óleo modelo a ser utilizado, incluindo suas características físico-químicas. O procedimento experimental para realização dos experimentos planejados será brevemente explicitado. Por fim, será relatado e comentado o planejamento experimental com as matrizes de testes experimentais realizadas, incluindo os testes exploratórios com o óleo de Marlim e os testes com o óleo modelo escolhido.

5.1. Bancada de Testes

Tencionava-se investigar a formação de dispersões de água em óleo após passagem por obstáculos típicos da produção de petróleo. Para isso, uma bancada geradora de dispersões foi projetada, construída e instrumentada.

A bancada de testes (Figura 7), cujo fluxograma pode ser visto ao fim dessa sessão, Figura 16, é constituída por reservatório de óleo de volume 500 L e um reservatório de água de volume 200 L. Água e óleo são bombeados por bombas de cavidade progressiva acionadas por inversores de frequência.

Cada uma das bombas de cavidades progressivas pode ser configurada com 3 diferentes conjuntos de rotor e estator e com a variação da frequência dos inversores entre 15Hz e 60Hz. Por conta disso, foram definidas 3 faixas de vazão, com base na curva de desempenho de cada conjunto:

0,2 L/min a 1,0 L/min (Rotor/estator bomba HD 10 – Figura 8);

0,8 L/min a 3,2 L/min (Rotor/estator bomba HD 15 – Figura 9);

2,0 L/min a 8,0 L/min (Rotor/estator bomba HD 20 – Figura 10);

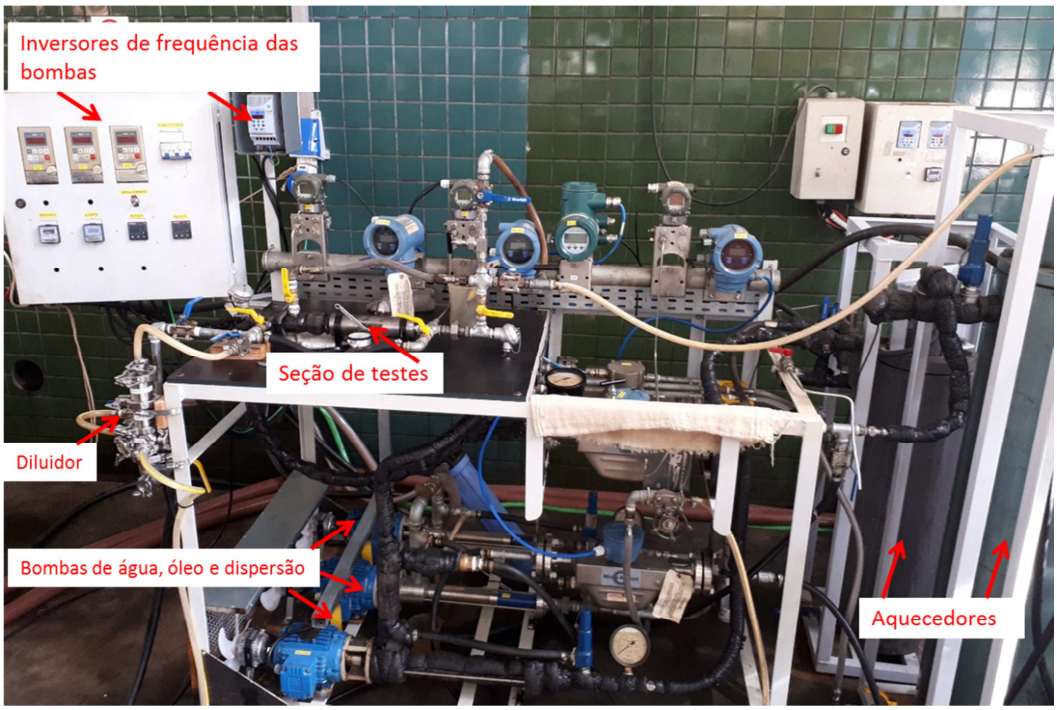


Figura 7 - Vista geral da bancada de testes

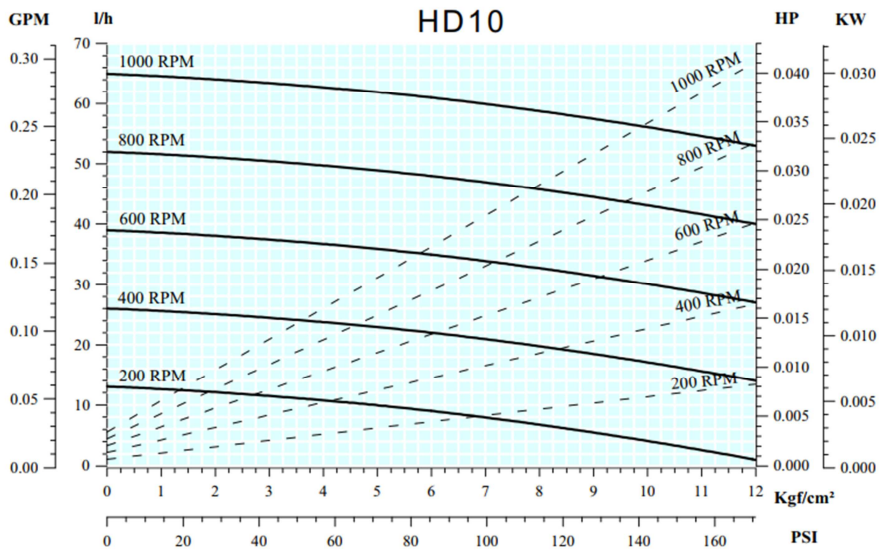


Figura 8 - Curvas de operação da bomba com o conjunto rotor/estator HD10 (Weatherford, 2019)

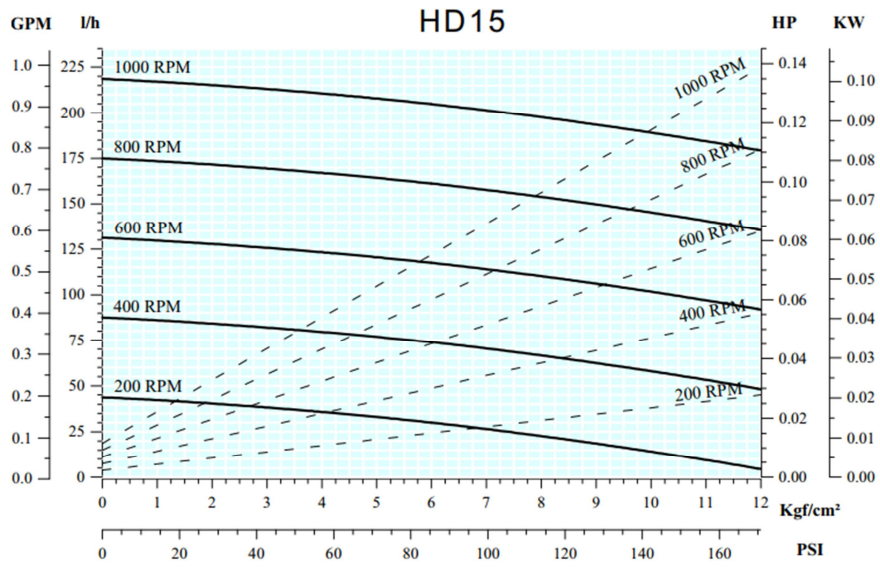


Figura 9 - Curvas de operação da bomba com o conjunto rotor/estator HD15 (Weatherford, 2019)

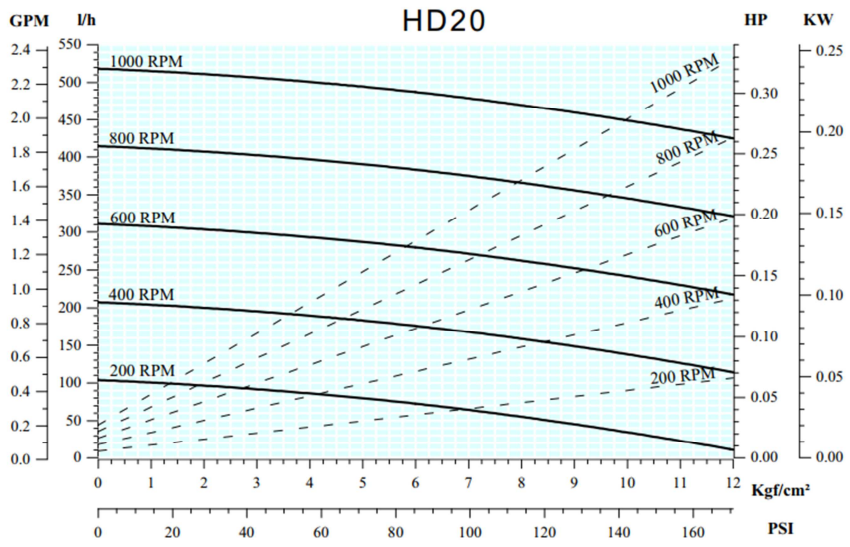


Figura 10 - Curvas de operação da bomba com o conjunto rotor/estator HD20 (Weatherford, 2019).

Por recomendação do fabricante, as bombas podem operar em pressão de até 12 bar em aplicações sem existência de partículas abrasivas. Pressão de até 10 bar, para a presença de partículas levemente abrasivas e de, no máximo, 6 bar no caso do bombeio de fluidos muito abrasivos.

Água e óleo bombeados passam por aquecedores elétricos, um para a água e um para o óleo (Figura 14). Os aquecedores têm controle de potência tiristorizado (até 12kW para água e até 7 kW para o óleo) e podem aquecer água e óleo até a temperaturas da ordem de 75°C, na vazão média de cada uma das fases de 3,2 L/min. A jusante dos aquecedores, todas as tubulações da bancada experimental foram isoladas termicamente, visando um controle mais apurado da temperatura objeto do experimento

As vazões mássicas de água e de óleo são medidas com o uso de medidores de vazão do tipo coriolis. Água e óleo são misturados em um Tê de mistura, onde a fase dispersa é injetada na corrente principal da fase contínua através de giclês com o diâmetro do orifício selecionado (0,5 e 0,6mm) em função das vazões e concentrações que devem ser geradas.

A escolha dos orifícios dos giclês foi baseada em experiência prévia onde se observou que velocidades de escoamento no orifício, da fase a ser dispersa, deveria ser da ordem de 20 m/s, de forma a conseguir gotas da ordem de centena de micrômetros.

No Tê de mistura, a dispersão gerada é de gotas grandes. O diâmetro das gotas então é refinado através da passagem da dipersão em uma válvula agulha, na qual é aplicada uma perda de carga conveniente para a quebra das gotas até a dimensão definida como dimensão das gotas a ser utilizada na entrada da seção. As pressões no Tê de mistura são monitoradas através da leitura em manômetros analógicos. A pressão na válvula agulha é indicada em um indicador/transmissor de pressão eletrônico.

As Figuras 11 e 12 explicitam os Dv 0,5 gerados pelos giclês de 0,5 mm e 0,6 mm, em condições extremas de tensão interfacial e concentração. É interessante notar que, dado que o objetivo era conseguir Dv 0,5 e Dv 0,9 na ordem de 50 μm e 100 μm, a escolha dos orifícios, segundo premissas já comentadas, foi acertada.

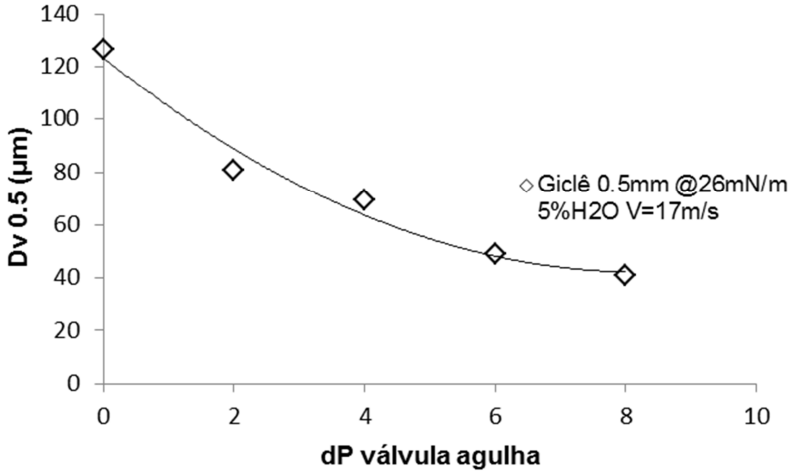


Figura 11 - Dv 0,5 gerado no giclê de 0,5 mm em função da perda de carga (ΔP) na válvula agulha de refinamento.

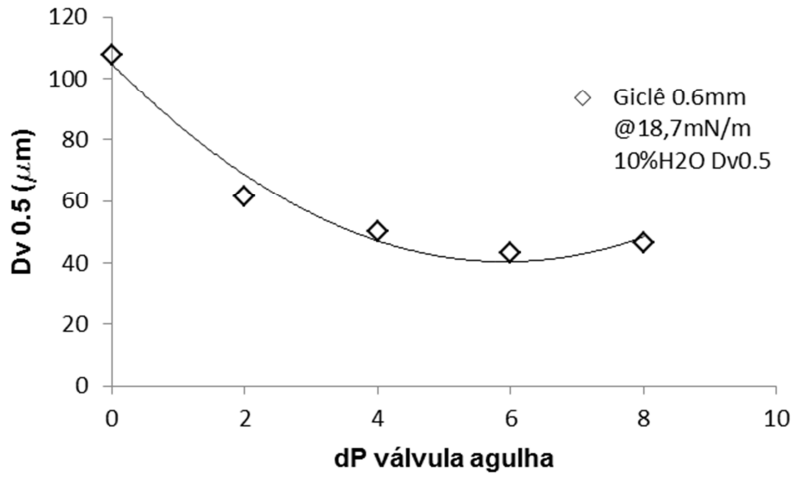


Figura 12 - Dv 0.5 gerado no giclê de 0,6 mm em função da perda de carga (ΔP) na válvula agulha de refinamento.

Gerada a emulsão em excesso, com a concentração e distribuição de gotas desejadas, a parcela da vazão que deve ser encaminhada para a seção de testes é rebombeada por uma bomba de cavidades progressivas. O excedente vai para dreno para posterior tratamento e reuso do óleo. Essa geração de emulsão em excesso e rebombeio de uma parcela para o teste permite que se opere em diferentes condições de vazão e pressão na seção de testes sem alteração das condições de geração de emulsão e, portanto, das características da emulsão de entrada.

A jusante da bomba de rebombeio de emulsão a vazão mássica da dispersão de teste é medida por medidor de vazão do tipo coriolis. Nos testes de quebra de gotas, a pressão na entrada e na saída da singularidade é medida através do uso de indicadores/transmissores inteligentes de pressão. Maiores detalhes sobre a singularidade instalada na seção de testes serão dados em seção posterior.

Além das medições de temperatura utilizadas para o controle do aquecimento de óleo e água, a temperatura da dispersão é medida com uso de transdutor do tipo PT100 na entrada e saída da seção de testes. A Tabela 5 traz a lista com os equipamentos principais da bancada geradora de dispersões.

Tabela 5 - Lista dos principais equipamentos do Banco Gerador de emulsões.

P-01	Aquecedor de óleo	Permutador de calor (ELTRA), Mod. ADO, Potência 7 kW, Tensão 220 VOLTS
P-02	Aquecedor de água	Aquecedor de passagem construído em tubo de aço 1020 com isolamento térmico em fibra cerâmica, com caixa de proteção. Termostato 20 a 300ºC. Potência de 12 kW. Modelo ADO-180 Fabricante Eltra
B-01 e B03	Bombas de óleo e emulsão	Bomba de cavidade progressiva Weatherford com rotor HD 20, vazão de 6,8 l/min, pressão de 12 Bar, acoplada diretamente a motor elétrico de 1/3 CV, 220 v, trifásico, com rotação variável através de inversores de frequência, rotação de 0 a 860 RPM, inversores Adleepower modelo AS2-IPM.
B-02	Bomba de água	Bomba de cavidade progressiva Weatherford com rotor HD 10, vazão de 0 a 1 l/min, pressão de 12 Bar, acoplada diretamente a motor elétrico de 1/3 CV, 220 v, trifásico, com rotação variável através de inversores de frequência, rotação de 0 a 860 RPM, inversores Adleepower modelo AS2-IPM.
B-04	Bomba de Diluente	Bomba de cavidade progressiva Geremia modelo WHD-15 (com Rotor e Estator HD 15) Vazão Máxima: 2,95 L/min. Pressão máxima de operação: 12 bar.
FI -01 e 02	Medidor de Vazão	Medidor de vazão do tipo Coriolis, vazão nominal de 50 kg/min, e vazão mínima de 2,3kg/min, Yokogawa modelo Rotamass RCCS34.
FI-03	Medidor de Vazão	Medidor de vazão do tipo Coriolis, vazão máxima de 45 kg/min, Micromotion da Emerson modelo F025.
M1	Misturador	Peça especial de injeção de água com giclê com orifício de 0,5 e 0,6mm.
PIT-01, 02, 03 e 04	Transmissor e indicador de pressão	Transmissor de pressão Yokogawa modelo EJA430E
TIT-01, 02, 03 e 04	Transmissor e indicador de temperatura	Sensor de Temperatura tipo PT-100 Ohms, montado em tubo de Inox 304, diâmetro de 6,0 x 150 mm de comprimento, rosca de ½ BSP e cabeçote de ligação KSC 3 fios.
Válvula homogeneizadora	Válvula	Válvula agulha, corpo em inox 304 e haste e sede em inox 316.
TQ -1	Tanque de óleo	Tanque de polipropileno, volume de 1000 litros.
TQ - 2	Tanque de água	Tanque metálico com capacidade de 200 litros.

Tanto a emulsão de entrada quanto a emulsão de saída podem ser coletadas para medição de concentração e tamanho de gotas em laboratório ou desviadas para medição em linha do tamanho de gotas no equipamento Insitec de marca Malvern que opera através do princípio de espalhamento de luz laser (*laser scattering*). Para a medição *at-line* com o Insitec, foi montado e validado no banco testes um sistema para diluição em linha das amostras de maior concentração, Figura 13.

Após coleta da amostra, o restante da dispersão é enviado para tanques de armazenamento (Figura 14). A dispersão armazenada, após realização dos testes, passa por um tratamento por centrifugação para recuperação do óleo modelo em condições de retorno ao tanque de alimentação, isto é, com BSW medido em laboratório inferior a 0,5% (Figura 15).

Figura 13 - À esquerda: Diluidor instalado no banco de testes; À direita: Reservatório de óleo mineral USP e bomba para diluição de amostra para leitura *at-line* do tamanho das gotas.

Figura 14 - Vista da bancada de testes: reservatórios na linha de dreno.

Figura 15 - À esquerda aquecedores de água e de óleo e, à direita, Bomba HD20 e centrífuga OSD6-Westfalia utilizadas no tratamento (operação *dewatering*) do óleo que era reutilizado.

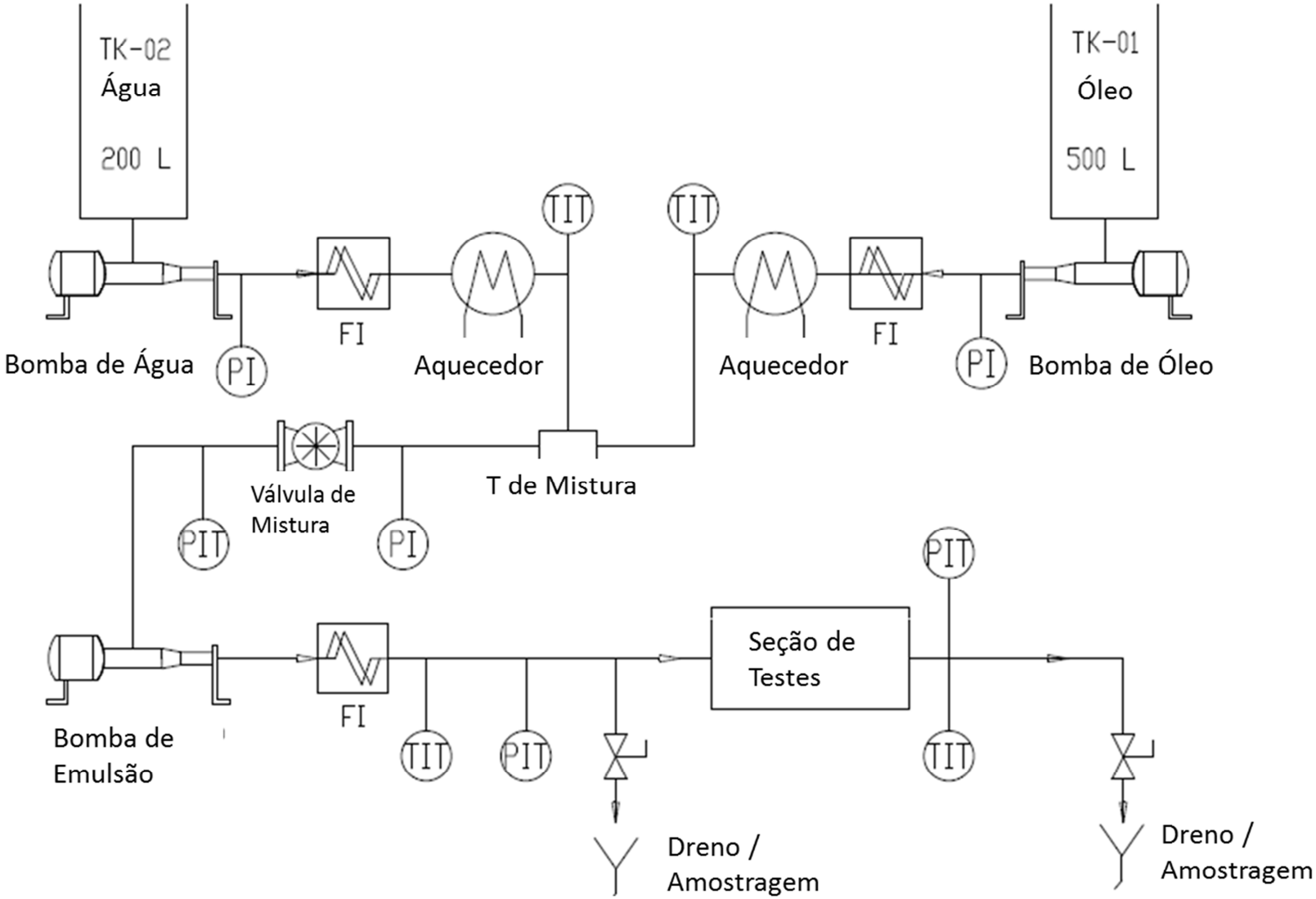


Figura 16 - Esquema da bancada de teste. Fonte: Elaboração própria.

5.2 – Métodos Analíticos

A seção a seguir indicará os métodos analíticos utilizados para determinações de propriedades físico-químicas, medição de teores de água em óleo e distribuição de tamanho de gotas.

5.2.1 – Medição de Distribuição de Tamanho de Gotas (DTG)

Foram realizadas medições de DTG de forma *off-line* e *at-line*. Ambas as formas de medição têm como princípio a difração de raios laser, apresentada em seção anterior. É importante frisar que os parâmetros óticos do óleo foram medidos e as configurações de ambos os equipamentos foram feitas de forma idêntica (parte real e parte imaginária do índice de refração).

A medição de tamanho de gotas realizada de modo *off-line* deve seguir uma restrita metodologia a fim de evitar que erros na amostragem, medição e análise dos resultados gerem possíveis incertezas associadas. Foi utilizado o equipamento Mastersizer 2000 da *Marlvern Instruments,* Figura 17. Todo o procedimento descrito a seguir foi realizado com bastante rigor.

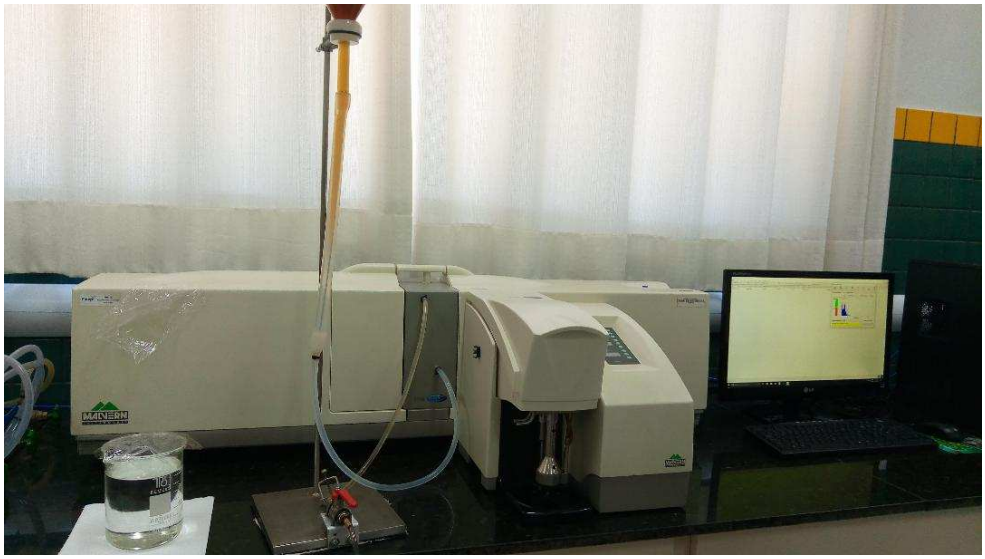


Figura 17 - Malvern Mastersizer 2000.

Para a coleta da amostra de fluido ensaiado, foi utilizado um bastão de vidro e as gotas advindas do bastão após completa rinsagem foram coletadas em um béquer de 100 *ml*, contendo um agitador magnético e aproximadamente 80 *ml* de óleo mineral USP (também conhecido como EMCA), um óleo mineral transparente cujo uso objetiva diluir o óleo da amostra, tornando a mistura final

mais transparente ao laser do *Malvern,* e preservar as gotas de água presentes neste óleo. Para a obtenção de uma boa obscurescência, um valor de 3 a 5 gotas de amostra de óleo foi considerado adequado. As características do óleo mineral diluente são dadas abaixo:

Óleo Mineral USP

- Aparência ---------- Límpido
- Odor e sabor ---------- Ausente
- Cor SAYBOLT ---------- + 30
- Densidade a 20 °C ---------- 0,8518
- Viscosidade, cSt, 100 F ---------- 14,23
- Viscosidade SSU, 100 F ---------- 74,4
- Acidez/neutralidade ---------- Neutro
- Fluorescência ---------- Ausente
- Ponto de Fulgor, COC, °C ---------- 162
- Ponto de Fluidez, °C ---------- -7

O óleo e o agitador devem ser colocados no béquer com antecedência de pelo menos 24 horas ao ensaio, para que qualquer bolha de ar presente seja eliminada. Os béqueres deverão ser cobertos com uma película de PVC, a fim de evitar contaminação por particulados durante o repouso.

O procedimento de medição da DTG no *Malvern* é feito do seguinte modo:

1. *Background* do aparelho com óleo mineral puro;
2. Colocar as amostras nos béqueres em agitação com velocidade do agitador ajustada de modo a evitar a inserção de bolhas de ar na amostra;
3. A amostra deve ser inserida, lentamente, no funil instalado sobre o *Malvern*, também a fim de evitar a formação de bolhas;
4. A válvula de esfera de controle do escoamento deve ser aberta, e a vazão regulada pelo estrangulador a uma taxa de 15 a 20 mL/min no vaso de descarte;

5. Devem ser feitas leituras de inspeção (comando *inspect* do *software* do aparelho). Quando o valor de obscurescência lida na célula for superior a 10%, pode se iniciar a leitura.
6. Devem ser feitas tantas leituras quantas forem possíveis, ainda obedecendo ao limite inferior de obscurescência de 10%. Quando o nível de fluido de ensaio estiver próximo do fim nas mangueiras, deve ser inserida no funil a quantidade necessária de óleo mineral puro, a fim de efetuar a limpeza da amostra através da tubulação e da célula de medição. A comprovação desta limpeza é feita observando a obscurescência lida pelo aparelho, que deve chegar ao nível zero;
7. O tratamento dos dados lidos consiste na execução de uma média de todas as leituras da amostra. Para isto, as leituras são comparadas entre si, para verificar se há alguma leitura muito discrepante (por exemplo, a passagem de uma bolha ou particulado modifica muito uma leitura), para que seja descartada.

A ocorrência de inconsistências em qualquer momento do experimento é refletida durante a análise dos resultados deste experimento e pode modificar resultado e suas interpretações. Deve-se, portanto, executar todo o experimento de forma bastante cuidadosa e criteriosa.

Devido às altas viscosidades dos óleos empregados e o alto fator de diluição da amostra, o risco de descaracterização da mesma por coalescência é minorado, sendo esse o método e o equipamento referências neste tipo de medição.

As medições de distribuição de tamanho de gotas de água em óleo realizadas de forma *at-line*, foram realizadas utilizando o equipamento Insitec da Malvern Instruments, Figura 18. Da mesma forma que ocorre com o medidor *off-line*, inicialmente deve-se fazer um *background* do equipamento com óleo mineral puro.

Inicialmente, foram testadas medições direcionando parte do fluido de teste diretamente para a célula de medição. A grande concentração de gotas, no entanto, inviabilizou a possibilidade de sucesso por aumentar demais a

obscurescência na lente. Diferentes espaçamentos de passagem de amostra na célula de leitura (*gaps*) foram testados sem sucesso.

Figura 18 - Insitec, da Malvern Instruments.

Para viabilizar a utilização da medição *at-line*, um sistema de diluição foi pensado e montado. O sistema de diluição contou com a utilização de um aparato desenvolvido pela Malvern Instruments. Este aparato (patente US 7,418,881 , 2008) é um diluidor multi-estágio, sem partes móveis, que se utiliza da passagem do diluente para aspirar a amostra e diluí-la em um venturi co-axial. Ele pode ser utilizado com ou sem a presença de uma bomba de alimentação de diluente. A Figura 19 mostra um desenho esquemático do aparato (Silva et al., 2017).

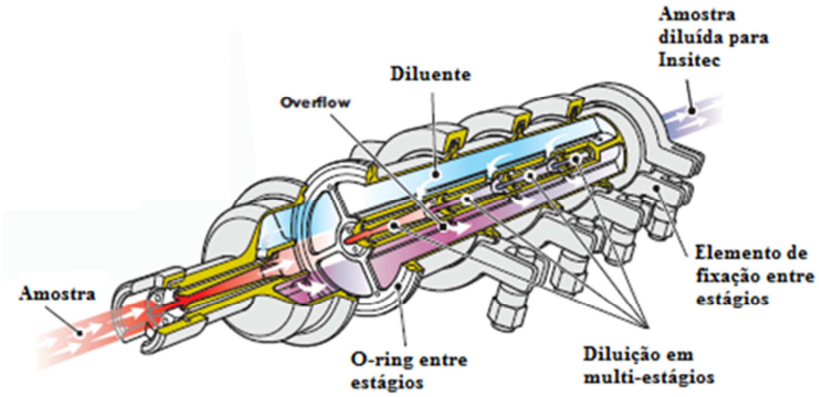


Figura 19 - Aparato diluidor da Malvern. Adaptado de brochura comercial- INSITEC LIQUID STREAM SIZE ANALYZER (2017).

Neste trabalho, o diluente foi bombeado até o aparato de diluição por uma bomba de cavidades progressivas, dotada de inversor de frequência, operando na menor frequência possível (15Hz). A vazão obtida nesta frequência foi medida por um medidor coriolis. Inicialmente, uma verificação da vazão versus contrapressão na linha foi realizada. Esta prática foi executada de modo a verificar se a bomba era capaz de manter a vazão independente da contrapressão enfrentada. Esta constatação pôde ser comprovada (Figura 20) (Silva *et al.*, 2017).

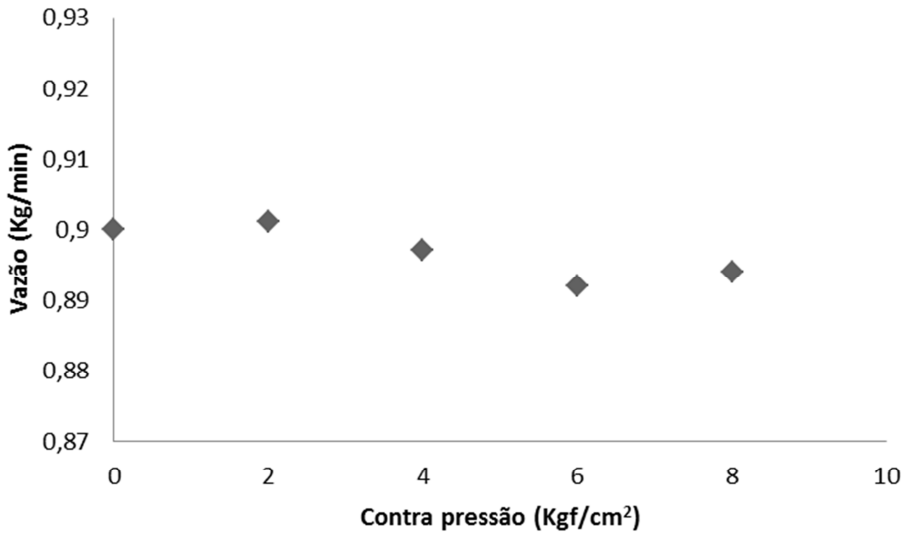


Figura 20 - Vazão fornecida pela bomba de diluente, a 15 Hz, *versus* pressão do sistema.

De posse da vazão gerada pela bomba, ao se instalar uma válvula agulha para controle do descarte de amostra, indiretamente se pôde controlar a vazão de amostra para o Insitec por simples subtração. Ao colocar essa válvula na linha de descarte garantiu-se que a amostra a ser diluída não foi descaracterizada. Avaliou-se, então, a influência da diluição da amostra na transmitância de sinal do Insitec. A Figura 21 mostra a influência da diluição na transmitância com amostras contendo 10% da fase dispersa (Silva et al., 2017).

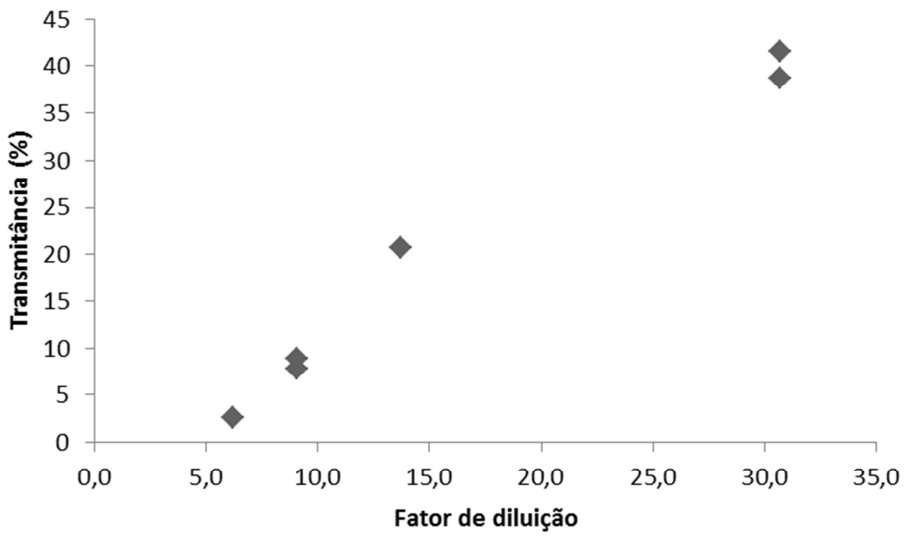


Figura 21 - Influência da diluição na transmitância do sinal no Insitec.

Uma análise da Figura 21 indica os limites de diluição necessários para uma boa amostragem, tendo em vista que a condição de 10% de concentração da fase dispersa nos experimentos seria a mais crítica. Sabendo-se da necessidade de transmitância mínima de 10%, ficou evidente que o fator de diluição durante os testes deveria ficar entre 10 e 30. Acima de 30, em termos práticos, não foi possível de se operar, por conta do limite de detecção do medidor de vazão utilizado (Silva *et al.*, 2017).

5.2.2 – Medição de Tensão Interfacial

A medição da tensão interfacial do óleo Marlim foi realizada com um tensiômetro modelo K9 da Krüss, pelo método de anel e placa (Figura 22).

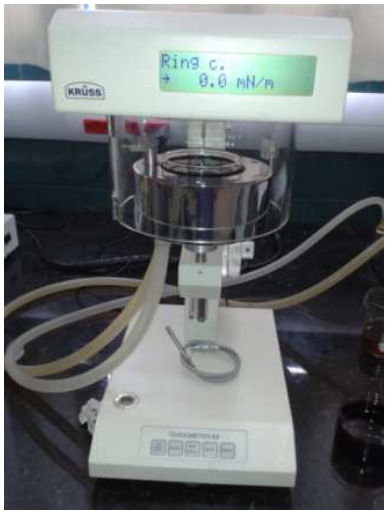


Figura 22 - Tensiômetro de anel e placa, modelo K9.

5.2.3 – Medição de Viscosidade e Massa Específica

As análises de viscosidade e massa específica foram realizadas utilizando-se o viscosímetro Stabinger, modelo SVM300 da Anton Paar (Figura 23).

Figura 23 - Viscosímetro Stabinger SVM 3000 da Anton Paar.

5.2.4 – Medição de Teor de Água em Óleo

As medições de teor de água em óleo foram importantes para garantir que o óleo reutilizado encontrava-se sempre com teores abaixo de 0,5%, um bom indicativo de que o tratamento do óleo com a centrífuga foi efetivo. Na maioria dos pontos executados, que serão descritos em seção subsequente, o teor de água em óleo não foi superior a 0,3%.

O método utilizado para tal medida foi a titulação potenciométrica pelo método de Karl Fischer, e o equipamento utilizado foi o KF Titrino Plus 870 da Methron, apresentado na Figura 24.

Figura 24 - KF Titrino Plus 870 da Methron.

5.3. Singularidade da Seção de Testes

Instalada na Seção de testes, indicadas no fluxograma da Figura 16, está uma singularidade construída de forma a mimetizar diferentes tipos de válvulas. Este dispositivo, representado na Figura 25, é um canal de seção transversal quadrada, com 5 mm de lado, e 200 mm de comprimento. Possui trechos cônicos em suas extremidades para promover a transformação da seção quadrada para circular, visando minimizar perdas de carga e zonas de recirculação do escoamento. A seção quadrada foi escolhida, para facilitar a fabricação do dispositivo. Maiores detalhes da singularidade de testes podem ser visualizados nos desenhos do Anexo A.

Para produzir a queda de pressão, na parte central deste duto, existem três gavetas móveis que podem ser posicionadas de forma a obstruir o canal em diferentes configurações. As três gavetas podem ter sua abertura variando de 0 a 5 mm e a posição de abertura é indicada pela medida de deslocamento feita por um relógio comparador (incerteza estimada de 0,01 mm), acoplado a cada uma das gavetas. Uma análise da perda de carga no trecho entre o transmissor de pressão e as hastes do dispositivo revelou que, no caso onde houve maior perda de carga, esta foi de aproximadamente 0,1 bar, não sendo significativa diante das quedas de pressão aplicadas nos experimentos.

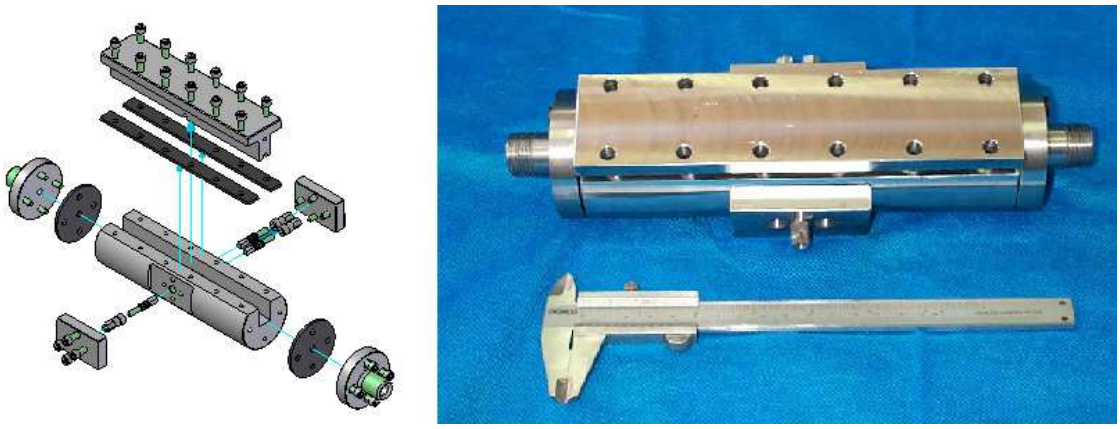


Figura 25 - Vista explodida da seção de testes (à esquerda) e da seção de testes montada (à direita).

Através do ajuste do avanço da haste central, pretendeu-se simular a passagem do fluido por uma válvula globo, em diferentes aberturas, quando se tem as duas hastes contíguas estacionadas em um ponto intermediário arbitrado da seção (fechado 3 mm) e a haste central oposta excursionando, e uma válvula gaveta, quando as hastes adjacentes estão repousadas na sede e a haste central, oposta, excursionando. Detalhes dessas configurações podem ser vistos na Figura 26.

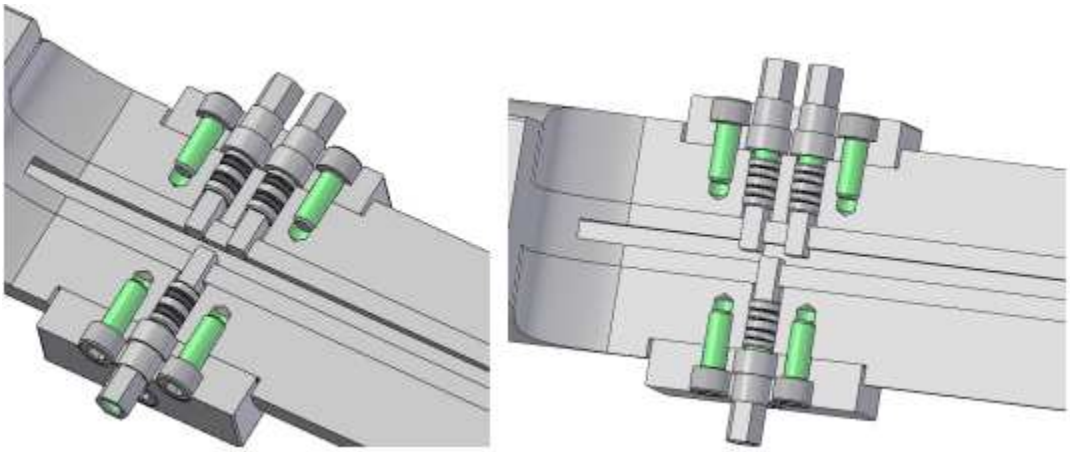


Figura 26 - Configuração gaveta (à esquerda), e globo (à direita).

5.4. Escolha do Óleo Modelo e suas Propriedades

Antes da escolha do óleo modelo utilizado, testes exploratórios foram realizados com o óleo do campo de Marlim, que é considerado um óleo pesado, segundo a classificação da ANP. Estes testes exploratórios estão descritos na seção 6.6.1 deste trabalho. Este foi o primeiro óleo a ser utilizado

durante o desenvolvimento da tese. Sua caracterização quanto à viscosidade, densidade e tensão interfacial foi realizada antes do planejamento desses testes. Os equipamentos descritos anteriormente foram utilizados para realização dessa caracterização, apresentadas nas Figuras 27 e 28, e na Tabela 6.

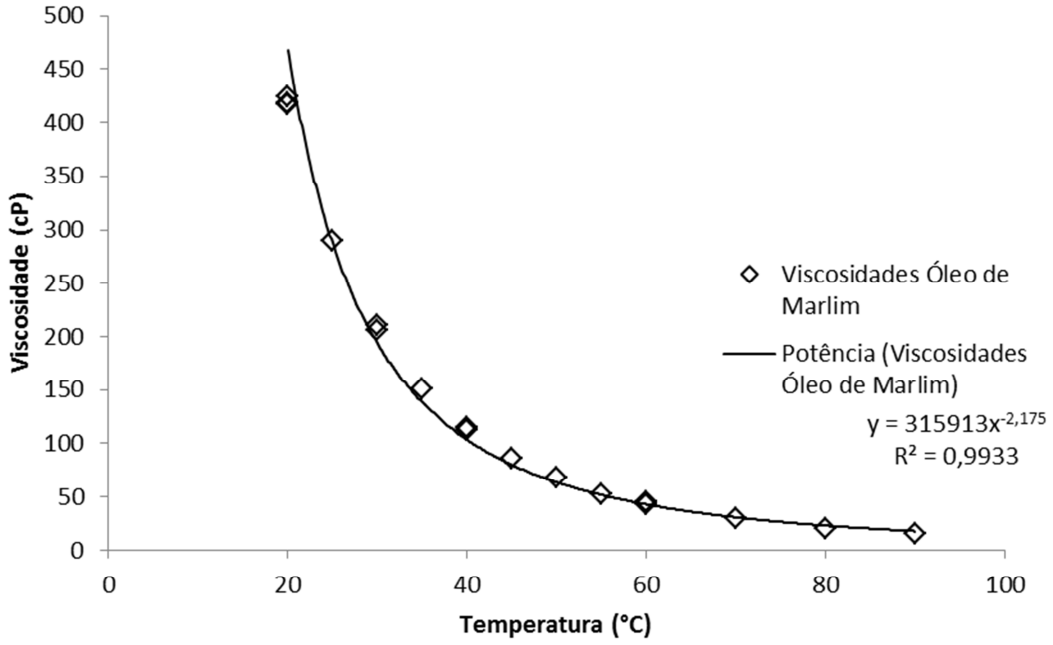


Figura 27 – Viscosidade Vs Temperatura do Óleo Marlim.

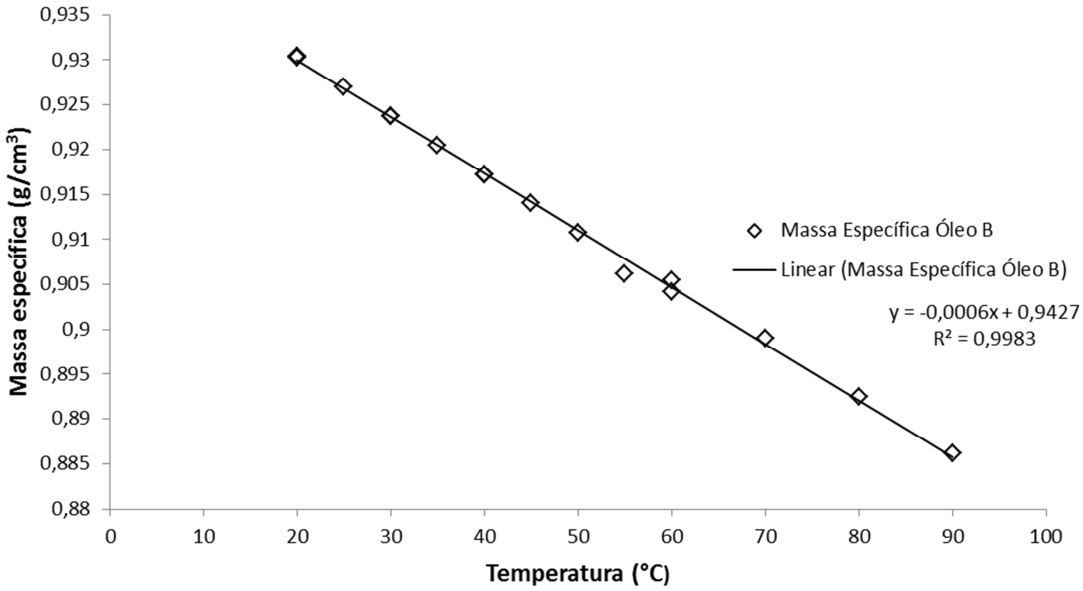


Figura 28 – Massa Específica do Óleo Marlim Vs Temperatura.

Tabela 6- Tensão interfacial do óleo Marlim.

Marlim	
Tensão interfacial (mN/m)	Temperatura (°C)
25,52	30
24,88	50

Tendo encerrado os ensaios exploratórios, foi decidido que a continuidade do desenvolvimento dependeria da utilização de um fluido cujas características físico-químicas pudessem ser mais bem controladas. Desta forma, iniciou-se uma busca por um óleo modelo que tivesse características similares de estabilidade da dispersão com petróleos crus. A primeira tentativa de óleo modelo foi feita com um óleo básico lubrificante (Neutro Leve). Foram realizados ensaios iniciais de estabilidade da dispersão desse óleo em comparação com o óleo de Marlim.

O procedimento para realização dos ensaios de estabilidade da dispersão fixava a velocidade de rotação de um *mixer* IKA em um béquer, onde 200ml do óleo a ser testado estava presente e mantido à temperatura alvo, para que todas as amostras estivessem na mesma viscosidade. 200 ml de água aquecida, à mesma temperatura do ensaio, era adicionada, lentamente. A mistura com BSW de 50% ficava sendo agitada (mantida a temperatura) até que os diâmetros médios de gotas da dispersão tendessem a estabilidade. Após essa ocorrência, a dispersão era vertida para 3 provetas graduadas de 100ml e iniciava-se o cronômetro para verificação da evolução da desestabilização da dispersão, pela separação de fases.

Os primeiros resultados comparativos entre o óleo de Marlim e o óleo Neutro Leve puro monstraram comportamentos muito distintos entre os óleos. A dispersão de Neutro Leve se mostrou completamente instável e a separação de fases ocorria de modo imediato. Numa tentativa de transferir compostos pesados do óleo de Marlim para o Neutro Leve, diferentes dosagens de Marlim

em Neutro leve foram testadas, sendo o máximo de 5% (em massa) de Marlim em Neutro Leve.

A Figura 29 mostra fotografias dos resultados desses testes de estabilidade de dispersão. A adição de percentuais de Marlim em Neutro Leve geraram grandes problemas de emulsão de interface, que se mostrou estável por dias. Por outro lado, pequenas quantidades de Marlim, abaixo de 0,5%, além de apresentarem emulsão de interface, não demonstraram cinética de desestabilização da dispersão similar à dispersão do óleo de Marlim.

A inviabilidade da utilização do óleo lubrificante Neutro Leve levou a uma nova pesquisa de possível óleo mineral. Pela similaridade com o óleo USP, utilizado na diluição das amostras para a análise do Malvern, um óleo mineral similar foi testado. Foi escolhido o EmcaPlus 200, cujas propriedades físico-químicas estão apresentadas na Tabela 7. A Tabela 8 traz as propriedades do EmcaPlus em função da temperatura

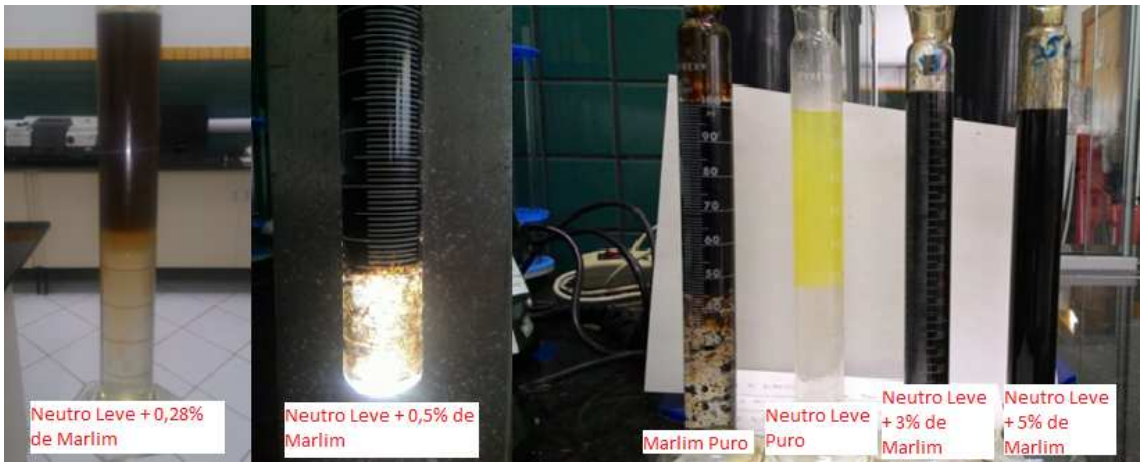


Figura 29 - Testes de estabilidade de dispersão com Marlim, Neutro Leve e mistura Marlim e Neutro Leve.

Tabela 7 - Propriedades física do EmcaPlus a 20°C.

	Viscosidade (mPA.s)	Massa específica (Kg/m³)	Tensão Superficial (mN/m)
EmcaPlus 200	94,5	865,6	40,4

Tabela 8 - Propriedades físicas do óleo EmcaPlus 200 em função da temperatura

Temperatura (°C)	Viscosidade		Densidade
	Dinâmica (mPA.s)	Cinemática (mm^2/s)	ρ (g/cm^3)
20,00	94,54	109,22	0,866
30,00	53,63	62,40	0,860
40,00	32,86	38,51	0,853
45,00	26,30	30,76	0,850
50,00	21,49	25,36	0,847
60,00	14,81	17,62	0,841
65,00	12,50	14,91	0,838
70,00	10,67	12,78	0,835
80,00	7,98	9,64	0,828

A utilização do óleo mineral (EmcaPlus 200) foi planejada em conjunto com um tensoativo não-iônico, que pudesse estabilizar a emulsão gerada, de forma a que ensaios de estabilidade do óleo mineral dopado com esse tensoativo se assemelhasse aos ensaios de estabilidade de um óleo cru. Foi escolhido um tensoativo de baixo HLB (balanço hidrofílico – lipofílico) que, além da função mencionada anteriormente, dava controlabilidade sobre as tensões interfaciais (óleo – água) a serem experimentadas. O tensoativo comercial escolhido foi o monooleato de sorbitan (Alkest O 80 M), de HLB calculado igual a 4,3.

Mais uma vez, o óleo cru utilizado para comparação da curva de estabilidade foi um óleo de Marlim, óleo pesado, segundo classificação ANP (Agência Nacional de Petróleo). O procedimento de estabilização foi o mesmo descrito anteriormente com rotação fixada em 300rpm. A temperatura foi mantida fixa, de modo a igualar a viscosidade do óleo de Marlim com o óleo mineral a temperatura ambiente. A Figura 30 mostra a curva de estabilidade do óleo de Marlim, com sua devida réplica.

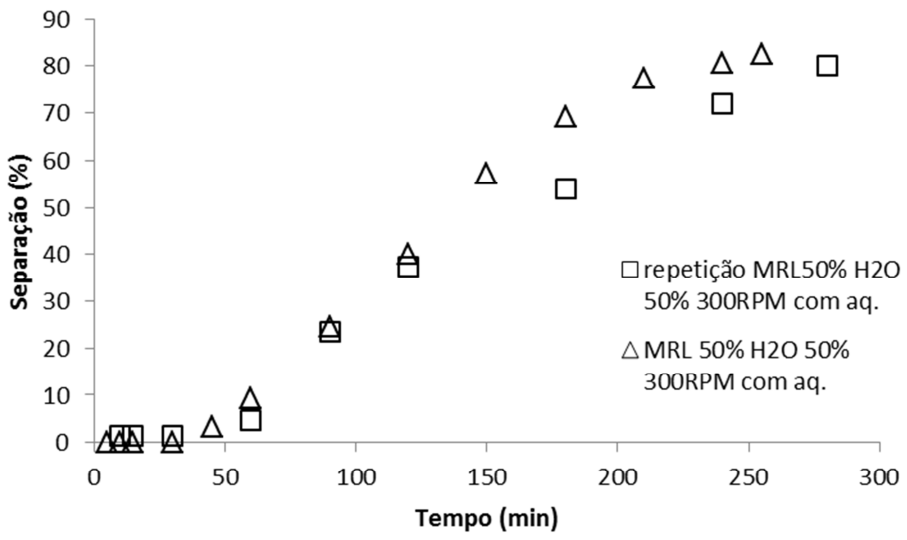


Figura 30 - Estabilidade da dispersão do óleo de Marlim, 50%/50% de concentração das fases.

Para garantir que a adição do tensoativo não interferiria na viscosidade do óleo mineral, foi verificado o comportamento dessa propriedade em função da concentração do tensoativo. A Figura 31 mostra os resultados obtidos em pelo menos três réplicas para cada dosagem. Observa-se que o tensoativo não tem qualquer influência na viscosidade do óleo, mesmo em altas dosagens.

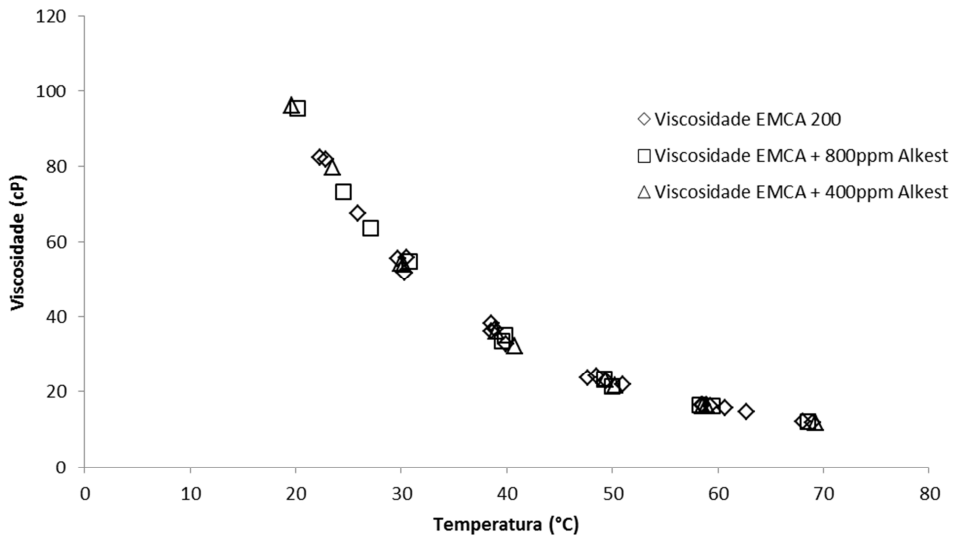


Figura 31 - Variação da viscosidade do óleo mineral EmcaPlus 200 em função da dosagem do tensoativo Alkest O80M.

Sabendo-se que o tensoativo não alteraria a viscosidade do óleo, verificou-se a influência do mesmo na tensão interfacial do óleo. A Figura 32

mostra a queda de tensão interfacial do óleo mineral em função da dosagem do produto tensoativo. Foi constatado que, a partir de 800ppm de tensoativo, a concentração micelar crítica já havia sido atingida.

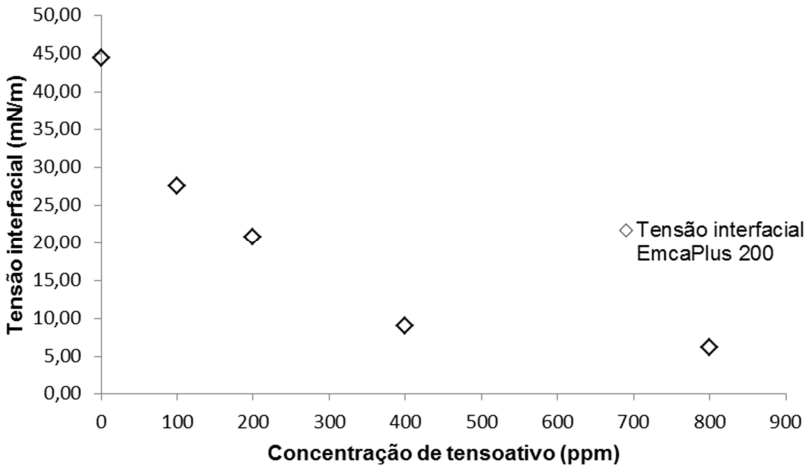


Figura 32 - Tensão interfacial do óleo mineral em função da concentração de tensoativo.

Ensaios de estabilidade do EmcaPlus a diferentes concentrações de tensoativo foram realizados. A Figura 33 mostra os resultados obtidos. Ficou evidente que a dopagem do óleo com o tensoativo deixou a emulsão mais estável, indicando a viabilidade dessa estratégia para testes de quebra de gotas na singularidade e com total controle das propriedades físicas do óleo.

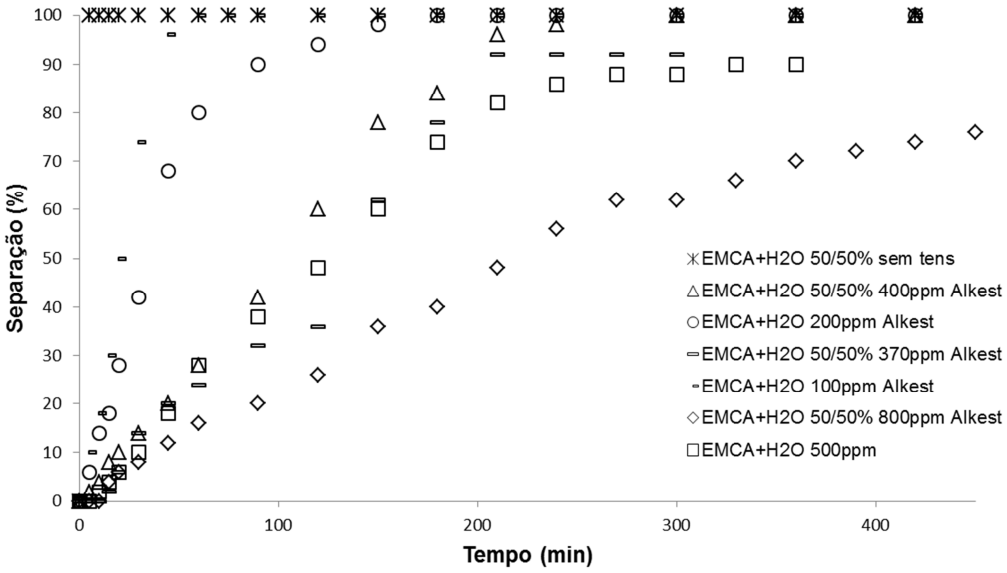


Figura 33 - Ensaios de estabilidade do óleo mineral dopado com diferentes concentrações de tensoativo.

Para efeito de comparação, a Figura 34 mostra os testes de estabilidade da dispersão de água em óleo de Marlim, juntamente com os ensaios de estabilidade da dispersão de água em óleo mineral, contendo tensoativo, em um mesmo gráfico.

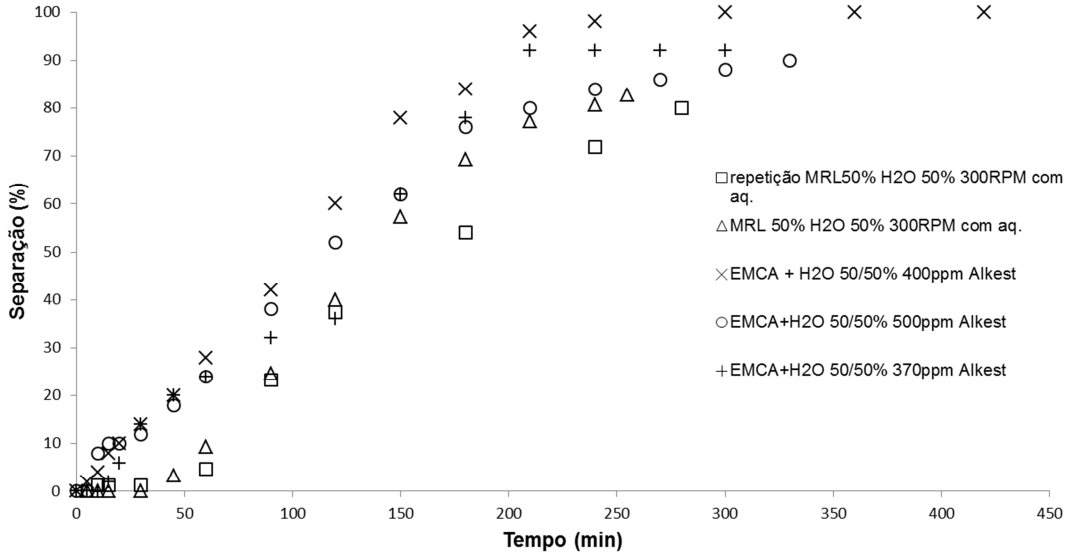


Figura 34 - Comparativo entre curvas de estabilização do óleo de Marlim e óleo mineral dopado com tensoativo.

A tensão interfacial foi quantificada a diferentes temperaturas, uma vez que essa propriedade é dependente da temperatura. Esse estudo foi realizado para se saber, de antemão, a dosagem necessária provável à temperatura desejada para se atingir a tensão interfacial desejada para os experimentos. Esse procedimento teve o intuito de diminuir o tempo de estabilização do óleo previamente à execução dos testes. A Figura 35 mostra o gráfico das médias de medições de tensão interfacial, em função da temperatura e a diferentes dosagens de tensoativo.

A partir da Figura 35 pode-se perceber que, dadas às temperaturas previstas de teste (função da viscosidade), e dos níveis de tensão interfacial escolhidos para investigação, a dosagem de tensoativo durante os experimentos variou entre 100 e 300ppm.

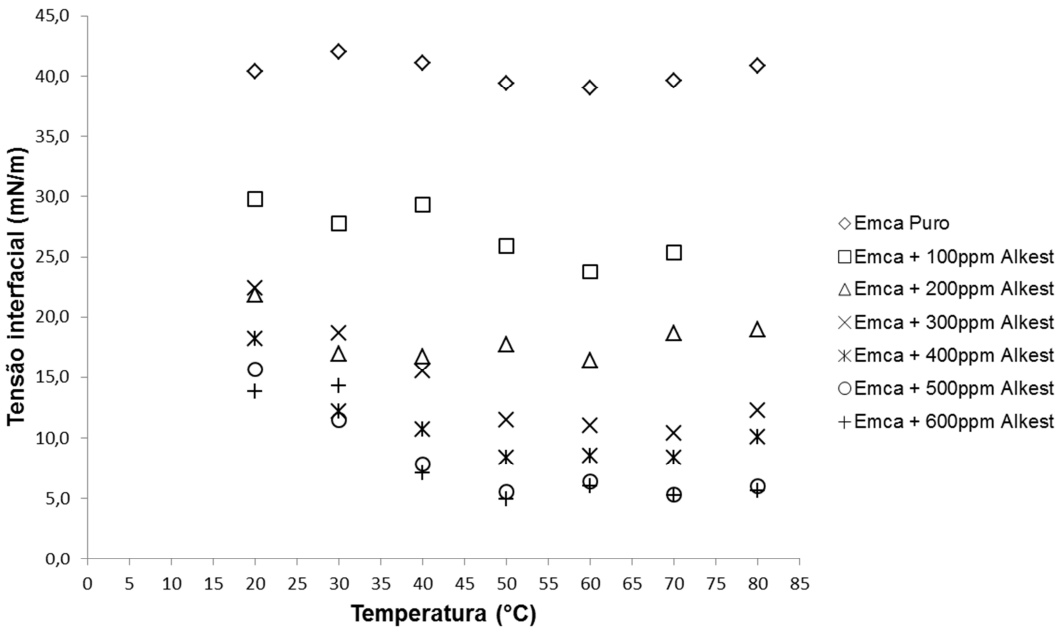


Figura 35 - Tensão interfacial em função da temperatura, do óleo mineral Emcaplus 200 com várias dosagens de tensoativo.

Após todos os ensaios anteriormente descritos, o óleo mineral EmcaPlus 200, aliado a adição do tensoativo Alkest O 80 M, foi considerado adequado para a utilização nos experimentos de avaliação de DTG, frente a quedas de pressão localizadas. Foi obtido um bom controle das propriedades físicas do óleo mineral, através do controle da temperatura e da dosagem de tensoativo.

5.5. Procedimento Experimental na Bancada de Teste

Antes de iniciar o escoamento dos fluidos pela bancada de testes, o óleo era homogeneizado, através da recirculação em vazão fixa, por um período de tempo suficiente para que um volume mínimo de duas vezes a capacidade do tanque fosse bombeado. Esta atividade visou garantir que não houvesse segregação de componentes de diferentes características do óleo. Uma amostra deste óleo era retirada e foram realizadas análises de viscosidade, densidade, teor de água e tensão interfacial. Estas análises tinham a função de verificar a homogeneidade e identidade do óleo e evitar erros experimentais oriundos da contaminação do óleo com água.

Após a homogeneização do óleo, as bombas eram ligadas na frequência desejada para se obter a vazão requerida. Uma curva de calibração da

frequência versus vazão a diferentes pressões de operação foi levantada previamente, com o objetivo de se minimizar o tempo de ajuste de vazão.

O tempo necessário para início de obtenção dos pontos experimentais restringiu-se, portanto, ao tempo de estabilização da temperatura pelos aquecedores. Uma vez estabilizada a temperatura, e dado o devido ΔP na válvula de mistura de forma a se obter d_v 0.5 de entrada próximo ao definido para os testes, iniciava-se a obtenção dos dados do ponto experimental. Neste momento, procedia-se com a coleta de amostra da entrada do ponto experimental, através do ponto de amostragem previamente explicitado, ou, quando instalado o equipamento de medição *at-line*, tinha-se a aquisição dos dados de distribuição de tamanho de gotas de entrada.

Tão logo era coletada a amostra/dados de entrada, fazia-se com que o fluxo passasse pela singularidade e ajustavam-se as gavetas da singularidade para a geometria escolhida, de forma a se obter a queda de pressão (ΔP) planejado para o ponto experimental. Após um período mínimo de 2 minutos com condições estáveis, coletava-se a amostra/dados de saída do referido ponto experimental.

Findada a coleta da amostra, nova condição de teste era buscada e o procedimento repetido a partir do ajuste das frequências das bombas. Todo o rejeito dos testes era coletado em tanques que permaneciam em repouso durante o período noturno, sendo descartada a água separada no dia seguinte. O óleo era reaproveitado, após o tratamento com a centrífuga *dewatering*. O tratamento era considerado efetivo quando os teores de água em óleo, análisados em laboratório, se apresentavam abaixo de 0,5%.

5.6. Planejamento dos Experimentos

Segundo Montgomery (2001), para se realizar um bom planejamento de experimentos, algumas diretrizes devem ser observadas. Primeiramente, deve-se reconhecer e entender o problema a ser estudado. Baseado em conhecimentos prévios sobre o assunto, deve-se escolher os fatores a serem investigados, em quantos níveis serão feitos os experimentos e o intervalo de interesse na investigação. O próximo passo deve ser a escolha da variável (ou

variáveis) de resposta. Todas as etapas mencionadas anteriormente devem ser realizadas numa fase chamada de pré-planejamento do experimento.

Após o pré-planejamento, deve-se escolher o tipo de *design* experimental. Essa escolha deve levar em conta o número de experimentos que sejam razoáveis de se realizar (incluindo suas réplicas). Após essa etapa, os experimentos devem ser feitos de forma cuidadosa e, de preferência, em sequência aleatória.

A análise estatística dos resultados é o sexto passo no planejamento e execução dos experimentos. A utilização de *softwares* facilita sua execução. Nessa fase, modelos empíricos podem ser desenvolvidos, advindos das relações entre respostas e fatores. É importante realizar uma análise dos resíduos e avaliação da validade do modelo. A última etapa envolve a avaliação das conclusões e recomendações para a continuidade dos estudos.

5.6.1. Experimentos Exploratórios (Óleo de Marlim)

Após análise dos resultados obtidos no estudo prévio de quebra de gotas realizado com o óleo de Albacora (Silva *et al.,* 2005), a decisão por estudar um tipo de óleo nacional diferente foi tomada. Pretendia-se, inicialmente, realizar os primeiros estudos relacionando resultados do óleo de Albacora com experimentos realizados com o óleo de Marlim.

Desejava-se, portanto, replicar os experimentos anteriores em uma mesma condição de viscosidade, esperando-se uma diferença nos resultados explicável pela mudança das características do óleo. Esta abordagem foi abandonada visto que, para se chegar à viscosidade do óleo de Albacora a 60°C (utilizada em todos os testes prévios), seria necessário aquecer o óleo de Marlim a aproximadamente 90°C.

A análise do ponto de fulgor do óleo de Marlim teve como resultado que o referido óleo liberava vapores em concentrações suficientes para inflamabilidade na ordem de 73°C. Por motivos de segurança, a primeira estratégia pensada foi descartada. Decidiu-se por utilizar os resultados dos ensaios prévios apenas como ponto de partida para o planejamento de experimento exploratório a ser desenvolvido.

Baseado nos resultados dos experimentos realizados com o óleo de Albacora (Silva *et al.,* 2005), foi possível notar os fatores que mais influenciam na quebra de gotas. Da mesma forma, pôde-se perceber quais fatores têm pouca influência nesse fenômeno. Alguns fatores não foram incluídos naquele estudo que, segundo a literatura, devem ser preponderantes na quebra de gotas.

A distribuição de tamanho de gotas em uma emulsão depende de fatores como tensão interfacial, tensões de cisalhamento, natureza de agentes emulsificantes, presença de sólidos e propriedades do óleo e da água (Kokal, 2002).

Os fatores que neste estudo foram abordados são característicos de diferentes tipos de óleo. São eles: viscosidade do óleo e tensão interfacial. Além destes, foram avaliados também a perda de carga localizada, a concentração de fase dispersa e a geometria da singularidade. Numa primeira abordagem, a influência da temperatura, como forma de alterar as propriedades do óleo, foi verificada através de experimentos realizados com planejamento fatorial completo, com fatores variando em dois níveis, com utilização de pontos centrais (seis pontos centrais no total). Foram previstas três réplicas, por ponto, para esse estudo exploratório.

Tendo como base as conclusões do estudo prévio, decidiu-se por utilizar como fatores: ΔP pela singularidade, por ter sido fator preponderante (Silva *et al.*, 2005); temperatura, promovendo a alteração das propriedades do fluido; e concentração de água no óleo (óleo como fase contínua), dentro da faixa onde a coalescência não se mostrou tão influente (até 12% de água em óleo, para óleo Albacora). A geometria da singularidade foi configurada como uma válvula Globo. A Tabela 9 mostra a matriz de testes planejada, sem suas respectivas réplicas, de forma aleatorizada.

Pretendeu-se, com os experimentos exploratórios, investigar a influência da temperatura na quebra de gotas, levando-se em conta as propriedades por ela alteradas. Buscou-se, com isso, a indicação de que diferentes tipos de óleo resultam em diferentes sistemas dispersos quando submetidos às mesmas perdas de carga localizadas e, consequentemente, que isso deve ser levado

em conta no dimensionamento dos equipamentos de processamento primário de petróleo.

Tabela 9 - Matriz de testes exploratórios.

Pontos aleatorizados	Temperatura	ΔPressão	Concentração
6	1	-1	1
3	-1	1	-1
9	0	0	0
10	0	0	0
7	-1	1	1
8	1	1	1
1	-1	-1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
2	1	-1	-1

Legenda

Nível	-1	0	1
Temperatura (°C) Viscosidade (cP)	30 (210)	45 (85)	60 (42)
ΔP Singu. (bar)	3	6	9
Concentração a/o (%)	5	7,50	10

5.6.2 Resultados e Discussão (Experimentos Exploratórios)

Os experimentos exploratórios foram executados de acordo com o planejado, de forma randômica e com criterioso cuidado, desde o ajuste do banco, passando pela coleta de amostras, até as análises laboratoriais (apenas utilizando o Malvern Mastersizer micro). Os resultados brutos obtidos estão apresentados na Tabela 10, de forma agrupada entre as réplicas, para melhor visualização.

Tabela 10 - Resultados brutos dos experimentos exploratórios

Ponto	Amostra	d (0.1) (μm)	d (0.5) (μm)	d (0.9) (μm)	d (4.3) (μm)	d (3.2) (μm)	PA (0.1) (%)	PA (0,5) (%)	PA MEDIO (0.1 e 0.5) (%)	PA (0.9) (%)	PA (3.2) (%)	
1	entrada	12,00	48,15	120,31	57,19	26,26						Ponto 0, 0, 0. viscosidade = 82cP; dP = 6bar; Concentração = 7,5%
	saida	6,36	20,39	49,08	24,71	13,5	47,00	57,65	52,33	59,21	48,59	
5	entrada	16,87	49,17	92,68	52,27	35,33						
	saida	6,46	21,31	57,08	27,11	13,47	61,71	56,66	59,18	38,41	61,87	
13	entrada	13,75	45,51	86,19	48,07	26,11						
	saida	8,82	23,71	62,14	30,13	16,89	35,85	47,90	41,88	27,90	35,31	
14	entrada	13,91	44,88	85,04	47,53	26,37						
	saida	9,42	29,76	72,76	35,96	18,91	32,28	33,69	32,98	14,44	28,29	
23	entrada	11,76	42,61	88,18	46,86	23,7						
	saida	7,91	24,83	68,9	35,41	16,06	32,74	41,73	37,23	21,86	32,24	
24	entrada	13,71	47,32	113,4	57,67	27,51						
	saida	7,68	28,73	89,05	41,33	15,41	43,98	39,29	41,63	21,47	43,98	
8	entrada	17	41,48	89,34	47,85	30,5						Ponto 1, -1, -1. viscosidade = 42cP; dP = 3bar; Concentração = 5%
	saida	8,96	19,79	41,32	23,81	15,6	47,29	52,29	49,79	53,75	48,85	
20	entrada	19,5	47,41	93,73	52,63	34,38						
	saida	11,47	25,19	53,08	29,49	19,62	41,18	46,87	44,02	43,37	42,93	
21	entrada	20,52	45,79	90,66	51,15	34,37						
	saida	12,2	26,61	53,63	33,3	20,1	40,55	41,89	41,22	40,84	41,52	
10	entrada	16,86	41,67	89,27	48,36	30,33						Ponto 1, -1, 1. viscosidade = 42cP; dP = 3bar; Concentração = 10%
	saida	9,74	22,94	51,52	29,1	17,46	42,23	44,95	43,59	42,29	42,43	
11	entrada	16,44	39,28	84,7	46,14	29,1						
	saida	9,96	22,74	49,63	28,75	17,7	39,42	42,11	40,76	41,40	39,18	
29	entrada	16,31	40,8	84,89	46,46	29,85						
	saida	8,78	20,41	45,63	27,2	14,3	46,17	49,98	48,07	46,25	52,09	
2	entrada	17,02	40,49	85,87	46,61	30,97						Ponto 1, 1, -1. viscosidade = 42cP; dP = 9bar; Concentração = 5%
	saida	4,19	9,83	24,13	13,17	7,4	75,38	75,72	75,55	71,90	76,11	
18	entrada	19,8	45,81	93,75	52,07	34,1						
	saida	4,65	11,33	28,55	16,26	8,96	76,52	75,27	75,89	69,55	73,72	
26	entrada	18,09	41,03	80,42	45,71	31,6						
	saida	4,94	12,1	50,42	25,7	9,93	72,69	70,51	71,60	37,30	68,58	
3	entrada	17,07	40,98	87,1	47,44	31,14						Ponto 1, 1, 1. viscosidade = 42cP; dP = 9bar; Concentração = 10%
	saida	3,68	9,01	23,55	13,28	6,65	78,44	78,01	78,23	72,96	78,64	
16	entrada	17,95	43,34	90,05	50,28	31,88						
	saida	4,3	10,99	27,34	14,59	8,22	76,04	74,64	75,34	69,64	74,22	
25	entrada	16,33	42,52	93,92	49,89	31,22						
	saida	3,69	9,07	24,19	14,34	6,95	77,40	78,67	78,04	74,24	77,74	
4	entrada	10,76	43,62	103,7	51,17	23,07						Ponto -1, -1, -1. viscosidade = 210cP; dP = 3bar; Concentração = 5%
	saida	10,42	37,43	101,87	47,43	21,44	3,16	14,19	8,68	1,76	7,07	
17	entrada	9,41	43,65	96,89	49,31	21,1						
	saida	8,69	35,06	83,32	41,66	18,78	7,65	19,68	13,67	14,01	11,00	
30	entrada	9,97	46,17	98,07	51,34	22,49						
	saida	9,27	34,77	97,54	46,83	19,65	7,02	24,69	15,86	0,54	12,63	
6	entrada	11,14	41,76	98,88	49,23	23,78						Ponto -1, -1, 1. viscosidade = 210cP; dP = 3bar; Concentração = 10%
	saida	10,64	34,39	92,61	43,96	21,34	4,49	17,65	11,07	6,34	10,26	
19	entrada	10,55	43,72	97,92	49,88	22,17						
	saida	8,87	36,42	106,28	49,81	19,24	15,92	16,70	16,31	-8,54	13,22	
28	entrada	12,07	42,33	88,13	47,07	23,93						
	saida	9,98	34,86	92,49	44,39	20,36	17,32	17,65	17,48	-4,95	14,92	
7	entrada	10,92	39,95	92,54	46,85	22,65						Ponto -1, 1, -1. viscosidade = 210cP; dP = 9bar; Concentração = 5%
	saida	8,27	31,29	81,23	38,82	18,19	24,27	21,68	22,97	12,22	19,69	
12	entrada	8,5	42,46	89,45	46,27	19,04						
	saida	6,62	26,56	70,92	33,28	14,97	22,12	37,45	29,78	20,72	21,38	
22	entrada	9,22	46,29	114,64	55,35	21,17						
	saida	7,21	35,29	68,9	43,62	16,39	21,80	23,76	22,78	39,90	22,58	
9	entrada	11,6	50,77	117,58	58,54	25,39						Ponto -1, 1, 1. viscosidade = 210cP; dP = 9bar; Concentração = 10%
	saida	6,32	30,79	94,77	41,99	15,44	45,52	39,35	42,44	19,40	39,19	
15	entrada	9,24	41,8	84,31	44,56	20,79						
	saida	6,49	28,95	80,07	36.84	15,18	29,76	30,74	30,25	5,03	26,98	
27	entrada	11,9	43,41	91,06	48,57	24,32						
	saida	7,04	28	82	38,26	16,05	40,84	35,50	38,17	9,95	34,00	

Os valores de diâmetros médios obtidos por análise em laboratório foram compilados. Para avaliação do efeito do escoamento nas gotas da dispersão, pela passagem através da singularidade, foi estabelecida uma

medida baseada na alteração do tamanho das gotas. Esta medida, chamada de percentual de alteração (PA), foi inicialmente descrita em Silva *et al.* (2005). Os autores do estudo anterior haviam reportado uma grande variância no percentual de alteração do $d_v0.9$, tendo optado por utilizar uma média das alterações dos $d_v0.1$ e $d_v0.5$ como fator resposta em sua análise estatística ($PA_{médio}$).

A mesma estratégia foi utilizada para as análises iniciais destes experimentos exploratórios. Utilizou-se a média dos percentuais de alteração dos d_v 0.1 e do d_v 0.5 (PA médio), como resposta para a análise das influências dos fatores. Uma análise estatística foi realizada utilizando-se o software de planejamento de experimentos Minitab. Em uma primeira análise, todos os pontos experimentais foram utilizados e todos os fatores estudados foram considerados. A análise estatística indicou que um dos pontos experimentais (ponto 5), encontrava-se com desvios de seu resíduo superior a 2,5. Com base nesta informação, uma nova análise foi realizada, retirando-se o ponto 5. A retirada do ponto 5, um ponto central, não gerou problemas para a análise, tendo em vista que haviam outros cinco pontos centrais. A Tabela 11 apresenta o novo resultado obtido.

Tabela 11 - Efeitos estimados dos fatores em PAmédio, excluindo-se o ponto 5.

Termo	Efeito	Coefic.	T	P
Constante		41,315	42,16	0,000
Temperatura	37,720	18,860	19,24	0,000
Pressão	24,210	12,105	12,35	0,000
Concentração	3,995	1,997	2,04	0,057
Temperatura*Pressão	6,990	3,495	3,57	0,002
Temperatura*Concentração	-3,002	-1,501	-1,53	0,143
Pressão*Concentração	3,322	1,661	1,69	0,107
Temperatura*Pressão*Concentração	-1,458	-0,729	-0,74	0,466

S = 4,80133
R^2 = 96,81%
R^2 (predito) = 92,96%
R^2 (ajustado) = 95,04%

Uma análise do valor-p indica que, dos fatores analisados, apenas a temperatura do óleo (atuando na viscosidade e outras propriedades do óleo) e queda de pressão (ΔP) são estatisticamente significativos. Sua interação de

segunda ordem também se mostra significativa (valor-p < 0,05). A concentração, e as interações de segunda e terceira ordem que a contém, não são estatisticamente significativas.

Este fato, corroborado pelo estudo de Silva *et al.*(2005), já era esperado nos níveis que foram testados. Segundo o estudo com o óleo de Albacora, a concentração era pouco significativa para valores abaixo de 12%, onde o efeito da coalescência provavelmente não era observado.

Da mesma forma, a grande influência da queda de pressão na alteração do tamanho de gotas observada já havia sido reportada por Silva *et al.* (2005). Tian (2007) conclui em seu estudo que um incremento na perda de carga implica em dispersões mais estáveis, ou seja, em menores diâmetros de gotas da fase dispersa.

A influência da temperatura (viscosidade e outros fatores) fica evidente nesta análise inicial e pode ser comparada quando se padronizam os efeitos e os apresentam na forma de um diagrama de Pareto, Figura 36. A linha vermelha limita os fatores estatisticamente significativos dos fatores não significativos. Termos com efeito maior que o indicado pela linha vermelha são estatisticamente significativos.

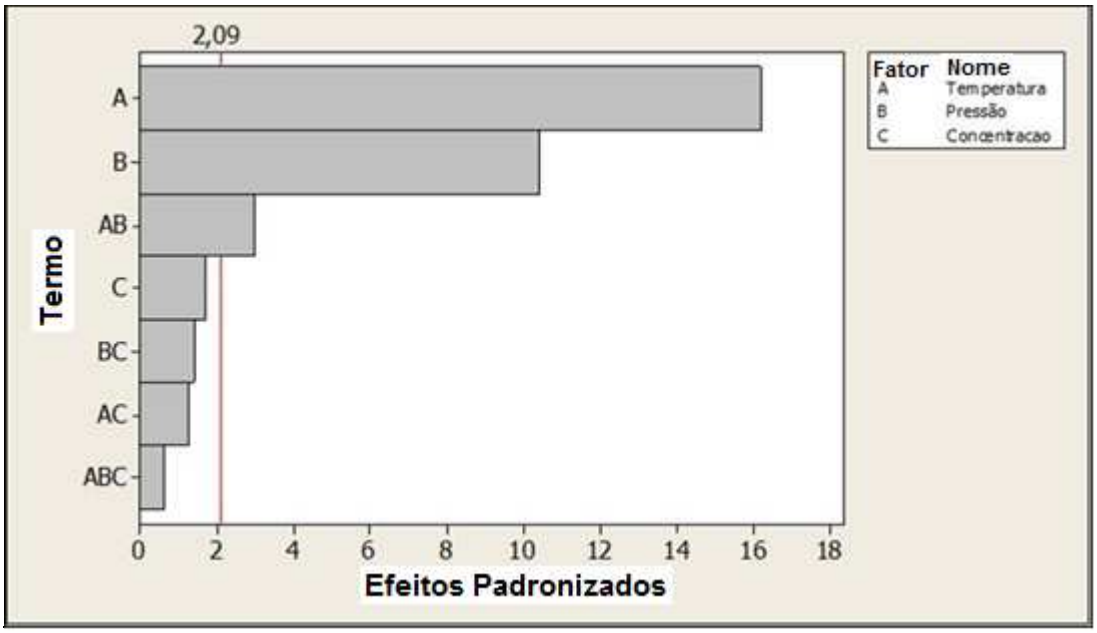


Figura 36 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados.

Baseado nessa informação, decidiu-se por retirar a concentração da análise estatística, ficando com apenas dois fatores. Percebeu-se que a retirada do fator concentração não alterou sensivelmente o resultado da análise de variância (ANOVA).

A Figura 37 demonstra a variação do PAmédio quando se varia a temperatura (viscosidade e outros fatores) e a pressão dos níveis inferiores para os superiores (do nível -1 para o +1). Fica evidente que o aumento da perda de carga gera maiores alterações no PAmédio, isto é, um alto ΔP gera gotas menores do que um ΔP mais baixo. Este fato é corroborado pelos estudos realizados por Van der Zande (1999), onde foi verificado que, quanto maior a taxa de dissipação por unidade de massa (sob a forma de queda de pressão), menor o tamanho de gotas gerado.

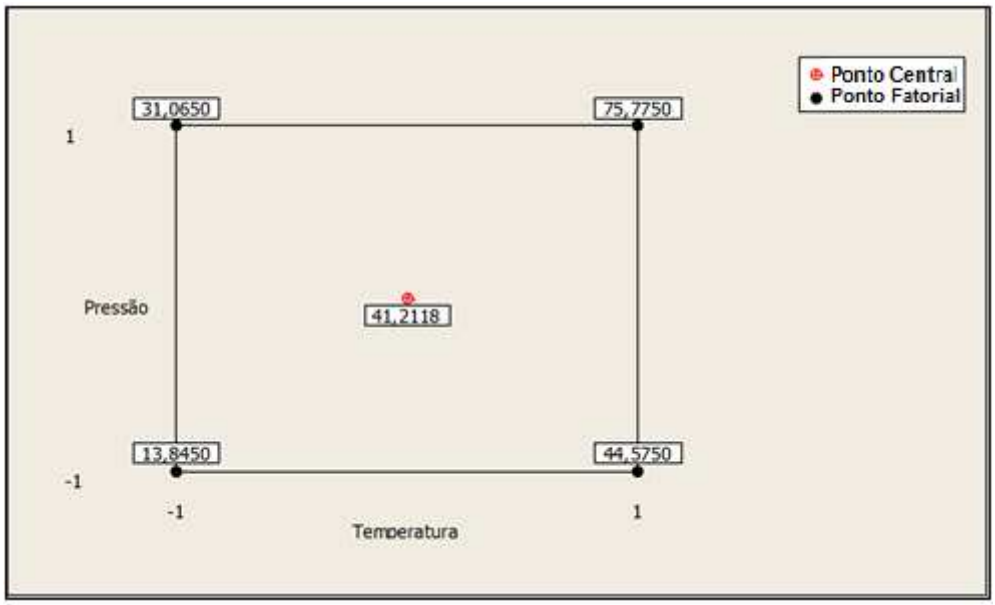


Figura 37 - Variação de PAmédio entre os níveis testados, para a temperatura e a queda de pressão.

Analisando ainda a Figura 37, pode-se perceber que a temperatura age de forma análoga, ou seja, quanto maior a temperatura da fase contínua (temperatura nível 1), maior a alteração em PAmédio. Isso nos leva a sugerir que menores viscosidades da fase contínua geram gotas mais diminutas em relação a maiores viscosidades. A equação proposta por Hinze (1955), Equação 13, não prescrevia a influência da viscosidade tanto da fase contínua quanto da fase dispersa.

Walstra (1993) também sugere que, em regimes altamente turbulentos, a viscosidade da fase contínua normalmente não tem influência sobre a quebra de gotas. Essa afirmação vai diretamente de encontro com o observado experimentalmente nesta seção. Walstra (1982, 1993), porém, diz também que, em alguns casos, a viscosidade pode ser levemente influente. Ele justifica que, caso o mecanismo de quebra esteja entre verdadeiramente inercial e verdadeiramente viscoso, o aumento da viscosidade reduz a intensidade turbulenta gerando, por conseguinte, maiores vórtices turbulentos, o que gerará maiores diâmetros de gotas.

Ao se considerar que a temperatura têm efeito significativo na quebra de gotas e que uma grande parcela deste efeito está diretamente relacionada com a viscosidade da fase contínua, pode-se inferir que as condições de escoamento na seção de testes poderiam não ser de plena turbulência, ou seja, parte da quebra de gotas estava ocorrendo devido à atuação de forças viscosas.

Esta suspeita foi confirmada pelos cálculos do número de Reynolds do orifício na seção de testes, quando restringida, que indicam que os casos dos pontos de menores viscosidades e do ponto central estariam em condição turbulenta, enquanto os casos de maior viscosidade encontram-se na região laminar. O cálculo, para efeito de simplificação, foi realizado para restrição lateral na geometria Globo, ou seja, com passagem de 1 mm, o que equivale a um β ~ 0,33 (onde $\beta = d_o/d_t$). Maiores detalhes sobre o cálculo do número de Reynolds do orifício estão alocados na seção 7.1.

Para verificar ainda a aplicabilidade dos modelos inerciais de quebra, a escala de Kolmogorov foi calculada, considerando-se o volume de dissipação de $2{,}5d_h$, conforme aplicado por van der Zande (1999A) e Fossen e Schumann (2016). A Tabela 12 traz os resultados desses cálculos. Fica evidente que d_{max} ~ dv0.9 obtido experimentalmente (Tabela 10) foi sempre inferior a $\lambda_{K,}$ (Equação 15) o que indica a não aplicabilidade dos modelos de quebra inerciais para os casos estudados.

Tabela 12 - Cálculos de dissipação de energia cinética turbulenta, Reynolds no orifício e escala de Kolmogorov.

Viscosidade (cP)	ΔP (bar)	ε (W/Kg)	λkolm (μm)	Reynolds tubo	Vol. Dissipação (m3)	Reynolds orifício
42	3	76766	190,1	317,5	3,125E-07	952,5
	9	230299	144,2	317,5	3,125E-07	952,5
85	6	150258	270,5	156,9	3,125E-07	470,7
210	3	73560	632,2	63,5	3,125E-07	190,5
	9	220679	480,4	63,5	3,125E-07	190,5

Em seu estudo, Walstra (1993) indica a supremacia do efeito da turbulência sobre o fenômeno de quebra de gotas. Nesse regime, a pressão dinâmica decorrente das flutuações de velocidade em distâncias iguais ou menores que o tamanho das gotas é o mecanismo responsável pela quebra de gotas. Sabendo-se da validade desta hipótese, de que a dissipação da energia cinética turbulenta é a principal responsável pela quebra de gotas em regime plenamente turbulento, novos experimentos deveriam ser planejados de modo a garantir regime plenamente turbulento em todos os casos. Os experimentos até esta seção apresentados parecem indicar que poderia estar havendo uma divisão entre forças viscosas e inerciais no mecanismo de quebra de gotas.

Outro fator interessante reside na razão entre as viscosidades da fase dispersa e contínua. Conforme a teoria de Taylor (1932, 1934) e o mapa descrito por Grace (1982), a quebra de gotas é favorecida quando a razão de viscosidades (R) se encontra entre 0,1 e 1. Valores acima de quatro ou muito próximos de zero impossibilitam a ocorrência do fenômeno de quebra. Os casos estudados nos testes exploratórios variaram de 0,0048 (μ_c = 210cP) a 0,024 (μ_c = 42cP). Uma avaliação dos resultados experimentais sugere que, operando a altas viscosidades de fase contínua, a quebra de gotas foi muito pequena, quase insignificante.

5.6.3. Conclusões Parciais dos Experimentos Exploratórios

Estudos exploratórios da influência de diferentes fatores na distribuição de tamanho de gotas de uma dispersão de água em óleo foram realizados. Pretendia-se verificar, inicialmente, se alguma característica físico-química (viscosidade, tensão interfacial), era significativa na quebra de gotas frente a uma perda de carga localizada (*choke*).

Verificou-se, por trabalhos anteriores, que a queda de pressão e a geometria do elemento dissipador de energia eram fatores influentes no fenômeno de quebra de gotas. A concentração da fase dispersa atua em dois patamares: quando em baixas concentrações, não se mostra influente; a altas concentrações, o efeito de coalescência torna a concentração um fator influente.

Com os resultados exploratórios, chegou-se à mesma conclusão quanto à perda de carga ser extremamente influente e quanto à concentração da fase dispersa ser pouco influente, quando em baixas concentrações (BSW<10%). Quanto maior for a perda de carga, mais pronunciada será a quebra de gotas.

Pôde-se verificar, também, que a temperatura apresentou influência significativa no fenômeno de quebra de gotas. Analogamente ao observado quanto ao ΔP localizado, quanto maior a temperatura, mais pronunciado será o fenômeno de quebra de gotas. Essa influência notada pode ser relacionada à viscosidade do fluido ou pode ter sido fruto da mudança no regime de escoamento entre o ponto médio e de maior viscosidade.

A partir desta constatação, inferiu-se que diferentes tipos de óleo poderiam apresentar diferentes respostas, quanto à quebra de gotas, quando submetidos à mesma condição operacional em campo. No entanto, novos experimentos deveriam ser realizados em condições turbulentas de escoamento na restrição e com controle total das propriedades dos fluidos.

5.6.4 Planejamento de Experimentos com Óleo Modelo

Silva *et al*. (2005) realizaram seus experimentos a uma mesma temperatura verificando apenas parâmetros como vazão, concentração da fase dispersa, ΔP e geometria da singularidade no efeito de quebra de gotas, relatando sobre forma de percentual de alteração dos diâmetros característicos à montante e à jusante da restrição.

Os estudos exploratórios tiveram o objetivo de confirmar os parâmetros que provavelmente afetariam a quebra de gotas, incluindo agora a mudança na temperatura como forma de alterar os parâmetros físico-químicos do óleo.

Por fim, baseado nos resultados obtidos nos experimentos exploratórios e a experiência advinda dos testes de Silva *et al*. (2005), um novo planejamento de experimentos foi realizado. Dessa vez, foi utilizado um óleo modelo, cuja escolha foi descrita anteriormente (seção 6.4) e cujo objetivo era de ter total controle sobre duas propriedades físicas do mesmo.

Excluindo-se o fator vazão (pouco significativo nos estudos de Silva *et al*., 2005, com o óleo de Albacora), os parâmetros a serem avaliados foram os mesmos utilizados nos estudos predecessores, incluindo o controle da viscosidade (pelo controle da temperatura) e da tensão interfacial (pela adição de tensoativo). Decidiu-se por escolher os níveis desses novos parâmetros baseado em valores factíveis com a realidade de um campo de produção e que fossem possíveis de serem atingidos experimentalmente. Os níveis dos demais parâmetros foram mantidos inalterados.

Vale pontuar que a concentração não foi uma variável que se mostrou significativa até 12% da fase dispersa no estudo com o óleo de Albacora e 10% com o óleo de Marlim. Mesmo com essa informação, por se tratar de um óleo modelo (EmcaPlus 2000), decidiu-se manter a concentração como variável, o que mais tarde se mostrou uma decisão bastante acertada.

A Tabela 13 traz o planejamento fatorial completo em dois níveis e quatro variáveis, contendo três pontos centrais por réplica. Foram realizadas ao menos três réplicas de cada experimento. Pontos experimentais considerados insatisfatórios tiveram novas réplicas realizadas. A quinta variável (geometria da singularidade) foi tratada separadamente, isto é, as quatro variáveis foram testadas contra a variável geometria (gaveta e globo), ou seja, a matriz ora apresentada foi realizada aleatoriamente tanto para a geometria gaveta quanto para a geometria globo.

Adicionalmente, ao final dos testes planejados, foram realizados ensaios de sensibilidade na condição de concentração de 5%, onde o fator preponderante nos testes anteriormente realizados foi explorado. Somente foi variada a queda de pressão em níveis intermediários com o objetivo de melhor entendimento do fenômeno. As demais variáveis foram mantidas fixas em

condição arbitrada e que pode ser observada na Tabela 14. Os testes adicionais foram realizados com ao menos três réplicas para cada geometria.

Tabela 13 - Matriz de testes planejada por geometria.

Ponto experimental	Viscosidade (cP)	Tensão int. (mN/m)	ΔP (bar)	Concentração (%)
1	12	25	3	5
2	12	25	9	5
3	12	25	3	10
4	12	25	9	10
5	26	25	3	5
6	26	25	9	5
7	26	25	3	10
8	26	25	9	10
9	19	20	6	7,5
10	19	20	6	7,5
11	19	20	6	7,5
12	12	15	3	5
13	12	15	9	5
14	12	15	3	10
15	12	15	9	10
16	26	15	3	5
17	26	15	9	5
18	26	15	3	10
19	26	15	9	10

Tabela 14 - Pontos extras em ΔP intermediário por geometria.

Ponto experimental	viscosidade (cP)	Tensão Intef. (mN/m)	ΔP (bar)	Concentração (%)
20	26	25	4,5	5
21	26	25	7,5	5

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos experimentalmente. Inicialmente, uma avaliação da zona de dissipação será apresentada. Para tal, simulações em Fluidodinâmica Computacional (CFD) foram executadas. Em seguida, uma avaliação dos tempos necessários e disponíveis para quebra na zona de dissipação será descrita.

Uma análise estatística dos pontos experimentais, com construção de modelos empíricos e baseado na teoria de Hinze, está apresentada, também, nesse capítulo. A seguir, estão apresentados os resultados experimentais de forma segregada por geometria e conjunta. Por fim, o modelo sugerido foi validado contra pontos experimentais de outro autor.

6.1 Simulações Usando CFD

Conforme explicitado em seções anteriores, os volumes/comprimentos, relatados por diversos autores, onde a dissipação da energia cinética turbulenta ocorre, apresentam grandes variações. Com o intuito de se verificar qual seria esse volume de dissipação para os casos experimentais anteriormente relatados, algumas simulações numéricas em CFD foram realizadas.

Nesta seção serão apresentados os objetivos e condições de contorno das simulações. Alguns resultados, obtidos via simulação, serão demonstrados. Todos os casos simulados estão apresentados no Anexo B, ao final desse trabalho.

6.1.1 Condições de Contorno

O objetivo da simulação em CFD foi verificar diferentes parâmetros para cada posição das hastes do dispositivo utilizado para mimetizar uma válvula, dadas às modificações das outras variáveis (viscosidade, queda de pressão, temperatura e massa específica). A partir da simulação, pôde-se estimar a zona de dissipação para fins de comparação com os dados da literatura. O fluido de trabalho considerado foi monofásico (óleo EMCAPLUS 200) com as propriedades dadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Propriedades do fluido: Óleo mineral EMCAPLUS 200

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)	Densidade (g/cm3)
65	12	0,8379
51	19	0,8465
45	26	0,8504

Nas simulações foram consideradas as variações de viscosidade, conforme a Tabela 15. Inicialmente, como condição de contorno, aplicou-se a vazão mássica experimental e observaram-se os resultados obtidos. Em casos onde a queda de pressão obtida via simulação não foi representativa do observado experimentalmente, algumas simulações com delta de pressão imposto foram realizadas. O dispositivo considerado reproduz os dois tipos de válvulas: globo e gaveta. O modelo para válvula globo está representado nas Figuras 38, 39 e 40.

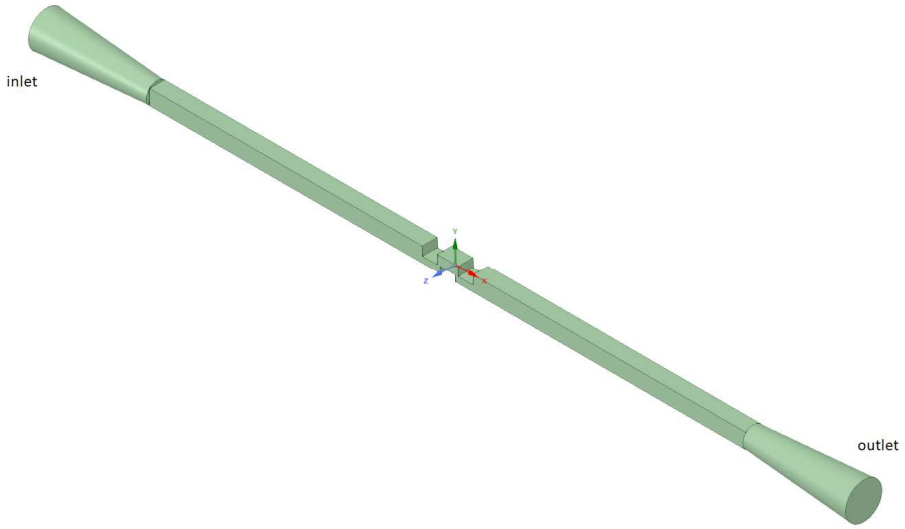


Figura 38 - Vista isométrica do modelo para a geometria globo.

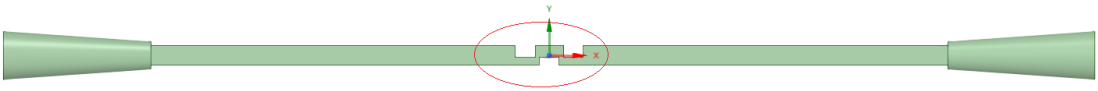


Figura 39 - Vista frontal do modelo para a geometria globo.

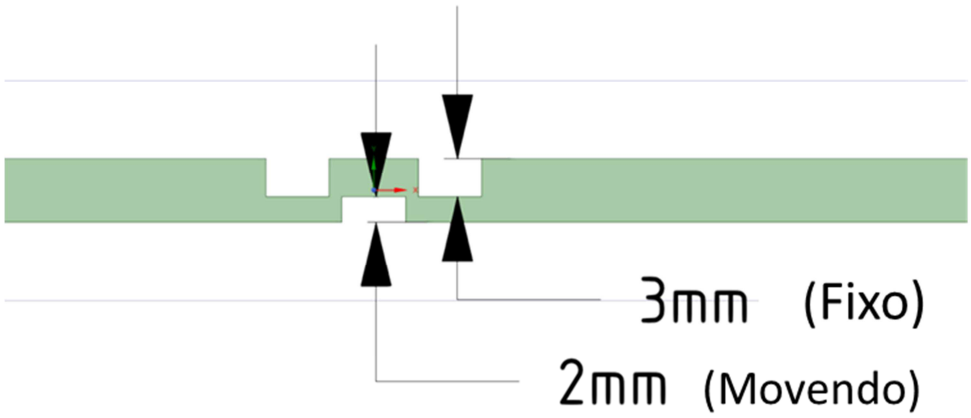


Figura 40 - Detalhe da haste do modelo para a geometria globo.

O dispositivo é um duto de seção transversal quadrada, com 5 mm de lado, e comprimento de 200 mm. Na região central estão as hastes móveis, conforme Figura 40. No caso da válvula globo duas hastes das extremidades permanecem fixas (avançada em 3 mm) e a central se movimenta.

O modelo para válvula gaveta está ilustrado nas Figuras 41, 42 e 43. Conforme a Figura 43, no caso da válvula gaveta somente a haste central se movimenta. As outras duas hastes ficam recuadas e não interferem no escoamento, não tendo sido representadas nas figuras.

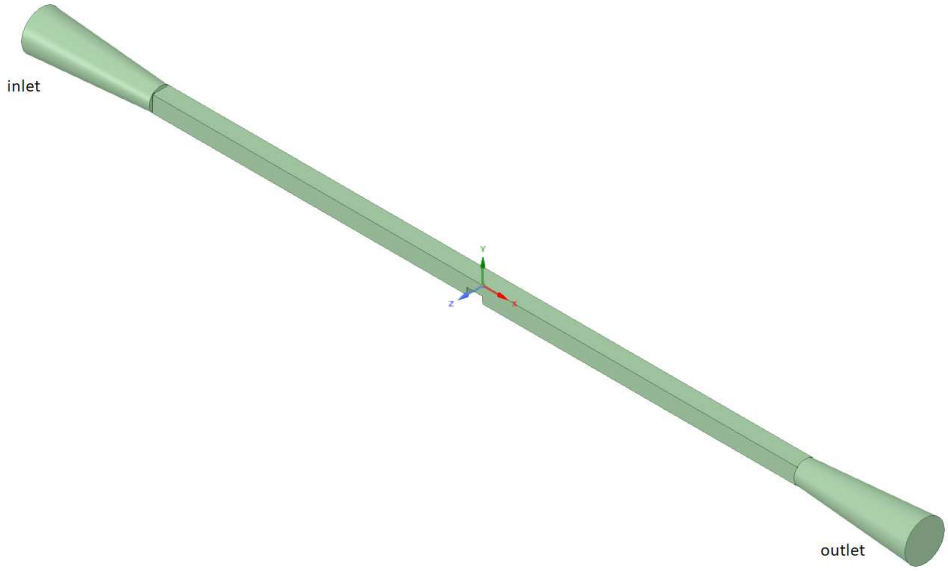


Figura 41 - Vista isométrica do modelo para a geometria gaveta.

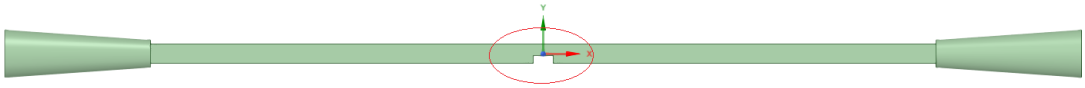


Figura 42 - Vista frontal do modelo para a geometria gaveta.

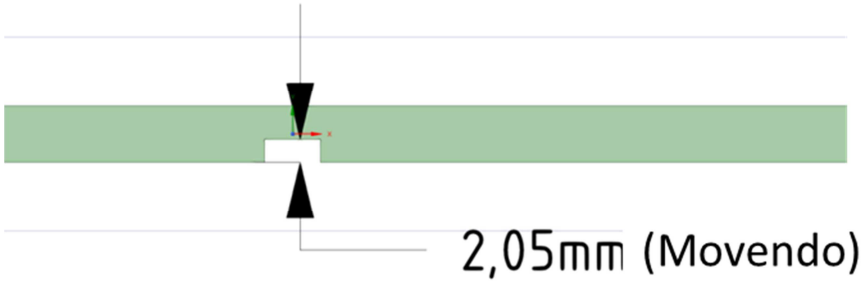


Figura 43 - Detalhe da haste do modelo para a geometria gaveta.

Nas simulações utilizou-se o modelo SST – k-ômega e a malha adequada para o modelo. Estimou-se uma altura do primeiro elemento da malha através do parâmetro Yplus igual 1 para o modelo. Com esta estimativa obteve-se as malhas para os dois modelos, Figuras 44 (válvula globo) e 45 (válvula gaveta). Foram realizadas simulações considerando as três viscosidades (12cP, 19cP e 26cP).

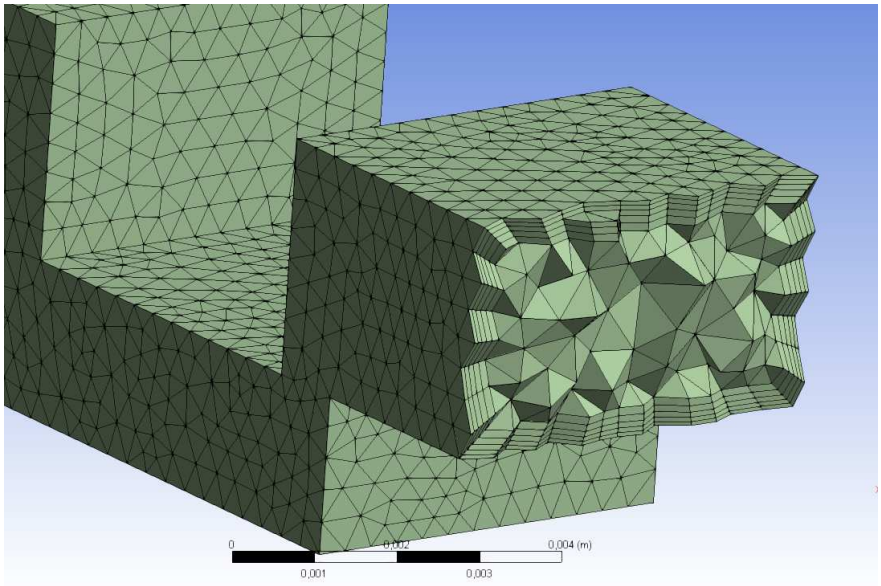


Figura 44 - Malha para o modelo da válvula globo.

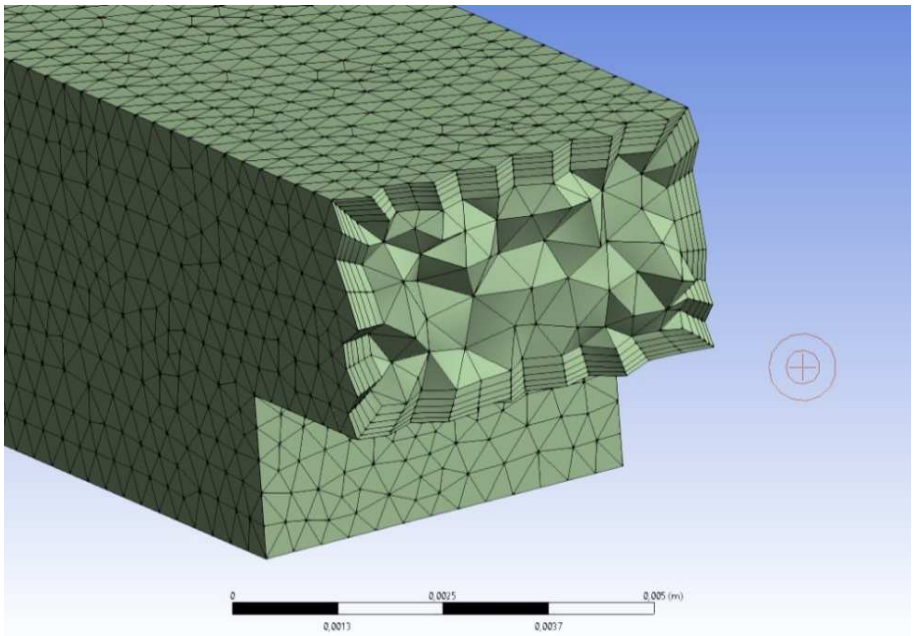


Figura 45 - Malha para o modelo da válvula gaveta.

6.1.2 Casos Simulados

Todas as simulações foram realizadas fixando as condições de contorno planejadas na matriz experimental e movendo a haste central em posições pré-determinadas. Desta forma, todos os pontos experimentais realizados tiveram um caso simulado com posição da haste central, se não exatamente no ponto, muito próxima ao caso real medido pelo relógio comparador (diferença sempre menor que 0,02 mm). Isso foi válido para as duas geometrias testadas experimentalmente.

O Anexo B traz as simulações dos pontos experimentais. Nesta seção, o intuito é ilustrar algumas das simulações e apresentar os dados usados nas seções posteriores de resultados e discussão dos resultados. Inicialmente, foi simulado o canal com passagem totalmente livre para verificação de possíveis dissipações pré-existentes. A Figura 46 mostra essa simulação e pode-se perceber que não ocorrem dissipações significativas no canal em passagem plena.

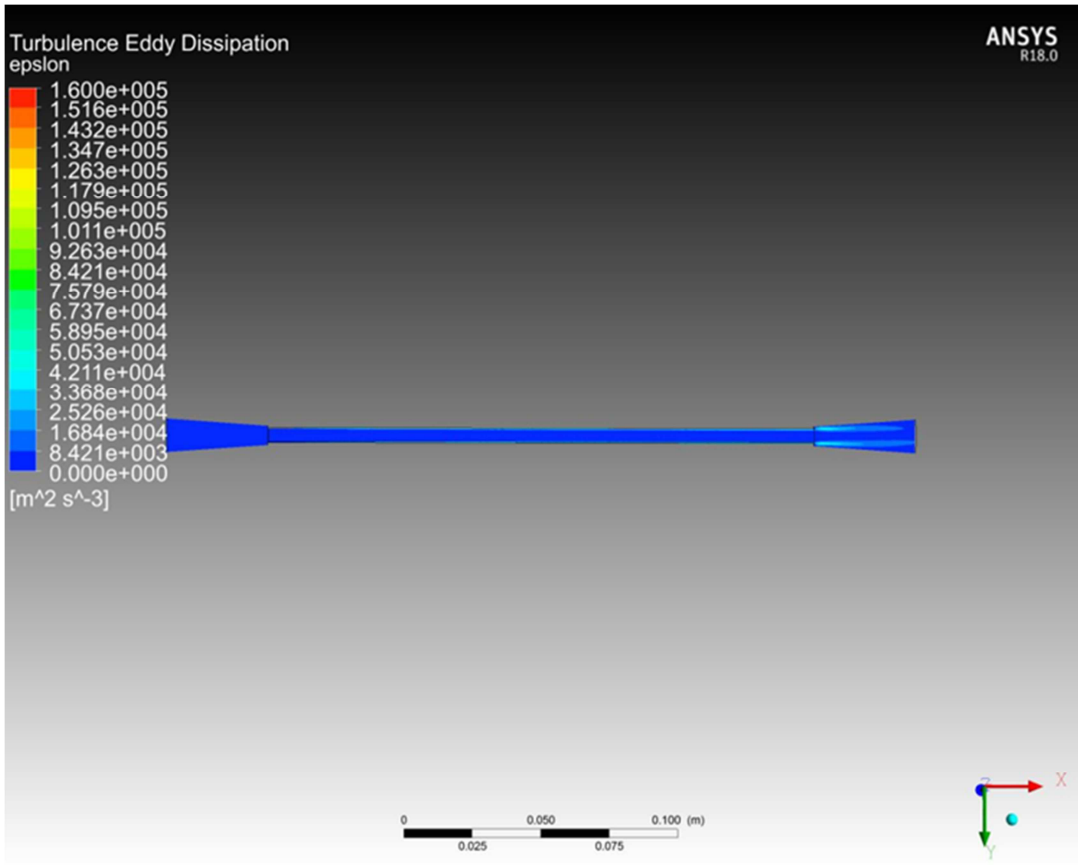


Figura 46 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta com canal livre.

6.1.3 Geometria Gaveta

As simulações para o caso da geometria gaveta serão apresentadas nessa seção. Inicialmente, mantendo-se a vazão mássica fixa (4Kg/min) e movendo a haste central para os pontos onde experimentalmente foram obtidos 3 a 9 bar de ΔP. A Figura 47 mostra a dissipação da energia cinética turbulenta para os casos extremos de queda de pressão simulados, com a menor viscosidade testada e em um mesmo intervalo de legenda, para efeito de comparação.

Para exemplificar o ponto central, a Figura 48 mostra o perfil da dissipação da energia em mesma escala do que foi apresentado anteriormente, para efeito de comparação. Também traz um intervalo reduzido para melhor visualização.

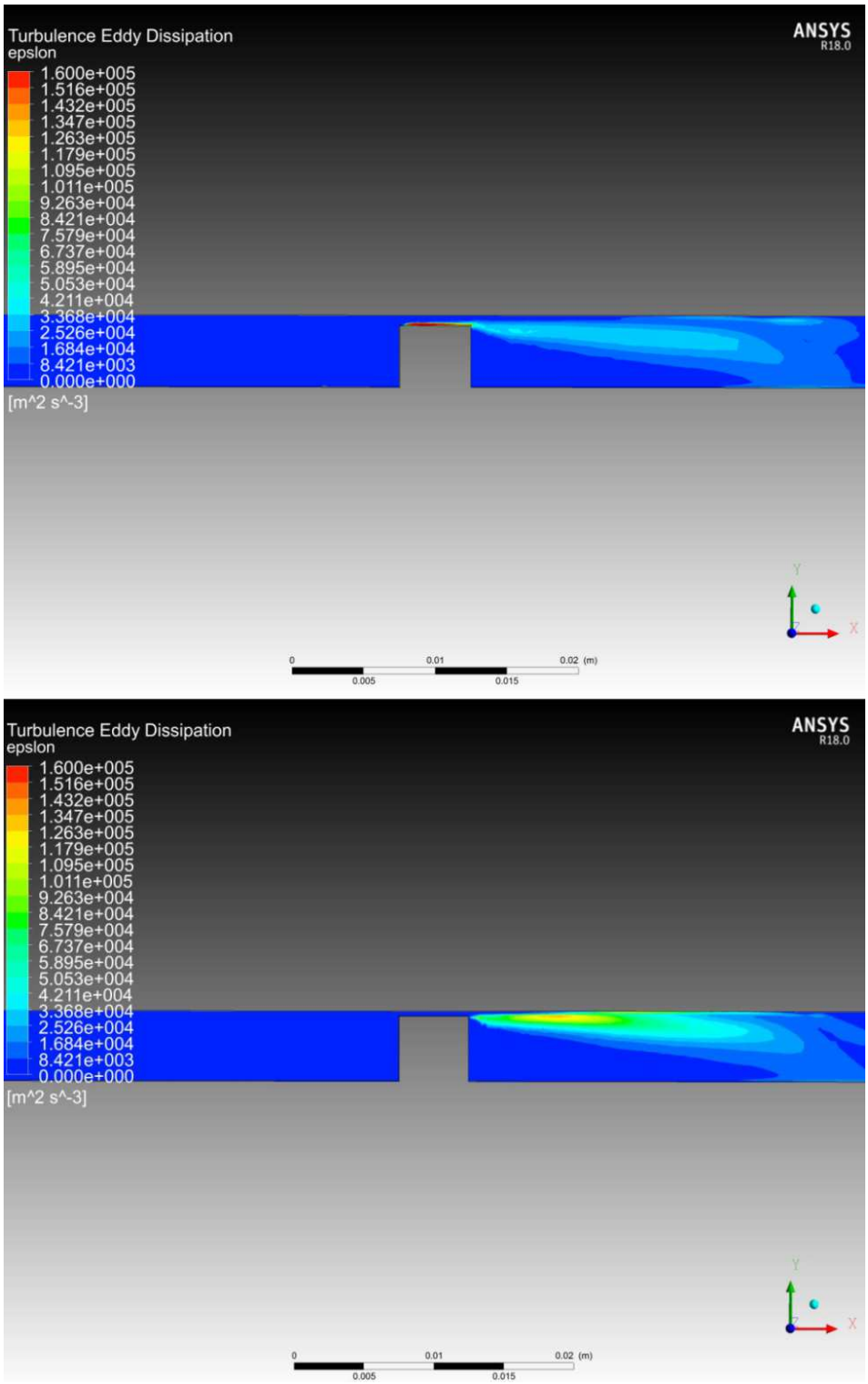


Figura 47 - Dissipação da energia cinética turbulenta para ponto de baixa viscosidade (12cP): ΔP = 3bar (acima); ΔP = 9bar (abaixo), para o caso da geometria gaveta.

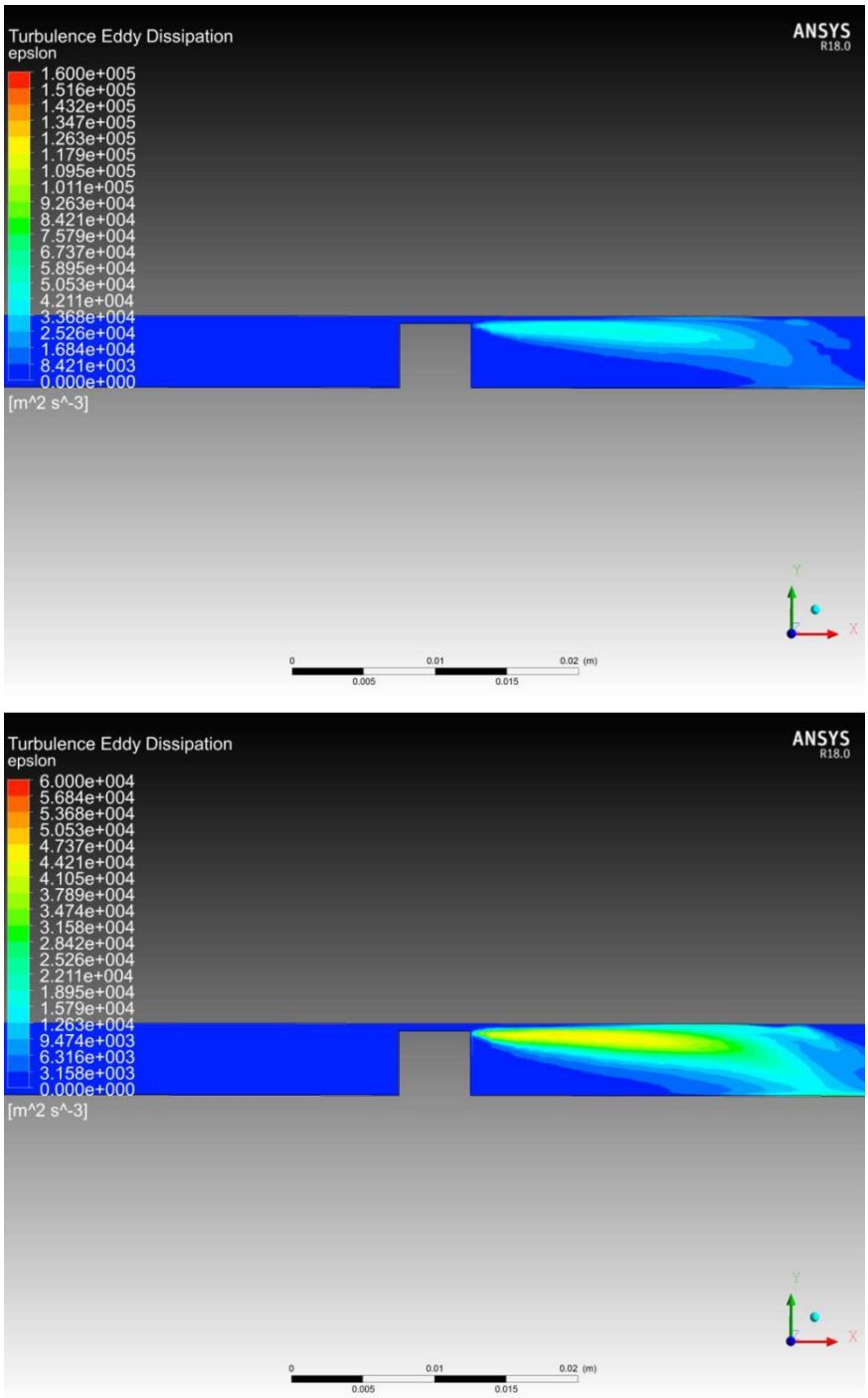


Figura 48 - Dissipação da energia cinética turbulenta para o ponto central (19cP), para o caso da geometria gaveta.

Existem outras informações interessantes que podem ser retiradas das figuras ora apresentadas. Fica evidente que a dissipação de energia ocorre em uma região que se estende por aproximadamente cinco (5) diâmetros de tubulação a jusante da restrição. Essa informação corrobora o que foi reportado por van der Zande (2000).

Além disso, pode-se observar que nem todo o volume equivalente a zona de dissipação de 5 diâmetros de tubulação se mostra efetivo. Uma boa aproximação seria que apenas aproximadamente metade desse volume teria efetividade na quebra de gotas, isto é, teria a presença de vórtices turbulentos responsáveis pela deformação e quebra de gotas. Sendo assim, a aproximação feita por van der Zande *et al.* (1999A), Fossen e Schumann (2016) e Silva *et al.* (2019), de que a zona de dissipação a ser considerada deveria ser da ordem de 2,5 diâmetros de tubulação parece ser bem acertada. A Figura 49 ilustra essa hipótese.

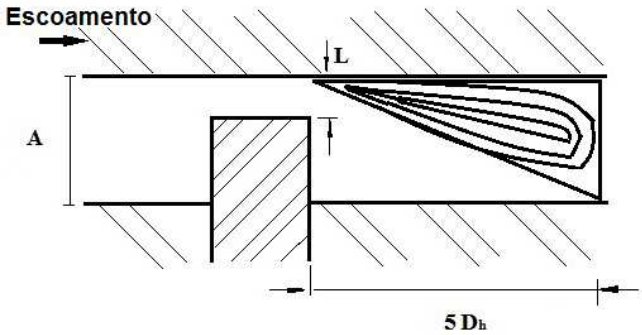


Figura 49 - Desenho esquemático da zona de dissipação da energia cinética turbulenta, para o caso da geometria gaveta. Fonte: Elaboração própria.

No Anexo B estão demonstrados o restante dos pontos simulados para dissipação da energia cinética turbulenta. As simulações realizadas foram de suma importância para a determinação da zona de dissipação. Parece claro que as distâncias de dissipação da energia tendem a convergir para um ponto similar, independente das condições aplicadas (vazão mássica imposta ou quedas de pressões impostas). Esse fato é corroborado por outros autores (Morrison *et al.*, 1993; van der Zande, 2000).

6.1.4 Geometria Globo

Similarmente ao que foi demonstrado para a geometria gaveta, serão abordadas as simulações realizadas para a geometria Globo. Um primeiro exemplo mostra a comparação do ponto a menor viscosidade para as quedas de pressão de 3 e 9 bar, incluindo o ponto central.(Figura 50), onde estão explicitados os valores de dissipação da energia cinética turbulenta para os casos mencionados anteriormente em um mesmo intervalo de legenda para melhor comparação.

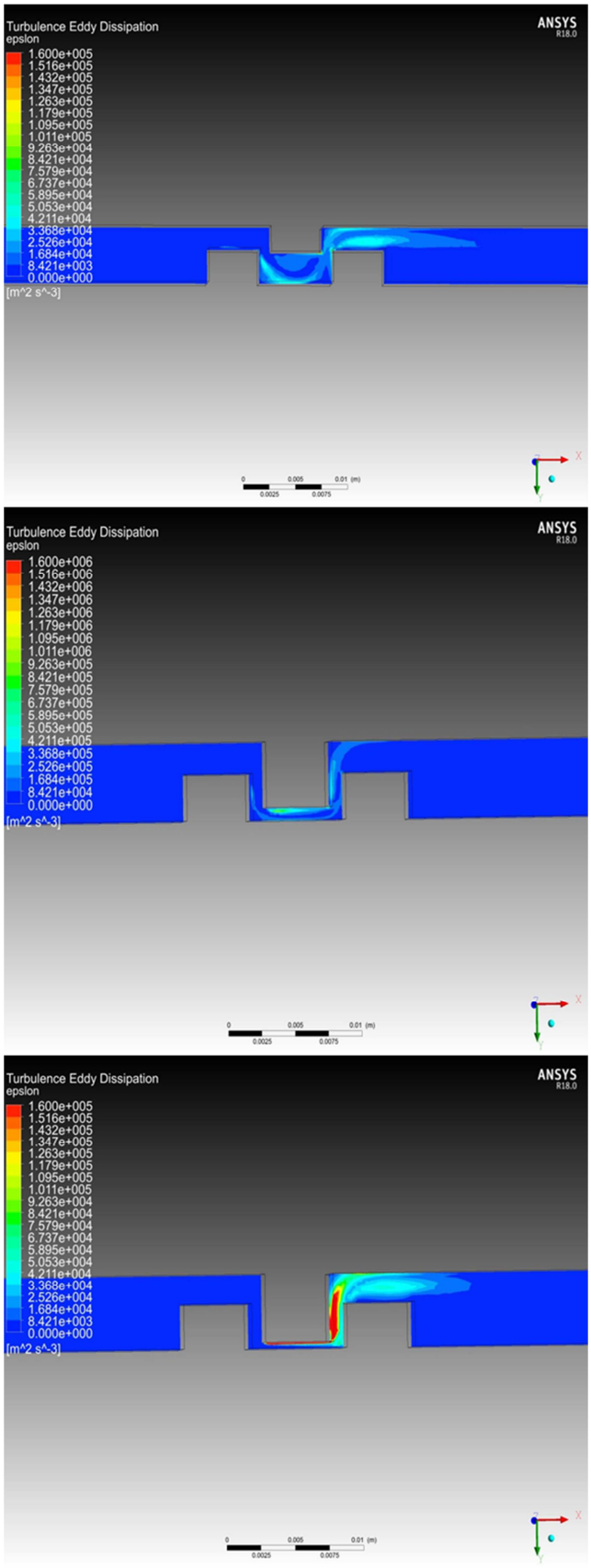


Figura 50 - Dissipação da energia cinética turbulenta para os casos simulados: ΔP = 3 bar e 12 cP (acima); ponto central (centro); ΔP = 9 bar e 12 cP (abaixo), para o caso da geometria globo.

Diferentemente do observado na geometria gaveta, a geometria globo apresentou uma zona de dissipação menor. Após todas as restrições existentes, a dissipação se estendeu por uma distância máxima de aproximadamente um diâmetro hidráulico do canal. Não obstante, as zonas de dissipações observadas, independente das condições de simulação, tenderam a ser bastantes similares.

Dada a diferença no volume de dissipação observado na simulação para a geometria globo, em relação ao relatado da academia e observado na geometria gaveta, para efeitos de cálculos posteriores serão considerados o volume interno da geometria na posição experimental somado ao volume correspondente a um diâmetro do canal após a restrição como volume de dissipação da energia cinética turbulenta.

6.2 Avaliação do Tempo de Quebra

Para realização dos experimentos, foi arbitrado para a emulsão na entrada da seção de teste um dv 0.5 e um dv 0.9 alvos. Fixaram-se os diâmetros médios em aproximadamente 50 a 60μm e esperou-se que os diâmetros máximos se encontrassem na região de 100 a 120μm.

Conforme explicitado por van der Zande (2000), quando se fala de quebra de gotas em restrições, é necessário um tempo de residência da gota na região de dissipação superior ao tempo necessário para quebra dessa gota. Assim, inicialmente, verificou-se o tempo de residência da gota dado o volume de dissipação, arbitrado como 2,5 d_h, conforme indicado por van der Zande (1999A) e Fossen e Schumann (2016).

Dada a vazão mássica, sempre mantida constante para todos os pontos experimentais, o cálculo de tempo de residência da gota resultou em um valor próximo a $4x10^{-3}$s. A partir da Equação 26, estimou-se o tempo necessário para deformar ao máximo diferentes tamanhos médios de gotas, sujeitas a diferentes dissipações de energia cinética turbulenta. A Figura 51 mostra essas situações simuladas.

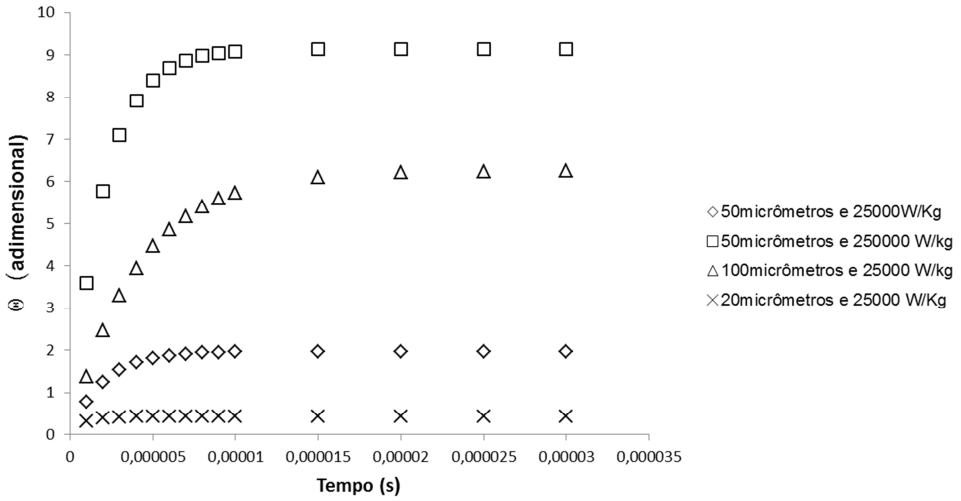


Figura 51 - Deformação versus tempo de gotas entre 20 e 100 micrômetros e 25000 e 250000 W/Kg de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa

A partir do gráfico pode-se observar que, mesmo em condições bem diferentes, a deformação máxima pode ser atingida em tempos inferiores a $1X10^{-5}$s. De posse das equações 28 e 29, uma estimativa do tempo necessário para quebra (t_{quebra}) e do tempo necessário para ação dos vórtices na quebra (t_{act}) foram calculados para o caso onde seria mais difícil quebrar gotas (tensões interfaciais altas e dissipações de energia cinética turbulenta baixas). Da mesma forma, também foram calculados o caso oposto, mais fácil de ocorrer quebra. Os resultados foram colocados em gráficos separados, Figuras 52 e 53.

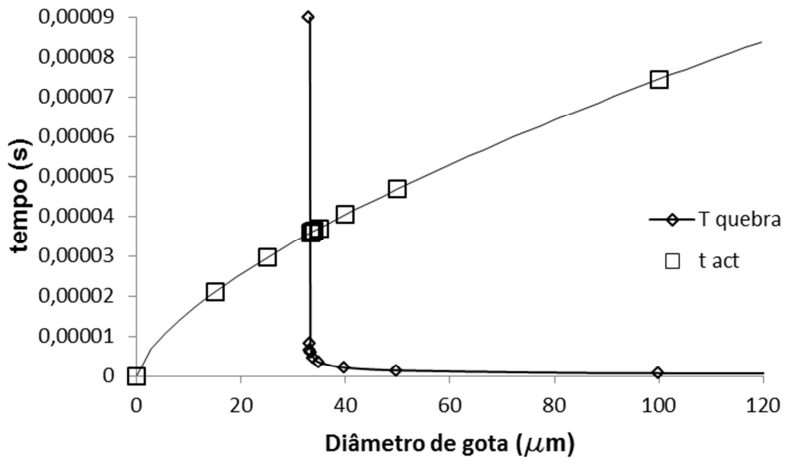


Figura 52 - Tempo necessário para quebra e tempo de atuação dos vórtices para o caso mais difícil de ocorrer quebra (σ 25mN/m e ε 25.000W/Kg).

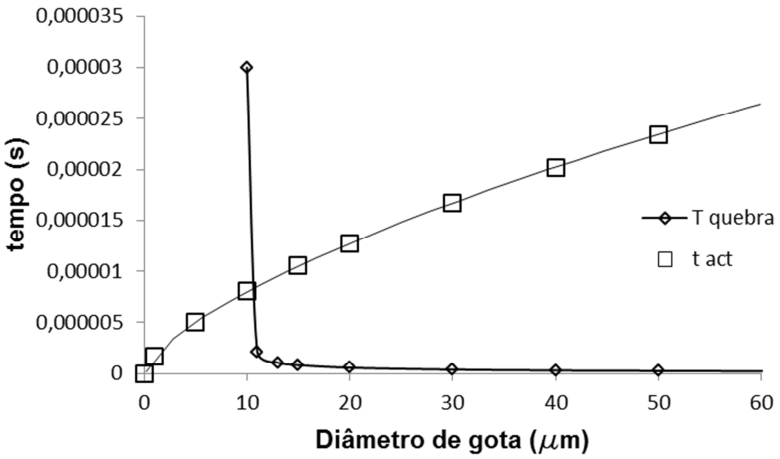


Figura 53 - Tempo necessário para quebra e tempo de atuação dos vórtices para o caso mais fácil de ocorrer quebra (σ 15mN/m e ε 250.000W/Kg).

As Figuras 52 e 53 indicam o tamanho de gotas que sujeitas a condições pré-determinadas têm a possibilidade de quebrar dado o tempo disponível. Para ocorrência de quebra de gotas, $t_{act} > t_{quebra}$, ou seja, do ponto de cruzamento das curvas para a direita, ocorrerá quebra. Desse ponto para a esquerda não é possível acontecer quebra de gotas.

Outra informação que se tira dos gráficos é que o tamanho máximo de gotas que não quebra em condições desfavoráveis (Figura 52) é de 33μm. Considera-se que as condições desfavoráveis correspondem a menor taxa de dissipação da energia cinética turbulenta e os maiores valores de tensão interfacial. Para condições favoráveis, esse valor foi de 11μm. Sabendo-se que as condições de dissipação de energia cinética turbulenta aplicadas nos experimentos sempre foram superiores ao exemplificado na Figura 52, pode-se afirmar que a escolha dos tamanhos de gotas alvo para o experimento foi adequado.

A última informação que se retira das Figuras 52 e 53, somada ao que foi exposto anteriormente, é o tempo de atuação para quebra de gotas, comparado ao tempo de residência das gotas na zona de dissipação. Os gráficos indicam ser necessários tempos da ordem de 0,5 a $4x10^{-5}$s para atuação dos vórtices. Como o tempo de residência da gota na zona de dissipação foi calculado como sendo da ordem de 10^{-3}s, pode-se concluir que há tempo suficiente para que ocorram quebras de gotas sucessivas na

passagem pelo elemento dissipador e sua zona de recuperação de pressão à jusante.

6.3 Testes em Branco

A seção de testes foi dimensionada de forma a que o escoamento se mantivesse laminar quando as hastes estivessem todas recuadas. O maior número de Reynolds, calculado para menor viscosidade do fluido contínuo nessa condição, foi inferior a 1200. Para o cálculo desse número de Reynolds, o diâmetro hidráulico (d_h) foi estimado como sendo $d_h = 4\frac{A}{Per}$, onde A é a área do canal e Per o perímetro molhado, ou seja, igual a soma dos comprimentos das arestas da seção quadrada (5 mm x 4).

Essa limitação do número de Reynolds teve como objetivo evitar que quebras de gotas ocorressem devido ao escoamento. Para comprovar esse fato, alguns ensaios em brancos foram realizados. A Figura 54 mostra uma curva típica de distribuição de tamanho de gotas (DTG) obtida nestes ensaios. Pode-se perceber que a distribuição permanece praticamente inalterada, o que assegura que toda quebra de gotas ocorre de maneira localizada na singularidade.

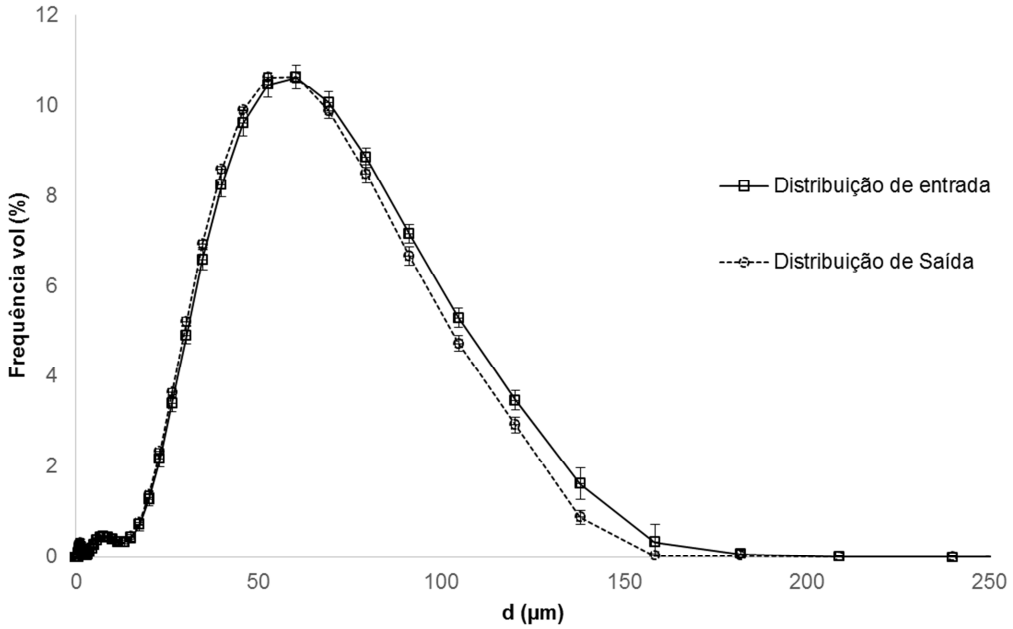


Figura 54 – DTG típica dos Ensaios em branco, com hastes recuadas: não há quebra de gotas significativas.

Diferentemente do que é reportado para escoamento em tubulações, onde a transição para o regime de escoamento turbulento ocorre em Reynolds superiores a 2100, o número de Reynolds crítico para orifícios é bem menor. De acordo com Lakshmana-Rao *et al.* (1977) e Janssen *et al.* (2001), o número de Reynolds crítico, onde o regime se torna turbulento, quando o escoamento passa por um orifício (borda quadrada) com pequeno β (relação entre o diâmetro do orifício e o diâmetro do canal, $\beta=d_o/d_h$), é constante e tem valores entre 300 e 340, aumentando com o aumento do β. Onde d_o é o diâmetro do orifício.

Em estudo anterior, Johansen (1930) relatou que o número de Reynolds crítico para orifícios poderia ser até menor. O autor observou, por métodos fotográficos, que o escoamento começava a se tornar turbulento em números de Reynolds superiores a 150, a depender da razão de diâmetros (β).

Assumindo-se que $Re_t=\beta.Re_o$ (Janssen *et al.*, 2001) e admitindo-se que a singularidade pode ser aproximada para uma placa de orifício, todos os pontos experimentais tiveram escoamento laminar até a chegada à singularidade, tornando-se turbulento na passagem pela mesma. Re_t e Re_o são, respectivamente, os números de Reynolds para as condições de escoamento na tubulação e no orifício.

6.4 Análise Estatística das Variáveis e Construção de Modelos

Nesta seção será apresentada uma análise da estatística das variáveis estudadas de forma a entender quais fatores são indispensáveis para a construção de modelos de quebra, ou a aderência dos modelos já existentes para os pontos experimentais testados.

6.4.1 Modelo Empírico

De posse dos resultados experimentais e com o auxílio do software Minitab V.17, o processo de construção de um modelo empírico por regressões lineares em superfície de resposta pode ser apresentado. A primeira resposta desse processo levou em consideração todos os fatores categorizados estudados com suas devidas interações, com regressão em modelo quadrático.

Uma análise de variância (ANOVA) foi realizada com o auxílio do Minitab V.17. A análise considera a resposta separada por método de medição de DTG. Esse estudo visa à verificação da significância de cada fator e assim conduzir uma criteriosa avaliação dos termos do modelo.

6.4.1.1 Modelo Empírico – Medidas com o Malvern Mastersizer 2000

A primeira análise foi feita para os pontos medidos com o Malvern Mastersizer 2000. A tabela ANOVA (Tabela 16) indica que todos os fatores principais se mostraram significativos uma vez que seus valores-p foram inferiores que 0,05 (intervalo de confiança arbitrado). Percebe-se, também, que a queda de pressão (ΔP) é quem exerce a maior influência no fenômeno, dado seu valor de QM (Aj.). Algumas interações entre fatores se mostraram relevantes e devem ser levantadas em análises posteriores. Por hora, é interessante pontuar a alta significância da interação entre viscosidade e concentração da fase dispersa.

Outras informações podem ser tiradas da Tabela 16. Pôde-se perceber que o ajuste do modelo quadrático é significante, dado seu valor-p. O fato do teste de falta de ajuste do erro ter ficado acima de 0,05 demonstra que o modelo gerado é estatisticamente significativo.

A tabela ANOVA traz outras informações que por hora não foram apresentadas, mas que serão explicitadas mais adiante, quando for conveniente. A remoção dessas informações foi realizada para tornar o texto menos extenso e repetitivo.

A Figura 55 apresenta os resíduos dos pontos obtidos com o Malvern. Segundo Brito (2014), no gráfico de probabilidade (Figura 55a) é possível avaliar a normalidade dos resíduos dos pontos experimentais. Os resíduos devem se ajustar a uma reta quando lançados em um gráfico probabilístico (Montgomery, 2001). O gráfico de resíduos versus valores ajustados (Figura 55b) mostra o grau de aleatoriedade dos resíduos. Os pontos mais afastados do centro são denominados *outliers* (Brito, 2014). Outra forma qualitativa de se

identificar *outliers* é através da verificação dos pontos que se afastam mais de dois desvios padrão da média.

Tabela 16 - Análise de variância dos pontos medidos pelo Malvern Mastersizer.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	17	32727,3	1925,1	47,24	0,000
Linear	5	25973,4	5194,7	127,48	0,000
viscosidade (cP)	1	2197,6	2197,6	53,93	0,000
TI (mN/m)	1	320,6	320,6	7,87	0,006
dP Sing (bar)	1	13425,2	13425,2	329,47	0,000
H2O (%)	1	7267,0	7267,0	178,34	0,000
geometria	1	3351,7	3351,7	82,25	0,000
Quadrado	2	1851,8	925,9	22,72	0,000
viscosidade (cP)*viscosidade (cP)	1	8,6	8,6	0,21	0,647
dP Sing (bar)*dP Sing (bar)	1	312,6	312,6	7,67	0,007
Interação com 2 Fatores	10	2948,2	294,8	7,24	0,000
viscosidade (cP)*TI (mN/m)	1	0,1	0,1	0,00	0,964
viscosidade (cP)*dP Sing (bar)	1	147,7	147,7	3,62	0,060
viscosidade (cP)*H2O (%)	1	2026,9	2026,9	49,74	0,000
viscosidade (cP)*geometria	1	223,6	223,6	5,49	0,021
TI (mN/m)*dP Sing (bar)	1	5,4	5,4	0,13	0,718
TI (mN/m)*H2O (%)	1	2,1	2,1	0,05	0,821
TI (mN/m)*geometria	1	8,7	8,7	0,21	0,645
dP Sing (bar)*H2O (%)	1	32,1	32,1	0,79	0,377
dP Sing (bar)*geometria	1	533,1	533,1	13,08	0,000
H2O (%)*geometria	1	1,6	1,6	0,04	0,843
Erro	113	4604,5	40,7		
Falta de ajuste	20	1011,4	50,6	1,31	0,194
Erro puro	93	3593,2	38,6	*	*
Total	130	37331,8			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
6,38342	87,67%	85,81%	83,25%

A Figura 55c de resíduos versus ordem de observação pode ser usado para se verificar se houve algum erro não aleatório, principalmente ao longo do tempo em que os experimentos foram executados. Já o histograma (Figura 55d) deve apresentar a forma de uma distribuição normal, confirmando a normalidade dos resíduos (Brito, 2014)

É possível observar (pelos gráficos de probabilidade normal, pelo histograma e de valores ajustados), que alguns *outliers* estão presentes, fugindo do padrão de normalidade e com resíduos muito elevados. Entretanto, é interessante notar a qualidade dos dados, sua normalidade e aleatoriedade.

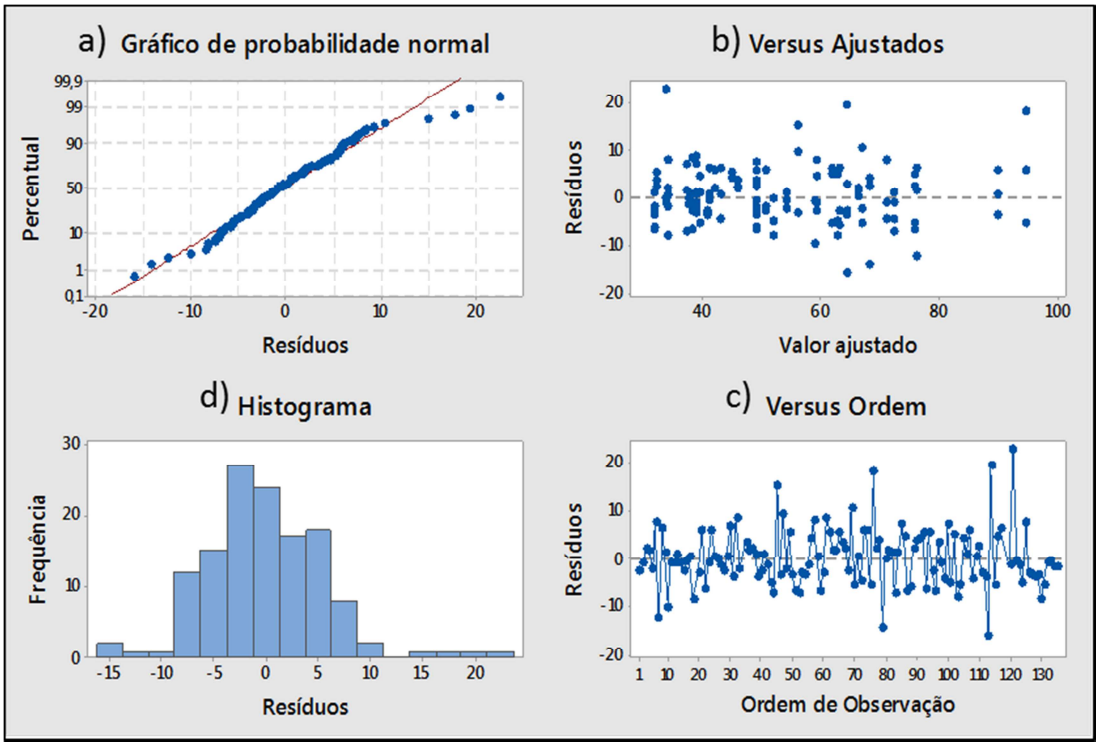


Figura 55 - Resíduos de d_{max} medido com o Malvern Mastersizer 2000. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.

Foi possível o ajuste de um modelo com razoável aderência às respostas experimentais. Antes de se retirar possíveis *outliers*, uma remoção das interações não significativas foi realizada. Essa ação visou à redução do modelo sem perda de qualidade na predição. Todos os fatores, quadrados dos fatores e interações cujo valor-p estivesse acima de 0,05 foram retirados. Uma nova tabela ANOVA está apresentada, Tabela 17.

Após remoção dos fatores estatisticamente insignificantes (redução do modelo), a tabela ANOVA trouxe a informação de que alguns pontos eram os responsáveis pelos resíduos que podem ser observados nos gráficos da Figura 56. Esses pontos podem ser considerados *outliers* e a remoção dos mesmos tende a melhorar o modelo empírico de predição.

Tabela 17 - Análise de variância dos pontos experimentais medidos pelo Malvern Mastersizer após retirada dos fatores não significativos estatisticamente.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	32522,3	3613,6	90,91	0,000
Linear	5	27224,7	5444,9	136,99	0,000
viscosidade (cP)	1	2294,3	2294,3	57,72	0,000
TI (mN/m)	1	382,6	382,6	9,63	0,002
dP Sing (bar)	1	13681,8	13681,8	344,22	0,000
H2O (%)	1	7637,3	7637,3	192,14	0,000
geometria	1	3424,3	3424,3	86,15	0,000
Quadrado	1	1884,0	1884,0	47,40	0,000
dP Sing (bar)*dP Sing (bar)	1	1884,0	1884,0	47,40	0,000
Interação com 2 Fatores	3	2964,3	988,1	24,86	0,000
viscosidade (cP)*H2O (%)	1	2255,3	2255,3	56,74	0,000
viscosidade (cP)*geometria	1	229,0	229,0	5,76	0,018
dP Sing (bar)*geometria	1	536,4	536,4	13,50	0,000
Erro	121	4809,5	39,7		
Falta de ajuste	28	1216,3	43,4	1,12	0,330
Erro puro	93	3593,2	38,6	*	*
Total	130	37331,8			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
6,30457	87,12%	86,16%	84,81%

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	dmax malvern	Ajuste	Resíd	Resíd Pad	
7	63,62	76,93	-13,31	-2,21	R
45	71,05	54,93	16,12	2,67	R
76	112,30	94,57	17,73	2,94	R
79	53,93	67,31	-13,38	-2,22	R
113	48,23	63,55	-15,32	-2,53	R
114	83,62	63,55	20,07	3,31	R
121	56,47	34,80	21,67	3,58	R

R Resíduo grande

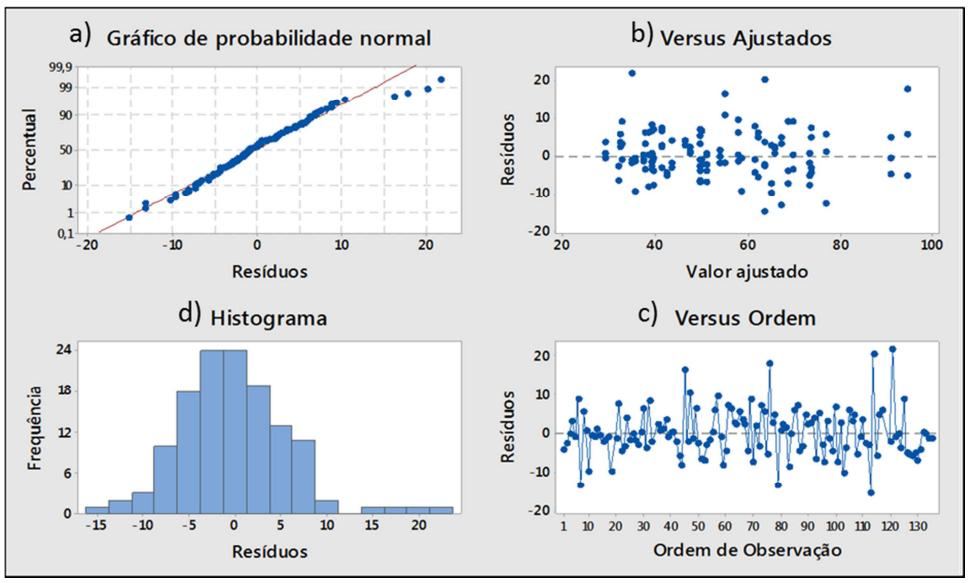


Figura 56 - Resíduos de d_{max} medido com o malvern Mastersizer 2000, após remoção dos fatores estatisticamente não significantes. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.

Normalmente, pontos cujo resíduo encontra-se fora da faixa de média +/- dois desvios padrão são considerados *outliers*. Os pontos experimentais apontados foram as observações 7, 45, 76, 79, 113, 114 e 121. Desses pontos, foi decidido retirar os pontos um a um de forma a não ter pontos cujo resíduo ultrapasse três vezes o desvio padrão. Adicionalmente, os pontos que tivessem resíduos entre 2 e 3 vezes o desvio padrão, mas que mantivessem ao menos três réplicas, foram também removidos. Dessa forma, foram excluídos os pontos 45, 76, 113, 114 e 121. O resultado dessa exclusão pode ser observado na Tabela 18 e Figura 57.

Tabela 18 - Análise de variância dos pontos experimentais medidos pelo Malvern Mastersizer após remoção de *outliers.*

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	29316,8	3257,4	125,15	0,000
Linear	5	25391,5	5078,3	195,11	0,000
viscosidade (cP)	1	2001,5	2001,5	76,90	0,000
TI (mN/m)	1	480,2	480,2	18,45	0,000
dP Sing (bar)	1	13661,4	13661,4	524,88	0,000
H2O (%)	1	6962,4	6962,4	267,50	0,000
geometria	1	2986,8	2986,8	114,76	0,000
Quadrado	1	1624,1	1624,1	62,40	0,000
dP Sing (bar)*dP Sing (bar)	1	1624,1	1624,1	62,40	0,000
Interação com 2 Fatores	3	2223,7	741,2	28,48	0,000
viscosidade (cP)*H2O (%)	1	1551,5	1551,5	59,61	0,000
viscosidade (cP)*geometria	1	254,9	254,9	9,79	0,002
dP Sing (bar)*geometria	1	462,3	462,3	17,76	0,000
Erro	116	3019,2	26,0		
Falta de ajuste	28	737,9	26,4	1,02	0,458
Erro puro	88	2281,3	25,9	*	*
Total	125	32336,0			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
5,10171	90,66%	89,94%	88,92%

Coeficientes Codificados

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	44,40	1,13	39,39	0,000	
viscosidade (cP)	-4,365	0,498	-8,77	0,000	1,03
TI (mN/m)	2,155	0,502	4,30	0,000	1,06
dP Sing (bar)	-11,651	0,509	-22,91	0,000	1,00
H2O (%)	8,200	0,501	16,36	0,000	1,06
geometria					
GAVETA	4,918	0,459	10,71	0,000	1,02
dP Sing (bar)*dP Sing (bar)	9,95	1,26	7,90	0,000	1,08
viscosidade (cP)*H2O (%)	-3,866	0,501	-7,72	0,000	1,06
viscosidade (cP)*geometria					
GAVETA	-1,540	0,492	-3,13	0,002	1,02
dP Sing (bar)*geometria					
GAVETA	-2,145	0,509	-4,21	0,000	1,00

A Tabela 18 mostra o modelo gerado com seus respectivos coeficientes, codificados ou não. É importante salientar que mesmo após a retirada das interações não significativas e dos *outliers*, os fatores principais permaneceram significativos.

A seção dos coeficientes gerados não codificados mostra uma importante informação. O valor de VIF (*Variance Inflation Factor*) mostra quando fatores apresentam dependência entre si, isto é, estão multicolinearizados, o que tende a aumentar a variância dos mesmos. Quando isso ocorre, deve-se avaliar a possibilidade de se remover um dos fatores multicolinearizados do modelo e se verficar os novos valores de VIF obtidos. É ideal que esse valor esteja o mais próximo de 1,00 possível, sendo aceitáveis valores entre 1,00 e 5,00. Como se pode observar dos dados da Tabela 18, os valores de VIF se mostraram bons, sendo esse mais um indício da qualidade do modelo.

Após a retirada dos pontos considerados *outliers*, um novo modelo empírico foi gerado, por tipo de válvula. Considera-se que esses modelos são válidos para casos em condições similares aos dos experimentos. No que tange a viscosidades e tensões interfaciais, o intervalo estudado abrange uma boa quantidade de casos na indústria de extração de petróleo. As quedas de pressão testadas também são condizentes com a realidade dos campos produtores de óleo nacionais.

<u>Equação de Regressão em Unidades Não codificadas</u>

<u>Tipo de válvula</u>
GAVETA

$$\boldsymbol{d_{max-malvern} = 68,04 + 0,813\mu + 0,431\sigma - 17,87\Delta P + 7,478\Phi + 1,106\,\Delta P^2 - 0,2209\,\mu.\Phi}$$ Equação 33

GLOBO

$$\boldsymbol{d_{max-malvern} = 41,27 + 1,253\mu + 0,431\sigma - 16,44\Delta P + 7,478\Phi + 1,106\,\Delta P^2 - 0,2209\,\mu.\Phi}$$ Equação 34

Onde, viscosidade (cP), Tensão Interfacial (mN/m), ΔP (bar), Φ(%)

A Figura 57 mostra os gráficos de resíduos do ajuste final do modelo. A aleatoriedade e normalidade dos pontos continuam sendo percebidas, tendo

claramente melhorado após a retirada dos *outliers*. A amplitude dos resíduos diminuiu consideravelmente. Dessa forma, os modelos ajustados apresentaram coeficiente de correlação do valor predito de aproximadamente 89%.

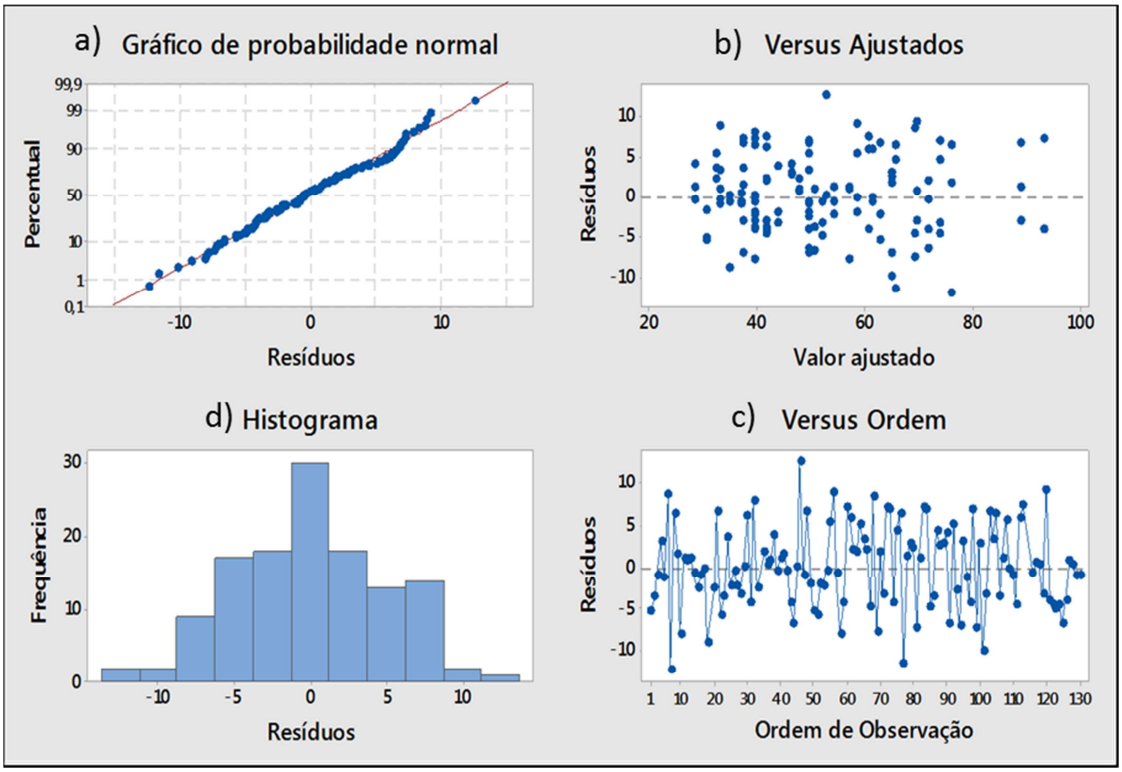


Figura 57 – Resíduos de d_{max} medido com o malvern Mastersizer 2000, após exclusão dos *outliers.* (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.

6.4.1.2 Modelo Empírico – Medidas Tomadas pelo Insitec

Assim como realizado para os pontos obtidos com o Malvern Mastersizer 2000, a mesma análise foi realizada para os pontos obtidos com o Insitec (Tabela 19). A significância da concentração da fase dispersa voltou a ser notada. Algumas diferenças foram notadas, como a não significância da viscosidade e da tensão interfacial. No entanto, essas mesmas variáveis se mostram influentes quando interagindo com outros fatores.

Tabela 19 - Análise de variância dos pontos experimentais medidos pelo Insitec.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	16	36966,2	2310,4	61,18	0,000
Linear	5	30559,4	6111,9	161,84	0,000
viscosidade (cP)	1	21,6	21,6	0,57	0,452
TI (mN/m)	1	77,2	77,2	2,04	0,156
dP Sing (bar)	1	11575,6	11575,6	306,52	0,000
H2O (%)	1	18786,5	18786,5	497,46	0,000
geometria	1	248,5	248,5	6,58	0,012
Quadrado	1	1133,4	1133,4	30,01	0,000
viscosidade (cP)*viscosidade (cP)	1	1133,4	1133,4	30,01	0,000
Interação com 2 Fatores	10	5059,5	506,0	13,40	0,000
viscosidade (cP)*TI (mN/m)	1	296,8	296,8	7,86	0,006
viscosidade (cP)*dP Sing (bar)	1	614,0	614,0	16,26	0,000
viscosidade (cP)*H2O (%)	1	1611,4	1611,4	42,67	0,000
viscosidade (cP)*geometria	1	932,7	932,7	24,70	0,000
TI (mN/m)*dP Sing (bar)	1	28,5	28,5	0,75	0,387
TI (mN/m)*H2O (%)	1	213,4	213,4	5,65	0,019
TI (mN/m)*geometria	1	181,2	181,2	4,80	0,031
dP Sing (bar)*H2O (%)	1	778,2	778,2	20,61	0,000
dP Sing (bar)*geometria	1	0,4	0,4	0,01	0,914
H2O (%)*geometria	1	352,3	352,3	9,33	0,003
Erro	99	3738,7	37,8		
Falta de ajuste	17	626,4	36,8	0,97	0,498
Erro puro	82	3112,3	38,0	*	*
Total	115	40704,9			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
6,14531	90,82%	89,33%	87,51%

A Figura 58 mostra os gráficos de resíduos dos pontos experimentais medidos com o Insitec. A aleatoriedade e normalidade também pôde ser percebida, apesar da observação de resíduos maiores do que o que foi observado nos pontos experimentais obtidos com o Malvern.

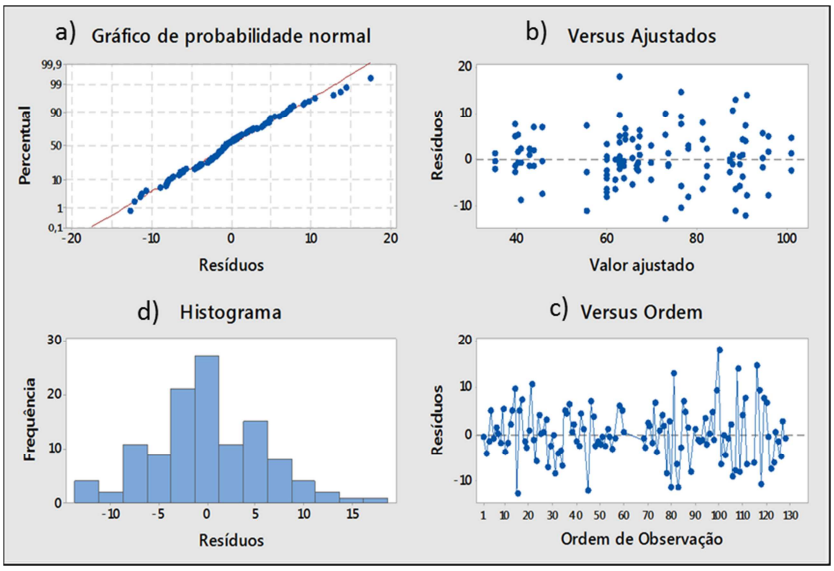


Figura 58 - Resíduos dos pontos medidos com o Insitec. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.

Esta é a primeira análise e algumas evoluções puderam ser realizadas baseadas nos resultados apresentados. Uma abordagem semelhante ao que foi apresentado para os pontos medidos pelo Malvern, as interações e quadrados de fatores cujo valor-p estivessem acima de 0,05 foram retirados. O resultado da regressão está mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 - Análise de variância dos pontos experimentais medidos pelo Insitec após remoção dos fatores não significativos estatisticamente.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	14	36937,1	2638,4	70,72	0,000
Linear	5	30612,9	6122,6	164,12	0,000
viscosidade (cP)	1	23,1	23,1	0,62	0,433
TI (mN/m)	1	78,0	78,0	2,09	0,151
dP Sing (bar)	1	11567,6	11567,6	310,08	0,000
H2O (%)	1	18855,8	18855,8	505,45	0,000
geometria	1	247,3	247,3	6,63	0,011
Quadrado	1	1129,6	1129,6	30,28	0,000
viscosidade (cP)*viscosidade (cP)	1	1129,6	1129,6	30,28	0,000
Interação com 2 Fatores	8	5030,4	628,8	16,86	0,000
viscosidade (cP)*TI (mN/m)	1	298,3	298,3	8,00	0,006
viscosidade (cP)*dP Sing (bar)	1	612,0	612,0	16,40	0,000
viscosidade (cP)*H2O (%)	1	1600,8	1600,8	42,91	0,000
viscosidade (cP)*geometria	1	930,2	930,2	24,93	0,000
TI (mN/m)*H2O (%)	1	214,7	214,7	5,75	0,018
TI (mN/m)*geometria	1	185,8	185,8	4,98	0,028
dP Sing (bar)*H2O (%)	1	775,9	775,9	20,80	0,000
H2O (%)*geometria	1	350,8	350,8	9,40	0,003
Erro	101	3767,8	37,3		
Falta de ajuste	19	655,6	34,5	0,91	0,574
Erro puro	82	3112,3	38,0	*	*
Total	115	40704,9			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
6,10781	90,74%	89,46%	87,89%

A mudança no modelo gerado foi imperceptível. Decidiu-se por retirar, então, os fatores viscosidade e tensão interfacial (mantendo as respectivas interações, mesmo com modelo não hierárquico), para se verificar se há algum ganho no modelo, em redução e melhor previsibilidade.

Houve um pequeno ganho no modelo empírico gerado. Verificou-se, então, quais pontos com resíduos mais altos poderiam ser suprimidos. Dos sete pontos indicados pelo programa, apenas dois foram possíveis de serem removidos de forma a se manter ao menos três réplicas por ponto experimental.

A nova tabela ANOVA (Tabela 21) e gráficos de resíduos (Figura 59) estão apresentados. Pode-se perceber um ligeiro incremento no coeficiente de correlação dos modelos gerados. Os modelos empíricos apresentados, a seguir, estão na forma codificada, sendo essa uma restrição do software, quando a regressão é realizada de forma não hierárquica. O VIF calculado indica que os fatores considerados no modelo não apresentam dependência entre si.

Tabela 21 - Análise de variância dos pontos medidos com o Insitec, após remoção dos fatores principais viscosidade e tensão interfacial, e remoção de *outliers.* Em seguida, tabela de VIF.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	12	36716,1	3059,7	92,16	0,000
Linear	3	30513,4	10171,1	306,35	0,000
dP Sing (bar)	1	11204,7	11204,7	337,48	0,000
H2O (%)	1	19105,6	19105,6	575,46	0,000
geometria	1	155,4	155,4	4,68	0,033
Quadrado	1	1323,1	1323,1	39,85	0,000
viscosidade (cP)*viscosidade (cP)	1	1323,1	1323,1	39,85	0,000
Interação com 2 Fatores	8	4685,8	585,7	17,64	0,000
viscosidade (cP)*TI (mN/m)	1	344,9	344,9	10,39	0,002
viscosidade (cP)*dP Sing (bar)	1	543,0	543,0	16,36	0,000
viscosidade (cP)*H2O (%)	1	1478,3	1478,3	44,53	0,000
viscosidade (cP)*geometria	1	843,6	843,6	25,41	0,000
TI (mN/m)*H2O (%)	1	254,7	254,7	7,67	0,007
TI (mN/m)*geometria	1	224,8	224,8	6,77	0,011
dP Sing (bar)*H2O (%)	1	697,4	697,4	21,01	0,000
H2O (%)*geometria	1	299,7	299,7	9,03	0,003
Erro	101	3353,3	33,2		
Falta de ajuste	21	624,9	29,8	0,87	0,625
Erro puro	80	2728,4	34,1	*	*
Total	113	40069,4			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
5,76200	91,63%	90,64%	89,31%

Coeficientes Codificados

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	60,36	1,44	41,85	0,000	
dP Sing (bar)	-10,706	0,583	-18,37	0,000	1,00
H2O (%)	13,971	0,582	23,99	0,000	1,00
geometria					
GAVETA	1,170	0,541	2,16	0,033	1,00
viscosidade (cP)*viscosidade (cP)	9,82	1,56	6,31	0,000	1,00
viscosidade (cP)*TI (mN/m)	1,878	0,583	3,22	0,002	1,00
viscosidade (cP)*dP Sing (bar)	-2,357	0,583	-4,04	0,000	1,00
viscosidade (cP)*H2O (%)	-3,886	0,582	-6,67	0,000	1,00
viscosidade (cP)*geometria					
GAVETA	2,938	0,583	5,04	0,000	1,00
TI (mN/m)*H2O (%)	-1,614	0,583	-2,77	0,007	1,00
TI (mN/m)*geometria					
GAVETA	1,515	0,582	2,60	0,011	1,00
dP Sing (bar)*H2O (%)	2,671	0,583	4,58	0,000	1,00
H2O (%)*geometria					
GAVETA	-1,751	0,583	-3,00	0,003	1,00

Equação de Regressão em Unidades Codificadas

Geometria
GAVETA

$$\boldsymbol{d_{max-Insitec} = 61,53 - 10,706\Delta P + 12,22\Phi + 9,82\mu^2 + 1,878\mu\sigma - 2,357\mu.\Delta P - 3,886\,\mu.\Phi - 1,614\sigma.\Phi + 2,671\,\Delta P.\Phi + 2,938\mu + 1,515\sigma}$$

Equação 35

GLOBO

$$\boldsymbol{d_{max-Insitec} = 59,19 - 10,706\Delta P + 15,722\Phi + 9,82\mu^2 + 1,878\mu\sigma - 2,357\mu.\Delta P - 3,886\,\mu.\Phi - 1,614\sigma.\Phi + 2,671\,\Delta P.\Phi - 2,938\mu - 1,515\sigma}$$

Equação 36

Onde, viscosidade (cP), Tensão Interfacial (mN/m), ΔP (bar), Φ(%)

Os gráficos de resíduo mantiveram sua aleatoriedade e normalidade. Percebe-se, no entanto, que os pontos obtidos com insitec foram menos repetitivos o que gerou um resíduo maior em alguns pontos.

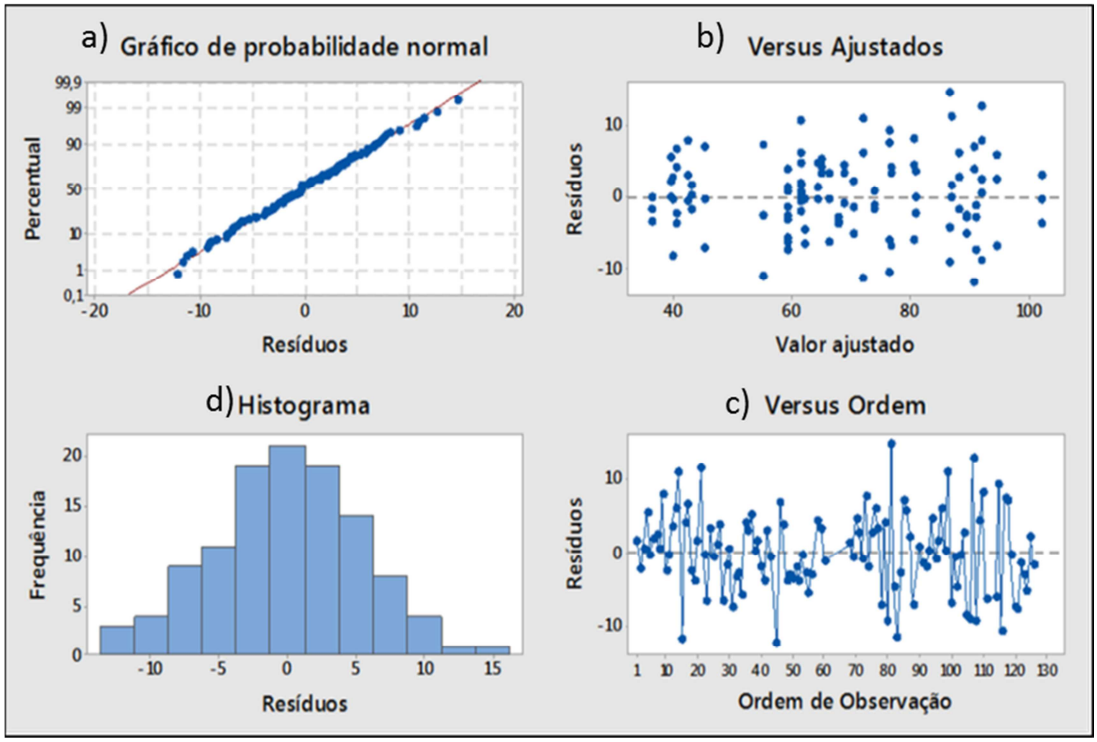


Figura 59 - Resíduos de d_{max} medidos com o Insitec, após exclusão dos fatores não significantes estatisticamente e dos *outliers*. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.

6.4.2 Modelos Baseados na Teoria de Hinze

Nesta seção, buscou-se ajustar os resultados experimentais a alguns modelos baseados na teoria inercial de Hinze (1955). Inicialmente, de maneira segregada entre os métodos de medida, foram feitas regressões multivariadas para obtenção da constante do modelo: $d_{max} = C.\varepsilon^{-0,4}\ \sigma^{0,6}\ \rho^{-0,6}$.

As análises foram separadas por concentração, baixa e alta. Numa primeira análise os pontos centrais (concentração de 7,5% de fase dispersa) foram incluídos em ambas as categorias. Após esta primeira análise, ficou mais claro que os pontos de 7,5% estavam mais aderentes aos resultados de baixa concentração (mais detalhes sobre isso serão expostos na próxima seção). Dessa forma, os pontos centrais foram removidos da análise a alta concentração.

6.4.2.1 Baixa Concentração

Os resultados experimentais apresentaram divergências entre os métodos de medição de DTG. Conforme mencionado na seção anterior, os pontos medidos com o Malvern Mastersizer 2000 apresentaram-se mais repetitivos, isto é, com menores resíduos. Ademais, as leituras de d_{max} pelo Insitec foram constantemente superiores às realizadas pelo Malvern, principalmente em concentrações mais altas.

Ficou evidente, portanto, que não se deve ter um único ajuste de modelo para ambas as técnicas de medição. Uma regressão foi ajustada para os pontos experimentais obtidos a baixa concentração de maneira segregada, por técnica de medição, sem distinção de tipo de válvula. As análises não serão todas apresentadas, mas seguiram a mesma lógica das análises dos modelos empíricos anteriores. Os resultados obtidos servirão de subsídio para a apresentação dos resultados comparativos por geometria com modelos clássicos em seção adiante.

Após realizar a regressão e verificar/eliminar os pontos que poderiam ser considerados *outliers* de forma a não causar prejuízo para o modelo, chegou-se a uma equação de ajuste para os pontos experimentais a baixa concentração medidos pelo Malvern. Essa equação (Equação 37) e os gráficos dos resíduos (Figura 60) estão apresentados.

Equação de Regressão

$$d_{max-malvern\ (baixa\ conc.)} = 3,2056\varepsilon^{-0,4} \times \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{0,6} \qquad \text{Equação 37}$$

Onde ε (W/Kg), σ(N/m) e ρ (Kg/m^3).

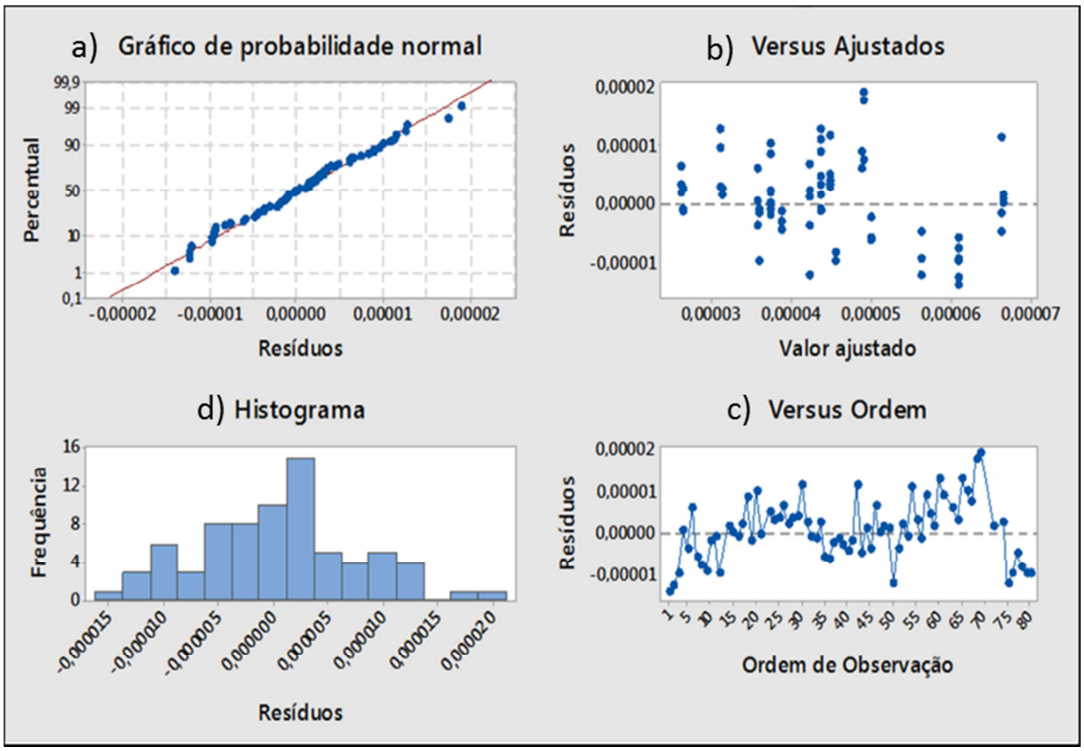


Figura 60 - Resíduos de d_{max}, a baixa concentração, medidos com o Malvern Mastersizer 2000, ajustados ao modelo baseado na teoria de Hinze. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.

A partir dos gráficos da Figura 63, ainda é possível observar a presença de dois pontos experimentais que parecem sair da normalidade, podendo ser considerados *outliers*. De forma a manter sempre três réplicas por ponto experimental, esses pontos não foram retirados do modelo.

A mesma análise foi feita para os pontos medidos com o Insitec. A Equação 38 e Figura 61 mostram o resultado da regressão e os gráficos dos resíduos para esse caso. É possível observar que, além de maiores resíduos, os pontos medidos com o Insitec se afastam um pouco mais da normalidade. Adicionalmente, pode-se suspeitar de uma tendência no gráfico dos resíduos versus valores ajustados.

Equação de Regressão

$$d_{max-Insitec\ (baixa\ conc)} = 4,1353\varepsilon^{-0,4} \times \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{0,6} \qquad \text{Equação 38}$$

Onde ε (W/Kg), σ(N/m) e ρ (Kg/m^3).

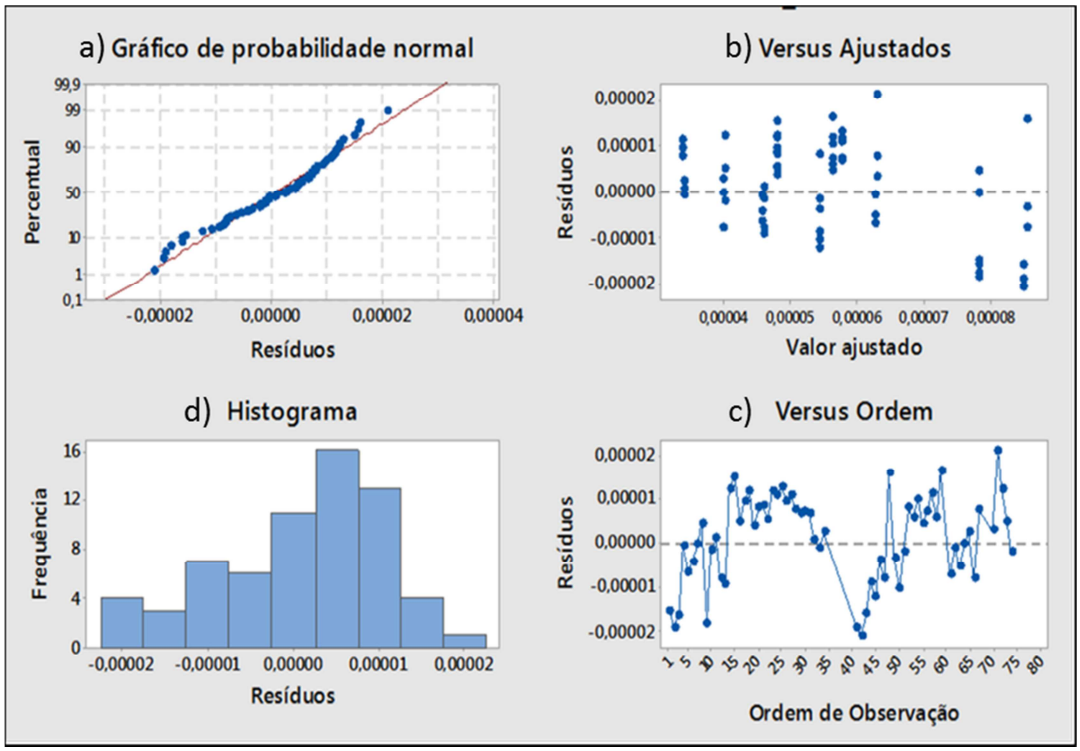


Figura 61 - Resíduos dos pontos medidos com o Insitec a baixa concentração. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.

6.4.2.2 Alta Concentração

As mesmas análises realizadas para os pontos a baixa concentração de fase dispersa foram feitas para os pontos a alta concentração. Primeiramente, uma regressão com os pontos medidos com o Malvern Mastersizer 2000 foi feita com o auxílio do Minitab. Após verificação de *outliers* e novas regressões, o modelo ajustado está apresentado na Equação 39. A figura dos gráficos dos resíduos, Figura 62, demonstra que os pontos experimentais apresentaram tendência a normalidade.

Equação de Regressão

$$d_{max-malvern\ (alta\ conc.)} = 4,398\varepsilon^{-0,4} \times \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{0,6} \qquad \text{Equação 39}$$

Onde ε (W/Kg), σ(N/m) e ρ (Kg/m^3).

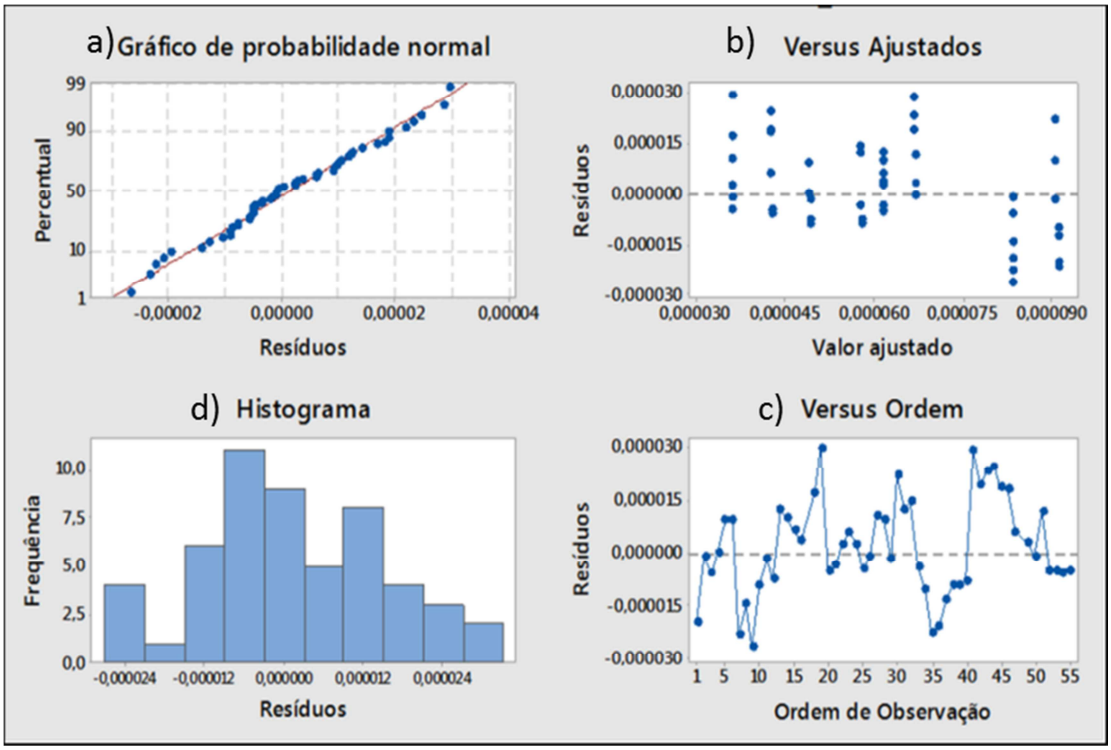


Figura 62 - Resíduos dos pontos a alta concentração medidos com o Malvern Mastersizer 2000. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.

Com os mesmos pontos experimentais, desta vez medidos com o Insitec, uma nova regressão foi realizada. A etapa de eliminação de *outliers* foi feita, porém nem todos os pontos com resíduos grandes foram possíveis de serem removidos. Um modelo para altas concentrações foi obtido (Equação 40), e os gráficos dos resíduos estão apresentados na Figura 66.

Equação de Regressão

$$\boldsymbol{d_{max-Insitec\,(alta\,conc.)} = 5,671\varepsilon^{-0,4} \times \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{0,6}} \qquad \text{Equação 40}$$

Onde ε (W/Kg), σ(N/m) e ρ (Kg/m^3).

Apesar de, na maioria dos casos, os resíduos terem se apresentado até menores que o que foi apresentado pelo Malvern, há uma forte tendência que pode ser observada no gráfico de valores ajustados versus resíduos.

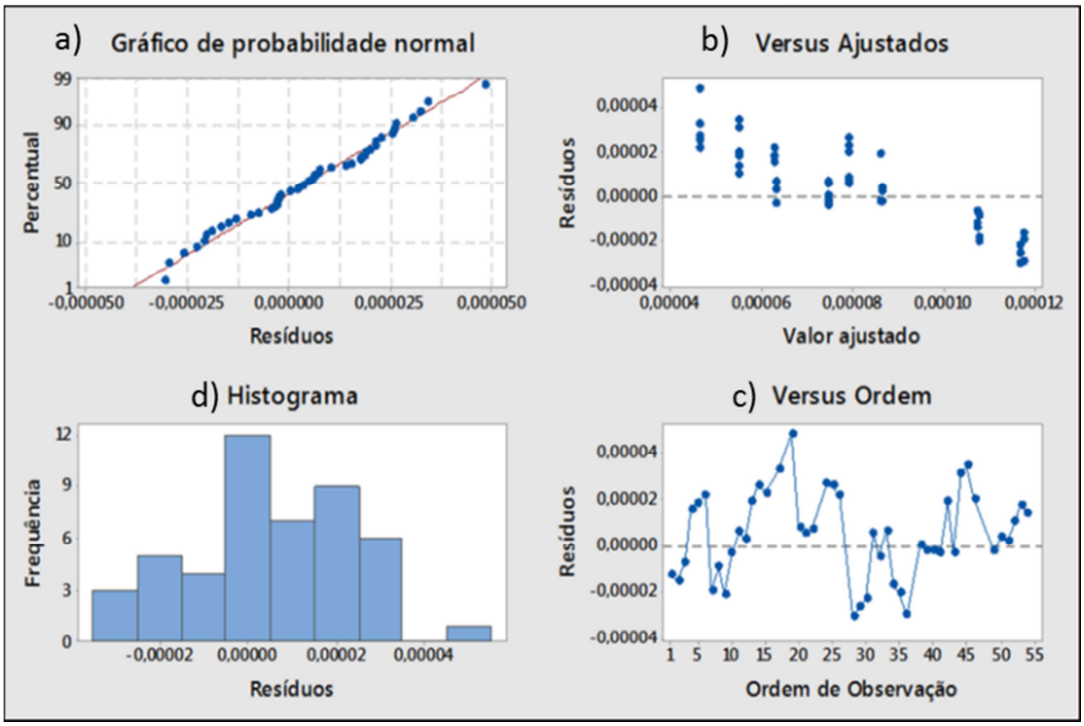


Figura 63 - Resíduos dos pontos, a alta concentração, medidos pelo Insitec. (a) Gráfico de probabilidade normal; (b) Resíduos *versus* valores ajustados; (c) Resíduos *versus* ordem de observação; (d) Histograma.

6.5 Resultados Geometria Gaveta

Nesta seção serão apresentados os resultados dos pontos experimentais para a geometria gaveta. A Tabela 22 mostra as médias dos diâmetros característicos obtidas com a utilização das duas técnicas de medição de DTG aplicadas, com seus respectivos desvios padrão. Os pontos feitos em laboratório (lab) foram medidos com o Malvern Mastersizer 2000. Já os pontos *at-line* foram obtidos pela diluição em linha e medição com o equipamento insitec da Malvern Instruments. A denominação “E” corresponde aos pontos de entrada no aparato. Já os pontos com a denominação “S”, são pontos após passagem pela restrição.

Alguns pontos extras foram realizados para que se melhorasse a resolução da resposta, incluindo pontos equidistantes entre o ponto central e os extremos. Esses pontos foram analisados apenas com o Malvern Mastersizer 2000 em laboratório, não tendo sido avaliados no sistema *at-line*. A Tabela 23 traz as médias desses pontos com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 22 - Médias dos resultados da geometria gaveta.

	GAVETA											
	Médias Lab			Desvios Lab			Médias Insitec			Desvios Insitec		
Ponto	D (0,5) (µm)	D (0,9) (µm)	D (0,1) (µm)	D (0,5) (+/-)	D (0,9) (+/-)	D (0,1) (+/-)	D (0,5) (µm)	D (0,9) (µm)	D (0,1) (µm)	D (0,5) (+/-)	D (0,9) (+/-)	D (0,1) (+/-)
1E e 2E	47,98	94,38	19,07	2,07	1,35	0,91	49,87	100,37	15,37	2,00	7,40	1,45
1S	29,46	67,61	9,97	1,22	8,58	1,27	30,47	66,34	7,00	2,02	2,62	0,59
2S	20,10	43,38	7,02	1,20	5,25	0,71	20,40	45,74	3,95	1,32	4,18	0,20
3E e 4E	60,08	116,74	25,10	2,34	7,27	1,77	64,48	114,50	16,44	5,36	8,08	3,44
3S	42,76	100,45	16,49	1,73	11,68	0,69	47,19	90,46	9,52	6,44	3,94	3,71
4S	31,71	65,25	13,28	0,97	9,84	1,39	36,97	76,85	5,38	5,32	6,11	1,92
5E e 6E	52,58	126,10	14,74	2,03	5,31	0,46	51,79	131,97	12,79	7,43	11,55	3,76
5S	29,11	67,12	7,59	0,66	0,75	0,31	32,51	86,89	7,11	1,66	12,73	1,17
6S	15,79	37,62	4,39	0,30	7,20	0,25	19,98	52,89	3,80	2,87	9,25	0,84
7E e 8E	53,30	121,24	15,83	5,61	20,04	1,43	60,19	127,77	15,41	3,03	10,91	3,27
7S	36,03	84,73	9,45	2,12	17,08	0,93	46,28	95,08	8,85	3,02	6,60	1,06
8S	23,70	49,11	5,13	1,39	0,79	1,86	36,26	73,10	5,40	2,66	1,37	2,95
9, 10 e 11E	54,95	127,96	17,13	2,97	12,76	1,30	56,87	130,10	15,93	3,60	7,34	1,56
9, 10, 11S	21,65	48,43	6,53	1,62	5,35	0,47	30,32	66,71	4,93	1,70	6,75	0,71
12E e 13E	50,58	108,99	17,24	1,75	8,62	0,65	48,55	113,57	13,67	4,07	8,64	1,50
12S	26,83	59,90	7,77	2,11	6,81	0,19	24,93	58,00	5,79	3,41	3,18	1,91
13S	17,36	39,39	5,57	0,80	4,98	0,39	16,93	37,93	3,32	2,20	5,64	0,17
14E e 15E	60,11	112,63	27,24	4,39	10,06	2,99	68,79	123,20	20,70	4,84	5,16	1,53
14S	41,65	90,23	14,56	3,24	4,92	0,57	46,34	90,31	7,77	2,77	12,53	1,94
15S	30,13	64,03	11,51	2,99	12,89	1,11	40,33	82,89	5,90	4,74	7,43	1,16
16E e 17E	51,06	132,04	13,23	3,65	11,94	1,64	49,44	138,21	11,42	1,84	6,86	0,72
16S	25,23	63,54	6,17	1,84	6,39	0,76	30,05	79,45	6,51	5,15	10,70	1,64
17S	14,23	40,85	3,78	1,06	13,54	0,39	18,71	44,94	3,52	1,27	7,13	0,36
18E e 19E	53,90	131,14	13,24	6,62	17,30	2,08	56,49	138,87	12,43	3,95	6,12	1,67
18S	30,36	71,36	6,24	3,76	6,39	1,06	39,88	87,24	6,46	3,44	3,27	1,86
19S	17,25	37,23	3,17	1,06	0,35	1,29	32,64	68,83	4,07	4,58	3,73	0,96

Tabela 23 - Pontos extras realizados apenas para as condições de alta tensão interfacial e viscosidade.

Ponto	D (0,5) (µm)	D (0,9) (µm)	D (0,1) (µm)	D (0,5) (+/-)	D (0,9) (+/-)	D (0,1) (+/-)
20E	50,61	108,19	16,84	2,36	8,99	0,02
20S	21,89	47,23	5,32	1,07	3,84	1,69
21E	52,54	117,89	17,08	2,21	8,26	0,46
21S	17,21	36,23	4,60	0,56	0,74	0,80

Os dados brutos referentes aos pontos executados encontram-se no Anexo C ao final dessa tese. Nas tabelas apresentadas no anexo podem ser vistos, além dos dados da Tabela 22 e 23, todas as condições esperadas de teste, as condições obtidas, dados do posicionamento das hastes, medições de vazão, pressão e temperatura.

A partir dos dados coletados durante os testes experimentais, pôde-se calcular alguns fatores importantes para avaliação dos modelos de quebra existentes. A Tabela 24 traz esses fatores para cada ponto experimental. Nessa tabela, encontram-se os valores de dissipação da energia cinética turbulenta (calculados segundo Equação 1, com o volume de dissipação correspondente ao volume de $2{,}5d_h$), os números de Reynolds na tubulação e

no orifício (Re_t e Re_o calculados a partir do d_h e do β, com a Equação 24), o cálculo da escala de Kolmogorov (a partir do ε e do ν, Equação 15).

A Tabela 24 traz o enfoque no dv 0.9 pois a grande maioria dos modelos de quebra visam a obtenção dos maiores diâmetros de gotas que resistem ao fenômeno de quebra, seja ele inercial ou viscoso (d_{max}). As análises a seguir seguirão o mesmo princípio, considerando que dv 0.9 ~ d_{max}. Alguns autores se baseiam nos diâmetros médios e, em alguns casos, no diâmetro médio de Sauter. Tendo em vista a aplicabilidade do estudo ora apresentado, a utilização de d_{max} se mostra mais apropriada, uma vez que o enfoque é em fenômenos de separação de fases.

Tabela 24 – Tabela resumo dos fatores calculados para a geometria gaveta.

	Condições				Média	Desvio	Média	Desvio	Valores calculados				
	μ	IT	dP	Conc.	D (0.9) Malv	D (0.9)	D (0.9) Insit	D (0.9)	ε	λk	β	Ret	Reo
Ponto	(cP)	(mN/m)	(kgf/cm2)	(%)	(μm)	(+/-)	(μm)	(+/-)	(W/kg)	(μm)	(admens.)	(admens.)	(admens.)
1	12	25	3	5	67,6	8,6	66,3	2,6	84495	13,7	0,25	1111,1	4387,0
2	12	25	9	5	43,4	5,2	45,7	4,2	261187	10,3	0,13	1111,1	8847,4
3	12	25	3	10	100,5	11,7	90,5	3,9	84495	13,7	0,25	1111,1	4387,0
4	12	25	9	10	65,2	9,8	76,8	6,1	261187	10,3	0,13	1111,1	8847,4
5	26	25	3	5	67,1	0,8	86,9	12,7	84113	24,3	0,27	512,8	1889,6
6	26	25	9	5	37,6	7,2	52,9	9,2	260376	18,3	0,14	512,8	3675,2
7	26	25	3	10	74,4	5,8	95,1	6,6	84177	24,3	0,27	512,8	1910,7
8	26	25	9	10	49,1	0,8	73,1	1,4	260544	18,3	0,14	512,8	3752,9
9; 10; 11	19	20	6	7.5	48,4	5,3	66,7	6,8	172312	16,1	0,17	701,8	4083,6
12	12	15	3	5	59,9	6,8	58,0	3,2	84591	13,7	0,25	1111,1	4467,9
13	12	15	9	5	39,4	5,0	37,9	5,6	261085	10,3	0,13	1111,1	8725,5
14	12	15	3	10	90,2	4,9	90,3	12,5	84559	13,7	0,25	1111,1	4440,6
15	12	15	9	10	64,0	12,9	82,9	7,4	261187	10,3	0,13	1111,1	8847,4
16	26	15	3	5	63,5	6,4	79,5	10,7	83955	24,3	0,28	512,8	1839,2
17	26	15	9	5	40,9	13,5	44,9	7,1	260275	18,3	0,14	512,8	3630,2
18	26	15	3	10	71,4	6,4	87,2	3,3	84293	24,3	0,26	512,8	1950,8
19	26	15	9	10	37,2	0,3	68,8	3,7	260342	18,3	0,14	512,8	3660,1
20	26	25	5	5	47,2	3,8	-	-	124335	21,9	0,21	512,8	2393,2
21	26	25	8	5	36,2	0,7	-	-	210438	19,2	0,15	512,8	3461,5

A seguir, os resultados dos experimentos são apresentados de forma segregada. Primeiramente são analisados os pontos de 5% de fase dispersa em fase contínua oleosa, juntamente com o ponto central de 7.5%. Considerou-se que dv 0.9 ~ $d_{máx,}$ e os cálculos da dissipação da energia turbulenta média foram realizados com base na Equação 1, sendo que o volume de dissipação correspondeu ao volume acima da haste somado ao volume correspondente a distância de 2,5 vezes d_h, conforme afirmado por Van de Zande (1999A) e Fossen e Schumann (2016).

A Figura 64 traz as médias dos pontos experimentais acima mencionados (com um mínimo de três réplicas), divididos pela condição de

viscosidade e tensão interfacial. A intenção do controle das propriedades físico-químicas da fase contínua era verificar se essas propriedades poderiam ter alguma influência no fenômeno de quebra de gotas. Nota-se que, para as condições testadas, as propriedades físico-químicas do óleo não influenciaram no resultado obtido. No mesmo gráfico, estão indicadas as curvas do tamanho dos vórtices de Kolmogorov calculados de acordo com a Equação 15 para a mínima e máxima viscosidade cinemática.

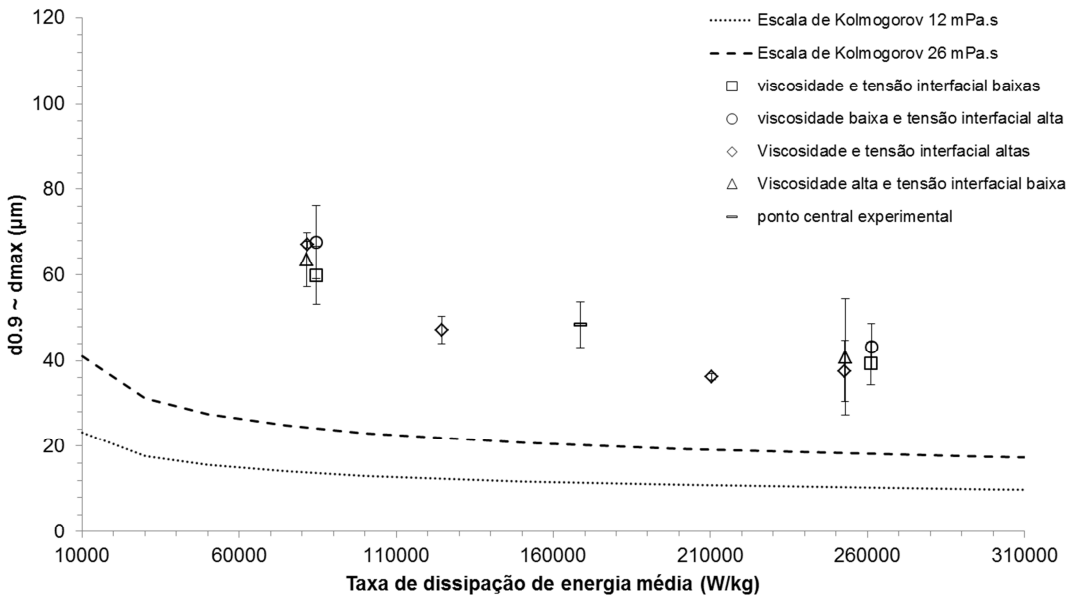


Figura 64 - Médias dos pontos experimentais com 5% de concentração da fase dispersa + ponto central, medidas com Malvern Mastersizer 2000.

Similarmente ao reportado nos resultados das medidas com o Malvern Mastersizer 2000, os mesmos pontos experimentais medidos com o Insitec estão expostos na Figura 65. Fica bem evidente que para baixas dissipações de energia, onde se esperam gotas maiores, a dispersão dos resultados foi grande, diferentemente do observado nas amostras *off-line*. Aparentemente, os pontos com viscosidade mais alta em condições de baixas dissipações apresentaram maiores diâmetros máximos.

Para uma melhor visualização, todos os pontos experimentais a baixa concentração, incluindo o ponto central, com as duas técnicas de medidas estão expostas na Figura 66.

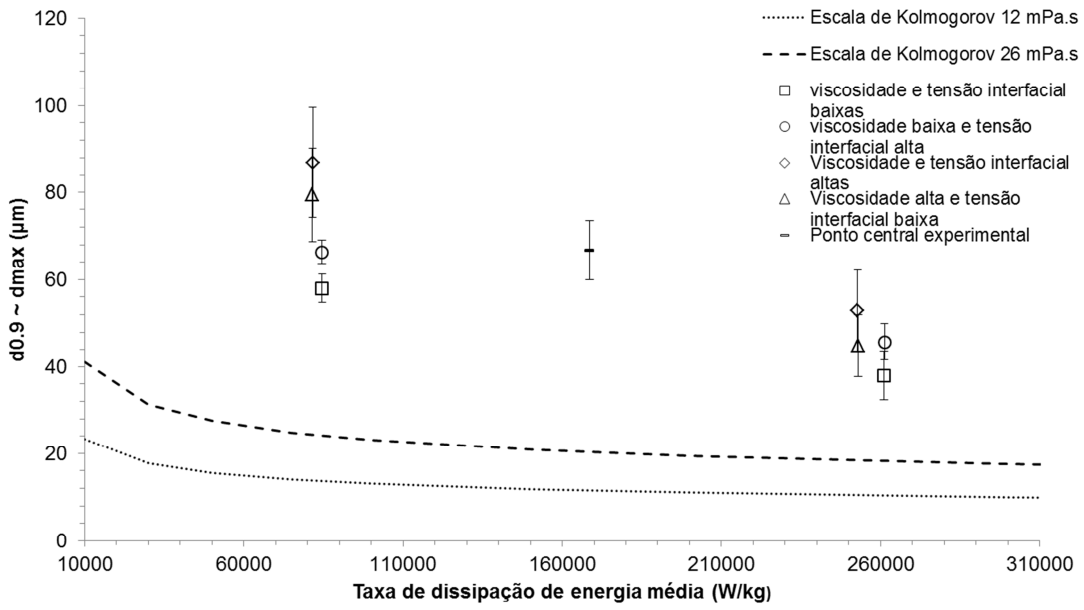


Figura 65 - Médias dos pontos experimentais com 5% de concentração da fase dispersa + ponto central, medidas com Insitec.

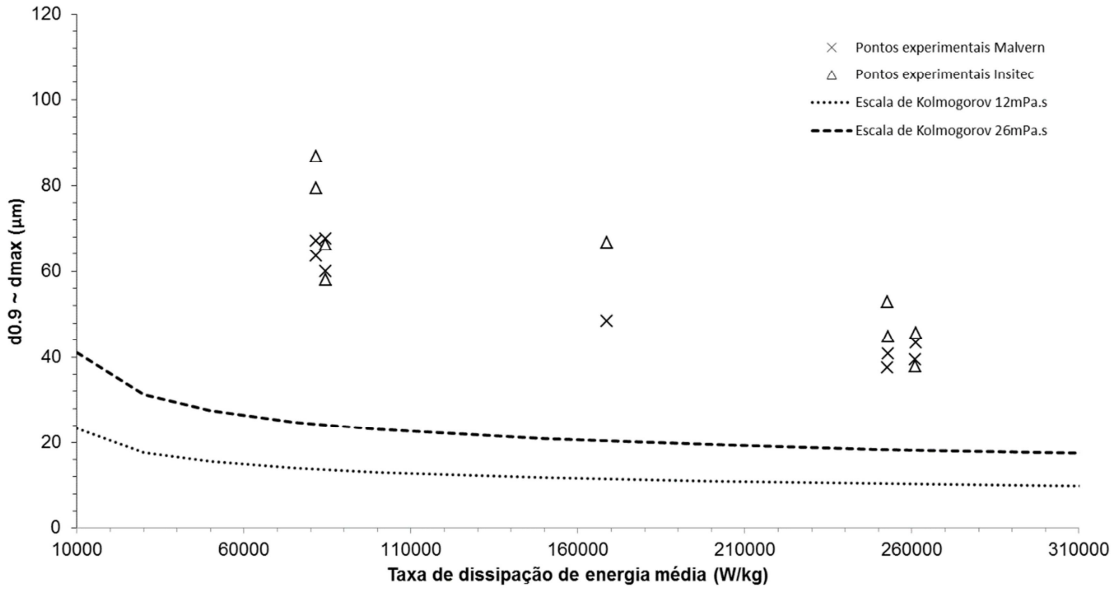


Figura 66 - Médias dos pontos experimentais com 5% de concentração da fase dispersa + ponto central.

Na Figura 66, é importante salientar que os pontos experimentais, com ambas as técnicas de medição, se apresentaram sempre superiores à escala de Kolmogorov. Sabendo-se que a maior escala de vórtices (escala integral) é equivalente a $0{,}1.d_t$ (Paolinelli e Yao, 2017), é válido afirmar que $\lambda_k < d_{max} < \lambda_{max}$ e, portanto, modelos inerciais de quebras de gotas poderiam ser utilizados

para validação dos resultados obtidos. A seguir, serão indicados diferentes modelos de quebra de gotas em comparação com os resultados experimentais.

A Equação 13 de Hinze (1955), por sua importância e pioneirismo, foi colocada na Figura 67 em comparação com os pontos experimentais a 5% de fase dispersa. Pode-se notar que o modelo subestima os valores de d_{max}. Essa constatação é corroborada por outros estudos com fase contínua de maior viscosidade e com fase dispersa em maiores concentrações (Paolinelli e Yao, 2017; Janssen *et al.*, 2001).

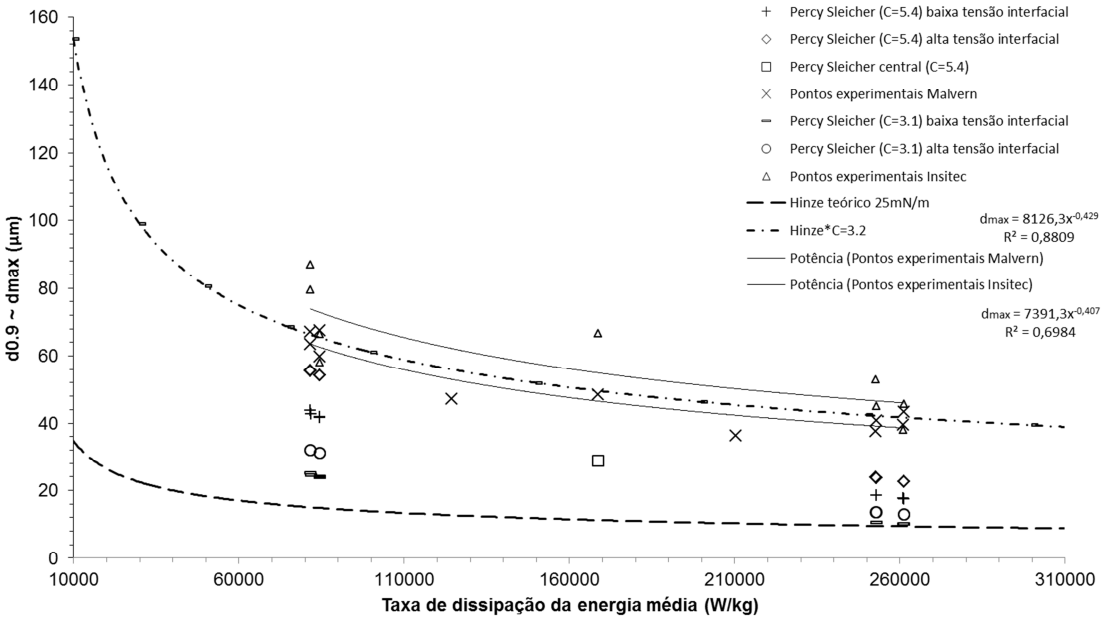


Figura 67 - Comparação de modelos de quebra aos resultados experimentais a baixa concentração de fase dispersa.

Apesar do modelo de Hinze não se mostrar adequado para a predição do tamanho de gotas após queda de pressão localizada nos experimentos realizados, é importante notar que um ajuste de curva de decaimento do diâmetro máximo com a taxa de dissipação da energia indicou $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,43}$ para os pontos medidos com o Malvern, e $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,41}$ para os pontos medidos com o Insitec, valor muito similar com o modelo de Hinze, onde $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,4}$ (Equação 13).

O modelo inercial de Hinze usa como constante de proporcionalidade um valor de 0,725. Pode-se ajustar essa constante de forma que o modelo descreva os pontos experimentais. Para o caso de baixa concentração a

constante C_H original foi substituída pelo valor de 3,2 (valor obtido na seção anterior), gerando uma melhor aderência ao modelo como pode ser observado na Figura 67.

Ao se considerar o modelo de quebra em orifício (Equação 25), sugerido por Percy e Sleicher (1983) e, levando-se em conta o valor da constante por eles obtida (3,1), observa-se uma melhora na previsão de d_{max}. Deve-se salientar que para efeito de comparação, estimou-se $\Delta P_{max} \approx \Delta P_{perm}/(1-\beta^2)$, onde β é igual a razão entre o diâmetro equivalente da passagem pela válvula e o diâmetro equivalente do canal. Van der Zande e Van den Broek (1998) melhor ajustaram seus pontos experimentais utilizando C=5,4. Com a aplicação desse valor de constante ao modelo, melhores predições do tamanho máximo de gotas foram obtidas.

Os resultados a seguir mostram os d_{max} obtidos para concentrações de 10% da fase dispersa com a adição do ponto central (7,5%) como comparação, Figura 68, para análises com o Malvern Mastersizer 2000. Fica evidente a maior dispersão dos pontos experimentais, explicitando uma possível influência dos parâmetros físico-químicos do óleo, onde se observa que pontos com menor viscosidade geraram gotas de maior d_{max}. A menor viscosidade aliada a maior concentração da fase dispersa, pode colaborar para o efeito de coalescência (maior interação entre gotículas dispersas).

Na Figura 69, estão presentes os mesmos pontos experimentais, porém com a utilização do Insitec para a medida. De uma maneira geral, os pontos apresentam menor dispersão, porém, aparentemente, uma influência grande do método de medida se apresenta. Os diâmetros das gotas lidos pelo Insitec se mostraram ainda maiores do que os observados nas medidas feitas com o Mastersizer.

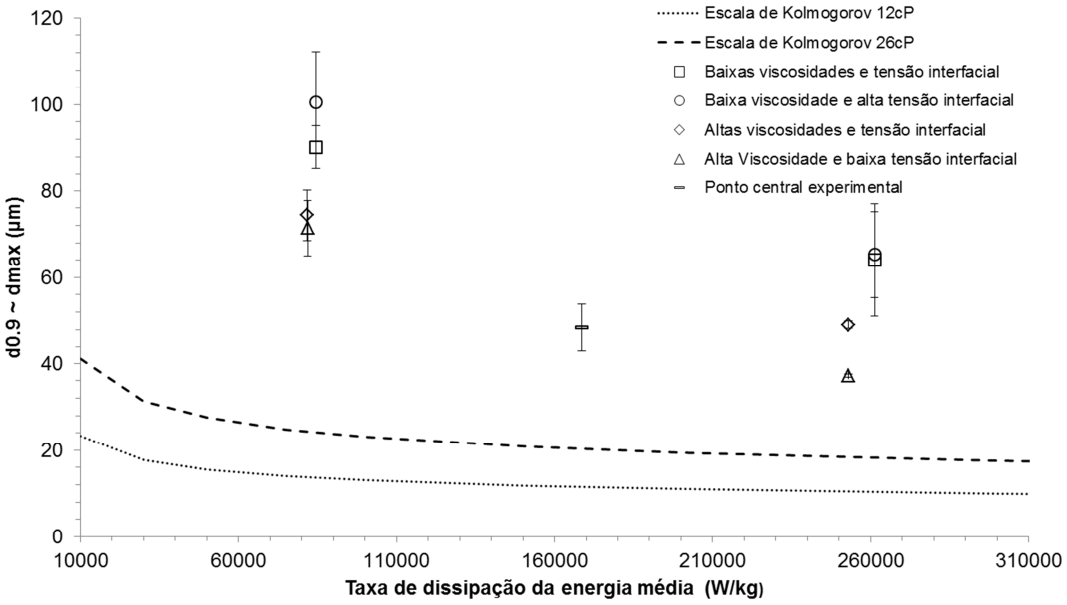


Figura 68 - Médias dos pontos experimentais com 10% de concentração da fase dispersa + ponto central, medidas com Malvern Mastersizer 2000.

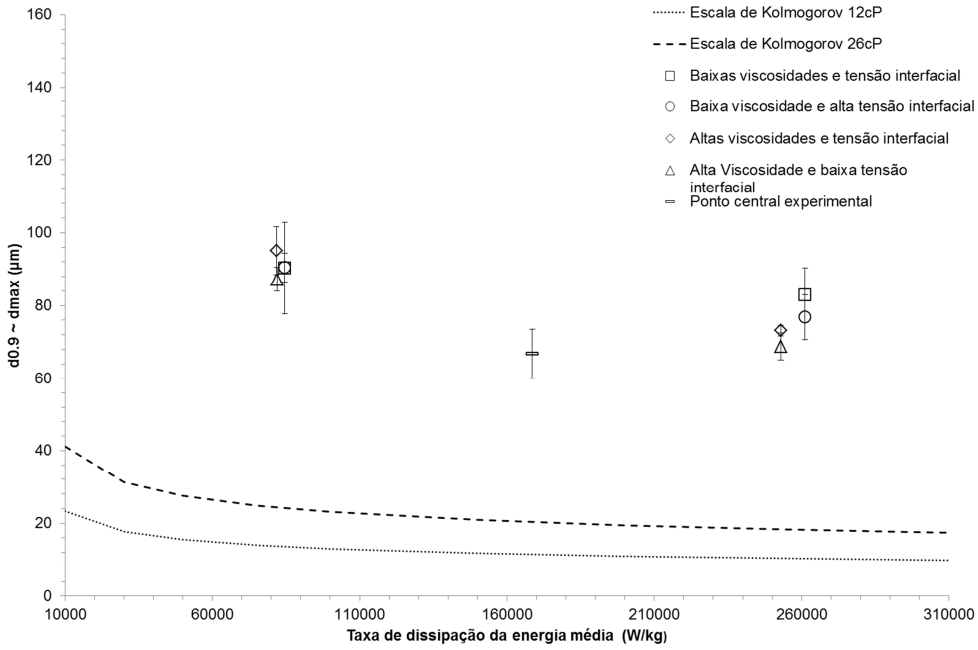


Figura 69 - Médias dos pontos experimentais com 10% de concentração da fase dispersa + ponto central, medidas com Insitec.

Para uma melhor visualização, todos os pontos experimentais a alta concentração, incluindo o ponto central, com as duas técnicas de medidas estão expostas na Figura 70.

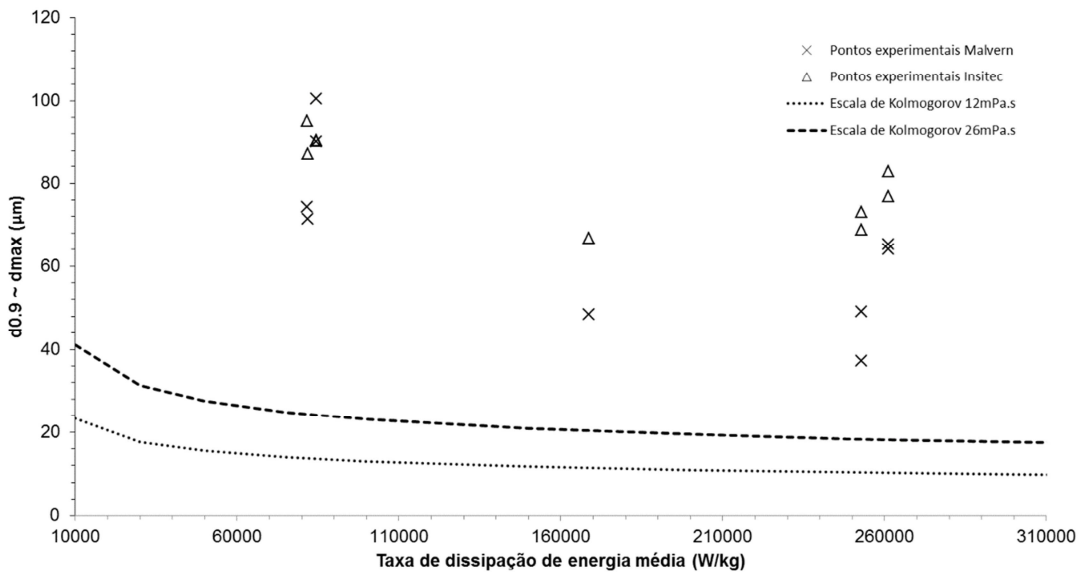


Figura 70 - Médias dos pontos experimentais com 10% de concentração da fase dispersa + ponto central, com ambas as técnicas de medida.

O aumento de d_{max} por conta de uma maior concentração da fase dispersa observado foi também reportado por Paolinelli *e* Yao (2017). Os autores sugerem que esse aumento gradual do d_{max} pode ser explicado por dois fenômenos. Primeiramente, uma supressão gradual da efetividade da tensão turbulenta, também chamada de atenuação da turbulência que, devido à presença das gotículas dispersas, a emulsão tem uma viscosidade aparente maior do que a da fase contínua que a constitui. Esse incremento na viscosidade aparente da emulsão é maior para maiores concentrações da fase dispersa. O segundo fenômeno que pode ter ocorrido é efeito da coalescência de gotas que, em maior número, tendem a ter maior probabilidade de choque (Walstra e Smulders, 1998).

Pode-se notar que em baixas concentrações de fase dispersa, uma curva de potência pôde ser ajustada razoavelmente bem incluindo o ponto central (Figura 67), tanto para os pontos medidos com o Mastersizer 2000 quanto para os pontos medidos com o Insitec (esse com uma dispersão muito maior).

O mesmo não foi possível para altas concentrações de fase dispersa (Figura 70). A tentativa de ajuste de curva de potência para os pontos medidos pelo Malvern Mastersizer 2000 incluindo o ponto central apresentou

decaimento de $d_{max} \propto \varepsilon^{-0.41}$, porém com coeficiente e correlação muito baixo. Os pontos medidos com Insitec, pelo contrário, não apresentaram a tendência observada pela teoria de Hinze. Isso sugere que os efeitos de supressão da turbulência e/ou coalescência começam a ser significativos em concentrações da fase dispersa superiores a 7,5%.

A Figura 71 mostra uma comparação entre os pontos experimentais de diâmetro máximo aproximado ($d_{0.9} \cong d_{max}$) a altas concentrações e os diferentes modelos anteriormente utilizados. Conforme realizado anteriormente para os pontos a baixa concentração, uma nova constante para o modelo de Hinze foi testada. O melhor valor para essa constante (obtida pela regressão multivariada dos pontos experimentais) foi C_H = 4,4. A predição, considerando essa nova constante está demonstrada na Figura 71.

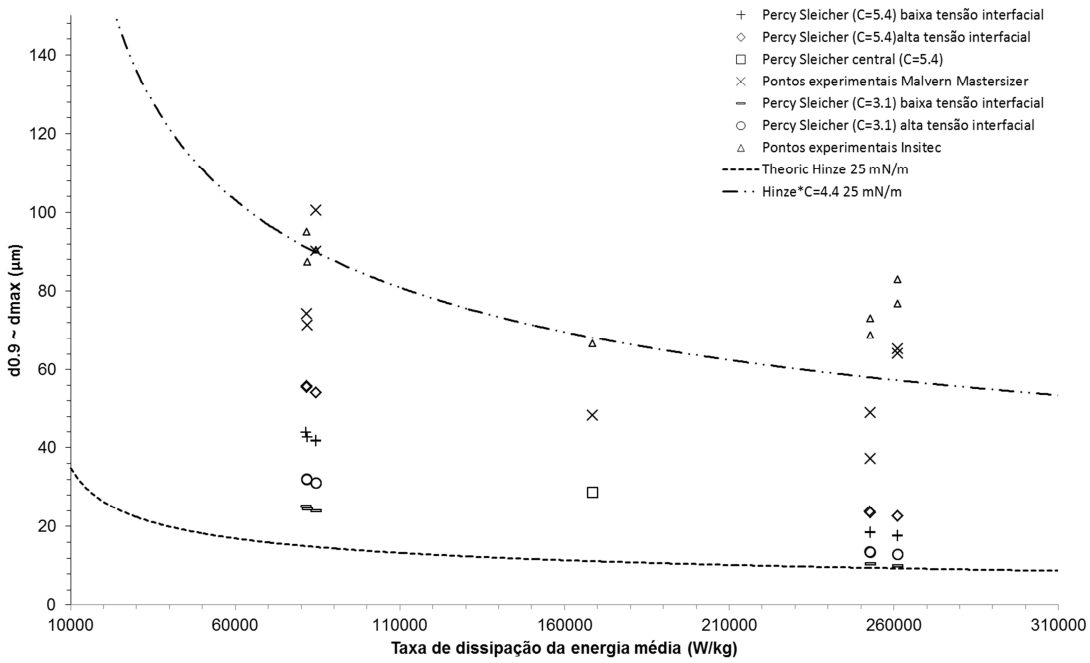


Figura 71 - Comparação de modelos de quebra aos resultados experimentais a alta concentração de fase dispersa, mais o ponto central (7,5%).

Apesar de todos os d_{max} obtidos experimentalmente estarem com valores acima da escala de Kolmogorov (Figuras 66 e 70), a proximidade desses valores justificou a avaliação do modelo de quebra em escoamento turbulento viscoso. As Figuras 72 e 73 mostram os resultados experimentais de diâmetro máximo frente à taxa de dissipação da energia turbulenta, a luz do modelo descrito por Vankova *et. al.* (2007), Equação 16, para concentrações

de 5 e 10% respectivamente. Os pontos do modelo foram calculados tendo como base os menores e maiores níveis de viscosidade, tensão interfacial e massa específica.

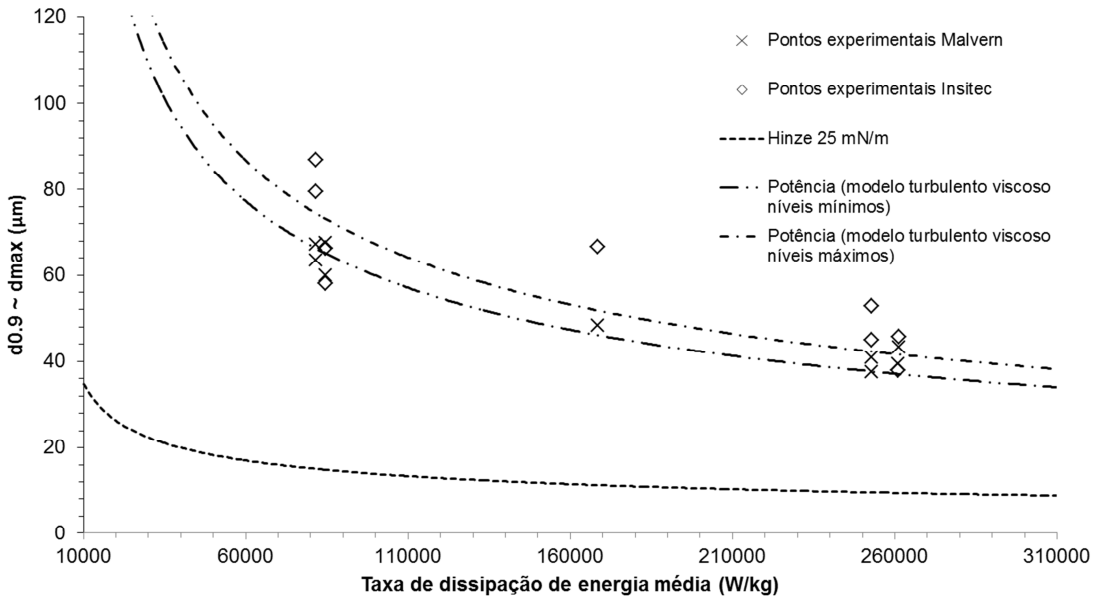


Figura 72 - Comparação do modelo viscoso com pontos experimentais a baixa concentração de fase dispersa.

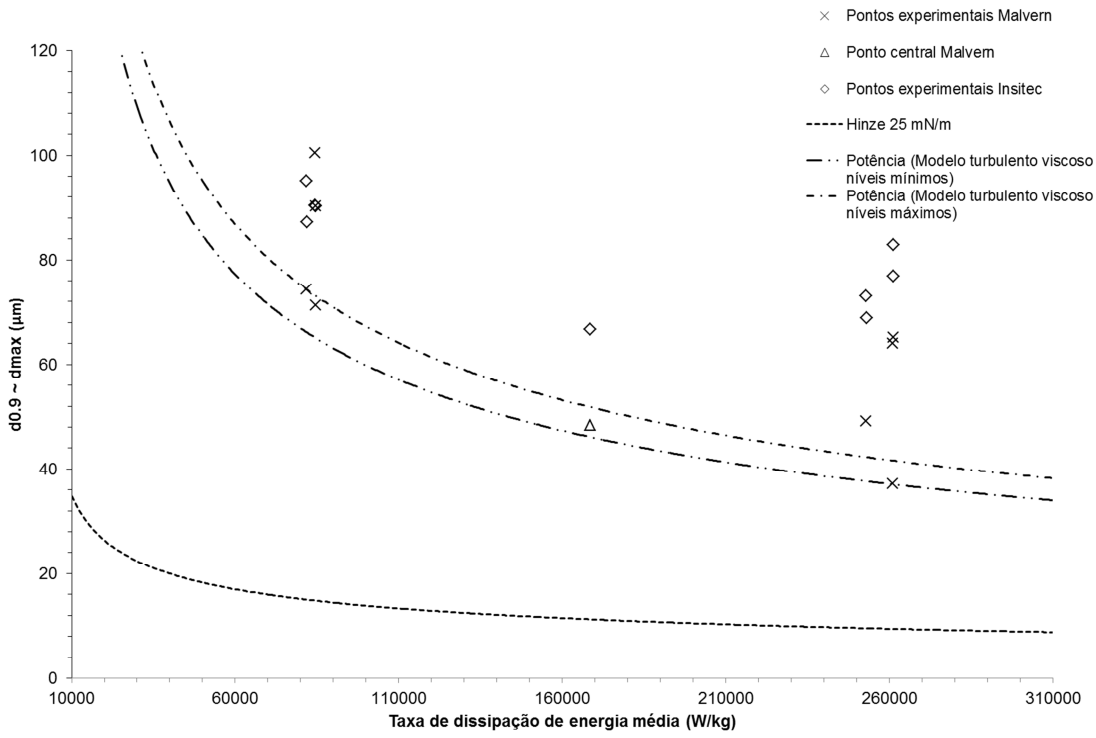


Figura 73 - Comparação do modelo viscoso com pontos experimentais a alta concentração de fase dispersa.

A partir das Figuras 72 e 73, pode-se observar que o modelo proposto por Vankova et al. (2007) gerou melhores resultados para os pontos de menor concentração do que os pontos de maior concentração.

6.5.1 Conclusões da Geometria Gaveta

O diâmetro máximo experimental, para baixas concentrações de água em óleo (inferiores a 7,5%), decaiu com o aumento da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta de acordo com a lei de potência com expoente de -0,43 (pontos medidos com o Malvern Mastersizer 2000) e -0,41 (pontos medidos com o Insitec). Este expoente é bem similar ao do modelo da teoria de Hinze - Kolmogorov (-0,4).

O aumento da concentração da fase dispersa resultou no aumento dos diâmetros máximos experimentais. O fenômeno de supressão da turbulência, devido ao aumento da viscosidade aparente da emulsão, e/ou a coalescência de gotas, devido a uma maior população das mesmas, podem possivelmente explicar esse resultado. Apesar de todos os esforços para evitar a coalescência, é possível que o fenômeno possa ter ocorrido em menor escala.

O modelo de quebra inercial de Hinze (1955) não foi capaz de descrever os resultados experimentais. Um aumento na constante do modelo, obtido por regressão multivariada dos pontos experimentais (obtida na seção anterior), tende a melhorar a predição. O modelo de Percy e Sleicher (1983) também não foi capaz de descrever os resultados, com a constante de proporcionalidade indicada pelos autores. A aplicação da constante de van der Zande e van den Broeck (1998) gerou resultados ligeiramente melhores (C=5,4).

Apesar de todos os pontos experimentais de diâmetro máximo terem sido superiores a escala de Kolmogorov, o que indicaria que forças inerciais estariam sendo mandatórias no fenômeno, o modelo de quebra turbulenta viscosa descreveu relativamente bem os resultados experimentais. Isso pode indicar que forças viscosas têm alguma influência no processo de quebra das gotas.

Outra explicação possível para a boa adequação do modelo de quebra viscosa ter se adequado bem aos resultados foi reportado por Vankova *et al.*

(2007), que indica que a constante advinda da equação de Laplace (C=4, Equação 5) possa ter sido a responsável por essa aderência.

Dos métodos de medição de DTG, a medição *offline* parece mais robusta. A medição *at-line* pode ter sido prejudicada por uma maior ocorrência de gotas presas na lente de medida (o que gera recontagem de gota), ou por uma maior ocorrência de coalescência, dado o longo caminho percorrido pela amostra e/ou por uma menor diluição da amostra.

6.6 Resultados Geometria Globo

Analogamente ao que foi feito para a geometria gaveta, nesta seção serão apresentados os resultados dos pontos experimentais para a geometria globo. A Tabela 25 mostra as médias dos diâmetros característicos obtidas com a utilização das duas técnicas de medição de DTG aplicadas, com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 25 - Médias dos resultados geometria globo.

	GLOBO											
	Médias Lab			Desvios Lab			Médias Insitec			Desvios Insitec		
Ponto	**D (0,5) (µm)**	**D (0,9) (µm)**	**D (0,1) (µm)**	**D (0,5) (+/-)**	**D (0,9) (+/-)**	**D (0,1) (+/-)**	**D (0,5) (µm)**	**D (0,9) (µm)**	**D (0,1) (µm)**	**D (0,5) (+/-)**	**D (0,9) (+/-)**	**D (0,1) (+/-)**
1E e 2E	47,87	95,41	18,36	1,55	4,81	1,46	50,69	103,28	15,06	1,71	4,37	1,19
1S	25,01	48,64	8,62	1,07	2,19	0,62	30,25	61,50	6,55	1,90	1,92	2,12
2S	17,44	36,35	4,79	0,98	4,95	1,41	18,42	41,91	3,42	0,93	2,90	0,30
3E e 4E	55,17	105,42	24,61	3,03	12,44	2,35	63,95	116,16	16,70	3,41	9,94	1,58
3S	36,01	83,25	14,93	1,89	9,65	1,17	50,03	95,70	10,32	1,71	3,81	2,00
4S	29,88	54,80	11,74	1,26	5,19	0,44	38,33	81,12	5,83	2,00	3,04	2,86
5E e 6E	51,69	118,15	15,24	0,89	3,98	0,53	57,37	150,69	15,10	3,48	7,05	1,67
5S	24,49	53,14	7,24	1,39	1,70	0,74	30,30	73,70	7,16	2,74	11,85	1,09
6S	13,45	31,45	4,19	0,96	4,91	0,73	19,03	41,47	3,83	1,45	5,00	0,66
7E e 8E	51,52	115,46	15,31	3,50	7,65	1,47	55,03	126,25	13,87	3,68	8,33	2,66
7S	31,56	62,04	9,48	3,36	6,31	1,33	45,50	91,17	7,10	4,60	6,22	1,06
8S	20,77	42,81	3,58	1,96	3,72	2,44	34,92	64,99	4,86	2,30	4,87	0,94
9, 10 e 11E	51,29	112,21	16,36	2,90	8,53	1,58	54,65	127,94	14,34	2,67	7,38	0,62
9, 10, 11S	19,12	39,60	5,98	1,66	4,45	1,04	26,01	56,68	4,38	1,84	3,80	1,01
12E e 13E	52,10	107,56	18,12	3,62	9,52	1,04	54,31	122,54	15,09	3,62	2,92	1,73
12S	23,48	48,50	7,91	0,72	0,83	0,66	27,55	69,19	5,42	0,96	1,08	0,30
13S	14,96	29,97	3,39	0,81	2,25	1,13	17,56	42,96	3,28	1,92	1,78	0,18
14E e 15E	60,75	115,58	25,33	5,67	14,80	1,87	70,30	126,23	20,62	1,97	6,26	1,62
14S	35,00	69,20	13,08	0,89	3,73	1,63	51,48	101,71	8,80	2,21	3,41	1,27
15S	32,14	62,99	7,81	2,85	9,43	0,20	39,30	90,23	4,21	3,67	10,22	0,12
16E e 17E	48,00	116,43	12,19	1,63	4,83	0,58	50,54	140,53	11,12	1,43	2,68	0,82
16S	20,29	50,82	4,27	0,99	4,72	1,75	25,69	64,51	4,68	0,69	0,44	0,61
17S	11,01	26,24	2,71	0,44	2,13	0,48	14,62	34,45	2,97	2,25	1,71	0,46
18E e 19E	48,26	113,90	12,42	2,84	9,34	0,41	57,83	134,36	13,45	3,79	11,97	1,70
18S	26,81	61,17	6,48	1,78	5,14	0,48	41,12	85,77	6,43	1,82	1,45	2,00
19S	16,78	37,83	3,89	1,44	6,42	0,64	31,73	70,87	3,64	2,44	2,88	1,32

Os mesmos pontos extras realizados para a geometria gaveta foram realizados também para a geometria globo, de forma que se tivesse uma sensibilidade em pontos equidistantes entre o ponto central e os extremos. Esses pontos foram analisados apenas com o Malvern Mastersizer 2000 em

laboratório, não tendo sido avaliados no sistema *at-line*. A Tabela 26 traz as médias desses pontos com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 26 - Resultados médios dos testes complementares geometria globo e seus respectivos desvios.

Ponto	D (0,5) (µm)	D (0,9) (µm)	D (0,1) (µm)	D (0,5) (+/-)	D (0,9) (+/-)	D (0,1) (+/-)
20E	54,89	122,11	18,20	0,81	7,11	0,19
20S	21,58	44,98	5,78	0,96	2,23	0,18
21E	55,33	124,49	17,98	4,20	14,67	1,10
21S	17,78	35,71	4,47	0,87	1,60	0,96

Todos os dados brutos referentes aos pontos executados encontram-se no Anexo C ao final dessa tese. Nas tabelas apresentadas no anexo podem ser vistos, além dos dados da Tabela 25 e 26, todas as condições esperadas de teste, as condições obtidas, dados do posicionamento das hastes, medições de vazão, pressão e temperatura.

Assim como foi feito anteriormente, puderam-se calcular alguns fatores importantes para avaliação dos modelos de quebra existentes. A Tabela 27 traz esses fatores, para cada ponto experimental. Nessa tabela, encontram-se os valores de dissipação da energia cinética turbulenta, os números de Reynolds na tubulação e no orifício (calculados a partir do d_h da passagem mais estreita na geometria globo e do β), o cálculo da escala de Kolmogorov (a partir do ε e do ν). O valor de β considerado foi calculado dada a menor passagem ao fluido ao longo do caminho da válvula globo. Em alguns casos a menor passagem foi o estreitamento lateral entre hastes, em outros foi a passagem no fim do curso da haste central.

A dissipação da energia cinética turbulenta foi calculada segundo a Equação 1, porém, dessa vez, com volume de dissipação correspondente ao volume total da geometria mais o volume referente à distância de $1d_h$ tendo como aresta a posição de abertura da haste. A consideração desse volume levou em conta as simulações numéricas apresentadas na seção 6.1. A Figura 74 mostra os volumes considerados para o cálculo de dissipação de energia.

Tabela 27 - Valores dos parâmetros calculados para a média dos pontos da geometria globo.

	Condições				Média	Desvio	Média	Desvio	Valores calculados				
	μ	IT	dP	Conc.	D (0.9) Malv	D (0.9)	D (0.9) Insit	D (0.9)	ε	λk	β	Ret	Reo
Ponto	(cP)	(mN/m)	(kgf/cm2)	(%)	(μm)	(+/-)	(μm)	(+/-)	(W/kg)	(μm)	(admens.)	(admens.)	(admens.)
1	12	25	3	5	48,6	2,2	61,5	1,9	104239	13,0	0,33	1111,1	3333,3
2	12	25	9	5	36,4	4,9	41,9	2,9	398140	9,3	0,15	1111,1	7169,3
3	12	25	3	10	83,3	9,7	95,7	3,8	104288	13,0	0,33	1111,1	3333,3
4	12	25	9	10	54,8	5,2	81,1	3,0	397982	9,3	0,16	1111,1	7117,2
5	26	25	3	5	53,1	1,7	73,7	11,9	101576	23,0	0,33	512,8	1538,5
6	26	25	9	5	31,5	4,9	41,5	5,0	383673	16,5	0,18	512,8	2913,5
7	26	25	3	10	62,0	6,3	91,2	6,2	101481	23,0	0,33	512,8	1538,5
8	26	25	9	10	42,8	3,7	65,0	4,9	383184	16,5	0,18	512,8	2855,2
9; 10; 11	19	20	6	7.5	39,6	4,5	56,7	3,8	249115	14,6	0,27	701,8	2607,3
12	12	15	3	5	48,5	0,8	69,2	1,1	104630	12,9	0,33	1111,1	3333,3
13	12	15	9	5	30,0	2,3	43,0	1,8	398455	9,3	0,15	1111,1	7276,0
14	12	15	3	10	69,2	3,7	101,7	3,4	104337	13,0	0,33	1111,1	3333,3
15	12	15	9	10	63,0	9,4	90,2	10,2	398140	9,3	0,15	1111,1	7169,3
16	26	15	3	5	50,8	4,7	64,5	0,4	101513	23,0	0,33	512,8	1538,5
17	26	15	9	5	26,2	2,1	34,5	1,7	383184	16,5	0,18	512,8	2855,2
18	26	15	3	10	61,2	5,1	85,8	1,5	101672	23,0	0,33	512,8	1538,5
19	26	15	9	10	37,8	6,4	70,9	2,9	383786	16,5	0,18	512,8	2927,4
20	26	25	4,5	5	45,0	2,2	-	-	167241	20,3	0,33	512,8	1538,5
21	26	25	7,5	5	35,7	1,6	-	-	315359	17,4	0,21	512,8	2393,2

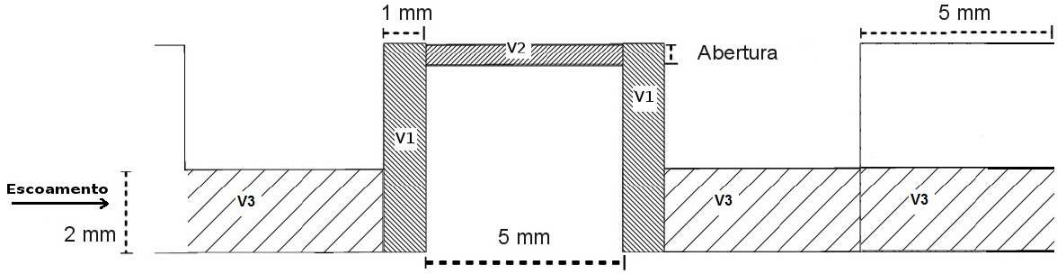


Figura 74 - Indicação dos volumes considerados para o volume de dissipação para a geometria globo: v_{dis} = 2.v1 + v2 + 3.v3.

Uma observação interessante constante na Tabela 27 diz respeito aos valores de dissipação da energia cinética turbulenta calculados dadas as considerações mencionadas previamente. A tortuosidade do escoamento passando pelo elemento dissipador gerou uma zona de dissipação menor na geometria globo quando se comparada com a geometria gaveta. Consequentemente, para as mesmas condições de escoamento, foram obtidos valores superiores da taxa de dissipação para a geometria globo.

Os resultados de d_{max} obtidos experimentalmente, assim como praticado na seção anterior, serão apresentados separadamente de acordo com a concentração, incluindo o ponto central para comparação. A verificação da consistência na inexistência de influência dos parâmetros físico-químicos para baixas concentrações fica evidente na Figura 75, cujos pontos experimentais

foram medidos com o Malvern Mastersizer 2000. Antecipando as explicações que virão com a apresentação dos resultados totais, uma curva de potência foi ajustada para os pontos com viscosidade e tensão interfacial altos. Isso foi feito para já indicar a aderência do resultado com a relação de d_{max} com a dissipação da energia, conforme mencionado anteriormente para a geometria gaveta.

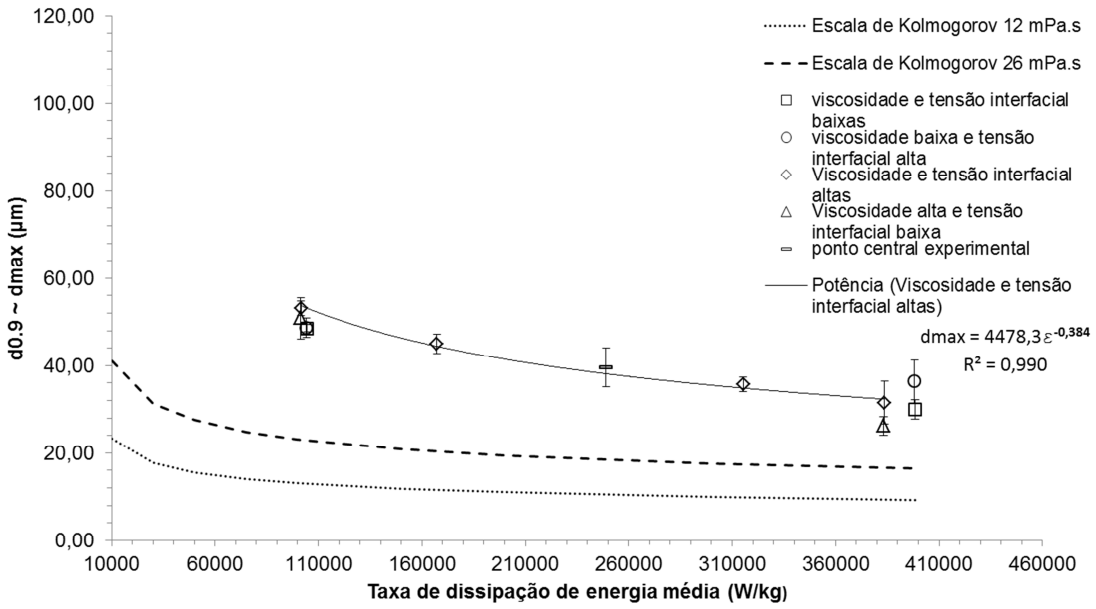


Figura 75 - Resultados experimentais a baixa concentração, medidos com Mastersizer 2000, segregados por propriedades físico-químicas para a geometria globo.

Os resultados de d_{max} medidos com o Insitec apresentaram comportamento análogo ao observado para a geometria gaveta. Os valores obtidos ainda que coesos, indicando uma inexistência de influência das propriedades do fluido, apresentaram-se maiores do que os medidos pela outra técnica. Vale ressaltar que o mesmo padrão foi observado nos pontos experimentais da geometria gaveta, anteriormente explicitado. A Figura 76 mostra o mesmo gráfico apresentado anteriormente, porém com medidas feitas com o Insitec.

É importante salientar que todos os pontos experimentais também se apresentaram acima da escala de Kolmogorov e, portanto, também se encaixariam na teoria de quebra de gotas turbulenta inercial. Para uma melhor

visualização, todos os pontos experimentais a baixa concentração, incluindo o ponto central, com as duas técnicas de medidas estão expostas na Figura 77.

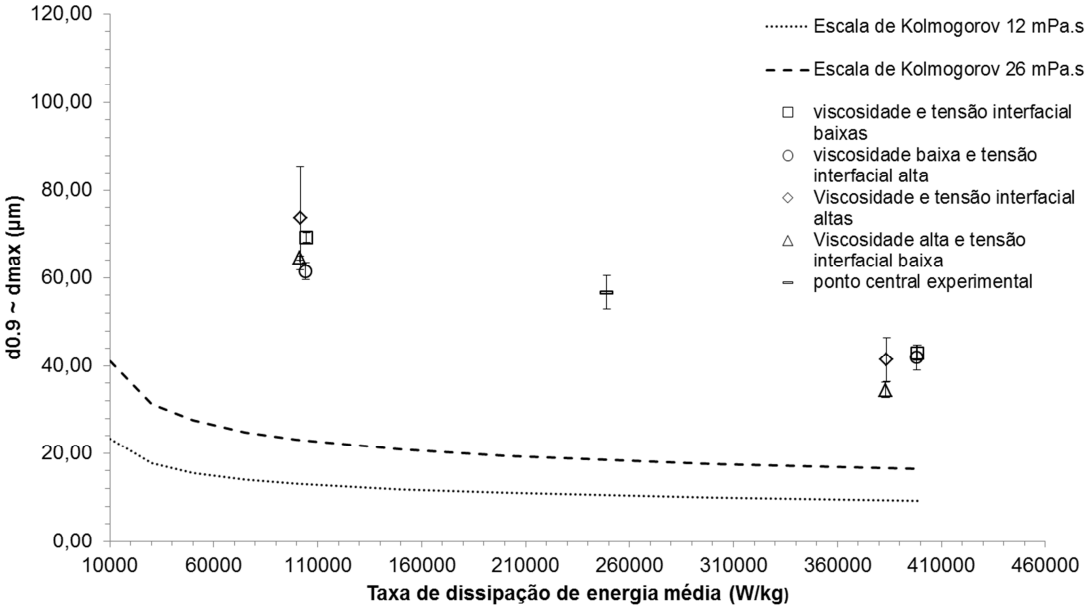


Figura 76 - Pontos experimentais a baixa concentração medidos com o Insitec, divididos por propriedades físico-químicas para a geometria globo.

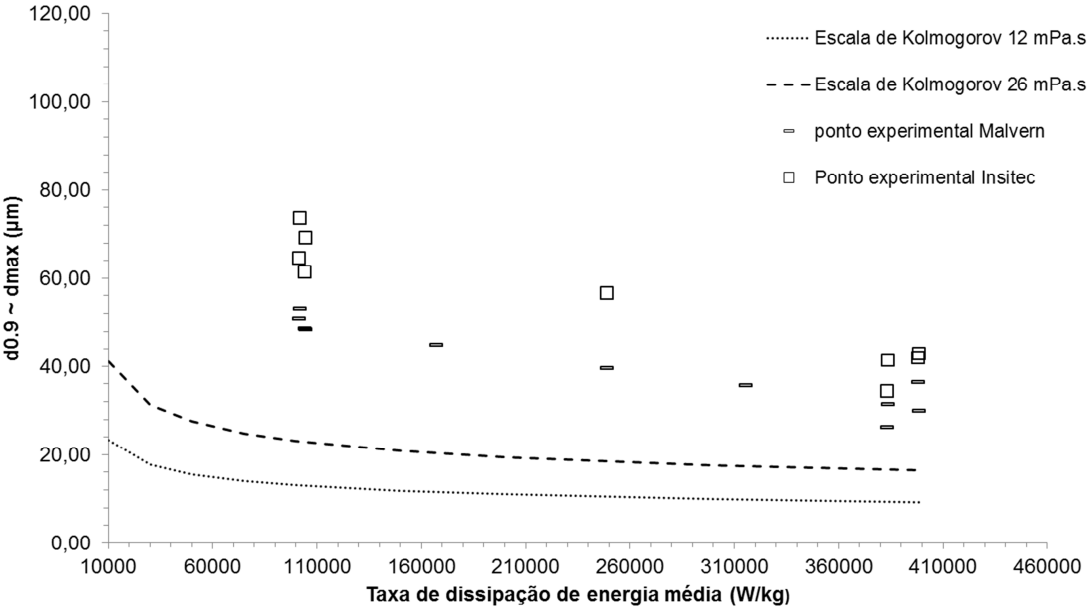


Figura 77 - Pontos experimentais divididos por técnica de medida de DTG para a geometria globo.

Sabendo-se que os diâmetros máximos obtidos experimentalmente se encontram na zona inercial de quebra de gotas, os mesmos modelos de quebra de gotas, aplicados anteriormente para a geometria gaveta, foram testados

para a geometria globo. A Figura 78 mostra o gráfico com a aplicação dos modelos.

O modelo clássico de Hinze também não se mostrou adequado para a predição do tamanho de gotas. É importante notar que, assim como observado para a geometria gaveta, um ajuste de curva de decaimento do diâmetro máximo com a taxa de dissipação da energia indicou $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,36}$ para os pontos medidos com o Malvern, e $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,38}$ para os pontos medidos com o Insitec, valor muito similar com o modelo de Hinze, onde $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,4}$ (Equação 13). É interessante perceber que o ajuste da constante do modelo de Hinze utilizado para a geometria gaveta (constante C_H original substituída pelo valor de 3,2) se mostrou adequado também para a geometria globo.

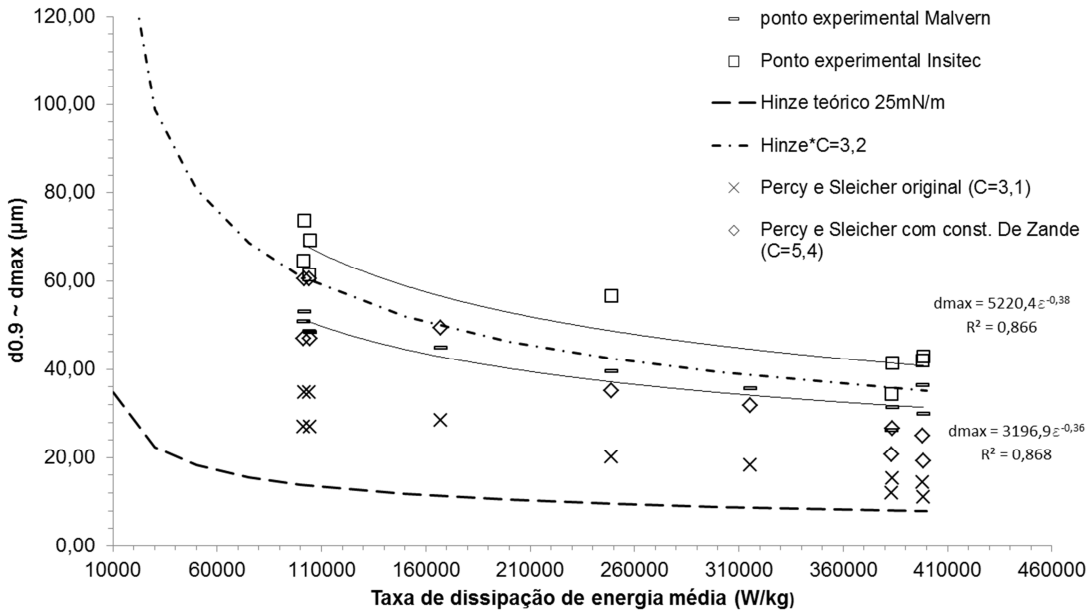


Figura 78 - Aplicação dos modelos de quebra de gotas turbulento para os pontos de baixa concentração de água em óleo, para a geometria globo.

Ao se considerar o modelo de quebra em orifício (Equação 25), sugerido por Percy e Sleicher (1983) e, levando-se em conta o valor da constante por eles obtida (3,1), observa-se uma melhora na previsão de d_{max}. A aplicação da constante reportada por Van der Zande e Van den Broek (1998), apresentou resultado mais próximo do que foi observado experimentalmente, quando comparado com a geometria gaveta.

Os resultados a seguir mostram os d_{max} obtidos para concentrações de 10% da fase dispersa com a adição do ponto central (7,5%) como comparação, Figura 79, para análises com o Malvern Mastersizer 2000. Os resultados, comparados à geometria anterior, se mostraram bastante coerentes. Ficou também evidente uma maior dispersão dos pontos experimentais, explicitando uma possível influência dos parâmetros físico-químicos do óleo, onde se observou que pontos com menor viscosidade também geraram gotas de maior d_{max}. A menor viscosidade, aliada a maior concentração da fase dispersa, pode colaborar para o efeito de coalescência (maior interação entre gotículas dispersas).

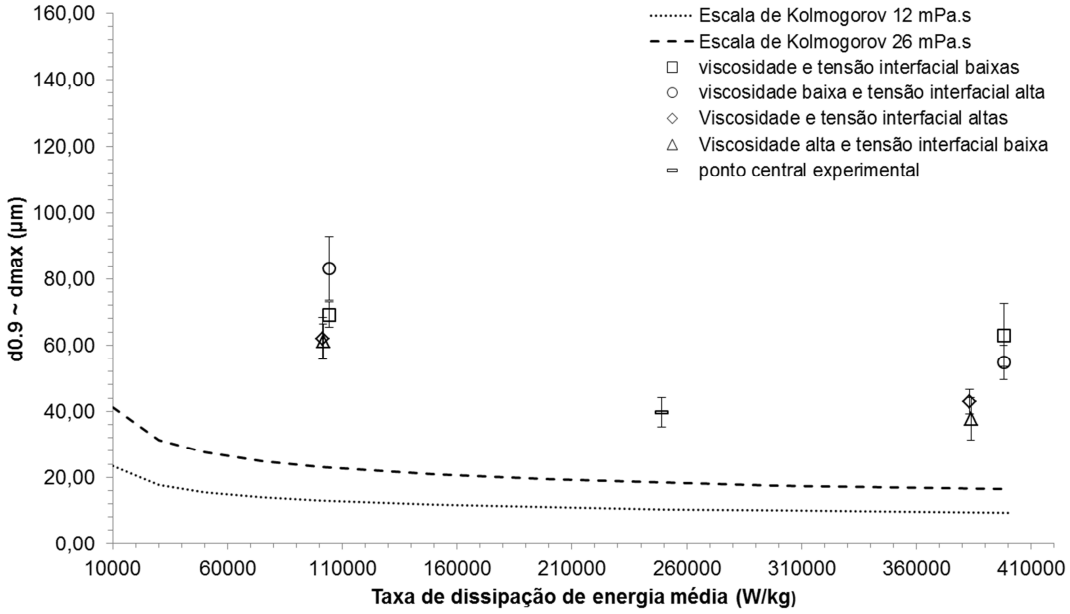


Figura 79 - Pontos experimentais com geometria globo a alta concentração + ponto central, medidos com o Malvern Mastersizer 2000.

Na Figura 80 estão presentes os mesmos pontos experimentais, porém com a utilização do Insitec para a medida. De maneira geral, os pontos apresentam menor dispersão, porém, aparentemente, uma influência grande do método de medida volta a se apresentar. As gotas lidas pelo Insitec também se mostraram maiores do que as observadas nas medidas feitas com o Mastersizer.

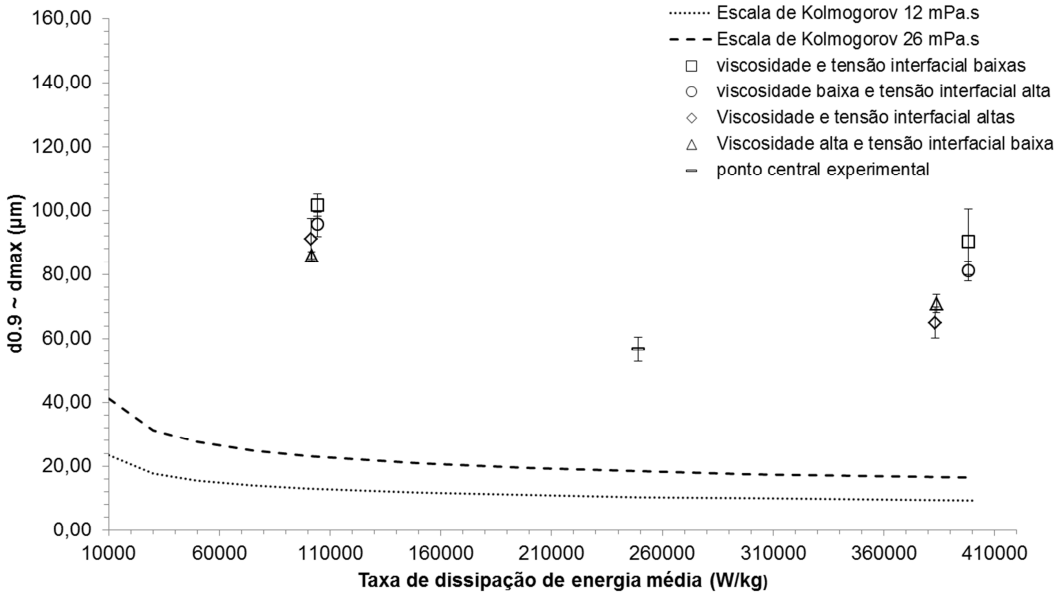


Figura 80 - Pontos experimentais da geometria globo com alta concentração + ponto central, medido com o Insitec.

Para uma melhor visualização, todos os pontos experimentais a alta concentração, incluindo o ponto central, com as duas técnicas de medidas estão expostas na Figura 81. O ponto central mais deslocado para valores menores volta a corroborar que os fenômenos de supressão da turbulência e/ou coalescência começam a afetar o resultado acima de 7,5% de fase dispersa.

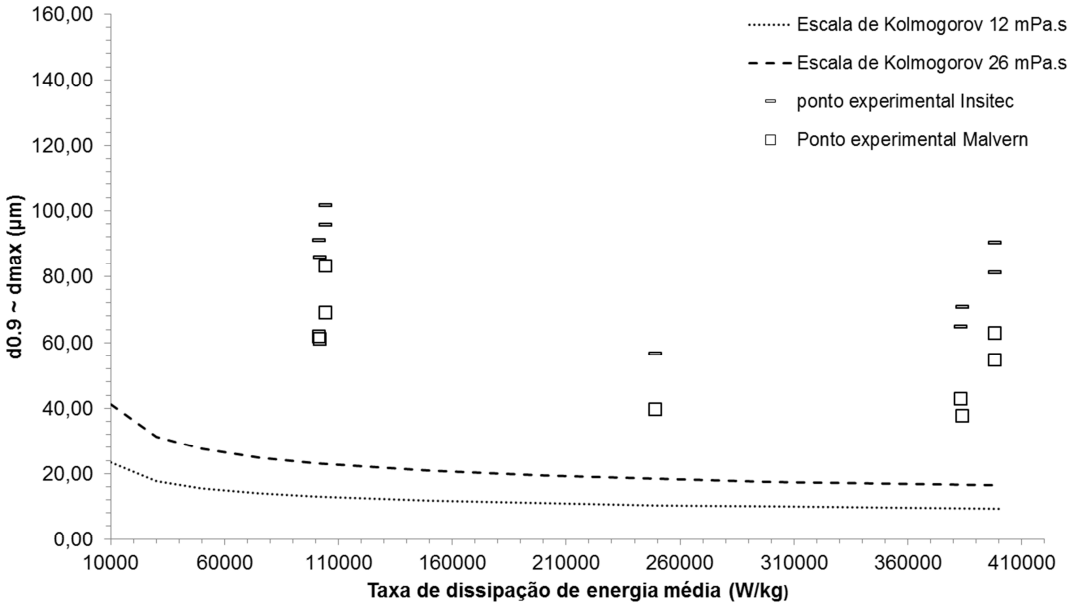


Figura 81 - Comparativo dos pontos experimentais a alta concentração da fase dispersa para ambas as técnicas de medição para a geometria globo.

O ajuste dos pontos experimentais aos modelos de quebra inercial (Hinze) e em orifício (proposto por Percy e Sleicher) está apresentado na Figura 82.

A dispersão dos pontos experimentais, aliada a mudança de comportamento perceptível do ponto central de concentração para os pontos de maiores concentrações, impossibilitou o ajuste dos pontos experimentais a uma lei de potência. Foi notado, no entanto, quando ajustada uma curva utilizando o ponto central, uma mudança na inclinação, sugerindo um aumento do coeficiente da relação de d_{max} com a dissipação da energia. Decidiu-se por não apresentar essas curvas pelos baixíssimos coeficientes de correlação por elas apresentados. Entretanto, a aplicação do modelo de Hinze ajustado pela constante sugerida para a geometria gaveta, apresenta predição razoável também para a geometria globo.

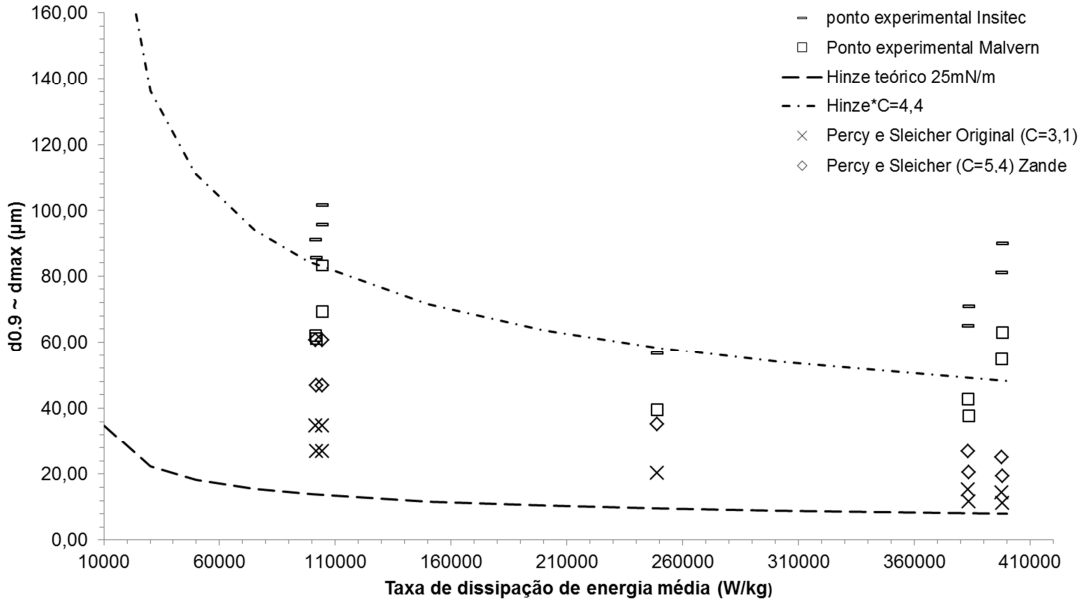


Figura 82 - Ajuste dos modelos de quebra aos pontos de maior concentração para a geometria globo.

Da mesma forma como ocorreu com os pontos de baixa concentração, o modelo de quebra devido a aceleração no orifício (Equação 25), levando-se em conta o valor da constante obtida pelos autores (3,1), apresentou uma melhora na previsão de d_{max}. A aplicação da constante reportada por Van der Zande e Van den Broek (1998), apresentou resultado mais próximo do que foi observado experimentalmente, quando comparado com a geometria gaveta.

Analogamente ao que foi mostrado para a geometria gaveta, o modelo de quebra de gotas turbulento viscoso, sugerido por Vankova *et al.* (2007), foi testado contra os pontos experimentais. As Figuras 83 e 84 mostram o ajuste das curvas teóricas de diâmetro máximo pelo modelo turbulento viscoso, com níveis máximos e mínimos dos fatores para cada concentração da fase dispersa, incluindo o ponto central cuja concentração era de 7,5% de água em óleo.

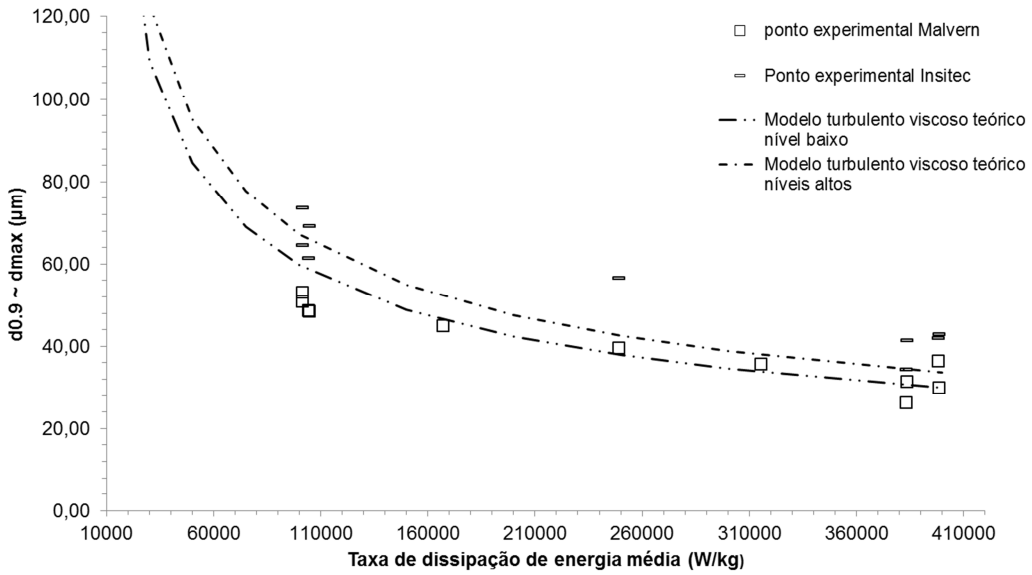


Figura 83 - Modelo turbulento viscoso para pontos de baixa concentração da fase dispersa + ponto central para a geometria globo.

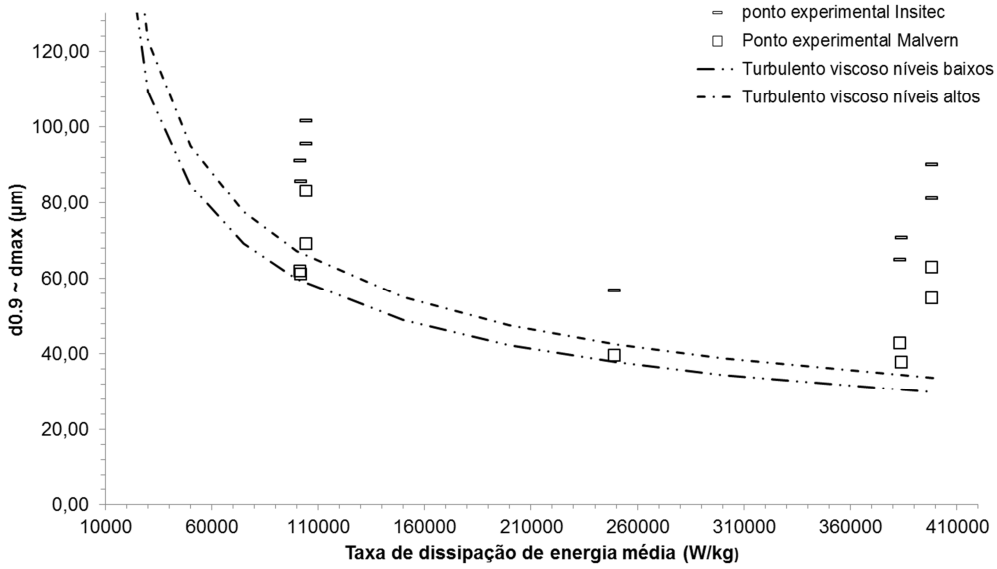


Figura 84 - Modelo turbulento viscoso para alta concentração da fase dispersa + ponto central para a geometria globo.

A resposta do modelo turbulento viscoso foi muito similar ao que foi observado para a geometria gaveta para os pontos de baixa concentração de fase dispersa. O modelo apresentou uma boa predição de valores de d_{max}. Novamente, como dito anteriormente, a boa resposta do modelo pode estar ligada ao valor da constante, como indicado por Vankova *et al.* (2007).

Os pontos de maior concentração de fase dispersa, igualmente ao que foi reportado com a geometria gaveta, foram sempre superiores aos valores de predição do modelo.

6.6.1 Conclusões da Geometria Globo

As mesmas conclusões obtidas para a geometria gaveta podem ser aplicadas à geometria globo. O diâmetro máximo experimental, para baixas concentrações de água em óleo (inferiores a 7,5%), decaiu com o aumento da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta de acordo com a lei de potência de -0,36 (pontos medidos com o Malvern Mastersizer 2000) e -0,38 (pontos medidos com o Insitec). Este coeficiente é bem similar ao do modelo de Hinze (-0,4).

O aumento da concentração da fase dispersa também resultou no aumento dos diâmetros máximos experimentais. Os mesmos fenômenos, de supressão da turbulência e/ou a coalescência de gotas, podem possivelmente explicar esse resultado. Os resultados para maior concentração da fase dispersa, para a geometria globo, deixaram mais evidente a possibilidade desses efeitos atuarem na atenuação da responsabilidade da dissipação da energia na quebra de gotas. Isso foi observado pela percepção da diminuição de inclinação de uma possível aplicação de curva de lei de potência.

O modelo de quebra inercial de Hinze (1955) não foi capaz de descrever os resultados experimentais. O mesmo aumento na constante do modelo (C=3,2 para baixas concentrações, e C=4,4 para altas concentrações), aplicado para a geometria gaveta tende a melhorar a predição tamb[em para a geometria globo. O modelo de Percy e Sleicher (1983) também não foi capaz de descrever os resultados, com a constante de proporcionalidade indicada pelos autores. A aplicação da constante de van der Zande e van den Broeck (1998) gerou resultados ligeiramente melhores.

O modelo de quebra turbulenta viscosa descreveu relativamente bem os resultados experimentais (principalmente os pontos de menor concentração de fase dispersa). Isso pode indicar que forças viscosas tem alguma influência no processo de quebra das gotas. Vankova *et al.* (2007) estudaram casos inerciais e viscosos, tentando prever a transição entre os modelos de quebra. Os autores definiram, para o caso estudado, que essa transição deveria ocorrer em viscosidades da fase contínua acima de 3 cP. Os autores também aventaram, como mencionado anteriormente, a possibilidade da constante do modelo turbulento viscoso ser um fator responsável pela aderência desse modelo aos seus resultados experimentais, o que é provavelmente bem plausível.

6.7 Resultado das Geometrias Agregadas

A observação dos resultados isolados das geometrias aliada às análises de variância da seção anterior, e o padrão repetitivo dos mesmos mostraram que a junção dos pontos experimentais de ambas as geometrias na análise poderia trazer maior luz ao estudo, além de respaldar as conclusões obtidas. As mesmas avaliações feitas para as geometrias isoladamente estão apresentadas na Figura 85, para menores concentrações de fase dispersa.

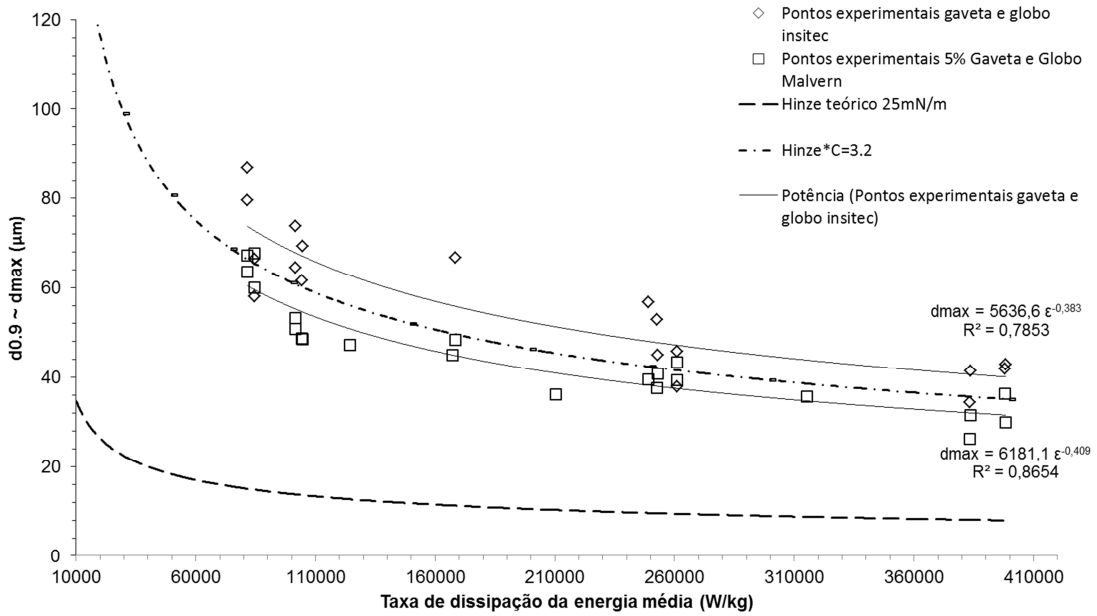


Figura 85 – Variação de d_{max} com ε para ambas as geometrias (baixa concentração de fase dispersa).

A Figura 85 mostra os resultados englobados por técnica de medição. Uma curva de potência foi traçada para cada conjunto de pontos. Muito interessante notar que a relação entre diâmetro máximo e dissipação da energia se manteve coerente com a teoria de Hinze (1955). Também é importante notar que o ajuste proposto para todos os pontos da geometria gaveta a baixa concentração foi adequado também para a geometria globo.

O resultado acima exposto leva a crer que a geometria não tem influência apreciável no processo como uma variável e sim como o elemento gerador de dissipação da energia. A geometria globo, por sua tortuosidade, gera maior dissipação de energia por volume de dissipação e, portanto, quebra mais as gotas que a geometria gaveta.

Apesar dos pontos medidos com o Insitec ficarem sempre acima dos pontos medidos de maneira *off-line*, a aproximação da relação $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,4}$ foi observada em ambas as técnicas. Para o Insitec $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,38}$, e para o Malvern $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,41}$.

O ajuste da curva de lei de potência apresentou melhor correlação para os resultados dos pontos medidos com o Malvern. O mesmo aconteceu com os pontos de maior concentração (Figura 86). A curva para os pontos medidos pelo Insitec foi omitida dado que o coeficiente de correlação se mostrou muito baixo (o modelo não representou bem o fenômeno). A curva para os pontos medidos com o Malvern foi mantida.

Observa-se uma dispersão muito maior dos pontos, porém um padrão de decaimento do diâmetro máximo de gota com a dissipação da energia ainda pode ser percebido. Conforme reportado por Janssen *et al.* (2001) o coeficiente de potência da relação entre d_{max} e ε tende a aumentar com o aumento da concentração da fase dispersa. Para o caso dos pontos experimentais deste trabalho, observou-se uma relação de $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,33}$ para os pontos medidos com o Malvern Mastersizer 2000.

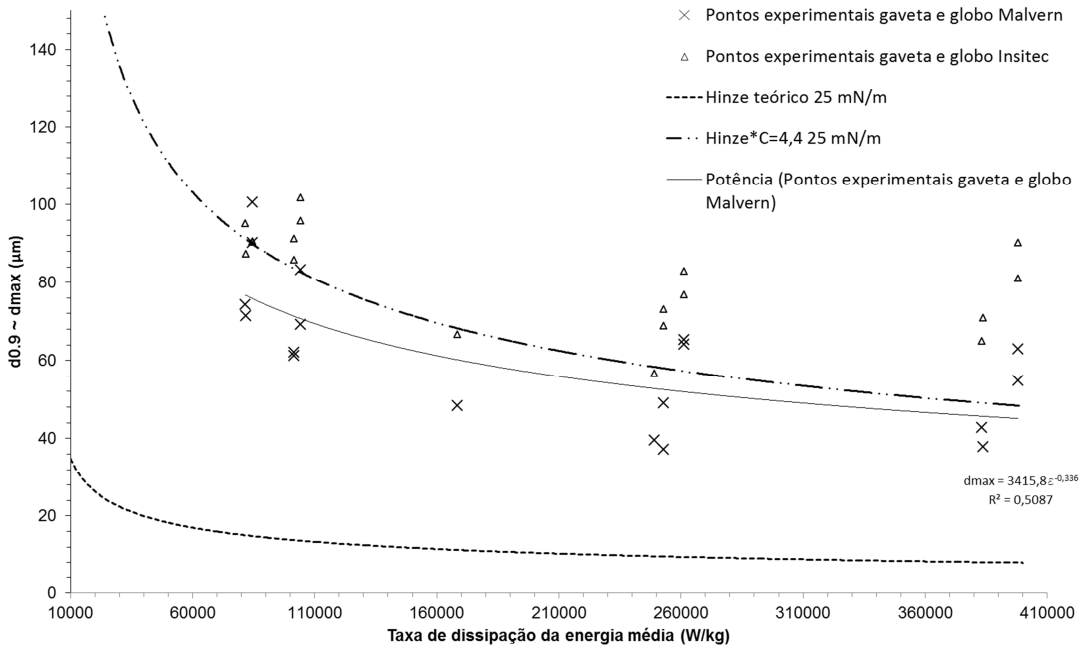


Figura 86 - Pontos Variação de d_{max} com ε para ambas as geometrias (alta concentração de fase dispersa).

A substituição da constante do modelo de Hinze sugerida pela análise de variância se mostrou razoavelmente adequada para todos os pontos experimentais.

6.8 Validação do Modelo Baseado em Hinze

Como uma forma de se verificar a validade do modelo baseado na teoria de Hinze, obtido anteriormente, os dados de quebra de gotas em geometria gaveta que constam no trabalho de Silva *et al* (2005) foram recuperados e estão apresentados na Tabela 28. Utilizando a mesma premissa para o cálculo da dissipação da energia cinética turbulenta apresentada nessa tese, calculou-se a dissipação da energia e, em seguida, os vórtices de Kolmogorov caso a caso. Esses dados também estão expostos na tabela.

Os pontos utilizados foram escolhidos de forma que estivessem o mais próximo do intervalo testado durante a tese. Dois parâmetros, no entanto, se encontravam fora desse intervalo. Nos experimentos de Silva *et al* (2005), foi utilizado um óleo real de médio grau API (ρ = 880 Kg/m^3) e dada a temperatura de execução, a viscosidade foi de 7,3 cP.

Tabela 28 - Dados experimentais de Silva *et al.* (2005) e valores calculados da dissipação da energia cinética turbulenta e dos vórtices de Kolmogorov.

	Condições				Média	Valores calculados	
	Q	**IT**	**dP**	**Conc.**	**D (0.9) Malv**	**ε**	**λk**
Ponto	**(l/min)**	**(mN/m)**	**(kgf/cm2)**	**(%)**	**(µm)**	**(W/kg)**	**(µm)**
1	5,0	19	0,5	8	73,9	15453	36,9
2	5,0	19	0,5	8	72,5	15453	36,9
3	5,0	19	1,0	8	62,6	30014	31,2
4	5,0	19	1,0	8	63,4	30609	31,1
5	5,0	19	2,0	8	53,9	60326	26,2
6	5,0	19	2,0	8	54,0	59434	26,3
7	5,0	19	3,0	8	49,1	89746	23,8
8	5,0	19	3,0	8	50,4	88854	23,8
9	5,0	19	4,0	8	43,9	119166	22,1
10	5,0	19	4,0	8	44,2	120057	22,1
11	5,0	19	5,0	8	44,8	148883	20,9
12	5,0	19	5,1	8	43,2	150071	20,9
13	5,0	19	4,0	8	43,9	119166	22,1
14	5,0	19	4,0	8	44,2	120057	22,1
15	2,5	19	4,0	8	47,4	119166	22,1
16	2,5	19	4,0	8	45,0	118571	22,2
17	5,0	19	1,0	8	62,6	30014	31,2
18	5,0	19	1,0	8	63,4	30609	31,1
19	2,5	19	1,0	8	65,2	30014	31,2
20	2,5	19	1,0	8	65,6	30609	31,1
21	3,7	19	2,5	8	52,8	74590	24,9
22	3,7	19	2,5	8	52,6	74887	24,9

Os diâmetros máximos obtidos foram superiores à escala de Kolmogorov, o que respalda a utilização do modelo de quebra inercial. Foi relatado pelo autor que, no nível de concentração testado, não houve efeito da concentração nos resultados experimentais. Dessa forma, os pontos experimentais foram testados contra o modelo obtido por regressão para concentrações baixas. O resultado dessa comparação está demonstrado na Figura 87.

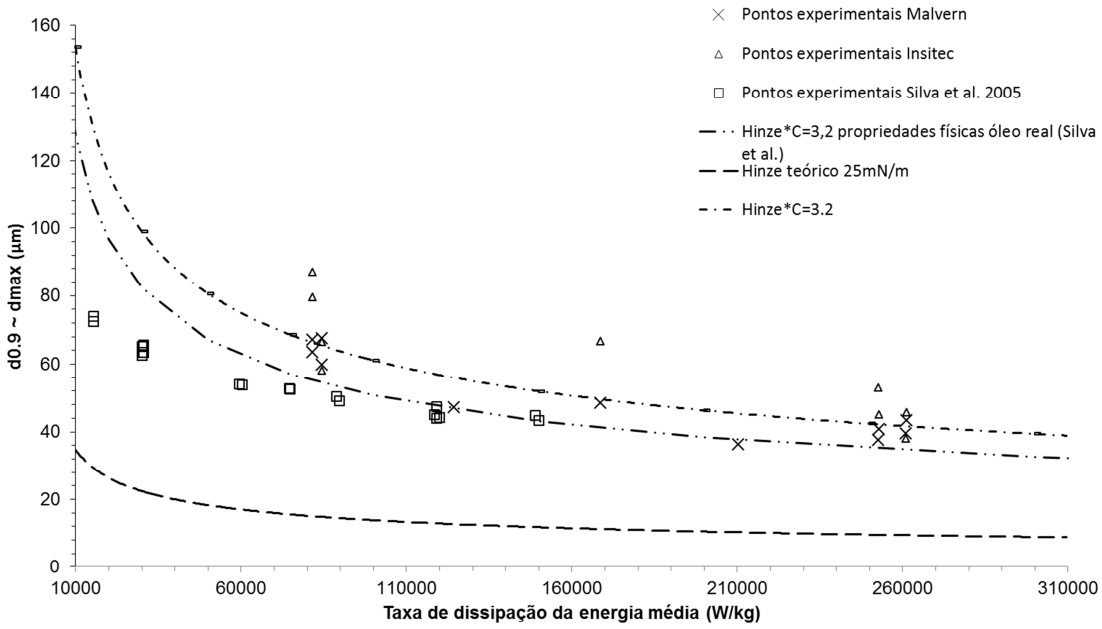


Figura 87 - Comparação do modelo de Hinze com os pontos experimentais de Silva *et al.* (2005).

Os pontos experimentais obtidos nessa tese foram mantidos para efeito de comparação. Percebe-se um grande distanciamento da previsão de d_{max} pelo modelo clássico de Hinze. No entanto, o ajuste da constante sugerida pela regressão multivariada tende a prever de forma bastante satisfatória os valores de diâmetro máximo, especialmente em maiores dissipações de energia cinética turbulenta.

Esse resultado respalda a hipótese de que o modelo clássico de Hinze, e suas variações, não deve ser a resposta para todas as condições e propriedades físico-químicas dos fluidos. Aparentemente, para condições usuais de produção (a baixos BSWs ou entre estágios de separação), o modelo ajustado de quebra baseado na teoria de Hinze apresenta boas previsões de diâmetro máximo de gotas.

7 CONCLUSÕES

Um estudo experimental de quebra de gotas foi apresentado nesta tese. Para tal, uma bancada experimental foi construída e utilizada para avaliação dos diversos fatores que poderiam ser influentes no fenômeno de quebra de gotas. As gotas, de tamanho inicial pré-determinado, foram expostas a uma queda de pressão localizada em um elemento dissipador de energia que mimetizava válvulas gaveta e globo.

O tamanho das gotas foi avaliado por dois equipamentos de medição de DTG, um *off-line* e outro *at-line,* mas com princípios idênticos. A medição *at-line* apresentou resultados mais dispersos do que a medida em laboratório. Uma justificativa para tal foi a maior possibilidade de coalescência no caminho até o analisador, possível recontagem de gotas presas na lente ou a menor diluição da amostra no sistema desenvolvido (o que favorece a coalescência). A medição *off-line* foi considerada mais robusta e repetitiva, dada a experiência prévia e dada a maior diluição da amostra, o que tende a preservá-la quanto a coalescência.

Cada um dos fatores foi avaliado quanto a sua influência no fenômeno de quebra de gotas. A queda de pressão é o fator que tem o maior efeito na quebra de gotas. Na investigação estatística, a análise da variância dos pontos experimentais indica que todos os efeitos estudados têm significância (em maior ou menor escala), tendo sido construído um modelo empírico de previsão de tamanho máximo de gota. Após análise dos resultados, pode-se afirmar que a geometria do elemento dissipador é importante, por sua correlação com a distribuição, em um volume, da dissipação. No entanto, introduzindo a dissipação da energia na modelagem (dada a geometria e volume de dissipação), o fator geometria pode ser considerado não significativo.

Os resultados experimentais de diâmetros máximos (d_{max}) foram sempre superiores à escala de Kolmogorov, o que sugere que a quebra de gotas ocorre devido às flutuações da pressão dinâmica, isto é, de forma inercial. Esses resultados foram comparados contra diversos modelos de quebra: devido à aceleração no orifício (Percy e Sleicher, 1983); modelo clássico

inercial de Hinze (1955); e modelo de quebra turbulenta viscosa (Vankova *et al.* 2007).

O modelo clássico de Hinze não foi capaz de prever os resultados experimentais. No entanto, o decaimento de d_{max} com a dissipação da energia cinética turbulenta respeitou a relação $d_{max} \propto \varepsilon^{-0,4}$ do modelo de Hinze na maioria dos casos, especialmente para os casos a baixa concentração de fase dispersa. Foi observado que essa relação tende a aumentar com o aumento da concentração de gotas, o que pode ser explicado pelo efeito de coalescência e/ou pela supressão da turbulência efetiva.

O modelo de quebra turbulenta viscosa previu razoavelmente os d_{max} obtidos experimentalmente. Acredita-se que a proximidade dos tamanhos de gotas com o tamanho dos menores vórtices que contém energia (escala de Kolmogorov), esteja fazendo com que haja uma concomitância de fenômenos de quebra, turbulenta inercial e turbulenta viscosa. Há de se pôr uma luz sobre a constante de proporcionalidade do modelo turbulento viscoso, que pode ser a responsável por esse resultado.

Tendo em vista a boa aderência dos pontos experimentais com a relação de decaimento dos diâmetros com a dissipação, um modelo baseado na teoria de Hinze foi apresentado via regressão multivariada dos pontos experimentais. A regressão apresentou um ajuste na constante de proporcionalidade do modelo de Hinze que melhorou consideravelmente a previsibilidade dos diâmetros máximos após quebra localizada das gotas.

Este modelo foi testado com pontos experimentais de outro autor (cujo trabalho utilizou óleo cru real) e, mesmo em condições de densidade e viscosidade fora do intervalo estudado nessa tese, apresentou boa aderência. A aderência ao modelo foi maior quanto maior fosse a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta média.

O efeito do aumento da concentração da fase dispersa torna o fenômeno de quebra de gotas de mais difícil previsão. Parece claro que, em solução diluída, a relação da dissipação da energia com d_{max} segue a teoria de Hinze. Com o aumento da fase dispersa, a supressão da turbulência e um efeito mais

pronunciado da coalescência deixam o fenômeno mais ameno. Visando à aplicação dessa teoria no processamento primário de petróleo, essa constatação tende a amenizar os problemas relacionados a emulsões e seus tratamentos.

Por fim, adotando uma posição conservadora, a utilização da teoria de Hinze ajustada, para os casos de fase contínua viscosa e fase dispersa aquosa, tende a suprir as questões na área de processamento primário, uma vez que o interesse se encontra na separação de fluidos. A aplicação de correções na constante de proporcionalidade para aplicações em condições de maiores concentrações de fase dispersa parece adequada para previsão dos diâmetros máximos de gotas a jusante de quedas de pressão localizadas.

Propostas para o Prosseguimento deste Trabalho

O advento dessa tese de doutorado trouxe algumas elucidações ao fenômeno de quebra de gotas de água em óleo. Com a finalização desse projeto, algumas lacunas ficam abertas para novos estudos na mesma linha de pesquisa.

Um dos primeiros assuntos que podem ser explorados seria o fenômeno de coalescência em concentrações maiores da fase dispersa, o que traz a reboque a verificação da supressão da turbulência. Pode-se investigar os fenômenos em projetos de pesquisa *a posteriori*, com o desafio de se conseguir identificar a parcela de cada um no crescimento das gotas geradas. Uma das formas que se pode tentar essa segregação dos fenômenos seria pelo uso de tensoativos que impedissem a ocorrência de coalescência de gotas.

Outro aspecto da quebra de gotas, mesmo a baixas concentrações da fase dispersa, seria a avaliação da influência do gás produzido na quebra de gotas ao passar por restrições. Para esse estudo, os diversos padrões de escoamento teriam de ser avaliados, o que não é trivial.

Caso os estudos sugeridos anteriormente viessem a obter sucesso, um modelo unificado de quebra de gotas em escoamento multifásico poderia ser buscado.

Uma terceira linha de pesquisa já vem sendo explorada e, dados os resultados ora apresentados, deve continuar a ser estudada. Trata-se da tentativa de minimizar os efeitos de quebra de gotas em equipamentos estáticos e dinâmicos. Ficou evidente a importância da dissipação da energia cinética turbulenta pontual na quebra de gotas. Deve-se, portanto, buscar soluções para que essa dissipação ocorra em um volume maior de dissipação, de forma a se obter gotas maiores e, com isso, facilitar o trabalho dos equipamentos de separação.

A última sugestão seria válida para trabalhos futuros. Dados os resultados obtidos nessa tese, seria interessante a avaliação dos modelos gerados em um ambiente mais realista de produção. Como sugestão, um estudo com válvulas comerciais e óleos reais poderia ser realizado. Como resultado, dispor-se-ia de um modelo que, dada a geometria e volumes de dissipação da válvula em questão, poderia prever os diâmetros máximos de gotas geradas. Essa atividade foi considerada como parcialmente atingida nessa tese, uma vez que deve ser validada em condições reais.

Referências Bibliográficas

Allen, T. – Particle Size Mesurement – Volume 1 – Powder Sampling and Particle Size Mesurement – Cap.2 – Chapman & Hall – 1997 5th edition;

Angelli, P.; Hewitt, G. F. (2000); Drop size distributions in horizontal oil-water dispersed flows. Chemical Engineering Science nº5 pp3133 – 3143. https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00585-0

Arnold, K.; Stewart, M. (1999); Surface Production Operation: Design of Oil-Handling Systems and Facilities – Cap. 1, 2 e 6 – Gulf Professional Publishing - 2nd edition; https://doi.org/10.1016/B978-088415821-9/50002-6 (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780884158219500026)

Batchelor G. K. (1951) - Pressure Fluctuations in Isotropic Turbulence. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 47(2), 359-374. https://doi.org/10.1017/S0305004100026712

Brasil, N. I.; et al. (2012); Processamento de Petróleo e Gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímica, meio ambiente. Rio de Janeiro, LTC PP 64 – 70.

Brauner, N. (2001) - The prediction of dispersed flows boundaries in liquid-liquid and gas-liquid systems. International Journal of Multiphase Flow. Vol 27, pp 885-910.

Brito A. C. (2014); Comparação Experimental de Técnicas de Regressão Linear para Análise da Confiabilidade dos Empacotamentos CBGA Submetidos à Ciclagem Térmica e Proposta de um Novo Método para o Ajuste e a Predição de suas Falhas – Tese de Doutorado – INPE.

Brochura - INSITEC LIQUID STREAM SIZE ANALYZER. Disponível em: http://www.iesmat.com/iesmat/upload/file/Malvern/Productos-MAL/MAL-

INS-ALISS-PAR%20Insitec%20L%20brochure.pdf – Sem data, consultado em 05/07/2017.

Brochura National Oil Varco (NOV) (2016), disponível em: https://www.nov.com/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Process_and_Flow_Technologies/Production_Technologies/Chokes/CVC_Series/CVC_Series.aspx Consultado em 28/03/2018.

Brochura Weatherford, (2018), Manual de Manutenção e Instalação – Bomba Dosadora HD10, HD15, HD20. Disponível em: https://www.helifer.com.br/images/artigos/pdf/manuais/Bombas-HD.pdf Consultado em 31/01/2019.

Calabrese R. V., Chang T. P. K., Dang P. T. (1986); Drop Breakup in Turbulent Stirred-Tank Contactors, Part 1 – Effect of Dispersed Phase Viscosity. AIChE Journal. Vol. 32, N.4.

Clay P. H. (1940A), The mechanism of emulsion formation in turbulent flow . I. Experimental Part; Proc. Roy. Acad. Sci. (Amsterdan), vol 43, pg 852.

Clay P. H. (1940B), The mechanism of emulsion formation in turbulent flow . II. Theoretical part and discussion; Proc. Roy. Acad. Sci. (Amsterdan), vol 43, pg 879.

Coupland, J. N.; McClements, D. J. (2001), “Droplet size determination in food emulsions: comparison of ultrasonic and light scattering methods”, Journal of Food Engineering, Vol 50, p.117-120.

Cristini V., Blawzdziewicz, J., Loewenberg, M., Collins, L. (2003); Breakup in Stochastic Stokes Flows: sub-Kolmogorov Drops in Isotropic Turbulence. Journal of Fluid Mechanics Vol. 492, pp 231-250. https://doi.org/10.1017/S0022112003005561

Cunha, P. S. M. D. (2008); Modelagem Matemática do Processo de Desidratação Eletrostática de Petróleos. – Dissertação de Mestrado – TPQB – UFRJ – 2008.

Davies J.T. (1985) Drop Sizes of Emulsions Related to Turbulent Energy Dissipation Rates, Chemical Engineering Science - Vol. 40, 839-842. https://doi.org/10.1016/0009-2509(85)85036-3

Eow, J. S.; Ghadiri, M. (2002); Electrostatic Enhancement of Coalescence of Water Droplets in Oil: a Review of the Technology; - Chemical Engineering Journal nº85, pp357 – 368.

Freitas, A. G. B.; *et al.* (2007); Investigação das Facilidades e Métodos Utilizados Atualmente no Processamento Primário de Petróleo em Campos Onshore e Offshore; 4º PDPETRO – Campinas S.P. 2007.

Fossen M., Schumann H. (2016) Experimental Study of the Relative Effect of Pressure Drop and Flow Rate on the Droplet Size Downstream a Pipe Restriction, Journal of Dispersion Science and Technology - Vol 38:6, 826-831 https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1207184

Galinat, S.; Masbernat, O.; Guiraud, P.; Dalmazzone, C.; Noïk, C. (2005); Drop break-up in turbulent pipe flow downstream of a restriction. Chemical Engineering Science nº60 pp6511 – 6528. https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.05.012

Galinat S. (2006) – Etude Experimentale de la Rupture de Gouttes dans un Ecoulement Turnbulent. PhD Thesis – Institut national Polytechnique de Tolouse.

Grace, H. P. (1982); Dispersion Phenomena in High Viscosity Immiscible Fluid Systems and Application of Static Mixers as Dispersion Devices in Such Systems. Chemical Engineering Communications 14, pp.225 – 277. 1982. doi:10.1080/00986448208911047

Hinze, J. O. (1955); Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Process. A.I.Ch.E Journal V1, nº 3 pp.289-295. https://doi.org/10.1002/aic.690010303

Husveg, T.; *et al.* (2009); A Cyclone-Based Low Shear Valve for Enhanced Oil-Water Separation. Offshore Technology Conference – OTC 2009. https://doi.org/10.4043/20029-MS

Janssen P.H., Noik C., Dalmazzone, C. (2001) Emulsion Formation in a Model Choke-valve, Society of Petroleum Engineers – SPE 71473. https://doi.org/10.2118/71473-MS

Johansen F.C. (1930) Flow through Pipe Orifices at Low Reynolds Numbers, A.M.I.Mech.E. https://doi.org/10.1098/rspa.1930.0004

Karam H. J., Bellinger J. C. (1968) Deformation and Breakup of Liquid Droplets in a Simple Shear Field, Ind. Eng. Chem. Fundamen. 1968, vol 7 (4), pp 576-581 - **DOI:** 10.1021/i160028a009

Karbstein H., Schubert H. (1995) Developments in the continuous mechanical production of oil-in-water macro-emulsions, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification Vol 34, Issue 3, Pg 205-211 https://doi.org/10.1016/0255-2701(94)04005-2

Kokal, S. (2002); Crude Oil Emulsions: A State-Of-The-Art Review – SPE 77497 - SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2002.

Kubie J., Gardner G.C. (1977) Drop Sizes and Drop Dispersion in Straight Horizontal Tubes and in Helical Coils, Chemical Engineering Science - Vol. 32, 195-202. https://doi.org/10.1016/0009-2509(77)80105-X

Kwakernaak P.J., van den Broek W.M.G.T., Currie P.K. (2007) Reduction of oil droplet breakup in a choke, Society of Petroleum Engineers – SPE 106693. https://doi.org/10.2118/106693-MS

Lakshmana Rao N.S., Sridharam K., Alvi S.H. (1977) Critical Reynolds Number for Orifice and Nozzle flows in Pipes, Journal of Hydraulic Research - 15 n°2. https://doi.org/10.1080/00221687709499654

Lemenand, T.; Della Valle, D.; Zellouf, Y.; Peerhossaini, H. (2003); Droplets formation in turbulent mixing of two immiscible fluids in a new type of static mixer. International Journal of Multiphase Flow 29 (2003) 813-840. https://doi.org/10.1016/S0301-9322(03)00032-6

Lockhart F.J., Chilingarian, George V., Kumar, Sanjay (1987) Chapter 3 Separation of oil and Gas, Editor(s): G.V. Chilingarian, J.O. Robertson,

S. Kumar, Developments in Petroleum Science, Elsevier, Volume 19, Part A, 1987, Pages 59-108, ISSN 0376-7361, ISBN 9780444416254, https://doi.org/10.1016/S0376-7361(08)70532-6 (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376736108705326)

Lucchesi, C. F. (1998); Petróleo. Estud. av., São Paulo , v. 12, n. 33, Aug. 1998. Acesso em 26 Fev. 2015. Disponível: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141998000200003&lng=en&nrm=iso. http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40141998000200003.

Manning F.S., Thompson R.E. (1995) Chapter 1, 2 and 6 - Oil field processing, volume 2 Crude Oil, Pennwell Books 1995, ISBN 9780878143542

Martínez-Bazán C., Montañéz J. L., Lasheras J. C. (1999) On the breakup of na air bubble injected into a fully developed turbulent flow. Part 2: size PDF of the resulting daughter bubbles. Journal of Fluid Mechanics, Vol 401, pp.183.

Milani, E. J.; *et al.* (2001); Petróleo na Margem Continental Brasileira: Geologia, Exploração, Resultados e Perspectivas. Brasilian Journal of Geophisics – Vol. 18(3), 2000.

Mitre, J. F. (2010); Modelos de Quebra e Coalescência de Gotas para o Escoamento de Emulsões. Tese de Doutorado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Mitre, J. F.; *et al.;* Droplet Breakage and Coalescence Models for the Flow of Water-in-oil Emulsions Through a Valve-like Element – Chemical Engineering Research and Design Journal. (2014).

Mlynek Y., Resnick W. (1972); Drop Sizes in an Agitated Liquid-Liquid System. AIChE Journal, vol. 18, N. 1.

Montgomery D. C. (2001); Design and Analisys of Experiment. 5th Edition. John Wiley & Sons Inc. – USA.

Moraes, C. A. C.; *et al.* (2009); Desenvolvimento de Válvulas Ciclônicas. Boletim Técnico da Produção de Petróleo.

Morrison G. L., DeOtte Jr. R. E., Nail G. H., Panak D. L. (1993); Mean Velocity and Turbulent Field Inside a β = 0,50 Orifice Flowmeter. AIChE Journal, vol. 39, N. 5.

Oliveira, A. G. (2010); Caracterização da Distribuição do Tamanho de Gotas em Emulsões Água em Óleo Utilizando Diferentes Técnicas de Medição. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá.

Oliveira, R. C. G., Oliveira, M. C. K.; Remoção de Contaminantes Tóxicos dos Efluentes Líquidos Oriundos da Atividade de Produção de Petróleo no Mar, Bol. Téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro, 43 (2): 129-136, abr./jun. 2000;

Padron G. (2001) – Mesurement and Comparison of Power Draw in Batch Rotor-Stator Mixers. MSc Degree – University of Maryland at College Park.

Padron G. (2005) – Effect of Surfactants on Drop Size Distribution in a Batch, Rotor Stator Mixer. PhD Thesis – University of Maryland at College Park

Patente: US 7,418,881 United States Patent – Watson *et al.* (2008) – Dilution System and Method. Malvern Instruments Limited. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US7418881B2/en

Paolinelli L.D., Yao A.R.J. (2017) Characterization of Droplets Sizes in Large Scale Oil-water Flow Downstream From a Globe Valve, International Journal of Multiphase Flow – Vol99, 132-150. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.09.014

Percy J.S., Sleicher C.A. (1983) Drop Breakup in the Flow of Immiscible Liquids Through an Orifice in a Pipe, AIChE Journal - vol 29, N°1, 161-164 https://doi.org/10.1002/aic.690290125

Rawle, A. - Basic Principles of Particle Size Analysis – Technical Paper – Malvern Instruments; acessado em 18/11/2015 e disponível em http://www.rci.rutgers.edu/~moghe/PSD%20Basics.pdf

Rego, F. C. A. (2008); Estudo do Hidrociclone Cilíndrico de uma Unidade de Flotação Centrífuga com o Auxílio de Fluidodinâmica Computacional. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós Graduação em Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Federal do rio de Janeiro.

Resolução CONAMA 393/2007 de 8 de Agosto de 2007. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=541, consultado 26/02/2015

Rueger P.E., Calabrese R.V. (2013) Dispersion of Water into Oil in a Rotor-stator Mixer. Part 1: Drop Breakup in Dilute Systems, Chemical Engineering Research and Design - vol.91, 2122-2133 https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.05.018

Rueger P.E., Calabrese R.V. (2013) Dispersion of Water into Oil in a Rotor-stator Mixer. Part 2: Effect of Phase Fraction, Chemical Engineering Research and Design - vol.91, 2134-2141 https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.06.010

Setekleiv, A. E.; Svendsen, H. F. (2014), "Comparison of piezo eletric particle monitor with laser diffraction technique", Mesurement, Vol. 55, p.133-141.

Silva, E.; Barca, L. F.; Souza, M. A.; Varella, S.; (2005); – A Formação de Emulsões de Água em Óleo Através do Escoamento por Orifícios e Válvulas – 7º Relatório de Progresso de Projeto de pesquisa Contrato 0050.0000981.04.3 – UNIFEI – 2005;

Silva F. S., Medronho R. A., Barca L. F. (2017); Validação Experimental de um Sistema de Diluição para Medição de Tamanho de Gotas (DTG) At-Line. XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados – ENEMP 2017.

Silva F. S., Medronho, R. A., Barca L. F. (2019); Experimental Study of Water Droplet Break up in Water in Oil Dispersions Using an Apparatus that

Produces Localized Pressure Drops. Oil & Gas Science and Technology. Vol 74. N.1. https://doi.org/10.2516/ogst/2018079

Silva, L. O. (2011); Regulação do Pré-Sal: Novas Fronteiras, Novos Desafios; 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás. Florianópolis SC.

Simmons M. J. H., Azzopardi B. J. (2001); Drop size distributions in dispersed liquid-liquid pipe flow. International Journal of Multiphase Flow 27 pp. 843-859.

Sleicher C. A. (1962) Maximum stable drop size in turbulent flow, AIChE J., vol 8, issue 4, 471-477. https://doi.org/10.1002/aic.690080410

Stamatoudis M., Tavlarires (1985); Effect of Continuous-Phase Viscosity on the Drop Size of Liquid-Liquid Dispersions in Agitated Vessels. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. Vol.4, pp. 1175 -1181.

Stone H. A. (1994) Dynamics of Drop Deformation and Breakup in Viscous Fluids, Annual Review of Fluid Mechanics – pg - 65-102; vol. 26 - https://doi.org/10.1146/annurev.fl.26.010194.000433

Taylor G. I. (1932) The viscosity of a fluid containing small drops of another fluid Proc. R. Soc. Lond. A 1932 138 41-48; Published 1 October 1932 https://doi.org/10.1098/rspa.1932.0169.

Taylor G.I. (1934) The formation of emulsions in definable fields of flow. Proc. R. Soc. Lond. A 1934 146 501-523; Published 1 October 1934 https://doi.org/10.1098/rspa.1934.0169.

Tian, G. (2007); Characterization of Oil-water Dispersion Shear Flow Through Restrictions. – Msc Thesis in the discipline of Petroleum Engineering. The University of Tulsa (2007).

Thomas J. E. (Organizador), et al. (2001); Fundamentos de engenharia de petróleo. Editora Interciência.

Treviranus, I. (2013); Introduction to Particle Size Analysis – Apresentação Horiba – 2013, Consultado em 02/2015; disponível em http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/Webinar_Slides/TR001_V3.pdf;

van der Zande, M. J.; Muntinga, J. H.; van der Broek, W. M. G. T.; (1998A) – Emusification of Production Fluids in the Choke Valve. Society of Petroleum Engineers, SPE 49173, 1998A.

van der Zande M.J, van den Broek W.M.G.T. (1998B), Breakup of Oil Droplets in the Production System, Proc. of ASME Energy Sources Technology Conference and Exhibition, Houston, ETCE98-4744.

van der Zande, M. J.; van Heuven, K. R.; Muntinga, J. H.; van der Broek, W. M. G. T.; (1999A); Effect of Flow Through a Choke Valve on Emulsion Stability; Society of Petroleum Engineers, SPE 56640, 1999A.

van der Zande, M. J.; Muntinga, J. H., van der Broek, W. M. G. T (1999B) – The Effects of Production Rate and Choke Size on Emulsion Estability – VIII INGEPET – 1999B.

van der Zande M. J. (2000) Droplet Break-up in Turbulent Oil-in-water Flow Through a Restriction. PhD. Thesis. Delft University of Technology – the Netherlands. ISBN 90-9013-870-6.

Vankova N., Tcholakova S., Denkov N.D., Ivanov I.B., Vulchev V.D., Danner T (2007) Emulsification in Turbulent flow 1. Mean and Maximum Drop Diameters in Inertial and Viscous Regimes, Journal of Colloid and Interface Science - vol. 312, pp. 363-380, https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.03.059

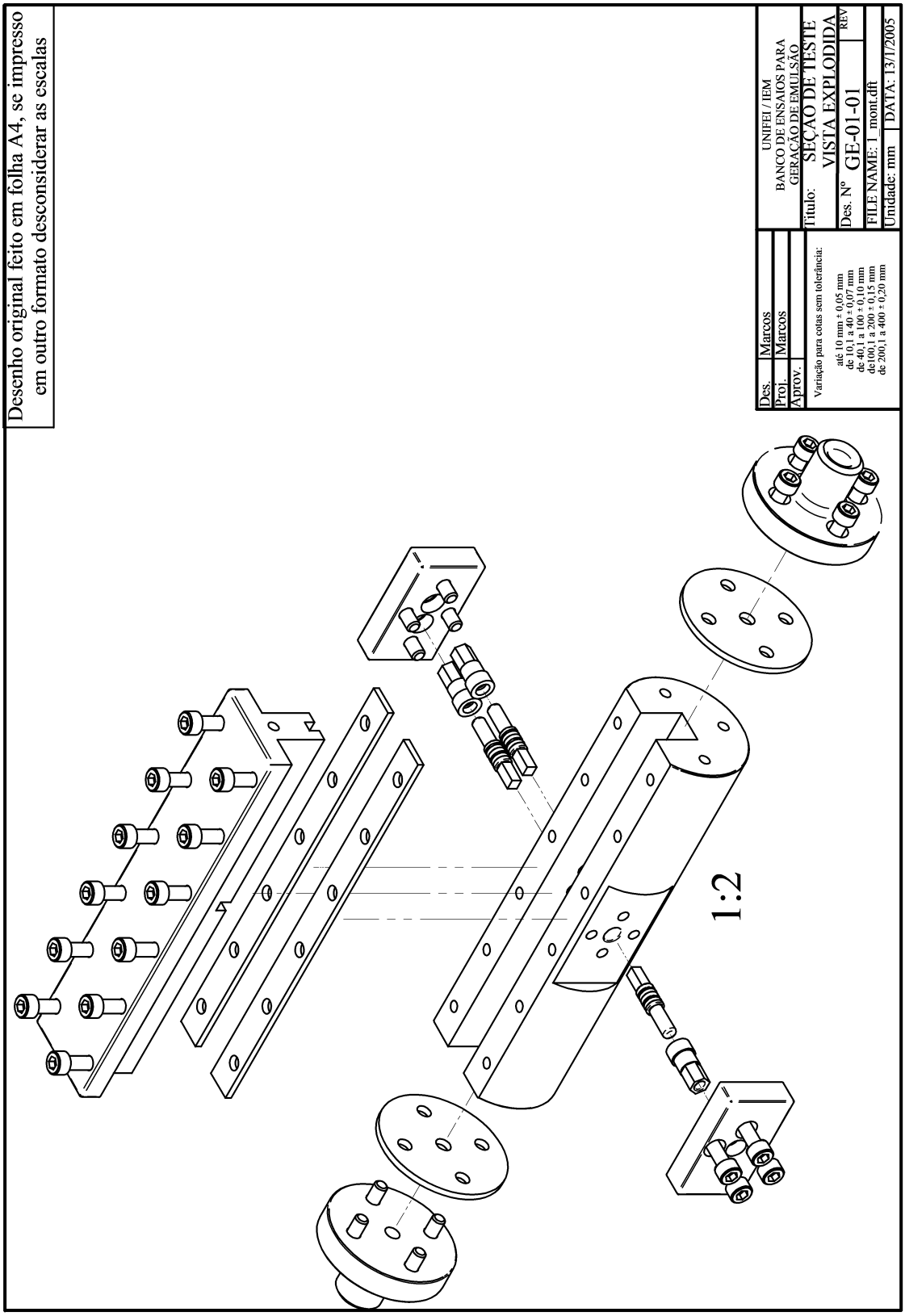
Walstra P. (1983), Encyclopedia of Emulsion Technology, Vol. 1, Becher P. (Ed.), Chapter 2 - Marcel Dekker, New York (1983) ISBN-13: 978-0824718763 ISBN-10: 0824718763

Walstra, P. (1993); Principles of Emulsion Formation. Chemical Engineering Science vol. 48; pp 333-349. 1993.

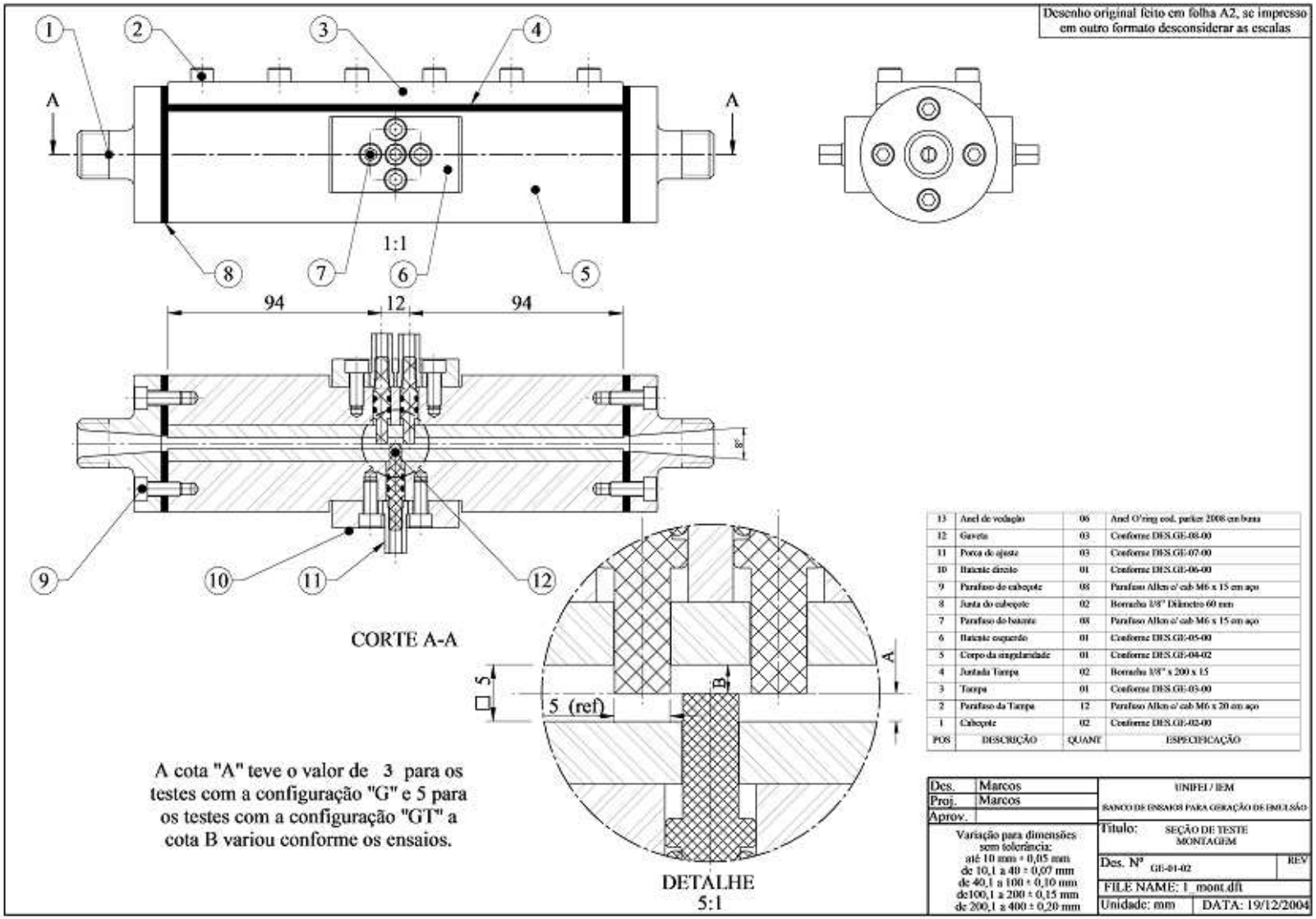
Walstra, P; Smulders, P. E. A. (1998); Modern Aspects of Emulsion Science – Capítulo 2 – Editor: Binks, B. P. (1998).

Xu, R. (2002) - Particles Characterization: Light Scattering Methods – Cap.1 – Kluwer Academic Publishers;

Anexo A - Desenhos Executivos da Singularidade



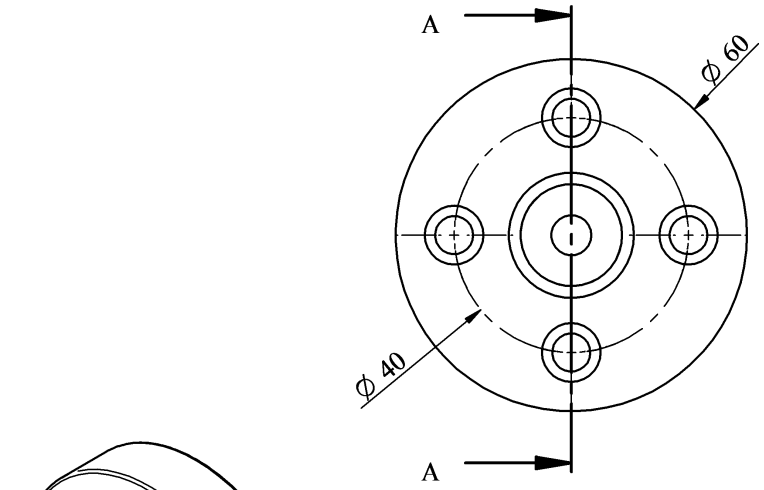
Desenho original feito em folha A2, se impresso em outro formato desconsiderar as escalas



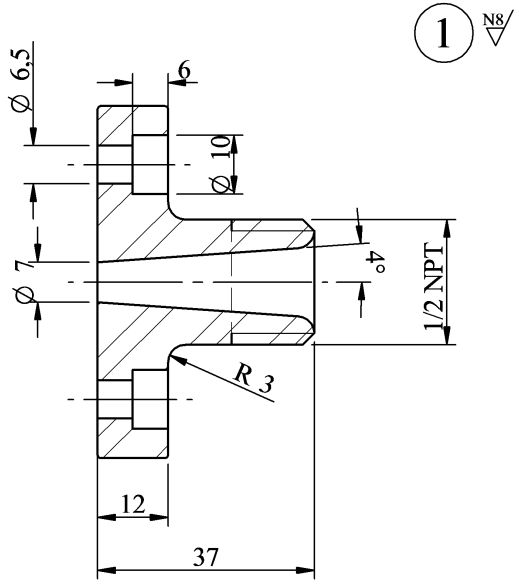
POS	DESCRIÇÃO	QUANT	ESPECIFICAÇÃO
13	Anel de vedação	06	Anel O'ring cod. parker 2008 em buna
12	Gaveta	03	Conforme DES.GE-08-00
11	Porca de ajuste	03	Conforme DES.GE-07-00
10	Balancin direito	01	Conforme DES.GE-06-00
9	Parafuso do cabeçote	08	Parafuso Allen c/ cab M6 x 15 em aço
8	Junta do cabeçote	02	Borracha 1/8" Diâmetro 60 mm
7	Parafuso do balancin	08	Parafuso Allen c/ cab M6 x 15 em aço
6	Balancin esquerdo	01	Conforme DES.GE-05-00
5	Corpo da engulamidade	01	Conforme DES.GE-04-02
4	Juntada Tampa	02	Borracha 1/8" x 200 x 15
3	Tampa	01	Conforme DES.GE-03-00
2	Parafuso da Tampa	12	Parafuso Allen c/ cab M6 x 20 em aço
1	Cabeçote	02	Conforme DES.GE-02-00

Des.	Marcos	UNIFEI / IEM	
Proj.	Marcos	BANCO DE ENSAIOS PARA GERAÇÃO DE EMULSÃO	
Aprov.			
Variação para dimensões sem tolerância: até 10 mm ± 0,05 mm de 10,1 a 40 ± 0,07 mm de 40,1 a 100 ± 0,10 mm de100,1 a 200 ± 0,15 mm de 200,1 a 400 ± 0,20 mm		Título: SEÇÃO DE TESTE MONTAGEM	
		Des. Nº GE-01-02	REV
		FILE NAME: 1 mont.dft	
		Unidade: mm	DATA: 19/12/2004

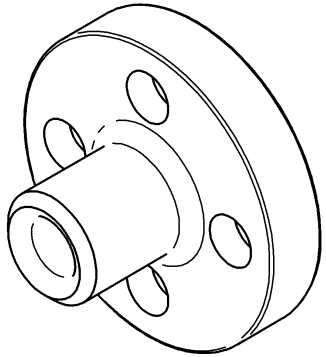
Desenho original feito em folha A4, se impresso em outro formato desconsiderar as escalas



1:1



Corte A-A



1:1

1	Cabeçote de ligação	02	SAE 1020 diam 2 ½" x 40
Pos.	Denominação	Quant	Material

Des.	Marcos
Proj.	Marcos
Aprov.	

Variação para cotas sem tolerância:

até 10 mm ± 0,05 mm
de 10,1 a 40 ± 0,07 mm
de 40,1 a 100 ± 0,10 mm
de100,1 a 200 ± 0,15 mm
de 200,1 a 400 ± 0,20 mm

UNIFEI / IEM
BANCO DE ENSAIOS PARA GERAÇÃO DE EMULSÃO

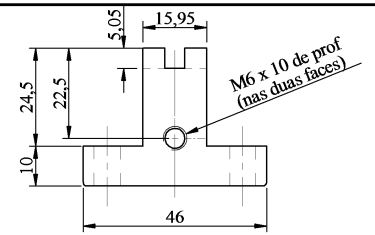
Título: Cabeçote

Des. Nº GE-02-00 REV

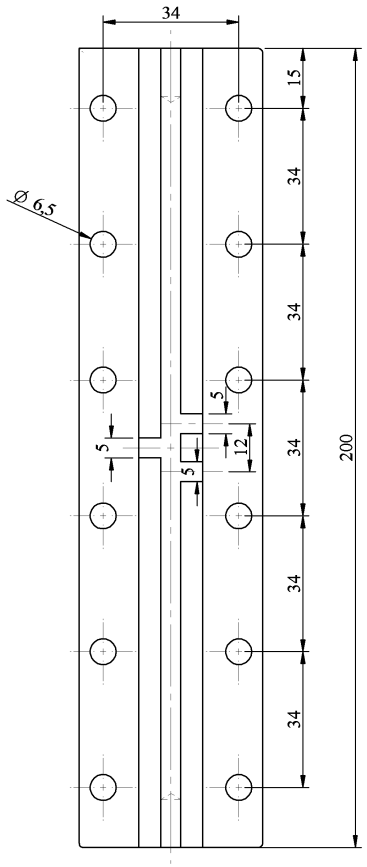
FILE NAME: 2_cab.dft

Unidade: mm DATA: 19/12/2004

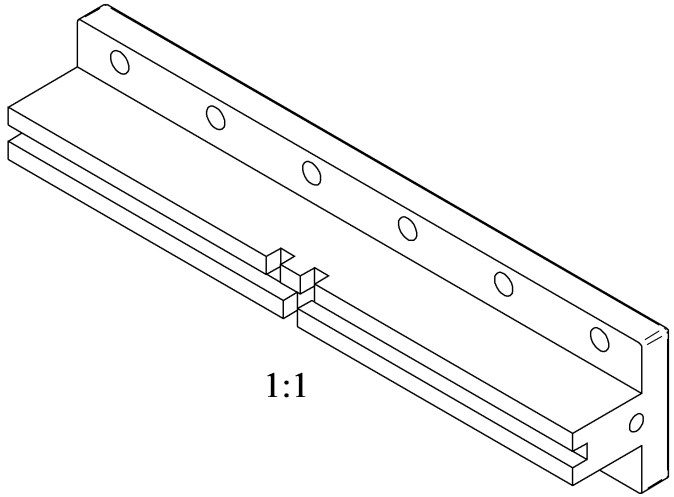
Desenho original feito em folha A3, se impresso em outro formato desconsiderar as escalas



3 N8



1:1



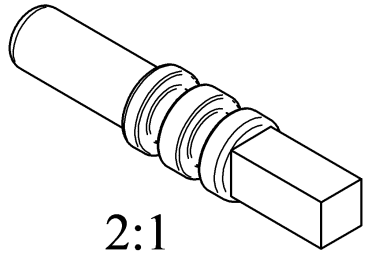
1:1

Retirar rebarbas e todas as quinas vivas,
se não indicado adotar raio 0,5

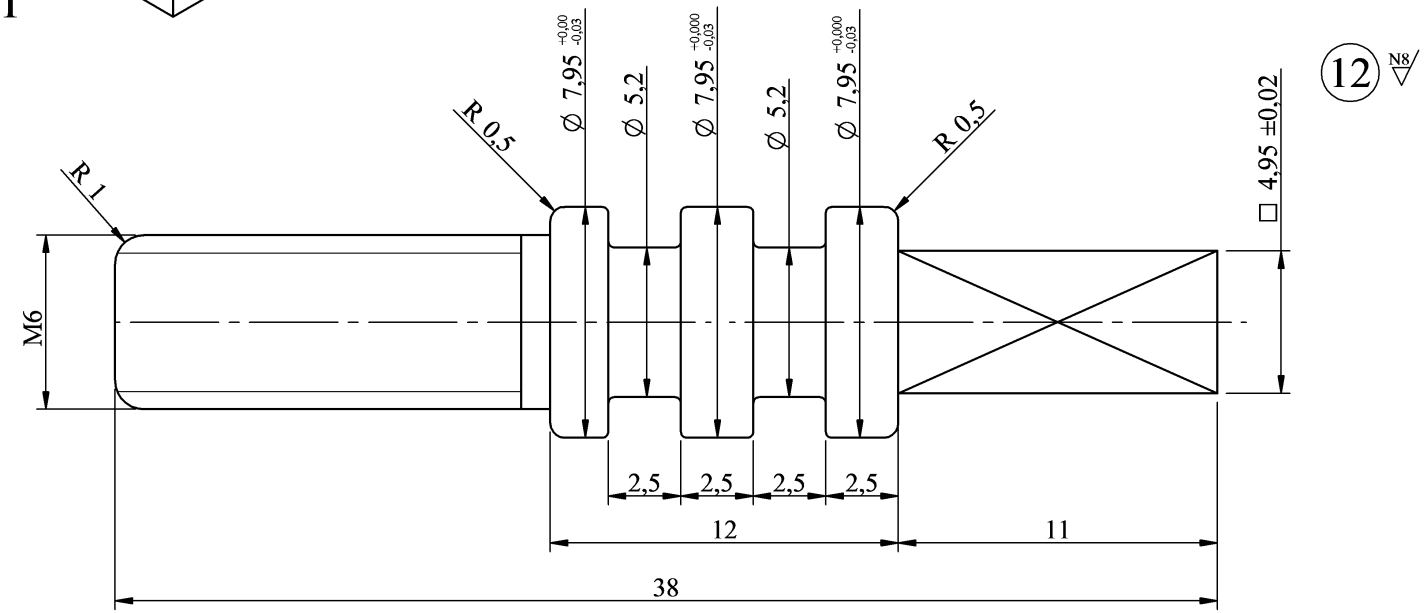
Pos.	Denominação	Quant	Material
3	Tampa	01	Bronze 1 1/2" x 2" x 205

Des.	Marcos	UNIFEI / IEM BANCO DE ENSAIOS PARA GERAÇÃO DE EMULSÃO
Proj.	Marcos	
Aprov.		
Variação para dimensões sem tolerância: até 10 mm ± 0,05 mm de 10,1 a 40 ± 0,07 mm de 40,1 a 100 ± 0,10 mm de100,1 a 200 ± 0,15 mm de 200,1 a 400 ± 0,20 mm		Titulo: Tampa
		Des. Nº GE-03-00 REV
		FILE NAME: 3 tampa.dft
		Unidade: mm DATA: 19/12/2004

Desenho original feito em folha A4, se impresso em outro formato desconsiderar as escalas



2:1



5:1

Raios não cotados adotar 0,2

12	Gaveta	03	INOX AISI 304 diam. 3/8" x 40
Pos.	Denominação	Quant	Material

Des.	Marcos
Proj.	Marcos
Aprov.	

Variação para cotas sem tolerância:

até 10 mm ± 0,05 mm
de 10,1 a 40 ± 0,07 mm
de 40,1 a 100 ± 0,10 mm
de100,1 a 200 ± 0,15 mm
de 200,1 a 400 ± 0,20 mm

UNIFEI / IEM
BANCO DE ENSAIOS PARA GERAÇÃO DE EMULSÃO

Título: Gaveta

Des. Nº GE-08-00 REV

FILE NAME: 8_gaveta.dft

Unidade: mm DATA: 19/12/2004

Anexo B – Simulações Numéricas dos Pontos Ensaiados

Sabendo-se que a dissipação da energia cinética turbulenta é função da queda de pressão, da vazão volumétrica e da geometria da zona de dissipação, explicitado aqui como volume de dissipação, as simulações foram segregadas por ΔP e viscosidade do fluido, dada a posição da haste central do aparato, que definia a queda de pressão requerida.

Os parâmetros fixados foram a vazão de entrada no canal e as propriedades do fluido. Foi considerado escoamento monofásico, isto é, apenas óleo escoando no conduto. Essa simplificação é válida uma vez que até as concentrações de água em óleo experimentadas não ocorrem grandes variações nas propriedades do fluido bifásico.

Os resultados obtidos nas condições ora explanadas indicaram que possivelmente deveria haver algum ponto de vazamento (interno nas folgas das hastes e/ou externo) no canal, uma vez que, quando operando em condições de maior restrição, ou seja, maior fechamento da haste central, as quedas de pressão observadas na simulação foram superiores ao controlado experimentalmente (mais pronunciado nos pontos de 9 bar de ΔP).

Novas simulações foram geradas, onde a queda de pressão foi mantida fixa e a vazão, por conta do possível vazamento no aparato, tendeu a diminuir. Esse artifício foi realizado para os pontos de 6 e 9 bar, sendo que os pontos de 9 bar as discrepâncias foram ainda maiores. Mesmo com os referidos problemas, o objetivo da simulação foi considerado atingido, uma vez que se almejava determinar a zona de dissipação da energia e que esta se mostrou bem similar entre os casos simulados, alterando apenas a intensidade da dissipação de energia.

Os resultados serão segregados por geometria, e cada condição será exibida por ponto. Os *ranges* foram mantidos iguais nas simulações de dissipação da energia cinética turbulenta para efeito de comparação. Em casos onde ficou difícil a visualização, estreitou-se o range para obtenção do real valor de dissipação.

1 – Canal Livre

Inicialmente foi realizada uma simulação com o canal totalmente livre para verificação da não ocorrência de significativas dissipações da energia cinética turbulenta, como pode ser observado na Figura B1.

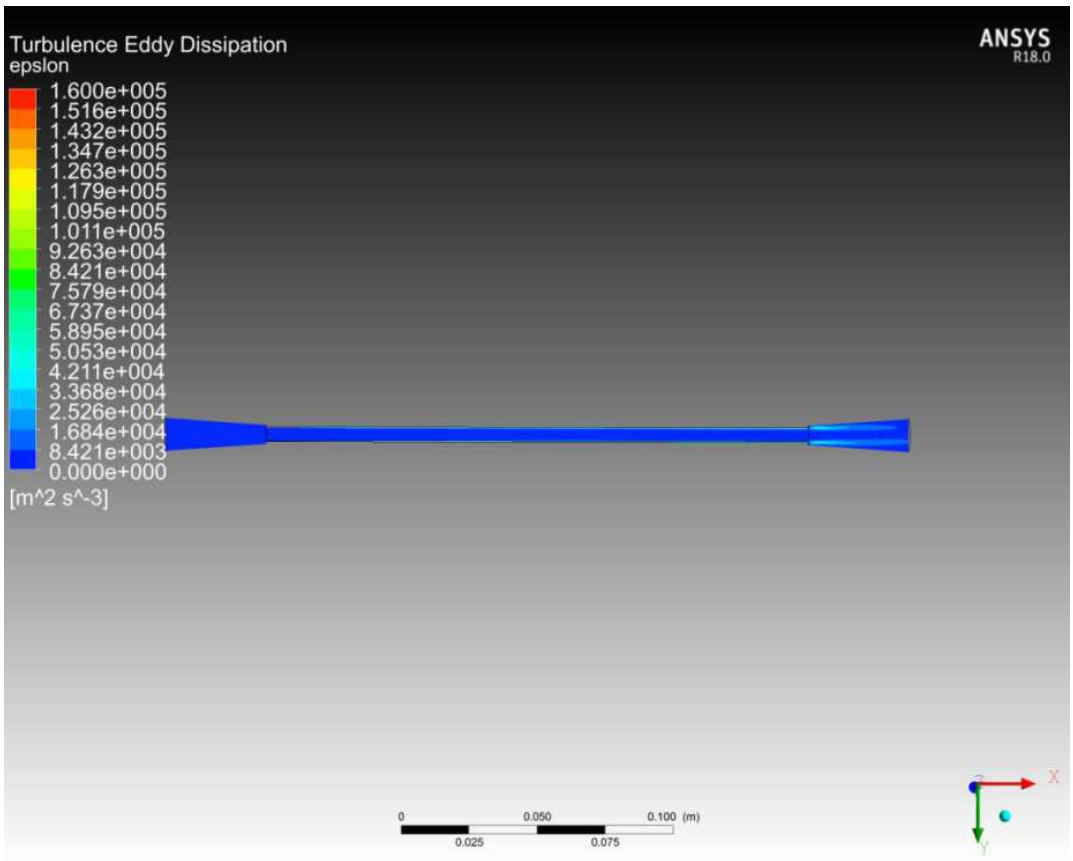


Figura B 1 – Dissipação da energia cinética turbulenta em canal livre

2 – Geometria Gaveta

2.1 – Ponto de 12 cP e ΔP = 3 bar

Para os pontos experimentais cujo ΔP foi de 3 bar, observou-se que não seria necessário alterar a simulação, uma vez que na simulação as quedas de pressão observadas foram da ordem de 3 bar. A Figura B2 mostra a simulação para dissipação de energia cinética turbulenta.

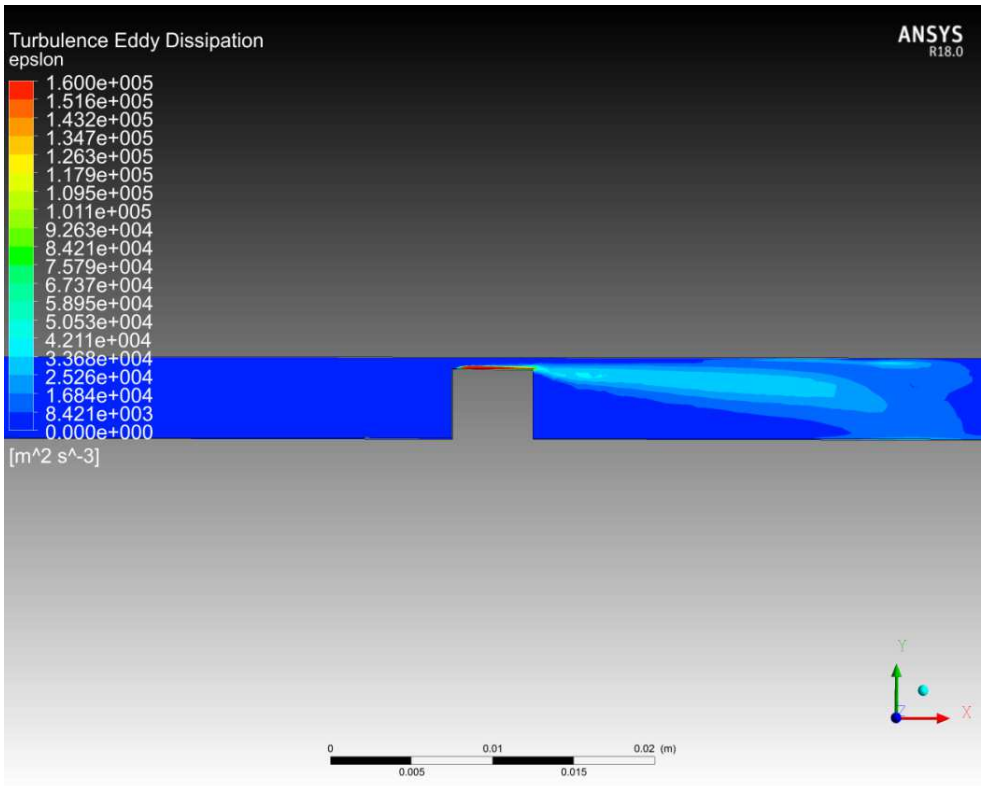


Figura B 2 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 12 cP e ΔP = 3 bar

2.2 – Ponto de 12 cP e ΔP = 9 bar

Para esse ponto, observou-se que a queda de pressão obtida à vazão fixa foi muito superior ao valor controlado experimentalmente (Figura B3). Isso evidenciou o vazamento interno ou externo ao canal. A Figura B4 mostra a dissipação da energia cinética turbulenta. Nesse ponto, usou-se do subterfúgio de realizar novas simulações fixando-se o ΔP e deixando a vazão variar. Como o foco do estudo foi a verificação da zona de dissipação da energia cinética turbulenta, nos demais casos, onde a simulação foi refeita com delta de pressão fixo, os resultados da simulação para delta de pressão não serão apresentados.

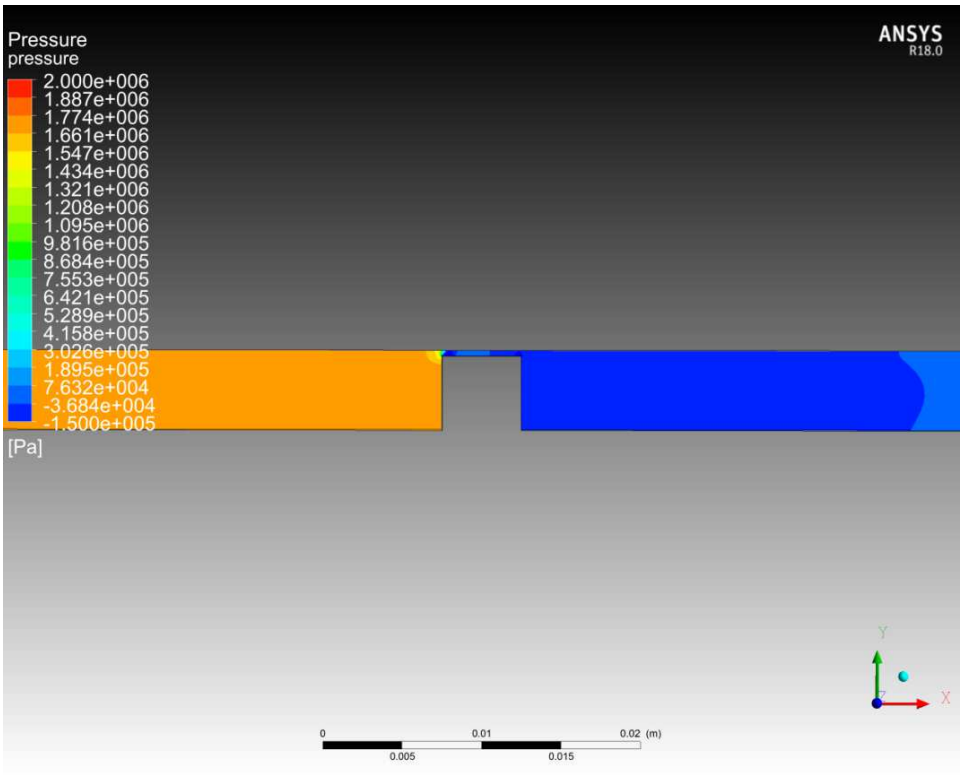


Figura B 3 - Simulação de ∆P para Ponto de 12 cP e ∆P = 9 bar

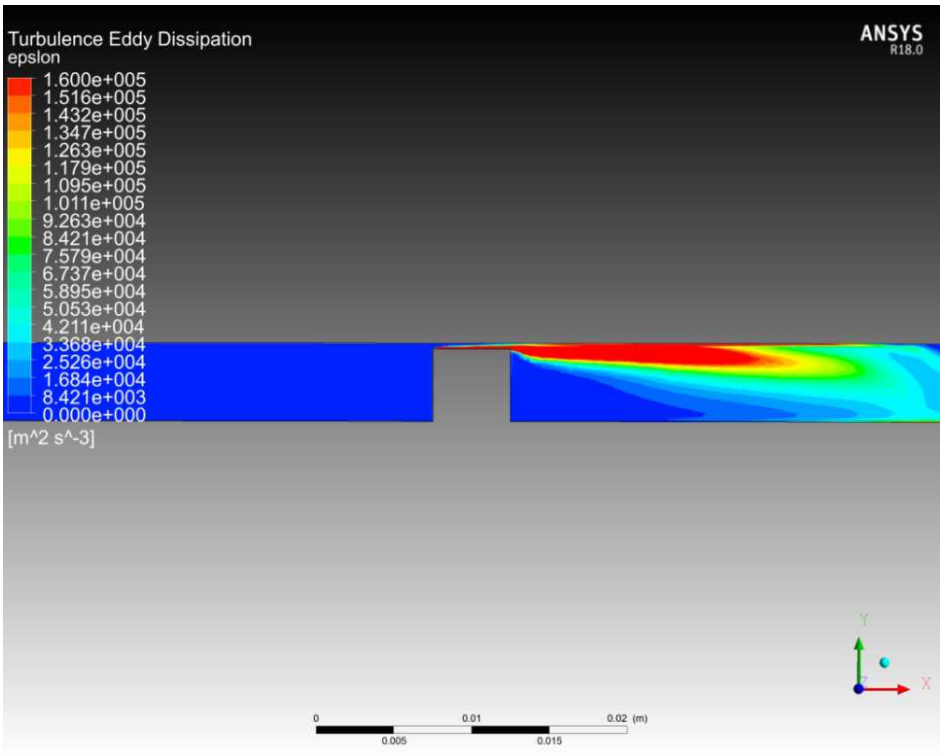


Figura B 4 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 12 cP e ∆P = 9 bar

Fixando a queda de pressão, na figura B5 temos a dissipação da energia cinética turbulenta. Vale lembrar que nesse caso a vazão volumétrica é inferior ao praticado nos experimentos.

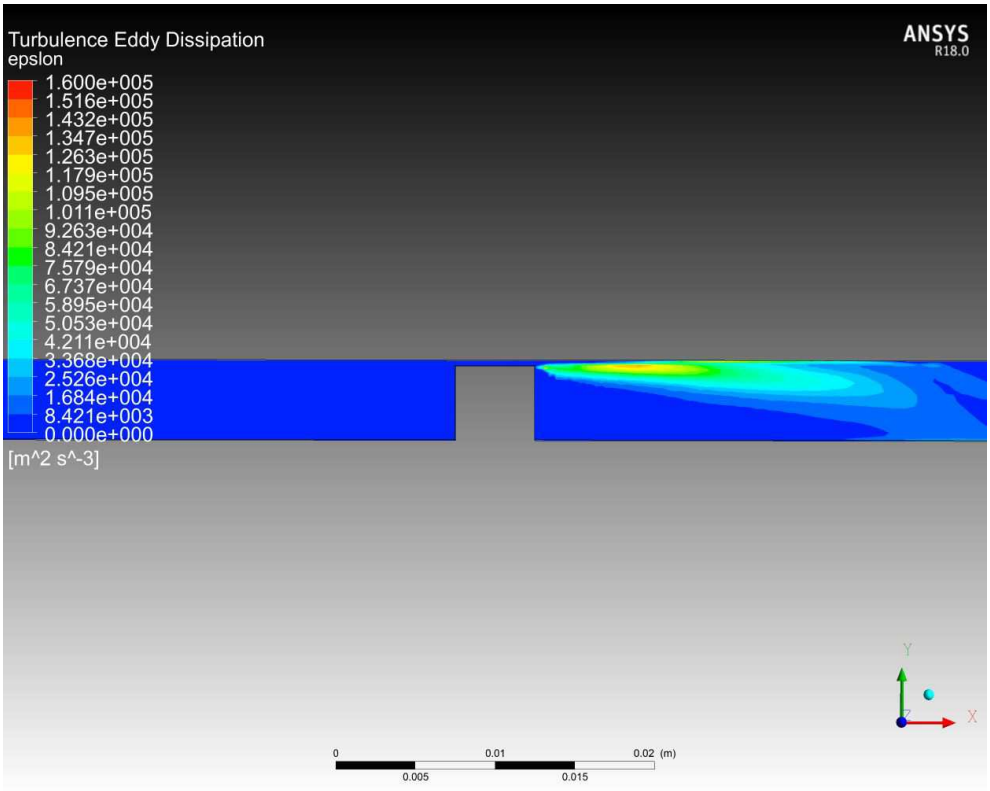


Figura B 5 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 12 cP e ΔP = 9 bar, fixando o ΔP

2.3 – Ponto de 26 cP e ΔP = 3 bar

A Figura B6 mostra a simulação à vazão fixa para o ponto experimental em questão. Para melhor visualização, o intervalo da legenda da dissipação da energia cinética turbulenta foi estreitado na Figura B7.

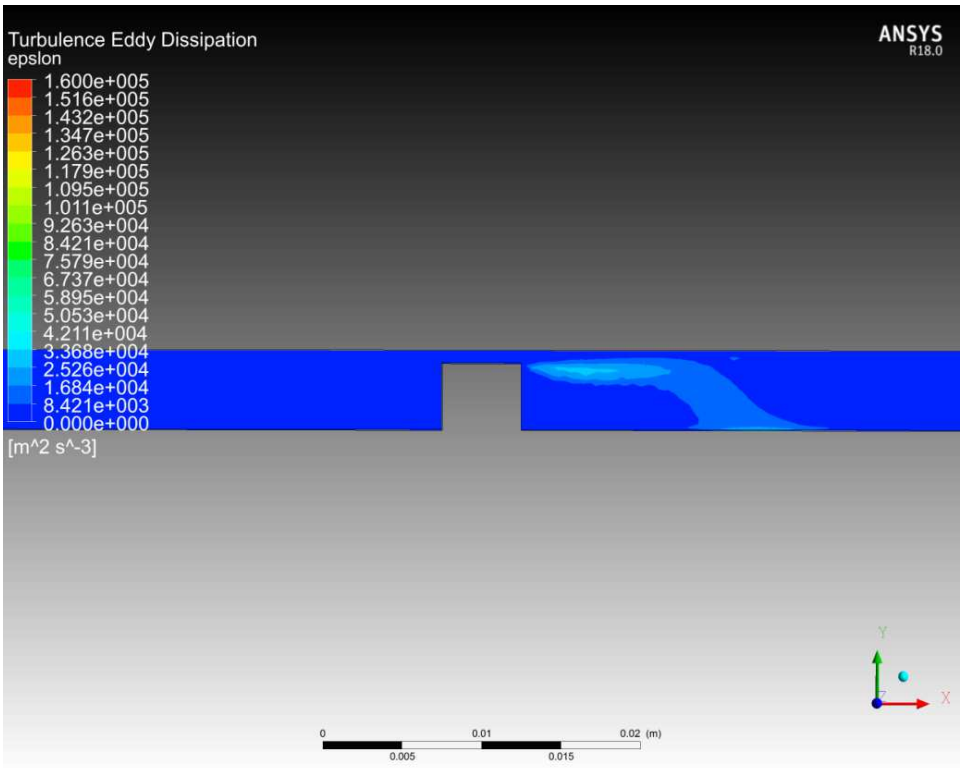


Figura B 6 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 3 bar

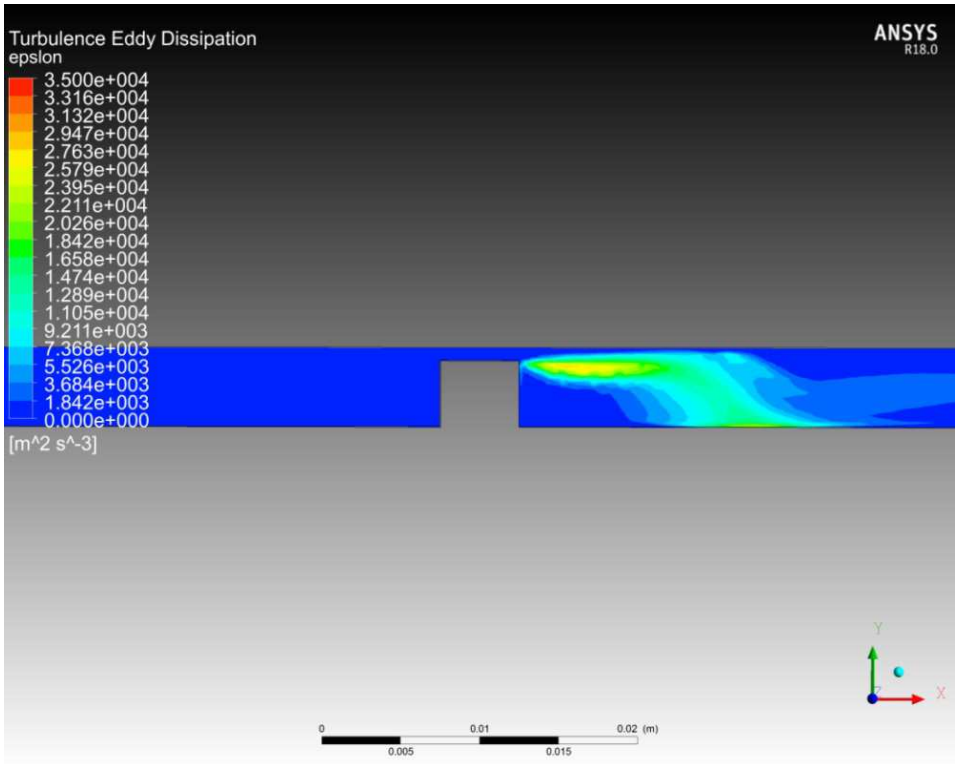


Figura B 7 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 3 bar. Intervalo da legenda reduzido para melhor visualização

2.4 – Ponto de 26 cP e ΔP = 9 bar

Nos pontos à maior viscosidade as discrepâncias na queda de pressão foram menos pronunciadas. Entretanto, optou-se por fazer as simulações à vazão fixa e pressão fixa de modo a se exemplificar que a zona de dissipação se mantinha muito similar. A figura B8 mostra a simulações para dissipação da energia cinética turbulenta a vazão mássica fixa.

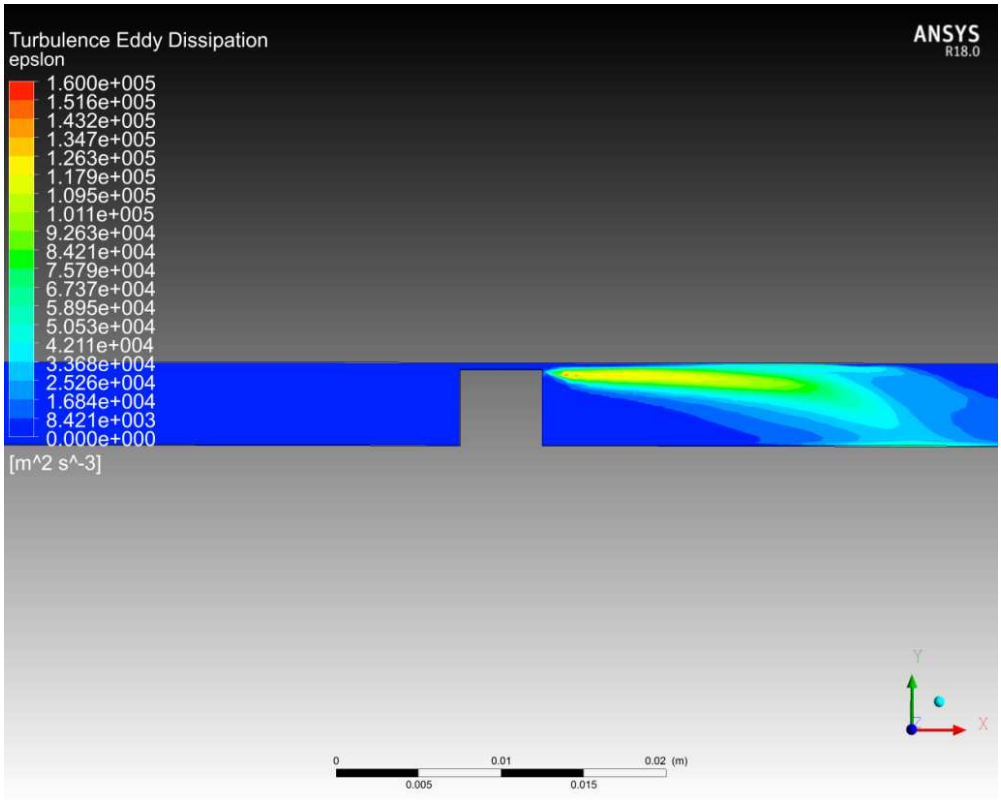


Figura B 8 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 9 bar

Mantendo-se a pressão fixa, a seguinte dissipação foi obtida na simulação (Figura B9).

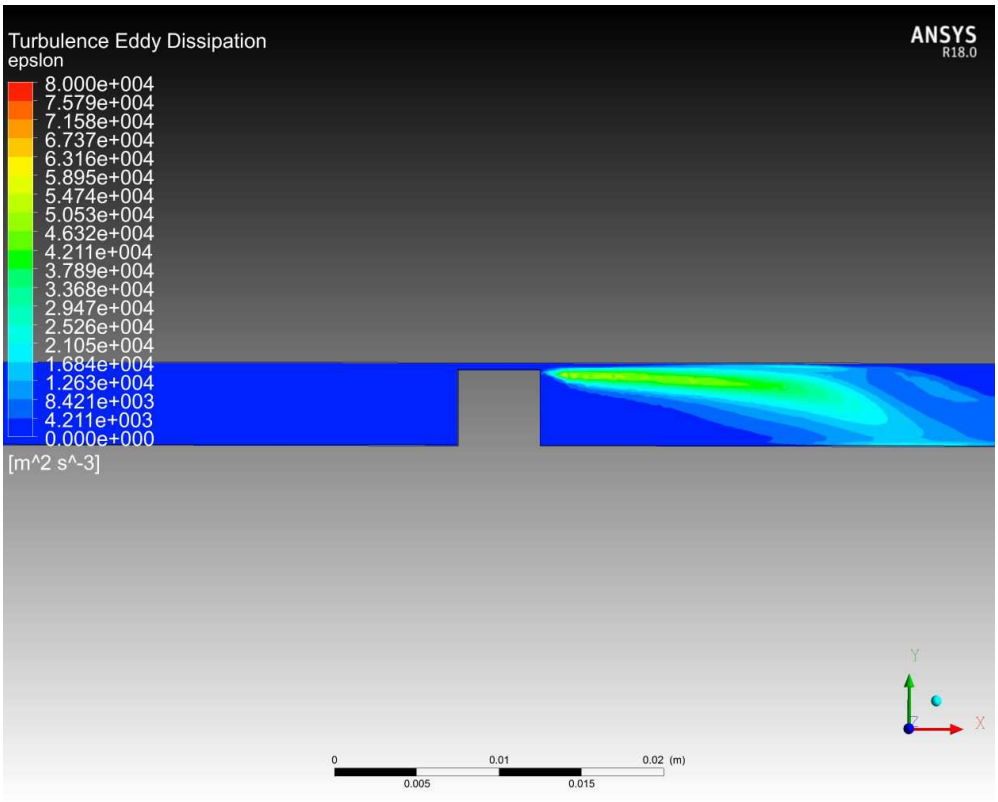


Figura B 9 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 9 bar, mantendo ΔP fixo

2.5 – Ponto de 19 cP e ΔP = 6 bar

A Figura B10 mostra a simulação para dissipação para o ponto central à vazão fixa. Da mesma forma como reportado anteriormente, foi realizada a simulação também a ΔP fixo (figura B11). Mais uma vez é interessante pontuar a similaridade das zonas de dissipação, o que corrobora com os dados da literatura e com o que foi assumido e aplicado na execução deste trabalho.

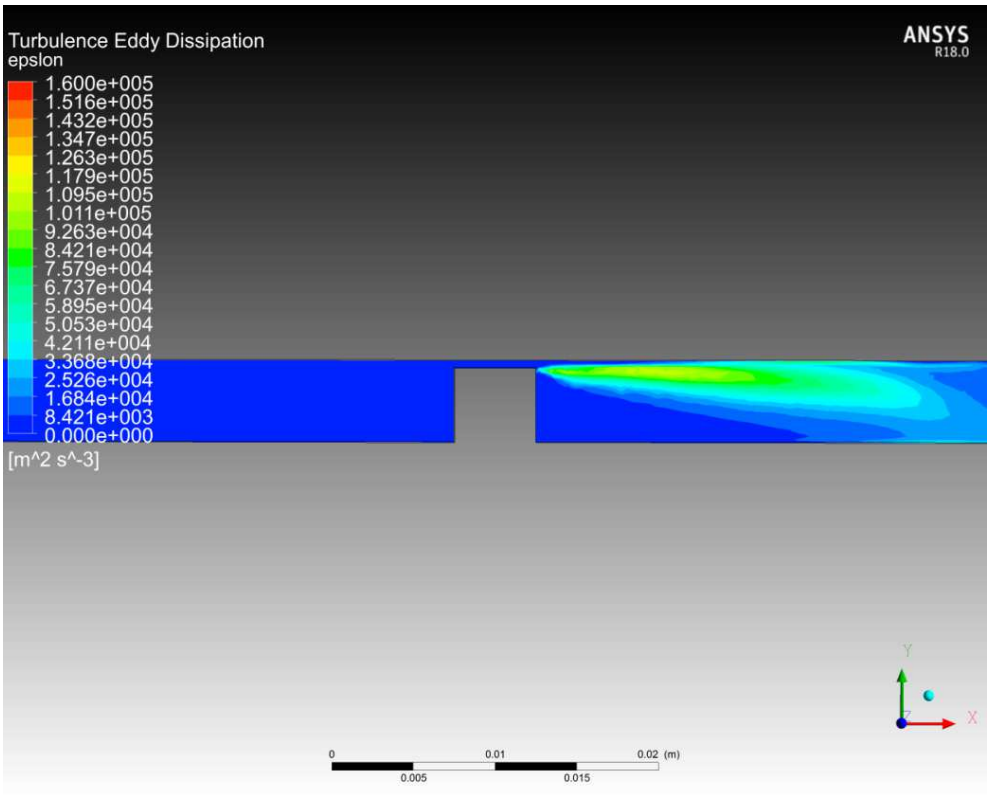


Figura B 10 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 19 cP e ΔP = 6 bar

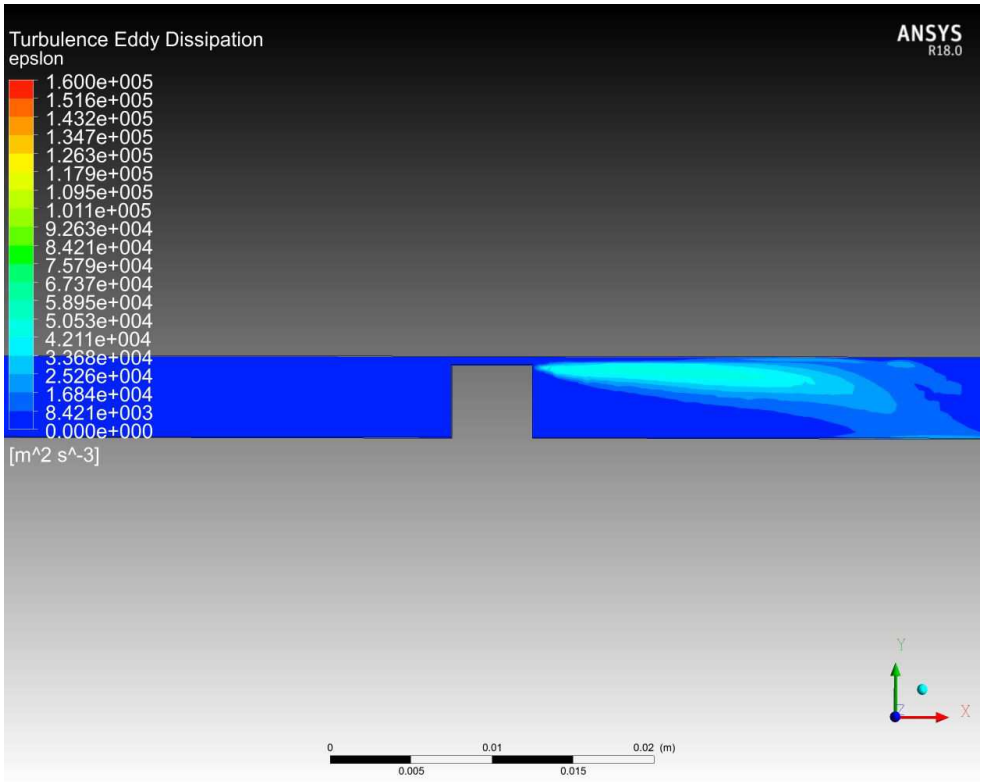


Figura B 11 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 19 cP e ΔP = 6 bar, mantendo ΔP fixo

Para uma melhor visualização dos valores de dissipação, estreitou-se o intervalo da legenda na Figura B12.

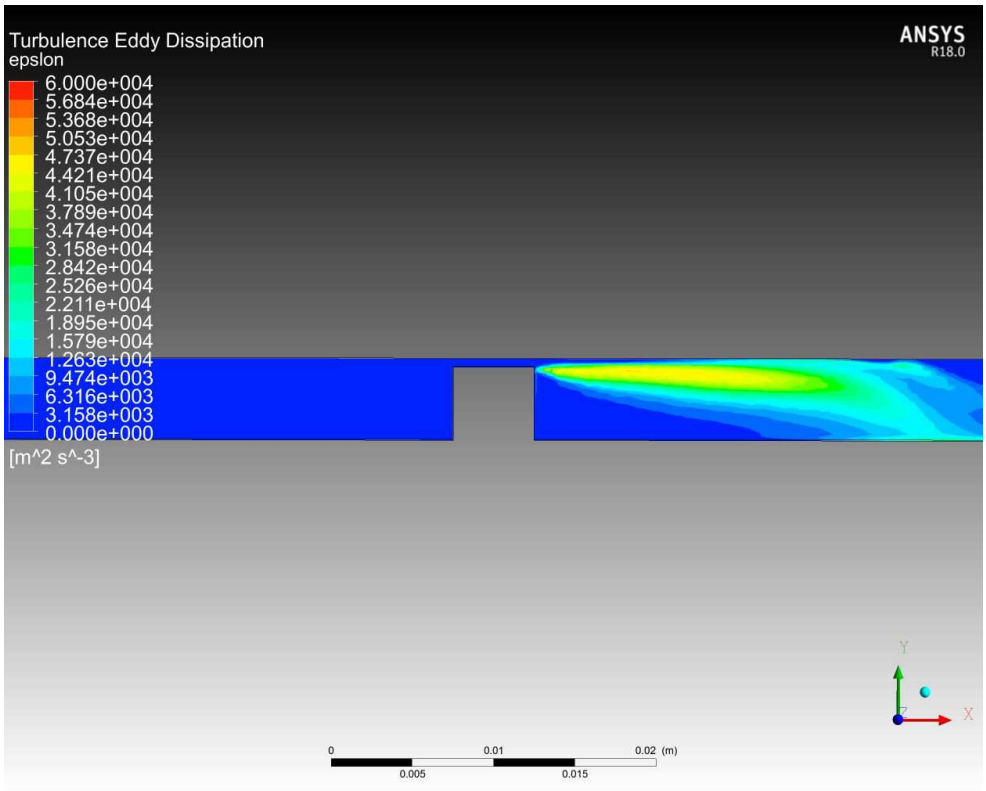


Figura B 12 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 19 cP e ΔP = 6 bar, mantendo ΔP fixo e com intervalo da legenda reduzido para melhor visualização

2.6 – Pontos extras simulados

2.6.1 – Pontos com 26cP e ΔP = 4,5 bar

A Figura B13 mostra a simulação para dissipação da energia cinética turbulenta para um dos pontos extras a vazão fixa. Utilizou-se o posicionamento da haste central experimental para a execução da simulação. Para uma melhor visualização dos valores de dissipação, estreitou-se o intervalo da legenda na Figura B14.

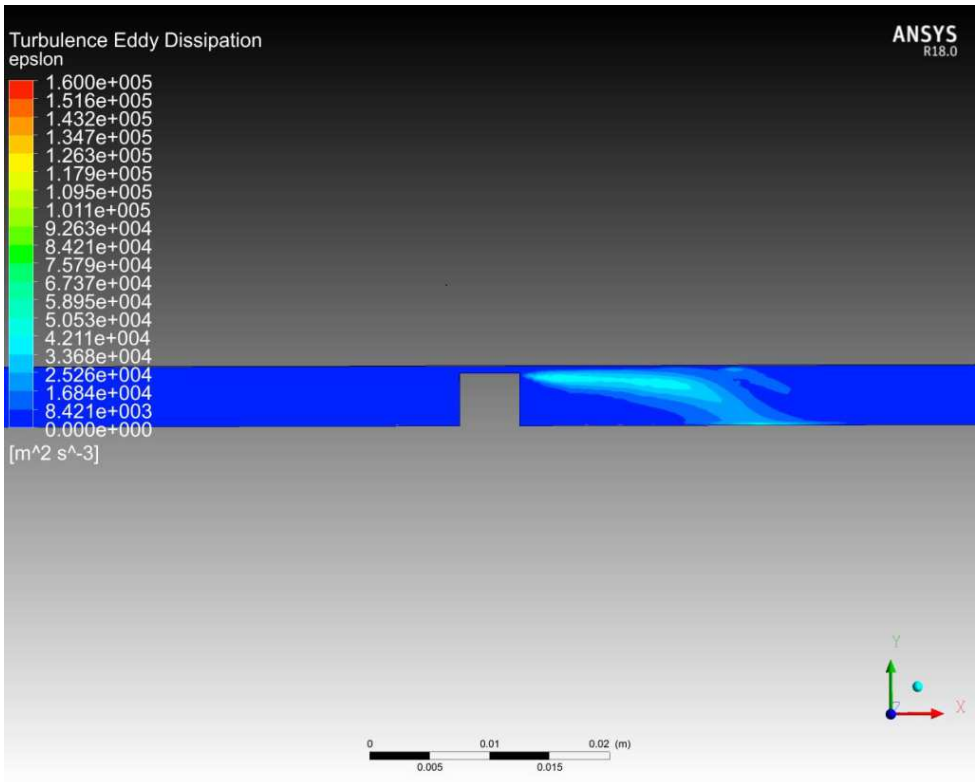


Figura B 13 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 4,5 bar

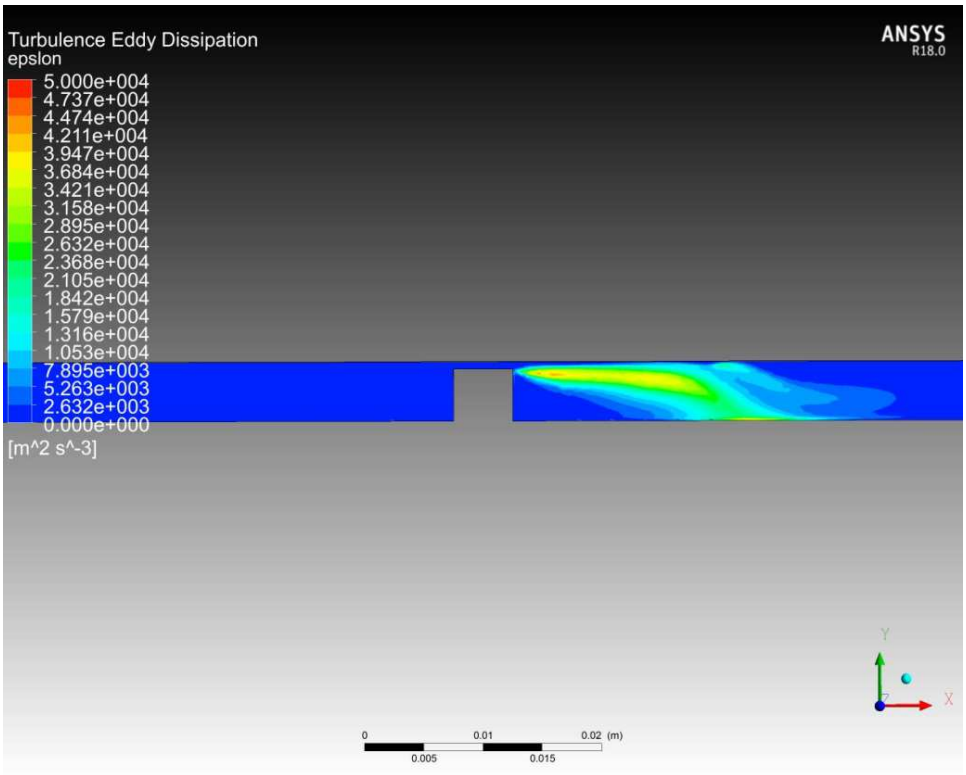


Figura B 14 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 4,5 bar, com intervalo da legenda reduzido

2.6.2 – Pontos com 26cP e ΔP = 7,5 bar

A Figura B15 mostra a simulação para dissipação da energia cinética turbulenta para o outro ponto extra à vazão fixa.

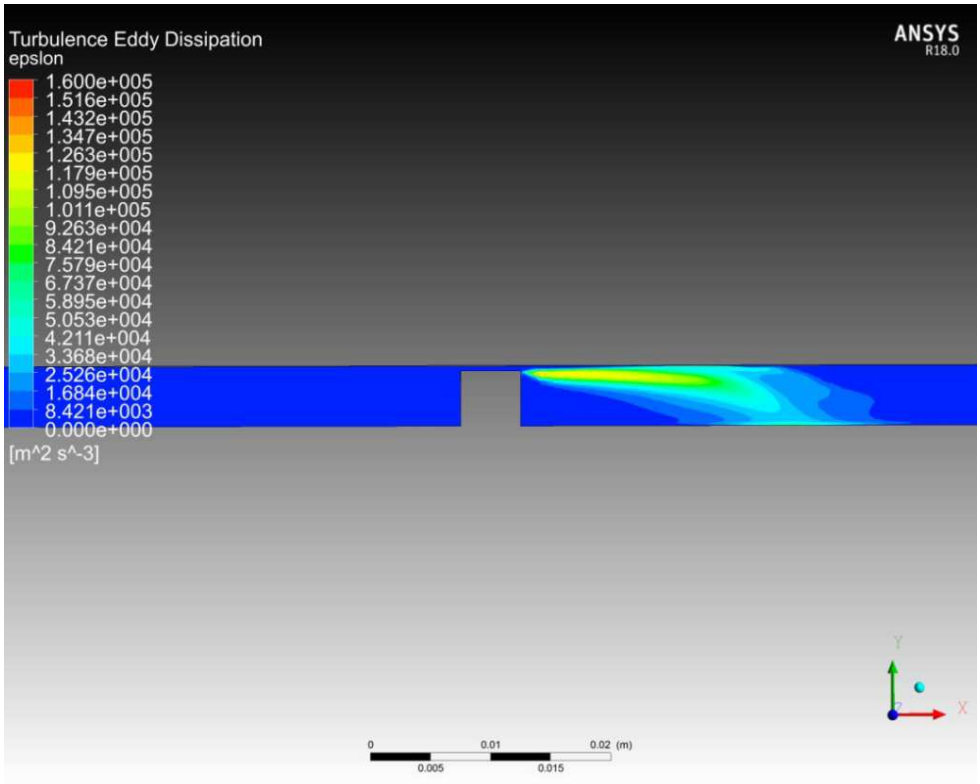


Figura B 15 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 7,5 bar

Para uma melhor visualização dos valores de dissipação, estreitou-se o intervalo da legenda na Figura B16. Ao se analisar todos as simulações a vazão fixa e pressão fixa da geometria gaveta, percebe-se que a zona de dissipação da energia cinética turbulenta tende a manter-se muito similar, independente das condições de delta de pressão e das vazões aplicadas. Essa zona se estende por aproximadamente 5 vezes o diâmetro hidráulico do canal, corroborando com alguns dados da literatura. Essa constatação dá confiança para utilização dessa zona de dissipação de energia nos exercícios e aplicações de modelos realizados ao longo deste trabalho.

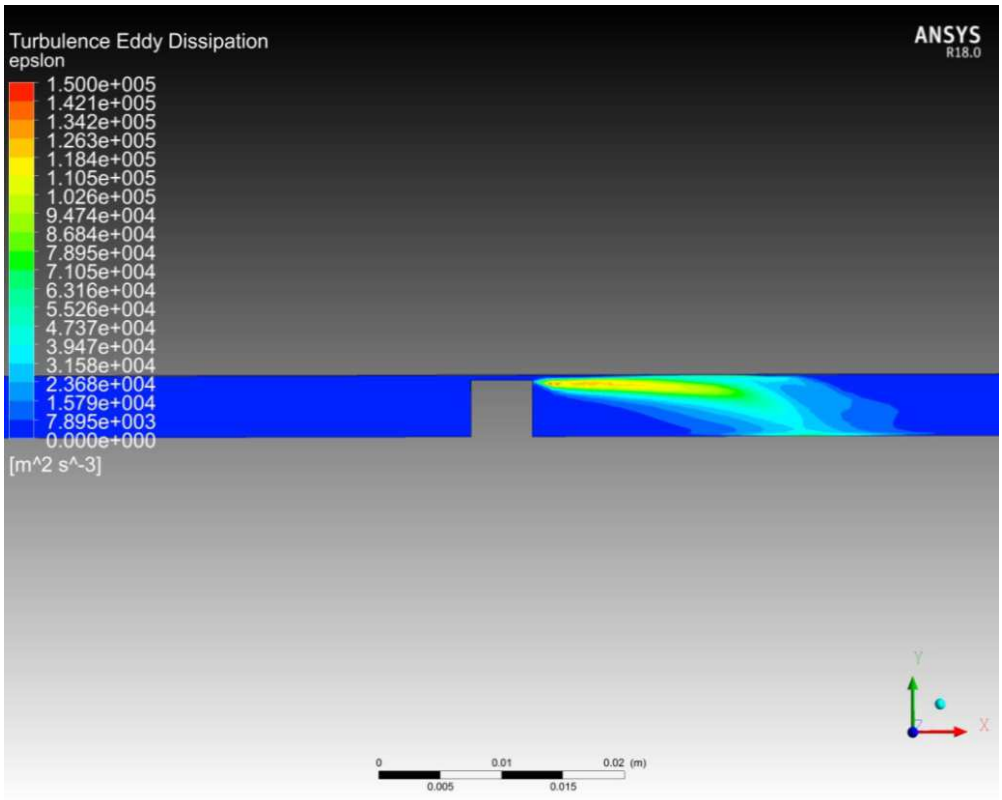


Figura B 16 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 7,5 bar, com intervalo da legenda reduzido

3 – Geometria Globo

O mesmo tratamento foi dado aos pontos simulados na geometria globo. Nesta geometria apenas os pontos simulados a vazão fixa cuja queda de pressão esperada era de 9 bar se mostraram muito discrepantes, indicando vazamento nas gavetas. Dessa forma, a abordagem de simular mantendo delta de pressão fixa foi utilizada apenas para esses pontos.

3.1 – Ponto de 12 cP e ΔP = 3 bar

A Figuras B17 mostra a simulação, a vazão fixa, nas condições de 12 cP e queda de pressão de 3 bar para a dissipação da energia cinética turbulenta. A seguir, para melhor visualização da dissipação, o intervalo da legenda foi estreitado (Figura B18).

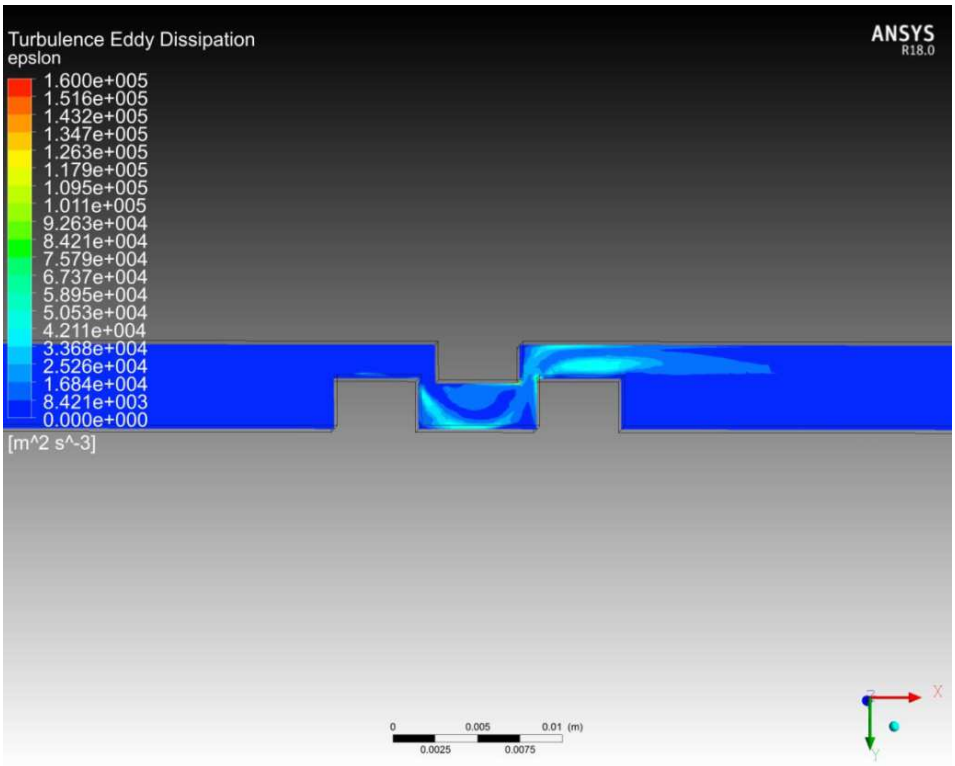


Figura B 17 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 12 cP e ΔP = 3 bar

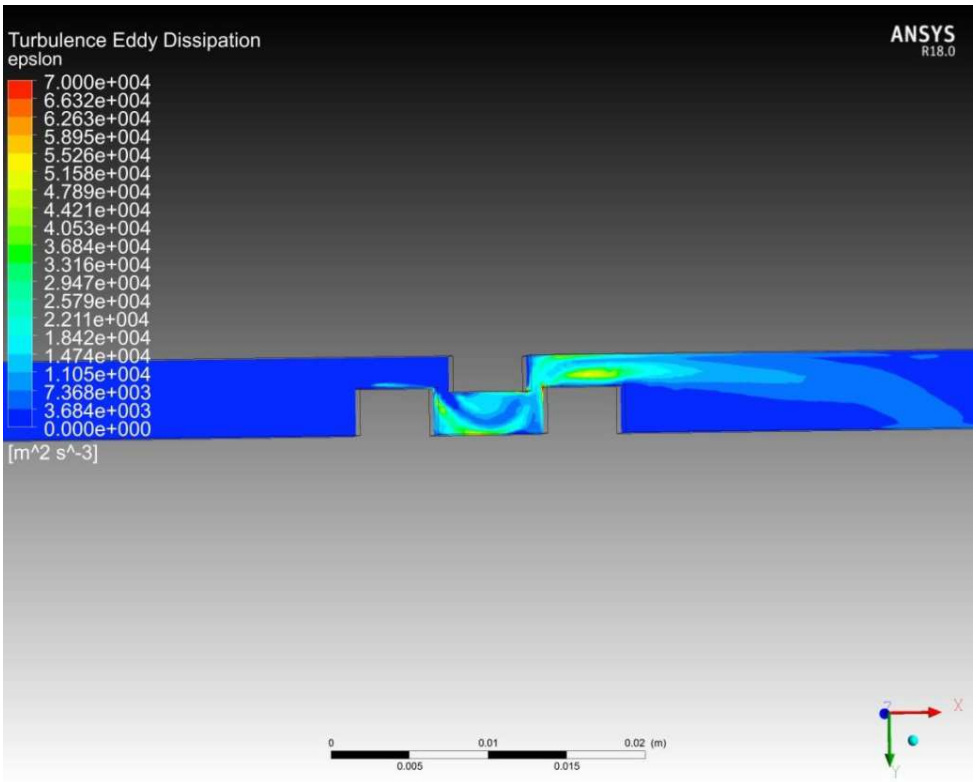


Figura B 18 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 12 cP e ΔP = 3 bar, com intervalo da legenda reduzido

3.2 – Ponto de 12 cP e ΔP = 9 bar

A Figura B19 mostra a simulação, a vazão fixa, nas condições de 12 cP e queda de pressão de 9 bar, para a dissipação da energia cinética turbulenta.

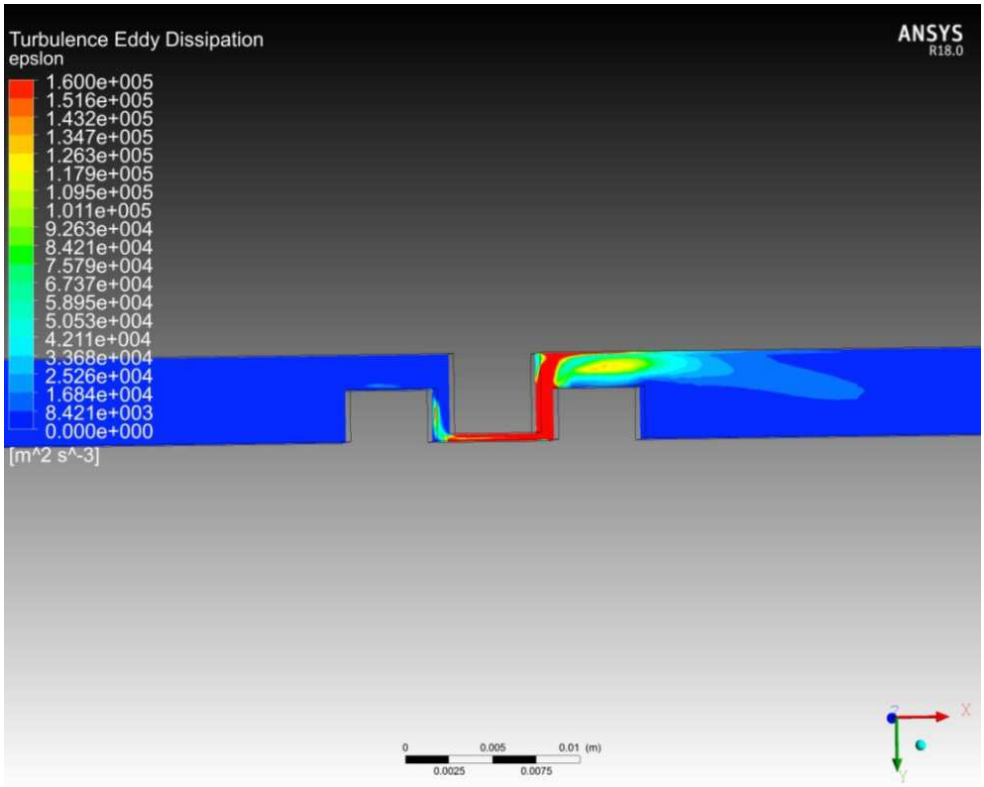


Figura B 19 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 12 cP e ΔP = 9 bar

Realizou-se a simulação fixando a queda de pressão e o resultado da dissipação da energia cinética turbulenta pode ser vista na Figura B20. Para melhor visualização, o intervalo da legenda foi aumentado (Figura B21).

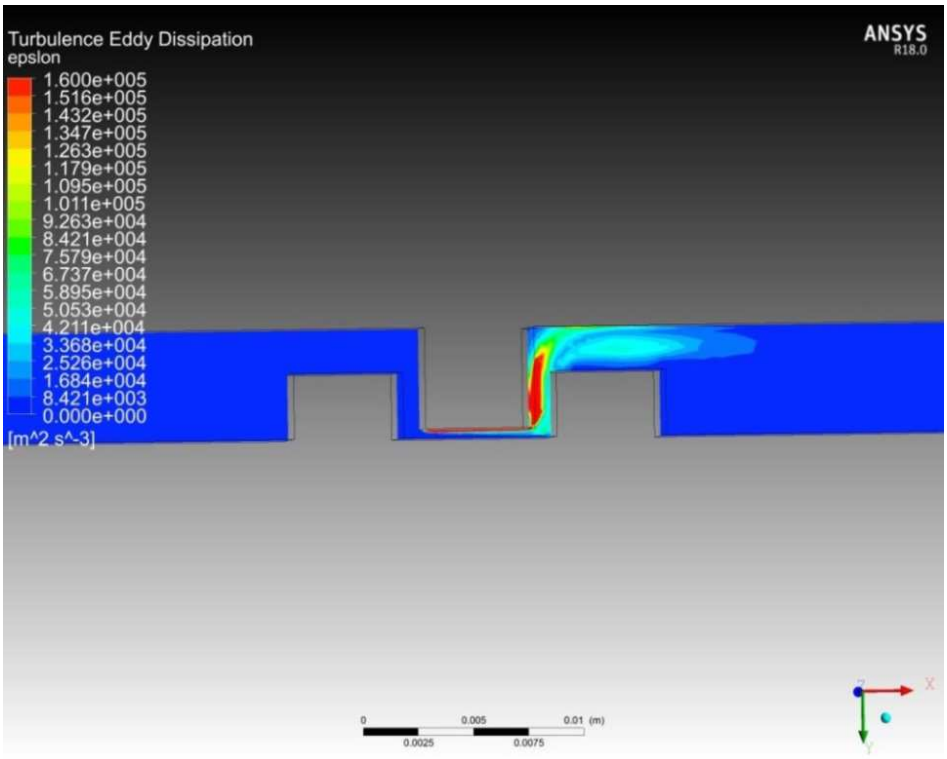


Figura B 20 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 12 cP e ∆P = 9 bar, a ∆P fixo

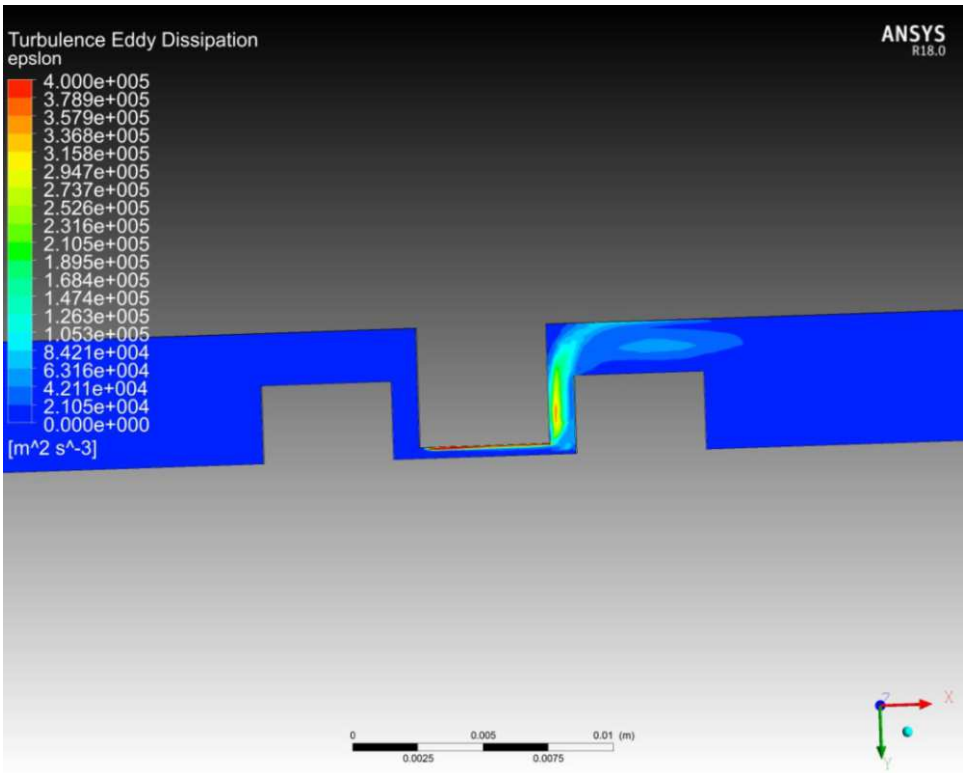


Figura B 21 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 12 cP e ∆P = 9 bar, a ∆P fixo, com intervalo da legenda aumentado

3.3 – Ponto de 26 cP e ΔP = 3 bar

A Figura B22 mostra a simulação, a vazão fixa nas condições de 26 cP e queda de pressão de 3 bar, para a dissipação da energia cinética turbulenta.

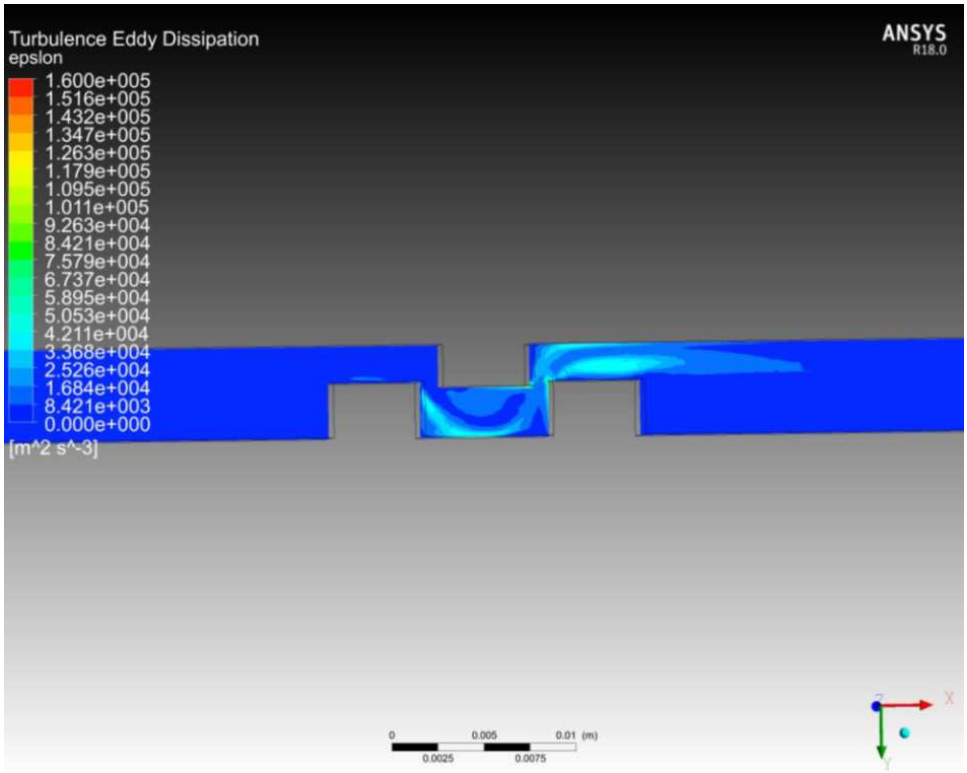


Figura B 22 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 3 bar

3.4 – Ponto de 26 cP e ΔP = 9 bar

A Figura B23 mostra a simulação, a vazão fixa nas condições de 26 cP e queda de pressão de 9 bar, para a dissipação da energia cinética turbulenta. Realizou-se também a simulação fixando a queda de pressão e o resultado da dissipação da energia cinética turbulenta pode ser vista na Figura B24.

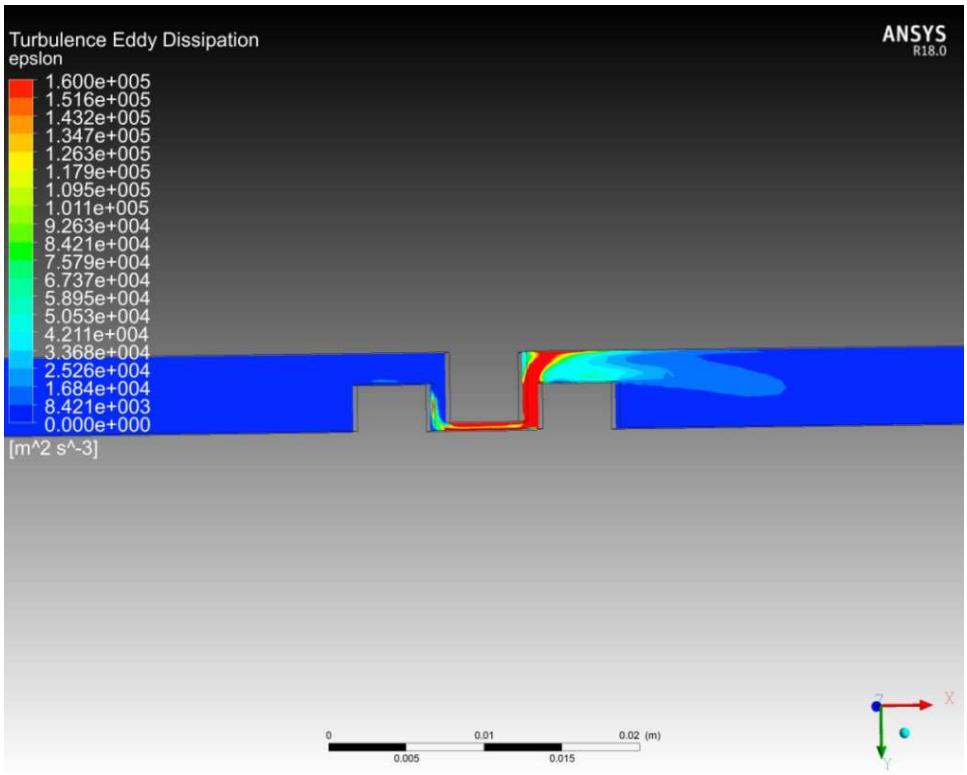


Figura B 23 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 9 bar

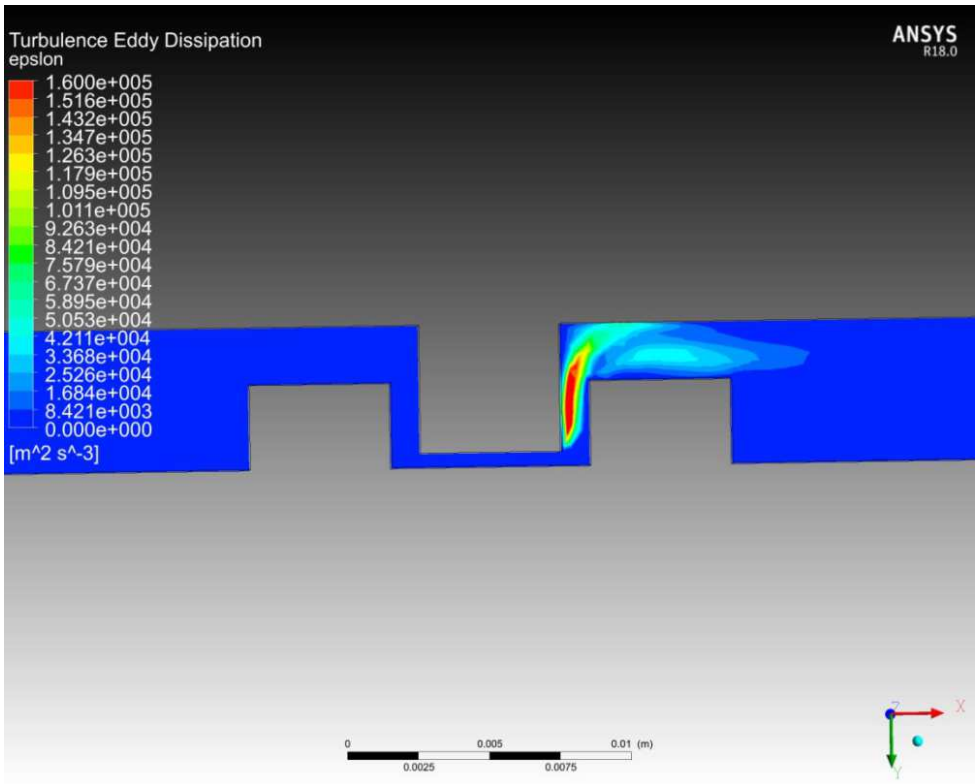


Figura B 24 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 9 bar, com ΔP fixo

Para melhor visualização, o intervalo da legenda foi aumentado (Figura B25).

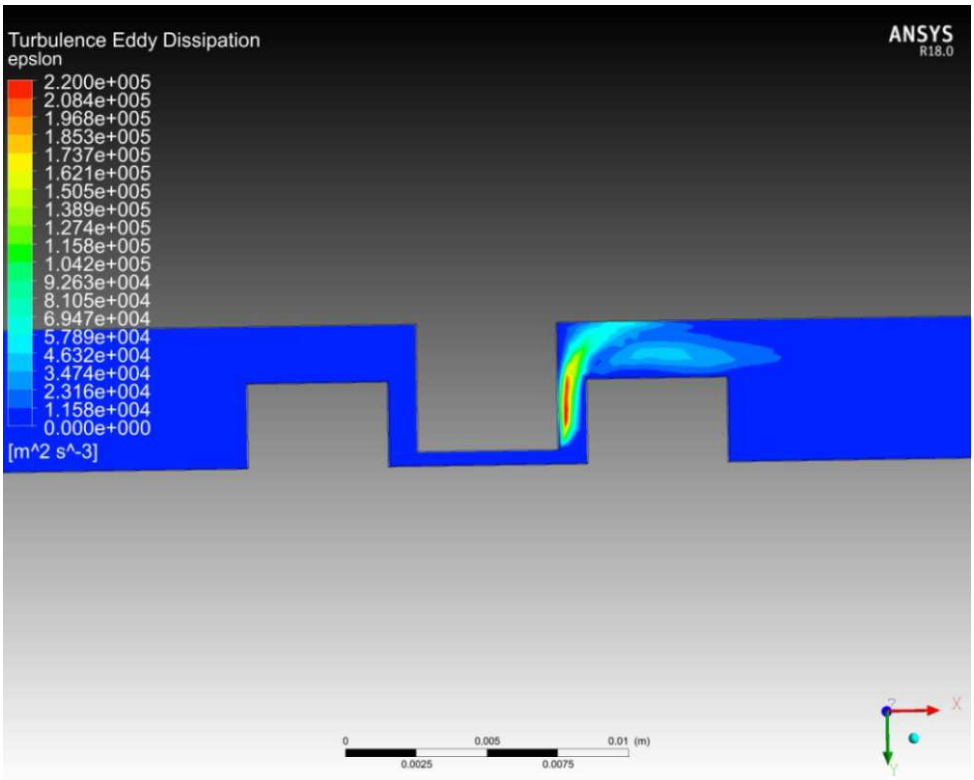


Figura B 25 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 9 bar, com ΔP fixo e intervalo da legenda reduzido

3.5 – Ponto de 19 cP e ΔP = 6 bar

A Figura B26 mostra a simulação, a vazão fixa nas condições de 19 cP e queda de pressão de 6 bar, para a dissipação da energia cinética turbulenta. Considerou-se que não seria necessária a realização de simulações a pressão fixa para esse ponto. Para melhor visualização, diminuiu-se o intervalo da escala (Figura B27).

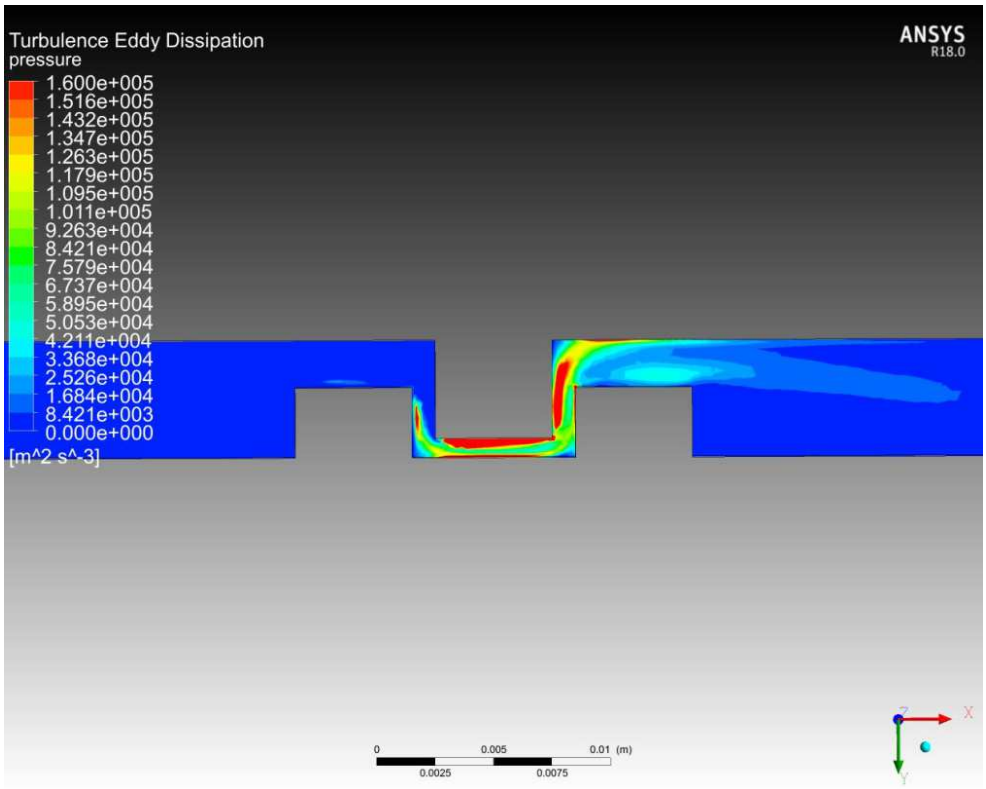


Figura B 26 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 19 cP e ΔP = 6 bar

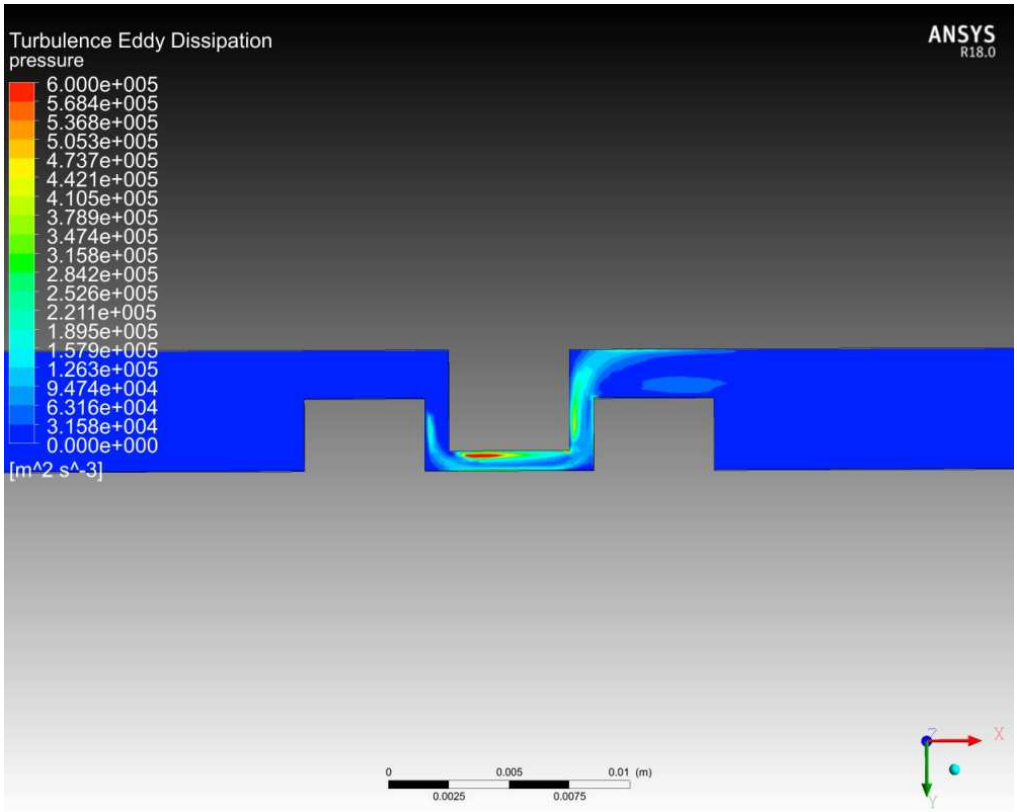


Figura B 27 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 19 cP e ΔP = 6 bar, com intervalo da legenda reduzido

3.6 – Ponto extras realizados

3.6.1 – Ponto de 26 cP e ΔP = 4,5 bar

A Figura B28 mostra a simulação, a vazão fixa nas condições de 26 cP e queda de pressão de 4,5 bar, para a dissipação da energia cinética turbulenta. Para melhor visualização, diminuiu-se o range da escala (Figura B29).

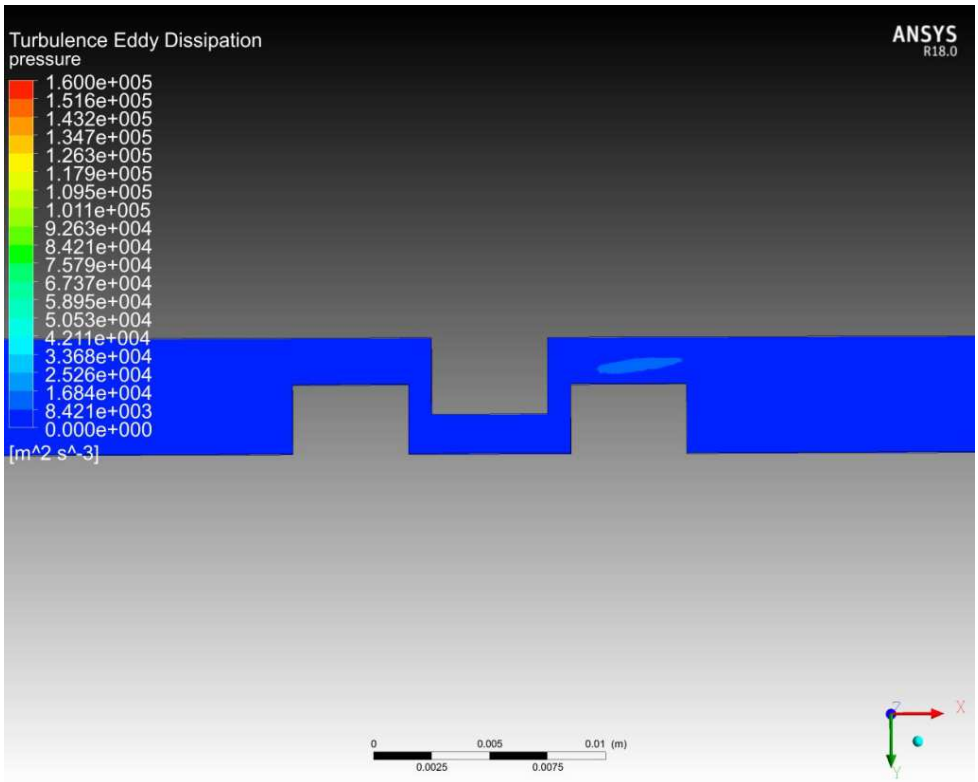


Figura B 28 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 4,5 bar

O valor de dissipação de energia obtido na simulação com queda de pressão de 4,5 bar (que não estava planejada inicialmente) parece bastante discrepante com o que vinha sendo obtido no restante das simulações. Este resultado foi considerado um resultado não confiável.

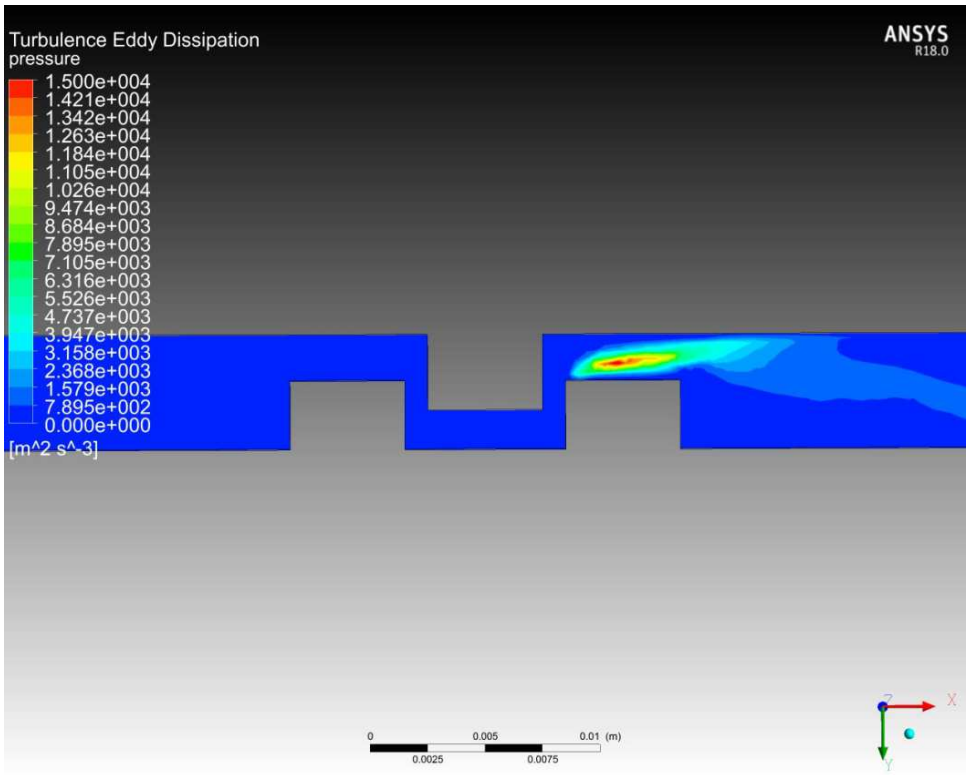


Figura B 29 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 4,5 bar, com intervalo da legenda reduzido

3.6.2 – Ponto de 26 cP e ΔP = 7,5 bar

A Figura B30 mostra a simulação, a vazão fixa nas condições de 26 cP e quebra de pressão de 7,5 bar, para a dissipação da energia cinética turbulenta. Para melhor visualização, diminuiu-se o intervalo da legenda (Figura B31).

Diferentemente do que foi observado para a geometria gaveta, na geometria globo a dissipação de energia cinética turbulenta ocorre em uma região mais curta à jusante do elemento dissipador. Não obstante, o padrão de que a dissipação ocorre em um mesmo volume, independente das condições impostas, voltou a se mostrar verdadeiro. Desta forma, as simulações realizadas foram de suma importância para definição dessa zona de dissipação que, no caso da geometria globo, se estende por uma distância de aproximadamente um diâmetro hidráulico do canal.

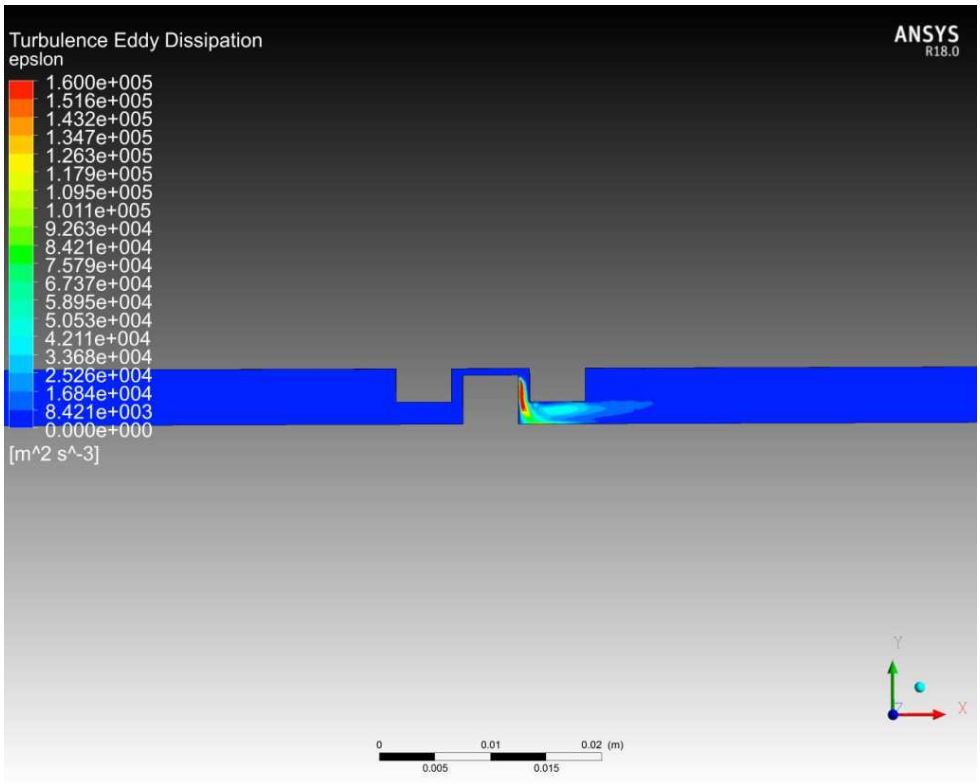


Figura B 30 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 7,5 bar

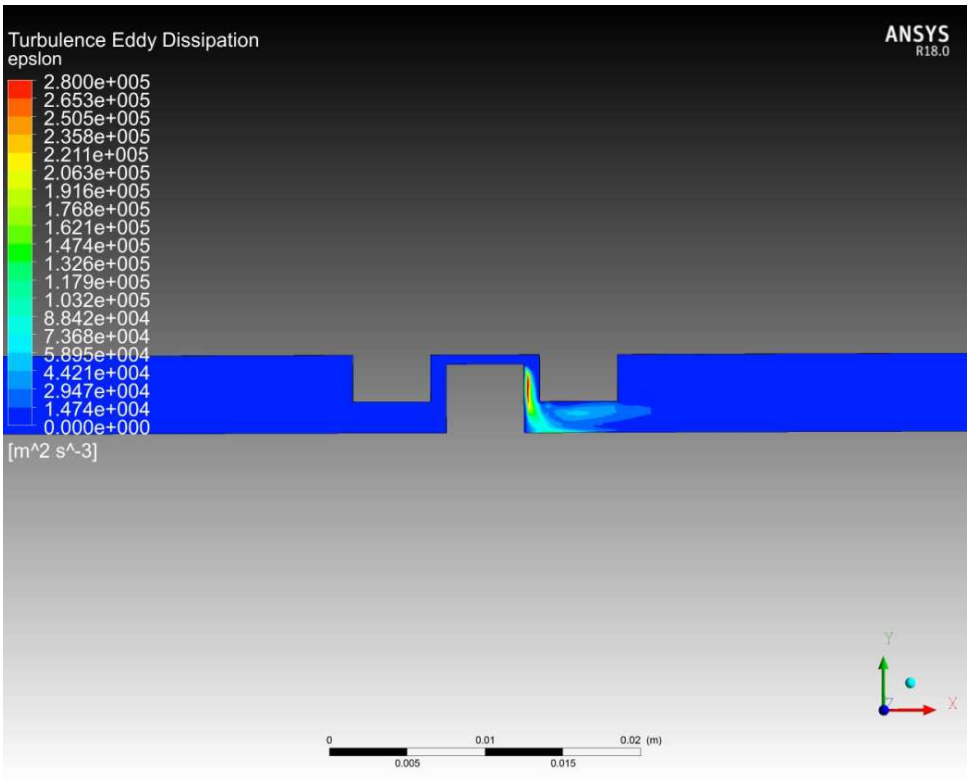


Figura B 31 - Simulação de dissipação da energia cinética turbulenta para Ponto de 26 cP e ΔP = 7,5 bar, com intervalo da legenda reduzido

Anexo C - Dados Brutos dos Pontos Experimentais

Geometria Gaveta

Réplica 1

								Valores medidos									Insitec				Malvern Mastersizer 2000		
	Configuração Banco Esperada							Qa	Qo	Qe	Qins	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	T mon	T jus	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	Transm	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)
Ponto	T °C	Tl (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kg/min	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)	(mm)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	(%)	(µm)	(µm)	(µm)
1E	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,22	4,00	4,03	0,93	3,16	-	-	63,6	-	48,01	95,45	15,25	81,8	49,08	95,4	18,27
1S	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	4,02	0,98	6,18	3,26	4,52	64,1	63,6	31,57	65,85	6,39	32,4	28,67	64,21	9,32
2E	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,03	0,97	3,11	-	-	64,2	-	47,11	93,55	12,74	29,5	45,49	94,03	18,34
2S	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	3,98	0,94	11,53	3,17	4,86	64,9	65,0	19,56	45,32	3,85	65,1	20,45	43,31	7,07
3E	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,417	3,78	4,07	0,99	2,11	-	-	64,7	-	58,52	103,47	11,92	11,8	61,56	116,52	26,87
3S	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,02	0,95	5,10	2,19	4,52	65,1	65,0	41,53	86,31	5,33	7,5	43,11	100,11	16,33
4E	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,07	0,96	2,06	-	-	64,7	-	60,76	113,90	12,38	13,5	58,84	112,64	24,85
4S	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,73	4,00	0,94	11,12	2,16	4,87	65,6	66,0	32,85	79,98	3,44	4,9	32,64	70,01	14,21
5E	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,95	4,03	0,99	2,58	-	-	45,9	-	42,53	121,41	8,06	8,0	51,23	125,6	14,91
5S	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	4,00	0,93	5,39	2,54	4,47	46,2	46,0	30,61	77,29	5,84	20,8	28,44	66,32	7,24
6E	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,22	3,97	4,03	0,99	2,58	-	-	46,2	-	42,21	119,66	8,09	8,2	50,72	123,21	14,53
6S	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	3,99	0,95	11,40	2,53	4,85	46,8	47,0	16,70	43,85	2,83	6,8	15,74	30,03	4,13
7E	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,08	0,96	2,44	-	-	45,9	-	55,93	132,42	10,94	6,4	57,96	135,06	15,78
7S	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,85	4,04	0,93	5,36	2,44	4,49	46,0	46,0	44,72	100,49	7,71	14,90	37,80	99,81	9,36
8E	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,07	0,96	2,57	-	-	45,60	-	58,48	134,00	12,51	10,02	55,86	118,64	15,67
8S	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,429	3,75	4,00	0,96	11,49	2,60	4,86	46,40	46,50	37,10	74,67	3,18	4,60	21,63	48,57	5,63
9E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,32	3,80	4,03	0,91	2,27	2,27	-	51,2	-	56,72	125,34	17,67	97,6	52,83	118,23	17,07
9S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,32	3,84	3,99	0,95	7,88	1,43	4,78	52,1	52,00	42,10	85,90	7,28	96,0	20,38	42,65	6,91
10E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,316	3,93	4,00	0,95	2,91	2,91	-	52,1	-	58,77	133,91	17,48	71,3	57,45	147,09	20,3
10S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,317	3,90	4,03	0,96	9,06	3,05	4,78	52,4	52,50	30,64	60,66	5,12	68,9	20,61	42,15	6,27
11E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,318	3,82	3,99	0,94	2,42	2,42	-	51,8	-	60,58	144,3	18,04	79,1	55,64	130,37	17,62
11S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,318	3,78	4,02	0,98	8,48	2,47	4,78	51,9	52,0	33,06	61,83	4,57	33,3	21,27	44,97	6,36
12E	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,219	4,05	4,00	0,94	3,13	3,13	-	64,6	-	42,59	99,92	11,06	61,6	49,8	100,52	16,9
12S	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,22	4,06	4,04	0,95	6,20	3,24	5,56	64,7	64,3	22,78	55,25	4,28	31,0	26,3	57,5	7,67
13E	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	4,02	0,94	2,44	2,44	-	64,5	-	44,14	106,16	13,17	58,8	52,75	123,68	17,5
13S	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	3,90	0,96	11,45	1,50	4,94	65,4	65,2	18,82	39,58	3,22	21,6	16,64	33,93	5,52
14E	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,418	3,74	4,07	0,96	2,88	2,88	-	64,7	-	55,92	98,08	16,49	26,8	66,43	124,94	28,84
14S	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,05	0,98	5,93	2,94	5,53	64,8	64,4	44,46	83,18	7,73	12,6	45,2	95,3	15,18
15E	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,82	4,04	0,93	2,57	2,57	-	64,4	-	60,77	117,93	18,77	80,2	56,69	104,18	26,37
15S	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,8	4,14	0,95	10,61	1,65	4,86	65,0	64,9	45,8	85,2	7,14	85,7	30,09	66,9	13,4
16E	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,01	4,00	0,93	2,67	2,67	-	47,0	-	46,43	130,67	10,95	85,8	48,46	120,14	12,63
16S	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,01	3,98	0,93	5,80	2,83	4,48	47,3	47,2	25,06	70,5	5,14	84,5	23,92	56,21	6,18
17E	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,02	3,98	0,96	2,86	2,86	-	46,1	-	49,19	138,4	11,01	50,8	54,87	144,51	14,42
17S	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,05	4,01	0,92	10,27	1,37	4,86	46,8	47,1	20,12	52,16	3,91	95,3	13,3	32,46	3,45
18E	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,419	3,79	3,98	0,94	2,41	-	-	45,3	-	52,21	137,14	10,34	13,8	46,99	114,14	11,23
18S	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,419	3,80	4,04	0,94	5,42	2,46	4,43	45,6	45,6	35,92	83,59	4,31	8,8	29,17	69,63	6,07
19E	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,419	3,76	3,98	0,93	2,40	-	-	45,6	-	55,2	142,00	13,01	25,1	50,76	122,48	13,02
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4	0,93	11,35	2,36	4,82	46,3	46,6	26,31	65,12	2,95	7,0	15,67	37,61	1,25

Réplica 2

	Configuração Banco							Valores medidos									Insitec				Malvern Mastersizer 2000		
								Qa	Qo	Qe	Qins	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	T mon	T jus	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	Transm	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)
Ponto	T °C	Tl (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kg/min	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)	(mm)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	(%)	(µm)	(µm)	(µm)
1E	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,05	4,04	0,95	2,16	-	-	64,5	-	50,60	109,87	16,68	87,8	50,67	113,89	17,37
1S	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,02	4,00	0,95	5,11	2,19	4,30	64,3	64,0	28,14	63,99	7,04	78,8	28,84	77,37	9,15
2E	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	4,03	0,96	2,17	-	-	64,3	-	51,28	109,67	16,06	69,1	51,09	124,56	18,10
2S	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	3,98	0,97	11,18	2,18	4,68	64,3	65,00	19,72	41,78	4,18	68,5	18,76	38,17	6,29
3E	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,415	3,75	4,04	0,97	2,15	-	-	64,2	-	63,36	112,68	17,04	59,2	61,72	220,97	22,86
3S	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,415	3,77	4,02	0,95	5,05	2,10	4,31	64,4	64,4	45,84	90,92	10,83	74,6	44,95	271,48	15,87
4E	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,418	3,74	4,05	0,95	2,16	-	-	63,9	-	62,25	110,45	19,74	74,9	56,67	121,14	22,86
4S	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,418	3,76	4,03	0,96	10,92	2,12	4,68	64,9	64,8	35,08	69,81	5,42	69,4	31,80	71,80	11,69
5E	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	4,06	0,94	1,81	-	-	45,1	-	58,86	148,34	16,75	82,5	55,93	133,04	15,36
5S	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,00	4,05	0,96	4,87	1,86	4,25	45,8	45,7	33,31	101,33	7,35	59,2	29,75	67,82	7,68
6E	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,02	4,04	0,98	1,92	-	-	45,8	-	54,64	142,40	13,96	46,4	63,85	161,11	15,98
6S	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,00	3,98	0,94	10,61	1,78	4,64	46,4	46,8	21,22	52,48	4,36	64,0	15,52	38,48	4,42
7E	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,00	0,97	2,27	-	-	46,0	-	61,93	133,22	16,94	66,2	59,69	155,29	15,63
7S	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	3,99	0,97	5,12	2,20	4,27	46,5	46,3	49,77	97,01	9,81	68,50	32,47	68,83	8,64
8E	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,76	4,02	0,98	2,79	-	-	45,50	-	60,45	133,55	15,80	43,20	59,08	140,42	15,43
8S	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,419	3,77	3,98	0,97	11,54	2,70	4,64	46,20	46,50	33,29	72,54	4,27	18,70	24,2	97,5	5,09
9E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,31	3,86	4,04	0,97	2,36	-	-	49,7	-	55,98	136,62	15,15	75,4	52,99	121,88	16,17
9S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,31	3,89	3,99	0,97	8,22	2,34	4,54	50,7	50,70	27,45	61,69	4,41	30,5	21,47	54,4	6,06
10E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,31	3,85	4,04	0,97	2,27	-	-	50,6	-	57,74	132,87	16,31	76,0	52,69	118,86	16,63
10S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,31	3,86	3,99	0,97	8,19	2,27	4,54	51,1	51,30	29,32	63,14	4,90	70,8	21,76	52,41	6,46
11E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,31	3,85	4,06	0,93	2,14	-	-	51,0	-	52,87	123,92	14,13	43,2	53,18	114,04	17,04
11S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,31	3,89	4,01	0,96	8,16	2,24	4,54	51,2	51,4	29,11	72,21	5,94	60,5	25,53	117,81	7,37
12E	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,01	4,02	0,97	2,64	-	-	64,3	-	51,67	115,54	15,3	63,9	49,38	102,03	16,65
12S	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,04	4,06	0,98	5,66	2,69	4,30	64,8	64,4	28,86	61,49	7,94	84,7	29,15	67,58	7,66
13E	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,02	4,02	0,98	2,61	-	-	64,7	-	51,19	117,86	14,04	41,2	52,17	107,23	18,37
13S	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,00	3,97	0,96	11,53	2,60	4,78	65,5	65,6	17,44	42,56	3,52	65,00	18,22	43,68	5,20
14E	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	3,98	0,99	2,54	-	-	65,0	-	70,51	123,07	20,34	28,90	59,65	110,74	28,84
14S	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,03	0,98	5,51	2,54	4,31	64,9	65,0	49,53	104,77	5,86	7,90	38,86	85,48	14,05
15E	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,01	0,94	2,43	-	-	64,9	-	72,78	126,80	20,73	32,60	65,06	128,86	26,12
15S	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,02	0,99	11,51	2,50	4,68	65,5	65,8	37,34	88,89	5,72	40,10	33,29	146,56	12,11
16E	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,01	4,03	0,94	2,62	-	-	45,4	-	50,59	130,48	12,56	86,90	45,33	120,56	10,57
16S	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	3,98	0,95	5,62	2,72	4,21	45,8	45,7	27,88	91,02	6,33	79,70	24,44	66,48	5,41
17E	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,00	4,03	0,97	2,65	-	-	45,9	-	49,02	138,55	11,25	66,00	50,58	125,22	12,70
17S	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	3,97	0,95	11,7	2,71	4,64	46,4	46,7	17,68	44,76	3,44	67,90	15,39	56,47	3,68
18E	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,04	0,99	2,69	-	-	45,9	-	55,41	138,07	11,33	53,50	52,77	134,18	11,37
18S	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	3,98	0,97	5,74	2,73	4,27	45,6	45,8	42,17	89,90	7,64	43,70	27,35	66,01	5,28
19E	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,05	0,96	2,63	-	-	45,4	-	53,41	127,93	12,75	51,30	50,05	118,85	11,67
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	3,98	0,96	11,61	2,68	4,61	46,0	46,3	32,26	93,12	4,39	20,10	20,8	106,99	4,00

Réplica 3

	Configuração Banco							Valores medidos									Insitec				Malvern Mastersizer 2000		
								Qa	Qo	Qe	Qins	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	T mon	T jus	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	Transm	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)
Ponto	T °C	Tl (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kg/min	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)	(mm)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	(%)	(µm)	(µm)	(µm)
1E	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	3,98	0,97	1,96	-	-	64,3	-	52,40	97,51	16,46	89,0	47,18	92,61	19,52
1S	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,06	4,03	0,96	5,10	2,08	4,25	65,0	65,4	31,70	69,17	7,57	73,4	30,87	61,25	11,43
2E	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,03	4,05	0,96	2,06	-	-	65,1	-	49,80	96,14	15,01	68,7	50,16	95,48	20,13
2S	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,03	4,04	0,97	11,03	2,03	4,65	65,6	65,90	21,92	50,11	3,81	48,1	21,08	48,66	7,7
3E	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	3,98	0,96	1,91	-	-	65,0	-	72,2	127,20	18,90	38,8	62,62	120,43	25,2
3S	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,04	0,96	5,10	2,05	4,24	65,1	65,6	54,20	94,16	12,40	79,4	40,83	112,3	17,47
4E	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,70	4,07	0,98	2,05	-	-	65,0	-	69,80	119,30	18,64	41,2	71,35	141,87	25,68
4S	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,420	3,74	4,00	0,97	11,07	2,06	4,65	65,5	66,0	42,98	80,75	7,27	67,1	30,70	53,93	13,95
5E	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,218	3,98	4,01	0,95	2,25	-	-	45,6	-	55,82	126,90	14,90	89,0	52,59	129,31	14,11
5S	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	3,98	0,96	5,30	2,32	4,18	45,7	47,2	33,62	82,05	8,15	84,2	29,14	67,22	7,84
6E	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,218	3,97	4,00	0,97	2,29	-	-	45,6	-	56,70	133,10	14,95	82,3	52,42	119,34	14,79
6S	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,218	4,00	4,00	0,96	11,19	2,28	4,61	46,7	47,5	22,02	62,33	4,20	83,3	16,12	44,36	4,62
7E	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,419	3,80	4,01	0,96	2,21	-	-	45,8	-	60,40	113,40	15,91	82,8	45,93	101,14	13,42
7S	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,00	0,96	5,27	2,24	4,18	45,0	47,4	44,36	87,73	9,02	78,20	36,19	111,17	10,53
8E	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	4,01	0,97	2,24	-	-	45,0	-	58,60	110,60	14,64	65,50	44,08	93,68	14,36
8S	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,420	3,79	3,97	0,97	11,22	2,24	4,62	45,40	46,60	43,28	84,54	6,03	71,70	24,29	50,02	7,13
9E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,314	3,92	4,02	0,96	2,43	-	-	51,0	-	63,34	130,04	16,62	71,6	51,75	117,02	15,89
9S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,314	3,91	4,02	0,95	8,58	2,56	4,52	51,7	51,90	30,50	66,19	5,16	59,4	19,98	46,62	6,26
10E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,315	3,90	3,99	0,99	2,54	-	-	51,3	-	54,93	121,54	13,63	31,9	57,63	143,61	16,43
10S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,315	3,86	4,03	0,95	8,52	2,53	4,52	52,0	52,40	31,06	67,51	5,64	59,8	21,69	48,02	6,03
11E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,315	3,9	3,99	0,98	2,52	-	-	51,6	-	50,84	121,01	14,44	63,9	60,41	140,51	17,01
11S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,315	3,86	4,03	0,96	8,53	2,52	4,52	51,7	52,2	31,43	80,48	3,7	60,6	22,12	56,19	7,03
12E	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,209	3,99	4,04	0,97	3,62	-	-	63,3	-	50,3	121,17	13,55	63,4	51,16	114,05	17,31
12S	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,02	3,98	0,97	6,45	3,,58	4,28	64,6	66,2	23,16	57,27	5,14	64,3	25,03	54,61	7,99
13E	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,216	4,02	4,08	0,96	3,44	-	-	64,7	-	51,38	120,75	14,87	75,6	48,19	106,43	16,69
13S	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,04	3,98	0,97	11,72	2,73	4,66	65,4	65,7	14,52	31,64	3,22	69,6	17,21	40,56	5,98
14E	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,41	3,74	4,01	0,96	2,42	-	-	64,7	-	69,57	125,35	20,13	87,4	57,40	108,35	24,97
14S	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,74	3,97	0,97	5,46	2,46	4,26	64,1	65,5	45,04	82,97	9,73	73,9	40,89	89,92	14,45
15E	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,418	3,74	4,01	0,96	2,43	-	-	64,3	-	65,54	116,4	20,8	77,7	54,53	104,61	23,24
15S	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,418	3,76	3,99	0,97	11,40	2,44	4,65	64,5	64,9	37,86	74,58	4,84	78,7	34,36	102,56	11,70
16E	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,04	4,05	0,95	2,63	-	-	45,5	-	51,95	147,78	12,05	88,8	53,47	134,58	13,85
16S	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,02	4,00	0,97	5,68	2,72	4,17	46,0	48,3	26,32	65,92	4,73	72,1	27,33	67,94	6,93
17E	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,218	4,01	4,04	0,97	2,70	-	-	45,4	-	49,45	143,39	10,71	68,2	53,62	147,24	15,22
17S	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,218	4,02	4,03	0,97	11,60	2,70	4,60	45,9	47,0	18,32	37,9	3,2	73,1	14,00	33,63	4,21
18E	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,05	0,97	2,67	-	-	45,0	-	61,66	144,79	41,29	68,9	62,86	156,74	14,15
18S	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,01	0,97	5,72	2,69	4,18	45,1	46,4	41,55	88,24	7,43	72,9	39,40	121,44	8,60
19E	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,06	0,97	2,67	-	-	45,1	-	61,03	143,27	14,71	68,9	63,66	152,72	14,28
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,00	0,97	11,71	2,68	4,62	45,6	46,6	35,77	68,79	3,75	76,6	24,59	150,78	5,47

Pontos refeitos – Geometria Gaveta

Configuração Bancada								Qa	Qo	Qe	Qins	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	T mon	T jus	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	Transm	Técnica de medida
Ponto	T °C	Tl (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kg/min	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)	(mm)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	(%)	
7E	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	3,91	-	0,69	-	-	45,5	-	50,41	105,77	17,24	-	Malvern
7E	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,00	-	0,75	-	-	46,0	-	54,20	127,06	16,82	-	Malvern
7E	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	4,01	-	0,75	-	-	45,7	-	52,52	114,13	18,10	-	Malvern
7S	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,08	-	3,58	0,62	4,23	46,0	47,0	37,96	80,52	9,4	-	Malvern
7S	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	4,07		3,57	0,63	4,23	45,8	47,0	34,70	70,02	8,28	-	Malvern
7S	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	4,07		3,56	0,63	4,23	45,9	47,4	37,07	78,02	10,51	-	Malvern
8E	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	4,02	0,99	2,27	-	-	45,9	-	65,51	137,22	21,10	34,80	Insitec
8S	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,80	4,05		9,58	0,61	4,64	46,40	48,10	24,66	48,74	2,65	-	Malvern
8S	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,02	0,96	11,06	2,22	4,64	46,70	48,40	38,40	72,10	8,75	43,50	Insitec
3E	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,04	-	0,43	-	-	62,8	-	61,56	125,02	25,66	-	Malvern
3S	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,74	4,02	-	3,32	0,37	4,30	63,2	64,2	42,16	88,95	16,28	-	Malvern
4E	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,72	4,03	-	0,42	-	-	63,3	56,1	57,57	104,67	27,4	-	Malvern
14E	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,8	4,02	0,98	2,14	-	-	63,7	-	73,57	129,64	23,43	30,3	Insitec
14S	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,81	4,05	0,98	5,17	2,10	4,34	63,7	66,2	65,79	131,85	12,9	28	Insitec
15E	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,81	3,95	0,97	2,12	-	-	63,8	-	61,04	106,75	32,28	36	Malvern
15E	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,81	3,95	0,97	2,12	-	-	63,8	-	83,61	155,61	24,76	36	Insitec
15S	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,02	-	9,35	0,38	4,68	64,3	65,9	28,55	61,02	10,86	-	Malvern
15S	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,01	-	9,35	0,37	4,68	64,2	65,8	28,11	60,37	10,87	-	Malvern
15S	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,81	4,05	-	9,25	0,32	4,66	63,5	64,7	30,73	83,62	11,69	-	Malvern
16S	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	4,00	0,96	5,09	2,17	4,24	44,6	45,8	36,8	85,73	8,43	66,1	Insitec
16S	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,22	3,92	3,98	0,98	5,16	2,23	4,27	45,9	47,6	34,19	84,08	7,91	36,2	Insitec
19E	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,81	4,04	0,98	2,20	-	-	45,9	-	66,71	143,93	19,46	29,6	Insitec
19E	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,82	4,01	-	0,70	-	-	45,9	-	50,23	118,87	16,98	-	Malvern
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,82	4	-	9,65	0,62	4,64	45,9	47,5	17,84	37,23	3,66	-	Malvern
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,8	3,98	0,98	11,19	2,22	4,64	46,1	48	36,23	72,57	5,2	19,1	Insitec
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,41	3,84	3,99	-	9,49	0,61	4,64	45,9	47	17,6	36,77	3,92	-	Malvern
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,41	3,84	3,99	-	9,49	0,61	4,64	45,9	47	17,89	37,32	3,86	-	Malvern
18E	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,05	0,97	2,18		-	43,7	-	77,32	159,00	21,32	47,6	Insitec
18S	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	4	0,98	5,25	2,23	4,28	45,8	48,6	53,5	102,63	11,64	24	Insitec
18S	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,05		3,71	0,64	4,28	45,8	4,84	34,57	78,44	7,37	-	Malvern

Pontos complementares Geometria Gaveta

Pontos analisados apenas no Malvern Mastersizer 2000

	Configuração Banco							Qa	Qo	Qe	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	dP valv ag	T mon	T jus	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	
Ponto	T °C	Tl (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kgf/cm²	Kgf/cm²	(mm)	(kgf/cm²)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	
1E	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4	0,68	-	-	4,2	44,1	-	48,62	98,87	16,84	Geometria Gaveta
1S	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	4,06	5,1	0,60	4,4	4,2	45,2	48,0	21,16	43,73	6,68	
2E	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	3,99	0,66	-	-	4,2	45,2	-	50,36	110,92	16,73	
2 S	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,02	8,08	0,58	4,6	4,2	45,8	49,20	17,79	37,08	5,14	
3E	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	3,99	0,65	-	-	4,21	45,4	-	49,99	108,90	16,82	
3S	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	4,01	4,06	5,86	0,58	4,4	4,20	45,6	48,8	21,38	46,61	3,43	
4E	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	3,99	0,65	-	-	4,20	45,5	-	52,49	115,73	17,61	
4S	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,01	8,08	0,58	4,6	4,21	45,5	49,0	17,16	35,76	4,98	
5E	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	3,99	0,65	-	-	4,20	45,4	-	53,22	116,81	16,86	
5S	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,06	5,09	0,6	4,4	4,22	45,5	49,0	23,12	51,34	5,85	
6E	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	3,99	0,65	-	-	4,21	45,4	-	54,77	127,01	16,91	
6S	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,02	8,08	0,6	4,6	4,19	45,8	48,8	16,68	35,84	3,68	

Pontos experimentais da Geometria Globo

Réplica 1

	Configuração Banco							Qa	Qo	Qe	Qins	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	T mon	T jus	Medidas Insitec				Medidas Malvern mastersizer 2000		
																	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	Transm	D (0,5) lab	D (0,9) lab	D (0,1) lab
Ponto	T °C	Tl (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kg/min	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)	(mm)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	(%)	(µm)	(µm)	(µm)
1E	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	3,97	0,95	2,1	-	-	62,9	-	53,23	109,5	15,28	81,7	47,65	97,28	18,05
1S	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,02	4,03	0,95	5,22	2,16	2,15	64,6	64,8	32,34	71,26	9,01	71,41	30,6	73,44	10,63
2E	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,05	0,95	2,14	-	-	64,50	-	52,3	106,5	17,1	75,6	48,61	97,1	20,97
2S	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,01	3,97	0,96	11,1	2,18	4,57	65,1	65,6	19,4	45	3,75	43,6	20,11	111,49	7,36
3E	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	3,96	0,96	2,15	-	-	64,3	-	66,2	117,1	19,2	61,6	54,34	99,18	27,03
3S	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,73	3,98	0,96	5,07	2,17	2,07	64,1	64,5	49,2	94,5	11,8	48,7	44,28	114,03	18,65
4E	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,85	3,95	0,96	2,15	-	-	64,6	-	65,3	115,9	17,2	32,7	57,32	105,11	27,66
4S	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,9	3,99	0,96	11,09	2,2	4,57	65,1	65,7	36,8	78,4	4,67	15,5	28,07	48,81	11,52
5E	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	4,05	0,95	2,06	-	-	44,9	-	61,63	158,4	17,62	88,9	52,88	122,79	15,6
5S	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,219	3,99	4,02	0,96	5,23	2,24	2,07	45,7	46,6	32,4	78	8,19	76,5	25,87	54,84	7,94
6E	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	4,01	0,97	2,22	-	-	45,6	-	55,4	149,5	15,34	70,3	52,11	117,22	15,9
6S	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	3,97	0,96	11,22	2,22	4,5	46,4	47,5	21,1	44,4	3,99	67,9	14,01	33,89	4,85
7E	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,03	0,95	2,12	-	-	45,7	-	53,78	122,2	10,9	12,0	50,45	111,15	14,78
7S	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	4,03	1	5,16	2,16	2,15	45,6	46,3	48,4	88,54	5,87	13,4	33,89	60,21	10,38
8E	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,03	1,01	2,14	-	-	45,5	44,4	56,4	127,7	11,49	15,2	52,13	116,89	15,67
8S	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4	0,98	11,62	2,66	4,48	45,1	45,7	37,5	59,8	5,94	74,2	19,7	40,05	3,15
9E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,315	3,89	4,05	0,99	2,38	-	-	50,5	-	52,38	117,05	14,43	37,6	55,54	127,6	16,12
9S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,31	3,89	3,97	0,95	8,3	2,37	4,22	51,1	51,7	25,74	60,24	6,67	85,7	18,56	38,98	5,4
10E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,318	3,89	4,06	0,98	2,36	-	-	50,6	-	51,98	121,5	14,33	42,8	51,48	107,91	18,63
10S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,32	3,87	3,98	0,99	8,25	2,39	4,21	5,1	52,1	27,34	57,41	3,92	24,8	22,95	69,67	6,9
11E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,317	3,88	3,95	0,96	2,31	-	-	50,9	-	50,87	127,86	14,66	59,8	54,97	123,86	18,22
11S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,318	3,89	4,01	0,96	8,19	2,29	4,21	51,1	52,4	27,34	55,8	5,09	52,9	29,66	141,63	9,14
12E	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,94	4,03	0,94	2,31	-	-	64,0	-	54,56	123,27	14,70	87,3	58,07	124,08	19,09
12S	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	3,97	0,97	5,48	2,49	2,35	64,5	64,7	26,81	69,02	5,36	57,6	24,31	49,43	7,16
13E	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	4,0	0,95	2,42	-	-	64,5	-	50,30	123,85	14,75	88,2	53,53	109,28	19,17
13S	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,22	3,97	3,98	0,96	11,37	2,35	4,59	64,6	65,8	19,43	43,20	3,49	59,6	15,99	32,43	3,63
14E	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,72	4,05	0,96	2,38	-	-	63,8	-	71,91	130,91	23,37	66,5	66,22	127,54	24,15
14S	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,80	4,04	0,97	5,38	2,40	2,27	64	64,7	49,41	98,29	10,13	45,01	42,02	97,52	14,76
15E	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,81	4,04	0,97	2,35	-	-	64	-	70,60	121,84	20,58	41,0	68,59	138,07	28,37
15S	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,80	3,98	0,98	11,26	2,35	4,58	64,4	65,5	35,20	78,57	4,07	28,2	33,69	128,66	12,06
16E	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	4,04	0,96	2,73	-	-	44,8	-	51,36	142,58	11,52	82,7	50,17	120,12	13,04
16S	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	4,01	0,97	5,71	2,75	2,33	45,4	45,8	31,22	93,9	4,24	68,3	19,47	48,72	2,25
17E	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,95	4,05	0,96	2,6	-	-	45,2	-	48,89	135,51	11	61,9	48,90	117,54	12,78
17S	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	4,04	0,98	11,61	2,59	4,49	45,9	47	18,43	43,26	2,93	46,5	10,50	25,21	2,79
18E	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,8	3,98	0,98	2,54	-	-	44,8	-	51,83	117,9	11,28	33,6	45,35	102,49	12,09
18S	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,81	3,99	0,97	5,45	2,52	2,34	45,2	46,4	41,79	86,76	7,37	47,9	24,75	56,06	5,92
19E	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	3,99	0,97	2,45	-	-	45	-	54,66	120,24	13,8	53,2	45,43	107,48	12,39
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,8	3,97	0,97	11,38	2,44	4,51	45,7	46,9	34,46	73,11	4,96	5,01	15,8	38,46	2,98

Réplica: 2

	Configuração Banco							Qa	Qo	Qe	Qins	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	T mon	T jus	Medidas Insitec				Medidas Malvern mastersizer 2000		
Ponto	T °C	Tl (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kg/min	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)	(mm)	(°C)	(°C)	D (0,5) (µm)	D (0,9) (µm)	D (0,1) (µm)	Transm (%)	D (0,5) lab (µm)	D (0,9) lab (µm)	D (0,1) lab (µm)
1E	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,05	0,96	2,35	*	*	63,0	*	50,6	99,4	15,31	53	45,55	88,33	16,79
1S	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	4,05	0,97	5,30	2,28	2,29	63,7	63,8	28,62	59,35	4,99	22,7	24,54	48,28	8,23
2E	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,05	0,97	2,21	*	*	63,8	*	49,30	97,78	13,65	37,3	50,07	102,59	17,76
2S	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	3,97	0,96	11,04	2,22	4,58	64,3	65,2	17,55	39,26	3,17	16,2	16,38	31,67	5,39
3E	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	3,95	0,96	2,17	*	*	64,1	*	65,31	121,34	15,09	24,2	53,68	100,87	22,13
3S	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,06	0,97	5,19	2,15	2,30	64,2	64,9	48,89	92,63	8,04	16,8	35,55	82,20	15,1
4E	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,04	0,98	2,14	*	*	64,1	*	67,52	131,59	16,01	22,1	58,63	112,11	23,76
4S	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,74	4,02	0,97	11,12	2,15	4,58	64,8	65,8	37,6	80,55	3,73	7,10	29,96	115,13	12,33
5E	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,94	3,98	0,96	2,45	-	-	45,4	-	59,13	154,8	14,43	48,2	51,77	118,94	15,01
5S	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	4	0,96	5,39	2,44	2,32	45,6	46,5	31,31	82,81	6,01	35,8	24,51	53,13	7,31
6E	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	3,96	0,97	2,44	-	-	45,4	-	58,07	151,03	15,10	40,7	50,56	112,02	15,14
6S	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	4,0	0,97	11,39	2,43	4,5	46	46,9	18,62	46,96	3,42	18,8	14,01	34,67	4,31
7E	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,01	0,96	2,38	-	-	45,2	-	68,37	154,44	19,84	41,5	52,84	116,26	16,12
7S	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,02	0,97	5,4	2,43	2,31	45,5	46,2	47,91	98,28	7,73	16,0	33,07	69,06	10,10
8E	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,01	0,96	2,4	-	-	45,3	-	67,01	149,35	18,05	29,2	57,41	129,51	17,53
8S	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4	0,96	11,45	2,46	4,51	45,8	46,7	34,15	69,47	4,35	15,6	23,7	84,32	7,55
9E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,32	3,82	4,04	0,95	1,91	*	*	49,8	*	61,6	141,2	18,4	55,0	52,13	115,42	16,49
9S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,32	3,83	4,01	0,96	7,91	1,95	4,23	51,1	51,8	27,7	63,0	4,63	24,0	19,26	37,33	7,2
10E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,32	3,82	4,01	0,96	1,96	*	*	50,9	*	56,1	134,2	12,8	20,3	50,64	106,97	16,59
10S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,32	3,82	4	0,96	7,9	1,95	4,23	51,3	52,2	28,7	59,7	4,38	18,6	18,98	39,41	6,52
11E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,32	3,90	4,02	0,96	1,91	*	*	51,1	*	58,4	140,0	14,2	26,1	52,40	111,96	17,46
11S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,32	3,86	4,01	0,96	7,89	1,92	4,23	51,5	52,5	25,1	56,3	3,84	12,8	19,99	47,29	6,86
12E	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	4,06	0,96	2,17	*	*	63,2	*	54,7	125,00	4,82	52,5	50,79	105,48	17,94
12S	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	4,05	0,96	5,29	2,25	2,32	64,0	64,9	27,2	68,2	5,75	49	23,13	47,84	8,23
13E	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	4,05	0,98	2,21	*	*	64,0	*	52,10	117,50	13,4	34	48,06	96,86	16,46
13S	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,22	3,95	3,99	0,96	11,19	2,24	4,58	64,6	65,5	15,6	44,60	3,15	30,7	14,54	86,12	6,33
14E	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	3,97	0,97	2,18	*	*	63,8	*	68,2	119,10	18,5	22,2	54,44	98,96	24,44
14S	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,00	0,97	5,08	2,14	2,26	64,2	64,9	53,8	105,1	7,6	12,7	35,21	73,32	15,11
15E	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,73	3,95	0,96	2,12	*	*	64	*-	79,10	147,10	19,7	19,4	56,70	105,30	25,06
15S	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,06	0,95	11,08	2,06	4,58	64,6	65,6	42,30	97,6	4,3	13,2	31,92	133,36	12,95
16E	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	3,97	0,96	1,84	-	-	46,1	-	49,29	140,19	9,9	27,5	48,99	123,64	11,98
16S	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,22	3,97	3,98	0,96	4,85	1,89	2,36	47,1	47,9	26,03	65	4,25	23,4	21,39	56,22	5,22
17E	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,22	3,96	3,96	0,96	1,88	-	-	46,8	-	50,12	140,31	10,8	34,5	47,50	112,72	11,88
17S	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,22	3,96	4,01	0,97	11,04	1,9	4,51	46,2	47,3	12,03	32,74	2,46	5,8	8,56	29,55	0,39
18E	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,8	3,98	0,96	1,85	-	-	45,6	-	58,81	142,83	12,02	18,4	49,86	119,33	12,31
18S	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,76	4,02	0,96	4,85	1,86	2,32	45,8	46,8	42,15	103,37	5,19	12,0	27,68	77,81	6,84
19E	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	3,99	0,97	1,84	-	-	45,8	-	59,8	139,45	13,08	19,4	49,54	116,71	12,63
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,79	4,01	0,96	10,81	1,83	4,51	46,1	47,2	31	71,89	3,62	9,2	18,37	56,67	4,35

Réplica: 3

	Configuração Banco							Qa	Qo	Qe	Qins	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	T mon	T jus	Medidas Insitec				Medidas Malvern mastersizer 2000		
																	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	Transm	D (0,5) lab	D (0,9) lab	D (0,1) lab
Ponto	T°C	TI (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O(%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kg/min	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)	(mm)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	(%)	(µm)	(µm)	(µm)
1E	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,03	4,00	0,96	2,58	*	*	63,7	*	49,6	104,0	14,19	49,9	48,41	94,32	19,0
1S	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,05	4,00	0,97	5,57	2,61	2,27	63,9	64,6	29,8	62,1	5,69	20,2	26,23	50,98	9,34
2E	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,03	3,98	0,96	2,62	*	*	64,2	*	49,1	102,5	14,8	46,6	46,90	92,84	17,61
2S	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,05	3,98	0,97	11,62	2,63	4,59	64,5	65,8	18,3	41,46	3,34	19,1	17,64	41,53	5,81
3E	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,01	0,96	2,61	*	*	64,3	*	59,86	106,3	17,51	42,5	50,28	89,45	22,24
3S	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,79	4,03	0,96	5,58	2,63	2,27	63,3	63,7	39,4	75,6	7,51	15,9	36,05	109,72	16,44
4E	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,02	0,96	2,58	*	*	64,6	*	59,5	104,7	15,2	25,4	56,76	125,78	24,81
4S	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,07	0,96	11,53	2,52	4,58	64,1	65,0	40,6	84,4	9,08	59,00	35,15	188,32	14,91
5E	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,01	4,03	0,97	3,02	*	*	44,8	*	52,6	139,7	13,03	62,0	44,65	106,15	12,91
5S	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,22	4,03	4,00	0,96	6,38	3,41	2,23	46,0	47,2	24,8	56,8	5,46	47,6	23,09	51,45	6,46
6E	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,22	4,05	3,95	0,97	3,38	*	*	45,8	*	47,8	134,8	12,3	52,4	51,15	119,79	14,53
6S	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,96	4,01	0,96	12,19	3,28	4,52	46,6	47,6	17,7	37,9	3,23	53,5	12,34	25,80	3,41
7E	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,83	3,98	0,96	3,22	*	*	45,9	*	52,5	132,0	13,82	34,4	48,67	110,54	14,50
7S	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,83	4,03	0,97	6,26	3,25	2,19	46,1	47,0	40,2	86,7	7,69	24,2	27,71	56,84	7,95
8E	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,81	3,98	0,96	3,24	*	*	45,8	*	51,4	124,1	13,4	32,2	47,63	108,41	13,28
8S	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,83	4,00	0,97	11,4	2,4	4,53	46,5	47,7	33,1	65,7	4,28	19,7	19,58	41,34	6,21
9E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,316	3,85	3,98	0,98	2,29	*	*	50,4	-	56,75	129,8	14,87	32,3	46,75	102,49	14,07
9S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,315	3,84	4,02	0,96	8,29	2,26	4,22	51,1	51,7	24,13	52,7	3,87	20,2	17,63	36,24	5,07
10E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,317	3,85	3,97	0,97	2,24	*	*	50,9	-	56,28	129,54	14,61	31,8	49,35	107,51	15,22
10S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,315	3,86	4,02	0,96	8,27	2,24	4,23	51,2	52	23,34	51,65	3,41	11	19,29	45,57	6,13
11E	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,314	3,84	3,98	0,97	2,21	-	-	50,6	-	56,4	131,9	14,78	34,6	48,31	106,17	14,47
11S	51	20	6	0,315	3,885	4	7,5	0,316	3,85	4,04	0,97	8,21	2,22	4,21	51,1	52,0	24,66	53,33	3,58	12,2	17,99	36,85	5,76
12E	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,05	4,02	0,96	1,17	-	-	64,8	-	62	138,00	17,19	49	49,11	100,16	17,49
12S	65	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,05	4	0,96	4,19	1,21	2,29	65,3	65,8	28,63	70,34	5,16	29,5	23,00	48,23	8,35
13E	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,04	4,00	0,97	1,18	-	-	65,3	-	59,90	123,08	17,52	54,7	53,04	109,50	18,58
13S	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	4,04	4,02	0,97	10,15	1,17	4,59	65,8	64,5	17,64	41,07	3,2	27,9	15,15	29,46	4,39
14E	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,78	3,97	0,96	2,83	-	-	65	-	72,43	136,18	19,69	30,7	64,72	126,03	22,74
14S	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	3,96	0,96	6,34	3,38	2,34	64,8	65,3	51,22	101,75	8,68	14,8	34,35	67,41	12,04
15E	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,82	3,96	0,96	3,97	-	-	65,2	-	67,62	124,70	20,52	36,2	58,90	109,13	25,57
15S	65	15	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,85	3,97	0,97	12,24	3,44	-	65,5	66,8	40,39	94,53	4,25	10,1	34,35	112,27	12,47
16E	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,06	4,02	0,96	2,21	-	-	47,3	-	50,78	142,22	11,13	41,3	46,49	111,36	11,85
16S	45	15	3	0,21	3,99	4	5	0,21	4,04	4,04	0,96	5,2	2,19	2,25	46,8	48,4	24,89	64,38	4,41	31,1	20,01	47,51	5,33
17E	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,22	4,03	4,02	0,96	2,15	-	-	47,5	-	52,79	142,39	12,39	43,6	45,92	113,18	11,61
17S	45	15	9	0,21	3,99	4	5	0,22	4,02	4,02	0,96	11,17	2,14	4,52	46,3	48,3	15,73	36,16	3,09	25,7	11,24	28,69	3,15
18E	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,75	3,95	0,96	2,1	-	-	46	-	59,98	141,54	14,57	28,1	46,92	109,15	11,97
18S	45	15	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,73	3,99	0,97	5,12	2,13	2,3	45,9	47	39,06	86,45	4,14	6,4	26,87	67,19	6,92
19E	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,76	4,06	0,96	2,09	-	-	45,8	-	61,89	144,19	15,95	34,5	52,47	128,22	13,1
19S	45	15	9	0,42	3,78	4	10	0,43	3,74	3,97	0,97	11,07	2,11	4,54	46,1	47,4	29,74	67,62	2,33	5,8	18,08	46,41	4,58

Pontos refeitos da Geometria Globo

	Configuração Banco								Qa	Qo	Qe	Qins	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	dP valv	T mon	T jus	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	Transm	
Ponto	Giclê	T °C	Tl (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kgf/cm²	(Kgf/cm²)	(mm)	(kgf/cm²)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	(%)	Técnica de medição
1S	0,5	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,08	0,97	5,53	2,39	3,05	3,5	64,9	66,0	24,26	46,65	8,30	-	Malvern
1S	0,5	65	25	3	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,08	0,97	5,53	2,39	3,05	3,5	64,9	66,0	32,34	63,04	8,96	68,6	Insitec
2S	0,5	65	25	9	0,21	3,99	4	5	0,22	3,95	4,03	-	9,3	0,35	4,59	3,5	65,1	66,60	18,3	35,86	3,18	-	Malvern
3E	0,6	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,1	-	0,47	-	-	11,0	64,0	-	81,1	154,1	34,89	-	Malvern
3S	0,6	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,78	4,02	-	4,31	0,39	3,74	11,0	64,8	-	33,94	63,62	13,66	-	Malvern
3S	0,6	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,01	0,96	5,41	2,39	3,00	11,1	64,7	66,2	38,50	77,46	14,5	-	Malvern
3S	0,6	65	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,75	4,01	0,96	5,41	2,39	3,00	11,1	64,7	66,2	51,99	99,96	11,12	36,5	Insitec
4S	0,6	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,02	-	9,35	0,38	4,60	11,3	65	66,7	30,82	57,89	11,31	-	Malvern
4S	0,6	65	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,78	4,01		9,37	0,38	4,58	11,3	63,1	66,7	30,67	57,7	11,81	-	Malvern
5S	0,5	45	25	3	0,21	3,99	4	5	0,2	3,93	4,01	0,96	5,3	2,3	3,76	4,22	45,5	47,2	27,2	60,3	7,26	63,4	Insitec
6E	0,5	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	4,03	0,96	2,39	-	-	4,22	45,3	-	41,44	92,16	11,7	58,1	Insitec
6S	0,5	45	25	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,97	4,08	0,96	11,6	2,97	4,55	4,2	45,7	47,6	18,7	36,62	4,69	88,9	Insitec
7E	0,6	45	25	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,77	4,04	0,98	2,33	-	-	6,21	45,7	-	54,39	113,7	15,5	36,6	Insitec
8S	0,6	45	25	9	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,05	-	9,61	0,64	4,52	6,3	46,7	48,3	23,04	47,04	1,38	-	Malvern
9E	0,6	51	20	6	0,32	3,885	4	8	0,32	3,93	4,06	0,99	2,63	-	-	4,25	50,8	-	52,65	119,64	14,38	25,0	Insitec
11S	0,6	51	20	6	0,32	3,885	4	8	0,32	3,90	4,00	-	6,52	0,53	4,30	4,25	51,4	52,3	17,47	35,16	3,98	-	Malvern
13S	0,5	65	15	9	0,21	3,99	4	5	0,21	3,95	4,03	-	9,37	0,38	4,55	2,25	63,2	64	14,14	28,01	2,16	-	Malvern
14S	0,6	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,43	3,80	4,01	-	0,42	2,99	5,33	38,0	65	-	36,16	71,10	11,51	-	Malvern
14S	0,6	65	15	3	0,42	3,78	4	10	0,42	3,76	4,00	-	3,41	0,42	3	5,33	63,7	63,1	34,26	64,97	13,64	-	Malvern

	Configuração Banco								Qa	Qo	Qe	Qins	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	dP valv	T mon	T jus	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	Transm	
Ponto	Giclê	T °C	TI (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kg/min	Kgf/cm²	(Kgf/cm²)	(mm)	(kgf/cm²)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	(%)	Técnica de medição
15S	0,6	65	15	9	0,42	3,78	4	10	**0,42**	**3,80**	**4,03**	**-**	**9,46**	**0,41**	**4,6**	**5,4**	**64,1**	**65,9**	**34,29**	**71,05**	**7,59**	**-**	**Malvern**
15S	0,6	65	15	9	0,42	3,78	4	10	**0,42**	**3,77**	**4,03**	**-**	**9,43**	**0,4**	**4,6**	**5,4**	**64,1**	**66,4**	**26,80**	**52,62**	**7,98**	**-**	**Malvern**
15S	0,6	65	15	3	0,42	3,78	4	10	**0,42**	**3,75**	**4,03**	**-**	**9,42**	**0,4**	**4,6**	**5,4**	**64**	**66,2**	**31,77**	**65,31**	**7,87**	**-**	**Malvern**
16S	0,5	45	15	3	0,21	3,99	4	5	**0,22**	**3,97**	**4,01**	**0,98**	**5,17**	**2,14**	**3,95**	**3,9**	**46**	**47,5**	**26,14**	**64,15**	**5,38**	**22,9**	**Insitec**
17S	0,5	45	15	9	0,21	3,99	4	5	**0,22**	**3,99**	**4**	**0,97**	**11,28**	**2,2**	**4,6**	**3,95**	**46,1**	**47,9**	**16,11**	**34,45**	**3,35**	**19,3**	**Insitec**
17S	0,5	45	15	9	0,21	3,99	4	5	**0,21**	**3,98**	**4,07**	**-**	**9,56**	**0,64**	**4,55**	**3,95**	**45,7**	**47,3**	**11,29**	**24,83**	**2,19**	**-**	**Malvern**
18S	0,6	45	15	3	0,42	3,78	4	10	**0,42**	**3,79**	**4,05**	**-**	**3,67**	**0,67**	**2,48**	**5,4**	**46,6**	**48,1**	**25,5**	**57,84**	**0,91**	**-**	**Malvern**
18S	0,6	45	15	3	0,42	3,78	4	10	**0,42**	**3,8**	**4,03**	**0,97**	**5,15**	**2,,2**	**2,84**	**5,4**	**45,8**	**47,5**	**29,26**	**63,57**	**6,24**		**Malvern**
18S	0,6	45	15	3	0,42	3,78	4	10	**0,42**	**3,8**	**4,03**	**0,97**	**5,15**	**2,,2**	**2,84**	**5,4**	**45,8**	**47,5**	**42,51**	**84,1**	**7,79**	**18,6**	**Insitec**
19S	0,6	45	15	9	0,42	3,78	4	10	**0,42**	**3,77**	**4,02**	**-**	**9,59**	**0,66**	**4,55**	**5,4**	**45,8**	**47,4**	**15,04**	**31,34**	**3,57**	**-**	**Malvern**
19S	0,6	45	15	9	0,42	3,78	4	10	**0,42**	**3,8**	**4**	**-**	**9,6**	**0,64**	**4,55**	**5,4**	**45,9**	**47,8**	**16,59**	**35,09**	**3,98**	**-**	**Malvern**

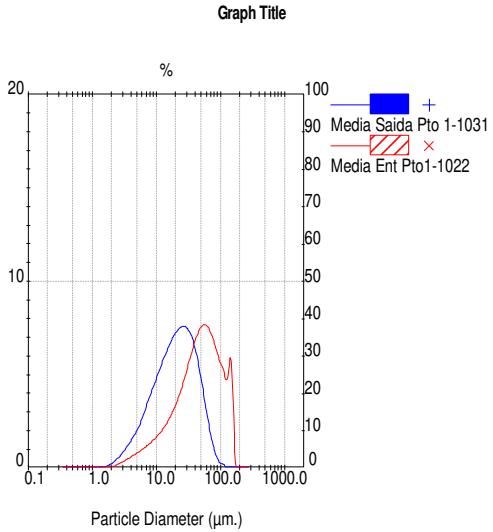
Pontos complementares Geometria Globo

Análise apenas no Malvern Mastersizer 2000

	Configuração Banco							Qa	Qo	Qe	Pmon	P Jus	Pos. relóg.	dP valv ag	T mon	T jus	D (0,5)	D (0,9)	D (0,1)	
Ponto	T °C	Tl (mN/m)	dP Sing (bar)	Qa	Qo	Qe	H_2O (%)	Kg/min	Kg/min	Kg/min	(Kgf/cm²)	(Kgf/cm²)	(mm)	(kgf/cm²)	(°C)	(°C)	(µm)	(µm)	(µm)	
1E	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	4,00	4,02	0,7	-	-	4,19	44,0	-	54,82	116,45	18,33	Geometria Globo
1 S	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	4,01	4,06	5,09	0,59	3,25	4,20	45,5	47,80	22,67	47,55	5,99	
2E	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,00	0,66	-	-	4,21	45,1	-	57,25	138,32	18,71	
2 S	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	4,02	8,08	6	4	4,20	45,6	47,7	18,77	37,39	5,53	
3E	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,92	3,99	0,66	-	-	4,22	45,1	-	54,12	130,09	17,99	
3S	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,05	5,10	0,60	3,27	4,30	45,3	47,5	21,21	43,83	5,67	
4E	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	3,99	0,67	-	-	4,18	45,6	-	50,51	109,11	16,71	
4S	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	4,00	4,00	8,09	0,6	4,4	4,20	45,6	48,2	17,43	35,53	4,23	
5E	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	3,99	0,67	-	-	4,20	45,2	-	55,73	119,80	18,29	
5S	45	25	4,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,99	4,05	5,09	0,61	3,3	4,20	45,6	48,1	20,85	43,55	5,67	
6E	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	3,98	0,65	-	-	4,18	45,6	-	58,22	126,05	18,51	
6S	45	25	7,5	0,21	3,99	4	5	0,21	3,98	4,01	8,06	0,57	4,4	4,20	45,7	48,3	17,14	34,20	3,65	

Anexo D – Curvas de DTG dos Experimentos Exploratórios

Ponto 1:



Result: Analysis Table

ID: Media Ent Pto1 | Run No: 1022 | Measured:
File: MRL0502 | Rec. No: 72 | Analysed: 11/2/2015 14:38
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 15.2 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 2.493 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0815 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2285 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 57.19 um | D[3, 2] = 26.26 um
D(v, 0.1) = 12.00 um | D(v, 0.5) = 48.15 um | D(v, 0.9) = 120.31 um
Span = 2.249E+00 | Uniformity = 6.597E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.09	12.21	2.17	76.32	6.55
0.36	0.00	2.28	0.19	14.22	2.54	88.91	5.79
0.42	0.00	2.65	0.31	16.57	2.98	103.58	5.18
0.49	0.00	3.09	0.43	19.31	3.52	120.67	4.92
0.58	0.00	3.60	0.57	22.49	4.17	140.58	4.99
0.67	0.00	4.19	0.71	26.20	4.94	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.85	30.53	5.77	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.01	35.56	6.57	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.19	41.43	7.23	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	1.39	48.27	7.61	301.68	
1.44	0.00	9.00	1.61	56.23	7.61		
1.68	0.02	10.48	1.87	65.51	7.23		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

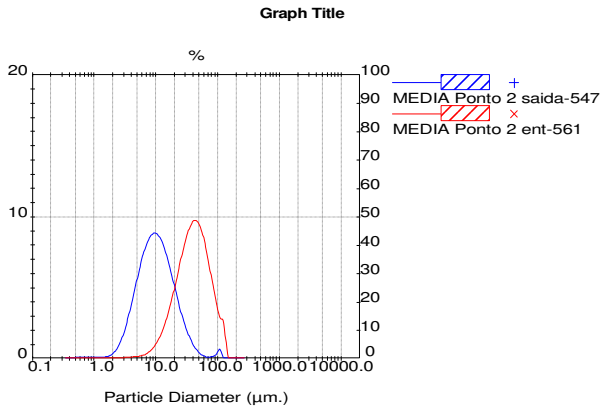
ID: Media Saida Pto 1 | Run No: 1031 | Measured:
File: MRL0502 | Rec. No: 74 | Analysed: 5/2/2015 13:54
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Averaged

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.9 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.047 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 120.67 um.

Conc. = 0.0571 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.4443 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 24.71 um | D[3, 2] = 13.50 um
D(v, 0.1) = 6.36 um | D(v, 0.5) = 20.39 um | D(v, 0.9) = 49.08 um
Span = 2.095E+00 | Uniformity = 6.575E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.30	12.21	5.90	76.32	0.85
0.36	0.00	2.28	0.49	14.22	6.44	88.91	0.33
0.42	0.00	2.65	0.74	16.57	6.94	103.58	0.19
0.49	0.00	3.09	1.04	19.31	7.31	120.67	0.00
0.58	0.00	3.60	1.38	22.49	7.53	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	1.76	26.20	7.55	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	2.15	30.53	7.29	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	2.72	35.56	6.67	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	3.40	41.43	5.69	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	4.04	48.27	4.42	301.68	
1.44	0.04	9.00	4.64	56.23	3.01		
1.68	0.15	10.48	5.28	65.51	1.76		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 2:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 2 ent | Run No: 561 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1660 | Analysed: 4/3/2015 16:42
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 13.2 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.653 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 140.58 um.

Conc. = 0.0769 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1937 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 46.61 um | D[3, 2] = 30.97 um
D(v, 0.1) = 17.02 um | D(v, 0.5) = 40.49 um | D(v, 0.9) = 85.87 um
Span = 1.700E+00 | Uniformity = 5.225E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.00	12.21	2.13	76.32	5.39
0.36	0.00	2.28	0.03	14.22	2.99	88.91	3.94
0.42	0.00	2.65	0.07	16.57	4.07	103.58	2.82
0.49	0.00	3.09	0.10	19.31	5.27	120.67	2.13
0.58	0.00	3.60	0.12	22.49	6.55	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.14	26.20	7.80	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.17	30.53	8.85	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.24	35.56	9.54	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.38	41.43	9.71	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.61	48.27	9.30	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.94	56.23	8.32		
1.68	0.00	10.48	1.44	65.51	6.93		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

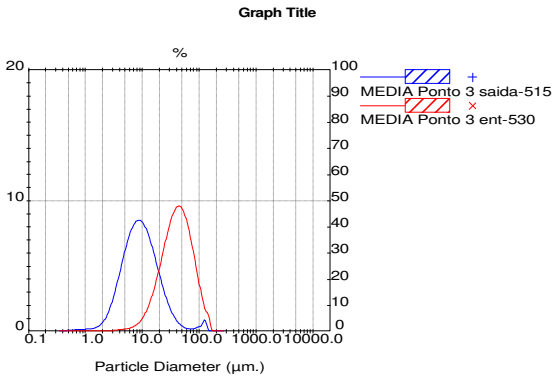
ID: MEDIA Ponto 2 saida | Run No: 547 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1659 | Analysed: 4/3/2015 16:36
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 22.1 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.327 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 120.67 um.

Conc. = 0.0356 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.8104 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 13.17 um | D[3, 2] = 7.40 um
D(v, 0.1) = 4.19 um | D(v, 0.5) = 9.83 um | D(v, 0.9) = 24.13 um
Span = 2.028E+00 | Uniformity = 7.125E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.03	1.95	0.45	12.21	8.01	76.32	0.16
0.36	0.05	2.28	0.85	14.22	7.09	88.91	0.34
0.42	0.08	2.65	1.50	16.57	5.99	103.58	0.61
0.49	0.10	3.09	2.41	19.31	4.81	120.67	0.00
0.58	0.11	3.60	3.53	22.49	3.68	140.58	0.00
0.67	0.12	4.19	4.80	26.20	2.67	163.77	0.00
0.78	0.12	4.88	6.07	30.53	1.83	190.80	0.00
0.91	0.12	5.69	7.19	35.56	1.18	222.28	0.00
1.06	0.11	6.63	8.08	41.43	0.70	258.95	0.00
1.24	0.11	7.72	8.66	48.27	0.37	301.68	
1.44	0.13	9.00	8.83	56.23	0.18		
1.68	0.23	10.48	8.61	65.51	0.11		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 3:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 3 ent | Run No: 530 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1658 | Analysed: 4/3/2015 16:34
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 17.0 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.527 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0974 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1927 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 47.44 um | D[3, 2] = 31.14 um
D(v, 0.1) = 17.07 um | D(v, 0.5) = 40.98 um | D(v, 0.9) = 87.10 um
Span = 1.709E+00 | Uniformity = 5.324E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.00	12.21	2.08	76.32	5.63
0.36	0.00	2.28	0.01	14.22	2.94	88.91	4.07
0.42	0.00	2.65	0.06	16.57	4.01	103.58	2.69
0.49	0.00	3.09	0.10	19.31	5.20	120.67	1.63
0.58	0.00	3.60	0.14	22.49	6.46	140.58	0.94
0.67	0.00	4.19	0.17	26.20	7.66	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.20	30.53	8.68	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.27	35.56	9.36	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.40	41.43	9.56	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.60	48.27	9.25	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.92	56.23	8.41		
1.68	0.00	10.48	1.40	65.51	7.14		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

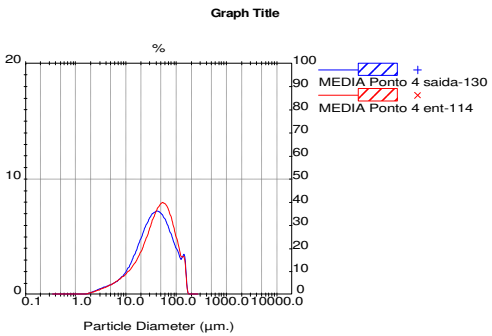
ID: MEDIA Ponto 3 saida | Run No: 515 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1657 | Analysed: 4/3/2015 16:30
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 30.0 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.349 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 140.58 um.

Conc. = 0.0446 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.9026 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 13.28 um | D[3, 2] = 6.65 um
D(v, 0.1) = 3.68 um | D(v, 0.5) = 9.01 um | D(v, 0.9) = 23.55 um
Span = 2.205E+00 | Uniformity = 8.614E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.03	1.95	0.81	12.21	7.22	76.32	0.23
0.36	0.06	2.28	1.33	14.22	6.25	88.91	0.35
0.42	0.08	2.65	2.10	16.57	5.16	103.58	0.54
0.49	0.11	3.09	3.09	19.31	4.07	120.67	0.79
0.58	0.13	3.60	4.24	22.49	3.05	140.58	0.00
0.67	0.15	4.19	5.45	26.20	2.18	163.77	0.00
0.78	0.16	4.88	6.59	30.53	1.49	190.80	0.00
0.91	0.17	5.69	7.53	35.56	0.97	222.28	0.00
1.06	0.19	6.63	8.18	41.43	0.60	258.95	0.00
1.24	0.23	7.72	8.48	48.27	0.37	301.68	
1.44	0.32	9.00	8.40	56.23	0.24		
1.68	0.49	10.48	7.97	65.51	0.20		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 4:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 4 ent | Run No: 114 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1424 | Analysed: 4/3/2015 11:21
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 21.0 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.194 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0941 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2601 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 51.17 um | D[3, 2] = 23.07 um
D(v, 0.1) = 10.76 um | D(v, 0.5) = 43.62 um | D(v, 0.9) = 103.70 um
Span = 2.130E+00 | Uniformity = 6.449E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.22	12.21	2.38	76.32	6.44
0.36	0.00	2.28	0.31	14.22	2.80	88.91	5.34
0.42	0.00	2.65	0.41	16.57	3.31	103.58	4.20
0.49	0.00	3.09	0.53	19.31	3.92	120.67	3.25
0.58	0.00	3.60	0.65	22.49	4.64	140.58	2.58
0.67	0.00	4.19	0.78	26.20	5.44	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.93	30.53	6.27	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.09	35.56	7.03	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.29	41.43	7.62	258.95	0.00
1.24	0.01	7.72	1.50	48.27	7.92	301.68	
1.44	0.07	9.00	1.75	56.23	7.84		
1.68	0.14	10.48	2.04	65.51	7.33		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

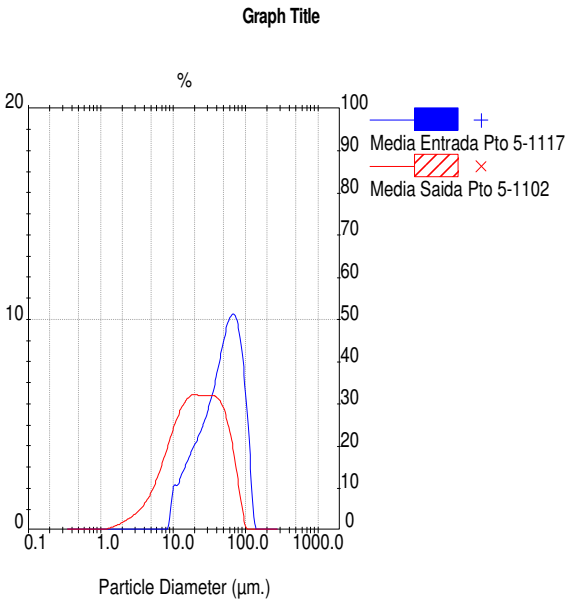
ID: MEDIA Ponto 4 saida | Run No: 130 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1425 | Analysed: 4/3/2015 11:25
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 20.5 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.370 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0862 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2799 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 47.43 um | D[3, 2] = 21.44 um
D(v, 0.1) = 10.42 um | D(v, 0.5) = 37.43 um | D(v, 0.9) = 101.87 um
Span = 2.443E+00 | Uniformity = 7.280E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.24	12.21	2.94	76.32	5.02
0.36	0.00	2.28	0.35	14.22	3.61	88.91	4.23
0.42	0.00	2.65	0.47	16.57	4.34	103.58	3.56
0.49	0.00	3.09	0.59	19.31	5.10	120.67	3.11
0.58	0.00	3.60	0.70	22.49	5.82	140.58	2.90
0.67	0.00	4.19	0.80	26.20	6.45	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.92	30.53	6.91	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.08	35.56	7.17	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.28	41.43	7.18	258.95	0.00
1.24	0.01	7.72	1.55	48.27	6.95	301.68	
1.44	0.06	9.00	1.90	56.23	6.47		
1.68	0.14	10.48	2.36	65.51	5.80		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 5:



Result: Analysis Table

ID: Media Entrada Pto 5 | Run No: 1117 | Measured: 5/2/2015 15:26
File: MRL0302 | Rec. No: 151 | Analysed: 11/2/2015 18:05
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: Internal | Measured Beam Obscuration: 17.5 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 8.163 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 9.00 um; > 190.80 um.

Conc. = 0.0856 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1698 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 52.27 um | D[3, 2] = 35.33 um
D(v, 0.1) = 16.87 um | D(v, 0.5) = 49.17 um | D(v, 0.9) = 92.68 um
Span = 1.542E+00 | Uniformity = 4.796E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.00	12.21	2.64	76.32	9.36
0.36	0.00	2.28	0.00	14.22	3.17	88.91	7.35
0.42	0.00	2.65	0.00	16.57	3.70	103.58	4.27
0.49	0.00	3.09	0.00	19.31	4.20	120.67	0.62
0.58	0.00	3.60	0.00	22.49	4.73	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.00	26.20	5.34	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.00	30.53	6.12	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.00	35.56	7.07	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.00	41.43	8.16	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.00	48.27	9.25	301.68	
1.44	0.00	9.00	1.66	56.23	10.04		
1.68	0.00	10.48	2.12	65.51	10.19		
1.95	0.00	12.21		76.32			

Result: Analysis Table

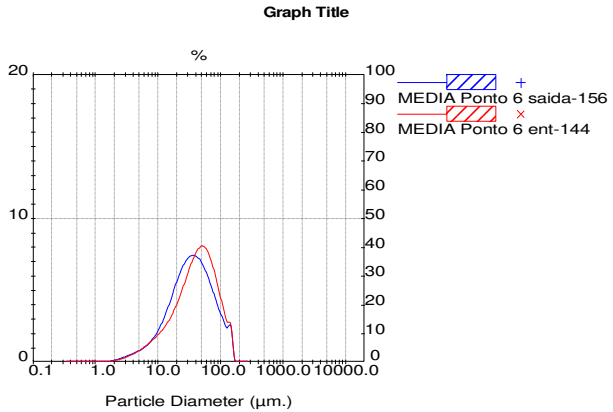
ID: Media Saida Pto 5 | Run No: 1102 | Measured: 5/2/2015 15:21
File: MRL0302 | Rec. No: 149 | Analysed: 11/2/2015 17:52
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: Internal | Measured Beam Obscuration: 16.9 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 4.286 %
Modifications: None

Conc. = 0.0414 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.4453 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 27.11 um | D[3, 2] = 13.47 um
D(v, 0.1) = 6.46 um | D(v, 0.5) = 21.31 um | D(v, 0.9) = 57.08 um
Span = 2.376E+00 | Uniformity = 7.308E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.42	12.21	5.82	76.32	1.92
0.36	0.00	2.28	0.56	14.22	6.18	88.91	0.48
0.42	0.00	2.65	0.72	16.57	6.39	103.58	0.00
0.49	0.00	3.09	0.91	19.31	6.42	120.67	0.00
0.58	0.00	3.60	1.18	22.49	6.38	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	1.52	26.20	6.38	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	1.97	30.53	6.39	190.80	0.00
0.91	0.01	5.69	2.53	35.56	6.34	222.28	0.00
1.06	0.05	6.63	3.19	41.43	6.12	258.95	0.00
1.24	0.12	7.72	3.90	48.27	5.60	301.68	
1.44	0.20	9.00	4.63	56.23	4.69		
1.68	0.30	10.48	5.28	65.51	3.41		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 6:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 6 ent | Run No: 144 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1426 | Analysed: 4/3/2015 11:27
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 21.7 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.234 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.1003 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2524 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 49.23 um | D[3, 2] = 23.78 um
D(v, 0.1) = 11.14 um | D(v, 0.5) = 41.76 um | D(v, 0.9) = 98.88 um
Span = 2.101E+00 | Uniformity = 6.406E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.14	12.21	2.55	76.32	6.04
0.36	0.00	2.28	0.21	14.22	3.00	88.91	4.83
0.42	0.00	2.65	0.31	16.57	3.56	103.58	3.68
0.49	0.00	3.09	0.42	19.31	4.22	120.67	2.78
0.58	0.00	3.60	0.55	22.49	4.99	140.58	2.19
0.67	0.00	4.19	0.71	26.20	5.84	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.89	30.53	6.68	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.09	35.56	7.42	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.32	41.43	7.92	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	1.57	48.27	8.08	301.68	
1.44	0.03	9.00	1.85	56.23	7.80		
1.68	0.08	10.48	2.17	65.51	7.08		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

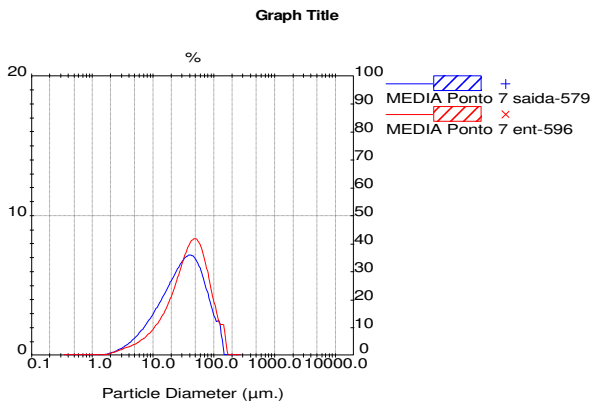
ID: MEDIA Ponto 6 saida | Run No: 156 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1427 | Analysed: 4/3/2015 11:31
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 18.8 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.250 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0773 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2812 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 43.96 um | D[3, 2] = 21.34 um
D(v, 0.1) = 10.64 um | D(v, 0.5) = 34.39 um | D(v, 0.9) = 92.61 um
Span = 2.383E+00 | Uniformity = 7.221E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.17	12.21	3.34	76.32	4.45
0.36	0.00	2.28	0.27	14.22	4.14	88.91	3.60
0.42	0.00	2.65	0.37	16.57	4.98	103.58	2.88
0.49	0.00	3.09	0.49	19.31	5.80	120.67	2.40
0.58	0.00	3.60	0.60	22.49	6.52	140.58	2.16
0.67	0.00	4.19	0.73	26.20	7.06	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.87	30.53	7.37	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.06	35.56	7.42	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.31	41.43	7.22	258.95	0.00
1.24	0.02	7.72	1.64	48.27	6.78	301.68	
1.44	0.05	9.00	2.08	56.23	6.13		
1.68	0.10	10.48	2.65	65.51	5.33		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 7:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 7 ent | Run No: 596 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1662 | Analysed: 4/3/2015 16:50
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 15.3 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.955 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0641 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2648 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 46.85 um | D[3, 2] = 22.65 um
D(v, 0.1) = 10.92 um | D(v, 0.5) = 39.95 um | D(v, 0.9) = 92.54 um
Span = 2.043E+00 | Uniformity = 6.284E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.20	12.21	2.61	76.32	5.59
0.36	0.00	2.28	0.30	14.22	3.11	88.91	4.24
0.42	0.00	2.65	0.40	16.57	3.73	103.58	3.06
0.49	0.00	3.09	0.51	19.31	4.45	120.67	2.20
0.58	0.00	3.60	0.62	22.49	5.28	140.58	1.73
0.67	0.00	4.19	0.74	26.20	6.19	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.88	30.53	7.08	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.05	35.56	7.83	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.27	41.43	8.28	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	1.52	48.27	8.30	301.68	
1.44	0.04	9.00	1.82	56.23	7.82		
1.68	0.11	10.48	2.18	65.51	6.86		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

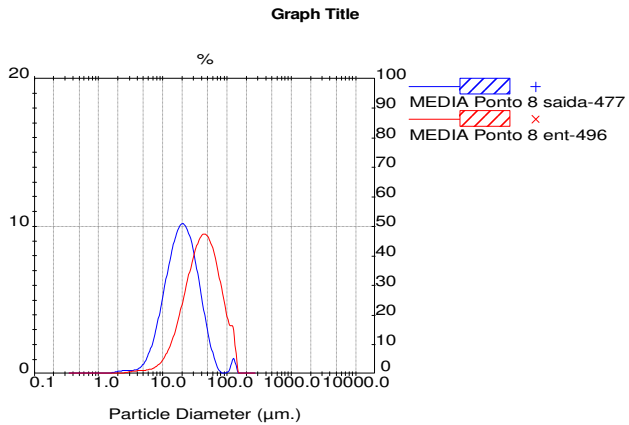
ID: MEDIA Ponto 7 saida | Run No: 579 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1661 | Analysed: 4/3/2015 16:45
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 17.2 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.040 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 140.58 um.

Conc. = 0.0604 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3298 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 38.82 um | D[3, 2] = 18.19 um
D(v, 0.1) = 8.27 um | D(v, 0.5) = 31.29 um | D(v, 0.9) = 81.23 um
Span = 2.332E+00 | Uniformity = 7.169E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.22	12.21	3.86	76.32	4.18
0.36	0.00	2.28	0.33	14.22	4.39	88.91	3.21
0.42	0.00	2.65	0.47	16.57	4.94	103.58	2.45
0.49	0.00	3.09	0.64	19.31	5.50	120.67	1.98
0.58	0.00	3.60	0.85	22.49	6.04	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	1.09	26.20	6.54	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	1.37	30.53	6.93	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.69	35.56	7.15	222.28	0.00
1.06	0.01	6.63	2.05	41.43	7.11	258.95	0.00
1.24	0.03	7.72	2.45	48.27	6.77	301.68	
1.44	0.08	9.00	2.88	56.23	6.11		
1.68	0.14	10.48	3.35	65.51	5.21		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 8:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 8 ent | Run No: 496 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1656 | Analysed: 4/3/2015 16:26
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.6 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.169 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 140.58 um.

Conc. = 0.0987 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1967 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 47.85 um | D[3, 2] = 30.50 um
D(v, 0.1) = 17.00 um | D(v, 0.5) = 41.48 um | D(v, 0.9) = 89.34 um
Span = 1.744E+00 | Uniformity = 5.338E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.00	12.21	1.99	76.32	5.75
0.36	0.00	2.28	0.06	14.22	2.83	88.91	4.37
0.42	0.00	2.65	0.13	16.57	3.87	103.58	3.25
0.49	0.00	3.09	0.18	19.31	5.06	120.67	2.55
0.58	0.00	3.60	0.22	22.49	6.31	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.24	26.20	7.51	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.26	30.53	8.53	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.31	35.56	9.22	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.41	41.43	9.45	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.59	48.27	9.17	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.88	56.23	8.37		
1.68	0.00	10.48	1.34	65.51	7.17		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

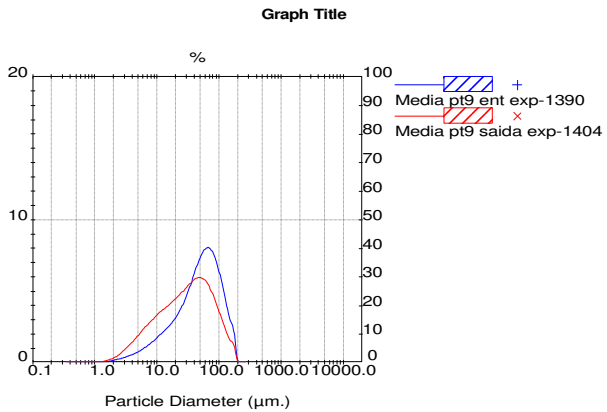
ID: MEDIA Ponto 8 saida | Run No: 477 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1655 | Analysed: 4/3/2015 16:19
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 18.1 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.775 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 140.58 um.

Conc. = 0.0562 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3846 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 23.81 um | D[3, 2] = 15.60 um
D(v, 0.1) = 8.96 um | D(v, 0.5) = 19.79 um | D(v, 0.9) = 41.32 um
Span = 1.635E+00 | Uniformity = 5.565E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.19	12.21	7.88	76.32	0.08
0.36	0.00	2.28	0.23	14.22	9.13	88.91	0.09
0.42	0.00	2.65	0.24	16.57	9.90	103.58	0.43
0.49	0.00	3.09	0.25	19.31	10.14	120.67	0.99
0.58	0.00	3.60	0.30	22.49	9.74	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.47	26.20	8.77	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.83	30.53	7.37	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.45	35.56	5.72	222.28	0.00
1.06	0.02	6.63	2.34	41.43	4.04	258.95	0.00
1.24	0.04	7.72	3.51	48.27	2.51	301.68	
1.44	0.08	9.00	4.92	56.23	1.30		
1.68	0.14	10.48	6.42	65.51	0.48		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 9:



Result: Analysis Table

ID: Media pt9 ent exp | Run No: 1390 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 153 | Analysed: 24/2/2015 15:44
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 15.9 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.704 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 190.80 um.

Conc. = 0.0735 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2363 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 58.54 um | D[3, 2] = 25.39 um
D(v, 0.1) = 11.60 um | D(v, 0.5) = 50.77 um | D(v, 0.9) = 117.58 um
Span = 2.088E+00 | Uniformity = 6.387E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.18	12.21	2.21	76.32	7.57
0.36	0.00	2.28	0.26	14.22	2.51	88.91	6.71
0.42	0.00	2.65	0.35	16.57	2.85	103.58	5.53
0.49	0.00	3.09	0.44	19.31	3.26	120.67	4.22
0.58	0.00	3.60	0.55	22.49	3.76	140.58	2.98
0.67	0.00	4.19	0.67	26.20	4.38	163.77	1.95
0.78	0.00	4.88	0.82	30.53	5.14	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.99	35.56	5.98	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.20	41.43	6.81	258.95	0.00
1.24	0.02	7.72	1.42	48.27	7.52	301.68	
1.44	0.06	9.00	1.67	56.23	7.96		
1.68	0.12	10.48	1.93	65.51	7.99		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

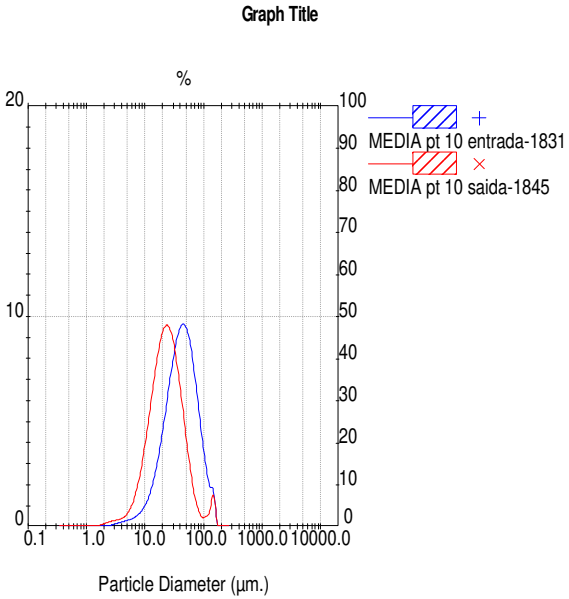
ID: Media pt9 saida exp | Run No: 1404 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 154 | Analysed: 24/2/2015 15:46
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 20.1 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.497 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 190.80 um.

Conc. = 0.0578 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3887 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 41.99 um | D[3, 2] = 15.44 um
D(v, 0.1) = 6.32 um | D(v, 0.5) = 30.79 um | D(v, 0.9) = 94.77 um
Span = 2.873E+00 | Uniformity = 8.991E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.38	12.21	3.77	76.32	4.62
0.36	0.00	2.28	0.57	14.22	4.01	88.91	3.83
0.42	0.00	2.65	0.80	16.57	4.26	103.58	3.00
0.49	0.00	3.09	1.07	19.31	4.53	120.67	2.22
0.58	0.00	3.60	1.37	22.49	4.82	140.58	1.57
0.67	0.00	4.19	1.69	26.20	5.14	163.77	1.09
0.78	0.00	4.88	2.02	30.53	5.46	190.80	0.00
0.91	0.01	5.69	2.35	35.56	5.73	222.28	0.00
1.06	0.04	6.63	2.67	41.43	5.91	258.95	0.00
1.24	0.08	7.72	2.97	48.27	5.91	301.68	
1.44	0.14	9.00	3.25	56.23	5.71		
1.68	0.24	10.48	3.51	65.51	5.27		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 10:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA pt 10 entrada | Run No: 1831 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 272 | Analysed: 25/2/2015 11:38
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 15.6 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 2.144 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0884 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1978 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 48.36 um | D[3, 2] = 30.33 um
D(v, 0.1) = 16.86 um | D(v, 0.5) = 41.67 um | D(v, 0.9) = 89.27 um
Span = 1.738E+00 | Uniformity = 5.420E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.01	12.21	1.92	76.32	5.60
0.36	0.00	2.28	0.06	14.22	2.70	88.91	4.04
0.42	0.00	2.65	0.11	16.57	3.70	103.58	2.74
0.49	0.00	3.09	0.16	19.31	4.87	120.67	1.87
0.58	0.00	3.60	0.22	22.49	6.15	140.58	1.47
0.67	0.00	4.19	0.27	26.20	7.43	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.32	30.53	8.54	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.40	35.56	9.32	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.51	41.43	9.62	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.68	48.27	9.35	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.94	56.23	8.49		
1.68	0.00	10.48	1.34	65.51	7.18		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

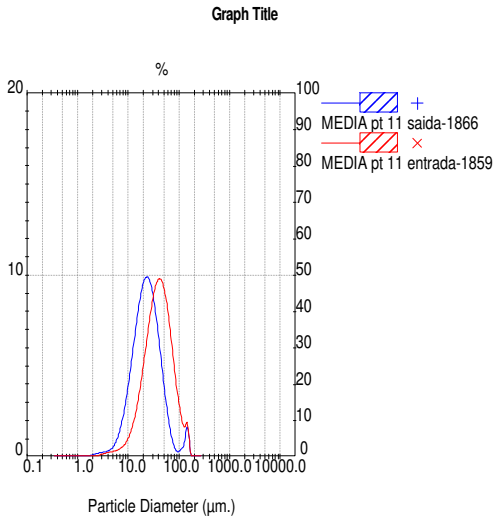
ID: MEDIA pt 10 saida | Run No: 1845 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 273 | Analysed: 25/2/2015 11:44
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.7 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.412 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0562 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3436 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 29.10 um | D[3, 2] = 17.46 um
D(v, 0.1) = 9.74 um | D(v, 0.5) = 22.94 um | D(v, 0.9) = 51.52 um
Span = 1.821E+00 | Uniformity = 6.399E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.17	12.21	6.27	76.32	0.75
0.36	0.00	2.28	0.23	14.22	7.60	88.91	0.44
0.42	0.00	2.65	0.28	16.57	8.68	103.58	0.50
0.49	0.00	3.09	0.33	19.31	9.39	120.67	0.86
0.58	0.00	3.60	0.38	22.49	9.57	140.58	1.38
0.67	0.00	4.19	0.50	26.20	9.17	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.73	30.53	8.26	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.13	35.56	6.96	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.74	41.43	5.44	258.95	0.00
1.24	0.02	7.72	2.58	48.27	3.91	301.68	
1.44	0.06	9.00	3.66	56.23	2.54		
1.68	0.11	10.48	4.91	65.51	1.46		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 11:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA pt 11 entrada | Run No: 1859 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 274 | Analysed: 25/2/2015 11:47
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 13.4 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 2.462 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0731 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2062 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 46.14 um | D[3, 2] = 29.10 um
D(v, 0.1) = 16.44 um | D(v, 0.5) = 39.28 um | D(v, 0.9) = 84.70 um
Span = 1.738E+00 | Uniformity = 5.466E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.01	12.21	2.08	76.32	4.75
0.36	0.00	2.28	0.07	14.22	2.98	88.91	3.26
0.42	0.00	2.65	0.13	16.57	4.12	103.58	2.18
0.49	0.00	3.09	0.19	19.31	5.42	120.67	1.64
0.58	0.00	3.60	0.24	22.49	6.80	140.58	1.59
0.67	0.00	4.19	0.28	26.20	8.09	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.32	30.53	9.11	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.38	35.56	9.70	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.49	41.43	9.71	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.66	48.27	9.11	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.95	56.23	7.95		
1.68	0.00	10.48	1.41	65.51	6.41		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

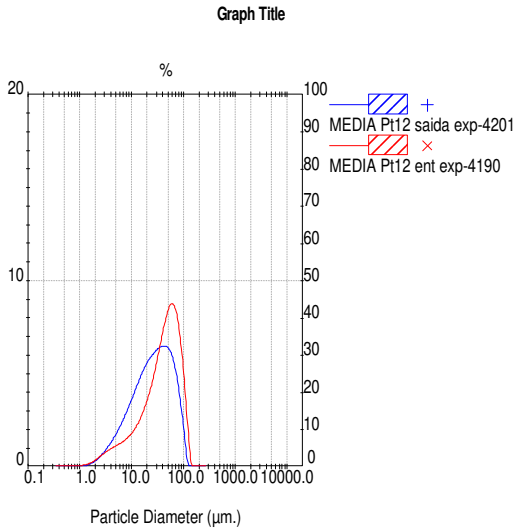
ID: MEDIA pt 11 saida | Run No: 1866 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 275 | Analysed: 25/2/2015 11:49
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 17.8 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.384 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0614 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3391 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 28.75 um | D[3, 2] = 17.70 um
D(v, 0.1) = 9.96 um | D(v, 0.5) = 22.74 um | D(v, 0.9) = 49.63 um
Span = 1.744E+00 | Uniformity = 6.268E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.15	12.21	6.43	76.32	0.51
0.36	0.00	2.28	0.20	14.22	7.83	88.91	0.29
0.42	0.00	2.65	0.24	16.57	8.97	103.58	0.45
0.49	0.00	3.09	0.28	19.31	9.70	120.67	0.91
0.58	0.00	3.60	0.32	22.49	9.87	140.58	1.51
0.67	0.00	4.19	0.42	26.20	9.41	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.65	30.53	8.39	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.05	35.56	6.95	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.68	41.43	5.31	258.95	0.00
1.24	0.01	7.72	2.55	48.27	3.68	301.68	
1.44	0.04	9.00	3.68	56.23	2.26		
1.68	0.09	10.48	5.00	65.51	1.18		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 12:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Pt12 ent exp | Run No: 4190 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 476 | Analysed: 25/2/2015 17:29
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 20.0 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 2.540 %
Modifications: None

Conc. = 0.0699 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3151 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 46.27 um | D[3, 2] = 19.04 um
D(v, 0.1) = 8.50 um | D(v, 0.5) = 42.46 um | D(v, 0.9) = 89.45 um
Span = 1.907E+00 | Uniformity = 5.858E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.41	12.21	2.31	76.32	7.41
0.36	0.00	2.28	0.56	14.22	2.69	88.91	5.71
0.42	0.00	2.65	0.70	16.57	3.16	103.58	3.49
0.49	0.00	3.09	0.83	19.31	3.72	120.67	1.07
0.58	0.00	3.60	0.95	22.49	4.38	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	1.06	26.20	5.17	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	1.16	30.53	6.06	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.27	35.56	6.98	222.28	0.00
1.06	0.10	6.63	1.40	41.43	7.84	258.95	0.00
1.24	0.13	7.72	1.55	48.27	8.50	301.68	
1.44	0.19	9.00	1.74	56.23	8.76		
1.68	0.29	10.48	1.99	65.51	8.43		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

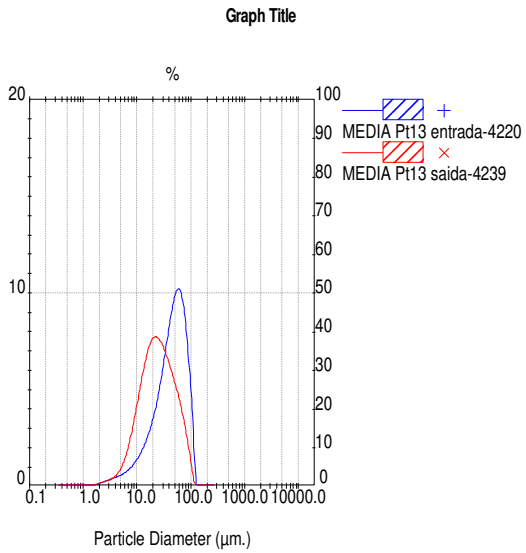
ID: MEDIA Pt12 saida exp | Run No: 4201 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 477 | Analysed: 25/2/2015 17:38
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 17.1 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 3.126 %
Modifications: None

Conc. = 0.0464 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.4007 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 33.28 um | D[3, 2] = 14.97 um
D(v, 0.1) = 6.62 um | D(v, 0.5) = 26.56 um | D(v, 0.9) = 70.92 um
Span = 2.421E+00 | Uniformity = 7.470E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.37	12.21	4.46	76.32	4.06
0.36	0.00	2.28	0.53	14.22	4.92	88.91	2.59
0.42	0.00	2.65	0.74	16.57	5.33	103.58	0.97
0.49	0.00	3.09	0.98	19.31	5.66	120.67	0.00
0.58	0.00	3.60	1.24	22.49	5.93	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	1.54	26.20	6.16	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	1.86	30.53	6.35	190.80	0.00
0.91	0.01	5.69	2.23	35.56	6.46	222.28	0.00
1.06	0.04	6.63	2.63	41.43	6.48	258.95	0.00
1.24	0.08	7.72	3.06	48.27	6.34	301.68	
1.44	0.15	9.00	3.50	56.23	5.93		
1.68	0.24	10.48	3.98	65.51	5.19		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 13:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Pt13 entrada | Run No: 4220 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 478 | Analysed: 25/2/2015 18:00
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 15.5 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 4.018 %
Modifications: None

Conc. = 0.0717 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2298 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 48.07 um | D[3, 2] = 26.11 um
D(v, 0.1) = 13.75 um | D(v, 0.5) = 45.51 um | D(v, 0.9) = 86.19 um
Span = 1.592E+00 | Uniformity = 4.867E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.16	12.21	2.01	76.32	8.09
0.36	0.00	2.28	0.24	14.22	2.47	88.91	5.72
0.42	0.00	2.65	0.31	16.57	3.02	103.58	2.81
0.49	0.00	3.09	0.39	19.31	3.71	120.67	0.00
0.58	0.00	3.60	0.45	22.49	4.54	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.53	26.20	5.56	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.61	30.53	6.74	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.73	35.56	7.98	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.88	41.43	9.13	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	1.08	48.27	9.95	301.68	
1.44	0.01	9.00	1.32	56.23	10.19		
1.68	0.05	10.48	1.63	65.51	9.60		
1.95	0.10	12.21		76.32			

Result: Analysis Table

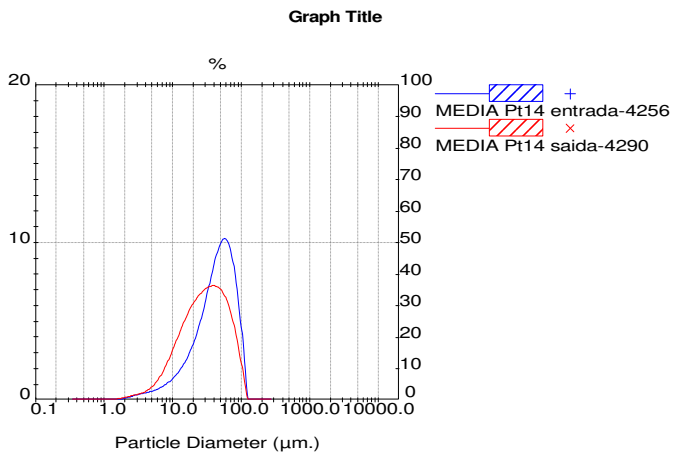
ID: MEDIA Pt13 saida | Run No: 4239 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 479 | Analysed: 25/2/2015 18:05
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.8 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 2.761 %
Modifications: None

Conc. = 0.0520 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3552 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 30.13 um | D[3, 2] = 16.89 um
D(v, 0.1) = 8.82 um | D(v, 0.5) = 23.71 um | D(v, 0.9) = 62.14 um
Span = 2.249E+00 | Uniformity = 6.805E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.18	12.21	5.97	76.32	2.75
0.36	0.00	2.28	0.24	14.22	6.83	88.91	1.61
0.42	0.00	2.65	0.30	16.57	7.41	103.58	0.45
0.49	0.00	3.09	0.37	19.31	7.70	120.67	0.00
0.58	0.00	3.60	0.50	22.49	7.67	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.71	26.20	7.43	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	1.04	30.53	7.01	190.80	0.00
0.91	0.02	5.69	1.54	35.56	6.46	222.28	0.00
1.06	0.03	6.63	2.21	41.43	5.85	258.95	0.00
1.24	0.05	7.72	3.03	48.27	5.21	301.68	
1.44	0.08	9.00	4.00	56.23	4.51		
1.68	0.13	10.48	5.00	65.51	3.71		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 14:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Pt14 entrada | Run No: 4256 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 480 | Analysed: 25/2/2015 18:13
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 15.4 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 4.037 %
Modifications: None

Conc. = 0.0717 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2276 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 47.53 um | D[3, 2] = 26.37 um
D(v, 0.1) = 13.91 um | D(v, 0.5) = 44.88 um | D(v, 0.9) = 85.04 um
Span = 1.585E+00 | Uniformity = 4.830E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.15	12.21	2.00	76.32	7.81
0.36	0.00	2.28	0.23	14.22	2.47	88.91	5.40
0.42	0.00	2.65	0.31	16.57	3.05	103.58	2.55
0.49	0.00	3.09	0.39	19.31	3.77	120.67	0.00
0.58	0.00	3.60	0.45	22.49	4.66	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.52	26.20	5.75	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.60	30.53	6.98	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.72	35.56	8.24	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.87	41.43	9.34	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	1.07	48.27	10.07	301.68	
1.44	0.02	9.00	1.31	56.23	10.16		
1.68	0.07	10.48	1.62	65.51	9.43		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

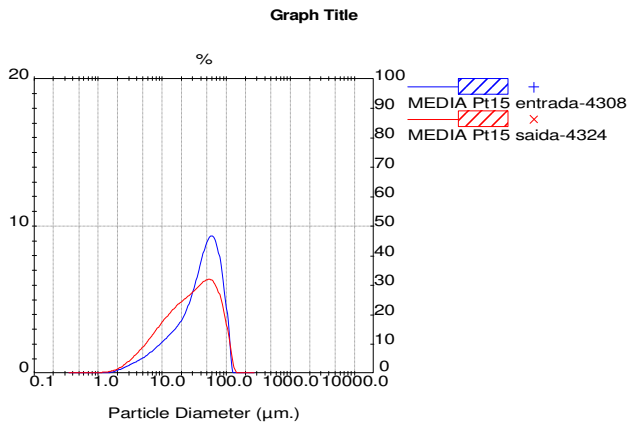
ID: MEDIA Pt14 saida | Run No: 4290 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 481 | Analysed: 25/2/2015 18:19
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 19.0 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 2.348 %
Modifications: None

Conc. = 0.0661 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3173 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 35.96 um | D[3, 2] = 18.91 um
D(v, 0.1) = 9.42 um | D(v, 0.5) = 29.76 um | D(v, 0.9) = 72.76 um
Span = 2.128E+00 | Uniformity = 6.566E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.20	12.21	4.47	76.32	4.34
0.36	0.00	2.28	0.27	14.22	5.17	88.91	2.84
0.42	0.00	2.65	0.33	16.57	5.76	103.58	1.20
0.49	0.00	3.09	0.41	19.31	6.26	120.67	0.00
0.58	0.00	3.60	0.52	22.49	6.63	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.69	26.20	6.94	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.95	30.53	7.15	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.31	35.56	7.25	222.28	0.00
1.06	0.03	6.63	1.79	41.43	7.19	258.95	0.00
1.24	0.05	7.72	2.37	48.27	6.93	301.68	
1.44	0.08	9.00	3.04	56.23	6.39		
1.68	0.14	10.48	3.75	65.51	5.53		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 15:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Pt15 entrada | Run No: 4308 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 482 | Analysed: 25/2/2015 18:23
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 15.6 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 3.254 %
Modifications: None

Conc. = 0.0575 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2886 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 44.56 um | D[3, 2] = 20.79 um
D(v, 0.1) = 9.24 um | D(v, 0.5) = 41.80 um | D(v, 0.9) = 84.31 um
Span = 1.796E+00 | Uniformity = 5.561E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.26	12.21	2.65	76.32	7.35
0.36	0.00	2.28	0.38	14.22	2.95	88.91	5.15
0.42	0.00	2.65	0.51	16.57	3.30	103.58	2.52
0.49	0.00	3.09	0.65	19.31	3.74	120.67	0.00
0.58	0.00	3.60	0.79	22.49	4.33	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.94	26.20	5.13	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	1.12	30.53	6.13	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.33	35.56	7.23	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.57	41.43	8.29	258.95	0.00
1.24	0.03	7.72	1.82	48.27	9.07	301.68	
1.44	0.08	9.00	2.09	56.23	9.31		
1.68	0.16	10.48	2.36	65.51	8.76		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

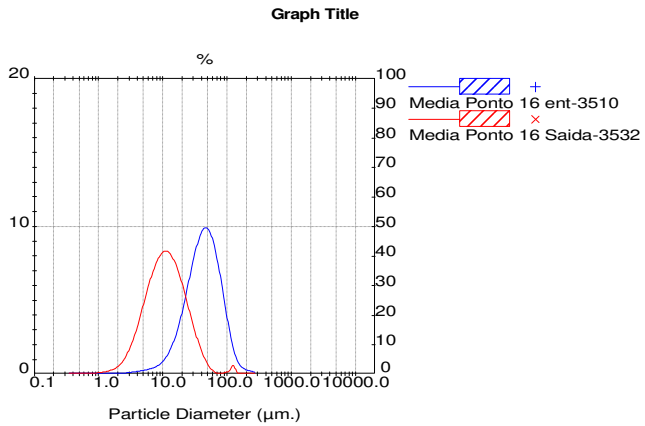
ID: MEDIA Pt15 saida | Run No: 4324 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 483 | Analysed: 25/2/2015 18:29
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 23.0 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.447 %
Modifications: None

Conc. = 0.0654 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3954 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 36.84 um | D[3, 2] = 15.18 um
D(v, 0.1) = 6.49 um | D(v, 0.5) = 28.95 um | D(v, 0.9) = 80.07 um
Span = 2.541E+00 | Uniformity = 7.914E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.37	12.21	4.11	76.32	5.04
0.36	0.00	2.28	0.54	14.22	4.42	88.91	3.80
0.42	0.00	2.65	0.75	16.57	4.69	103.58	2.25
0.49	0.00	3.09	1.00	19.31	4.93	120.67	0.61
0.58	0.00	3.60	1.28	22.49	5.16	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	1.59	26.20	5.41	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	1.93	30.53	5.69	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	2.28	35.56	5.98	222.28	0.00
1.06	0.08	6.63	2.65	41.43	6.23	258.95	0.00
1.24	0.11	7.72	3.03	48.27	6.37	301.68	
1.44	0.16	9.00	3.40	56.23	6.28		
1.68	0.24	10.48	3.77	65.51	5.86		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 16:



Result: Analysis Table

ID: Media Ponto 16 ent | Run No: 3510 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 789 | Analysed: 26/2/2015 17:45
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Averaged

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 15.8 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.975 %
Modifications: None

Conc. = 0.0914 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1882 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 50.28 um | D[3, 2] = 31.88 um
D(v, 0.1) = 17.95 um | D(v, 0.5) = 43.34 um | D(v, 0.9) = 90.05 um
Span = 1.664E+00 | Uniformity = 5.340E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.01	12.21	1.68	76.32	6.09
0.36	0.00	2.28	0.05	14.22	2.40	88.91	4.36
0.42	0.00	2.65	0.09	16.57	3.36	103.58	2.78
0.49	0.00	3.09	0.14	19.31	4.52	120.67	1.55
0.58	0.00	3.60	0.18	22.49	5.84	140.58	0.75
0.67	0.00	4.19	0.23	26.20	7.19	163.77	0.42
0.78	0.00	4.88	0.27	30.53	8.44	190.80	0.27
0.91	0.00	5.69	0.34	35.56	9.39	222.28	0.19
1.06	0.00	6.63	0.43	41.43	9.87	258.95	0.11
1.24	0.00	7.72	0.58	48.27	9.76	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.80	56.23	9.02		
1.68	0.00	10.48	1.15	65.51	7.73		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

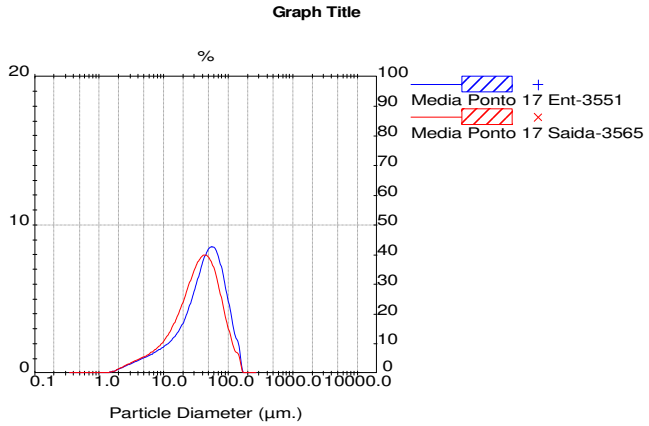
ID: Media Ponto 16 Saida | Run No: 3532 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 790 | Analysed: 26/2/2015 17:52
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 23.6 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.491 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 140.58 um.

Conc. = 0.0392 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.7300 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 14.59 um | D[3, 2] = 8.22 um
D(v, 0.1) = 4.30 um | D(v, 0.5) = 10.99 um | D(v, 0.9) = 27.34 um
Span = 2.096E+00 | Uniformity = 7.219E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.61	12.21	8.12	76.32	0.03
0.36	0.00	2.28	0.95	14.22	7.59	88.91	0.12
0.42	0.01	2.65	1.45	16.57	6.81	103.58	0.30
0.49	0.02	3.09	2.14	19.31	5.84	120.67	0.54
0.58	0.03	3.60	3.00	22.49	4.78	140.58	0.00
0.67	0.04	4.19	4.00	26.20	3.70	163.77	0.00
0.78	0.07	4.88	5.06	30.53	2.69	190.80	0.00
0.91	0.09	5.69	6.08	35.56	1.81	222.28	0.00
1.06	0.13	6.63	6.99	41.43	1.09	258.95	0.00
1.24	0.18	7.72	7.71	48.27	0.57	301.68	
1.44	0.26	9.00	8.17	56.23	0.23		
1.68	0.39	10.48	8.32	65.51	0.05		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 17:



Result: Analysis Table

ID: Media Ponto 17 Ent | Run No: 3551 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 791 | Analysed: 26/2/2015 17:59
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.6 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.494 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0631 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2844 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 49.31 um | D[3, 2] = 21.10 um
D(v, 0.1) = 9.41 um | D(v, 0.5) = 43.65 um | D(v, 0.9) = 96.89 um
Span = 2.004E+00 | Uniformity = 6.117E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.32	12.21	2.22	76.32	6.76
0.36	0.00	2.28	0.45	14.22	2.56	88.91	5.33
0.42	0.00	2.65	0.58	16.57	2.99	103.58	3.83
0.49	0.00	3.09	0.71	19.31	3.56	120.67	2.51
0.58	0.00	3.60	0.84	22.49	4.29	140.58	1.51
0.67	0.00	4.19	0.97	26.20	5.18	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	1.10	30.53	6.17	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.24	35.56	7.15	222.28	0.00
1.06	0.01	6.63	1.39	41.43	7.97	258.95	0.00
1.24	0.04	7.72	1.56	48.27	8.45	301.68	
1.44	0.11	9.00	1.75	56.23	8.43		
1.68	0.20	10.48	1.96	65.51	7.85		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

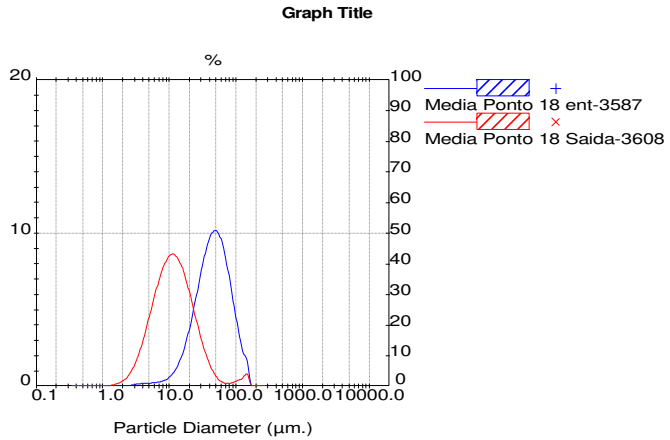
ID: Media Ponto 17 Saida | Run No: 3565 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 792 | Analysed: 26/2/2015 18:04
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 20.3 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.394 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0709 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3196 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 41.66 um | D[3, 2] = 18.78 um
D(v, 0.1) = 8.69 um | D(v, 0.5) = 35.06 um | D(v, 0.9) = 83.32 um
Span = 2.129E+00 | Uniformity = 6.597E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.34	12.21	2.98	76.32	4.68
0.36	0.00	2.28	0.49	14.22	3.57	88.91	3.40
0.42	0.00	2.65	0.63	16.57	4.25	103.58	2.29
0.49	0.00	3.09	0.77	19.31	5.03	120.67	1.48
0.58	0.00	3.60	0.91	22.49	5.85	140.58	1.00
0.67	0.00	4.19	1.04	26.20	6.66	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	1.18	30.53	7.36	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	1.34	35.56	7.83	222.28	0.00
1.06	0.01	6.63	1.54	41.43	7.97	258.95	0.00
1.24	0.05	7.72	1.79	48.27	7.70	301.68	
1.44	0.12	9.00	2.10	56.23	7.00		
1.68	0.22	10.48	2.49	65.51	5.94		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 18:



Result: Analysis Table

ID: Media Ponto 18 ent | Run No: 3587 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 793 | Analysed: 26/2/2015 18:07
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 14.4 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.627 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0888 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1760 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 52.07 um | D[3, 2] = 34.10 um
D(v, 0.1) = 19.80 um | D(v, 0.5) = 45.81 um | D(v, 0.9) = 93.75 um
Span = 1.614E+00 | Uniformity = 5.000E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.02	12.21	1.30	76.32	6.72
0.36	0.00	2.28	0.06	14.22	1.98	88.91	5.00
0.42	0.00	2.65	0.11	16.57	2.90	103.58	3.41
0.49	0.00	3.09	0.15	19.31	4.07	120.67	2.17
0.58	0.00	3.60	0.18	22.49	5.42	140.58	1.34
0.67	0.00	4.19	0.20	26.20	6.88	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.22	30.53	8.26	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.24	35.56	9.38	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.29	41.43	10.04	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.38	48.27	10.09	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.55	56.23	9.49		
1.68	0.00	10.48	0.84	65.51	8.30		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

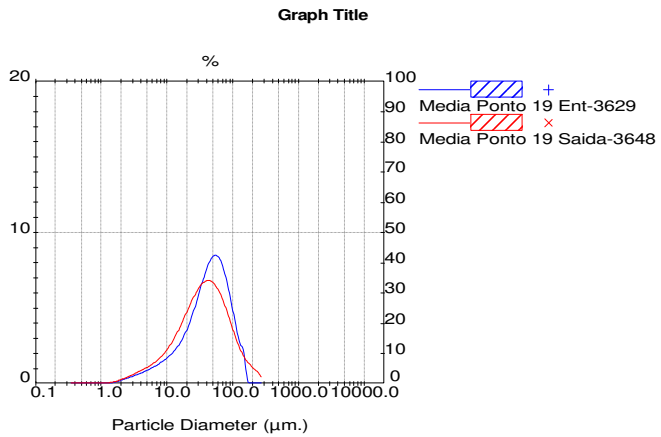
ID: Media Ponto 18 Saida | Run No: 3608 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 794 | Analysed: 26/2/2015 18:09
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 19.8 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.281 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0337 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.6699 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 16.26 um | D[3, 2] = 8.96 um
D(v, 0.1) = 4.65 um | D(v, 0.5) = 11.33 um | D(v, 0.9) = 28.55 um
Span = 2.109E+00 | Uniformity = 8.150E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.43	12.21	8.39	76.32	0.21
0.36	0.00	2.28	0.73	14.22	7.80	88.91	0.30
0.42	0.00	2.65	1.20	16.57	6.93	103.58	0.44
0.49	0.00	3.09	1.88	19.31	5.85	120.67	0.59
0.58	0.00	3.60	2.75	22.49	4.69	140.58	0.72
0.67	0.00	4.19	3.79	26.20	3.56	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	4.93	30.53	2.54	190.80	0.00
0.91	0.02	5.69	6.04	35.56	1.69	222.28	0.00
1.06	0.04	6.63	7.05	41.43	1.03	258.95	0.00
1.24	0.08	7.72	7.87	48.27	0.57	301.68	
1.44	0.14	9.00	8.42	56.23	0.30		
1.68	0.25	10.48	8.60	65.51	0.19		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 19:



Result: Analysis Table

ID: Media Ponto 19 Ent | Run No: 3629 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 795 | Analysed: 26/2/2015 18:12
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 19.2 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.738 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 163.77 um.

Conc. = 0.0800 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2706 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 49.88 um | D[3, 2] = 22.17 um
D(v, 0.1) = 10.55 um | D(v, 0.5) = 43.72 um | D(v, 0.9) = 97.92 um
Span = 1.999E+00 | Uniformity = 6.091E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.26	12.21	2.22	76.32	6.65
0.36	0.00	2.28	0.36	14.22	2.61	88.91	5.28
0.42	0.00	2.65	0.46	16.57	3.11	103.58	3.86
0.49	0.00	3.09	0.57	19.31	3.74	120.67	2.63
0.58	0.00	3.60	0.69	22.49	4.52	140.58	1.72
0.67	0.00	4.19	0.81	26.20	5.44	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.94	30.53	6.41	190.80	0.00
0.91	0.02	5.69	1.09	35.56	7.34	222.28	0.00
1.06	0.03	6.63	1.25	41.43	8.07	258.95	0.00
1.24	0.06	7.72	1.44	48.27	8.46	301.68	
1.44	0.11	9.00	1.66	56.23	8.36		
1.68	0.17	10.48	1.91	65.51	7.74		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

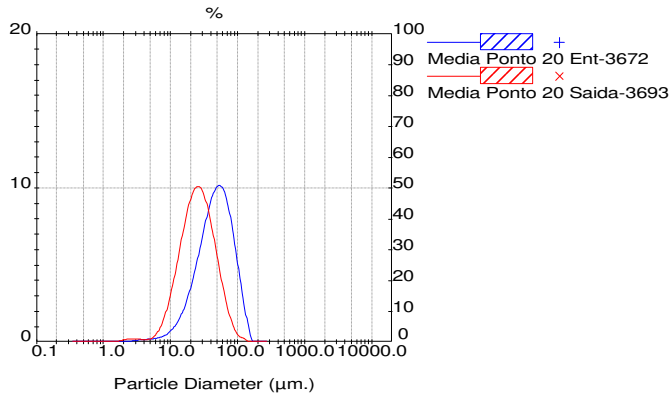
ID: Media Ponto 19 Saida | Run No: 3648 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 796 | Analysed: 26/2/2015 18:16
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 21.2 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.515 %
Modifications: None

Conc. = 0.0755 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3118 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 49.81 um | D[3, 2] = 19.24 um
D(v, 0.1) = 8.87 um | D(v, 0.5) = 36.42 um | D(v, 0.9) = 106.28 um
Span = 2.675E+00 | Uniformity = 8.520E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.31	12.21	3.07	76.32	4.74
0.36	0.00	2.28	0.43	14.22	3.64	88.91	3.86
0.42	0.00	2.65	0.57	16.57	4.26	103.58	3.01
0.49	0.00	3.09	0.70	19.31	4.91	120.67	2.27
0.58	0.00	3.60	0.84	22.49	5.54	140.58	1.72
0.67	0.00	4.19	0.98	26.20	6.09	163.77	1.33
0.78	0.00	4.88	1.15	30.53	6.52	190.80	1.05
0.91	0.00	5.69	1.33	35.56	6.77	222.28	0.77
1.06	0.06	6.63	1.55	41.43	6.80	258.95	0.42
1.24	0.08	7.72	1.83	48.27	6.60	301.68	
1.44	0.13	9.00	2.17	56.23	6.17		
1.68	0.21	10.48	2.58	65.51	5.54		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 20:



Result: Analysis Table

ID: Media Ponto 20 Ent | Run No: 3672 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 797 | Analysed: 26/2/2015 18:19
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.1 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.679 %
Modifications: None

Conc. = 0.0997 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1745 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 52.63 um | D[3, 2] = 34.38 um
D(v, 0.1) = 19.50 um | D(v, 0.5) = 47.41 um | D(v, 0.9) = 93.73 um
Span = 1.566E+00 | Uniformity = 4.857E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.03	12.21	1.41	76.32	7.56
0.36	0.00	2.28	0.07	14.22	2.03	88.91	5.72
0.42	0.00	2.65	0.10	16.57	2.83	103.58	3.78
0.49	0.00	3.09	0.14	19.31	3.83	120.67	2.03
0.58	0.00	3.60	0.16	22.49	5.01	140.58	0.67
0.67	0.00	4.19	0.18	26.20	6.32	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.20	30.53	7.65	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.24	35.56	8.85	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.32	41.43	9.74	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.45	48.27	10.14	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.66	56.23	9.91		
1.68	0.00	10.48	0.97	65.51	9.03		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

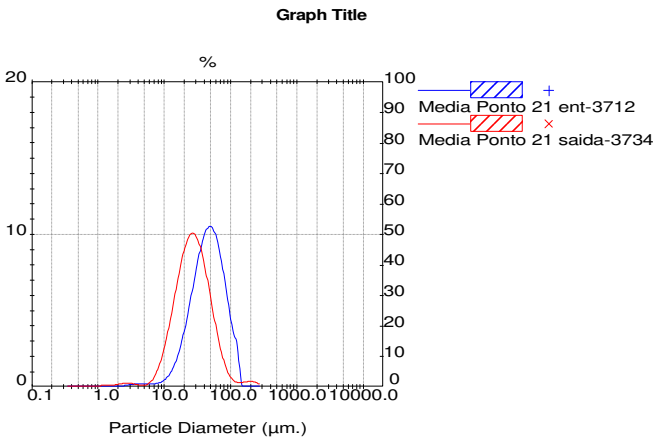
ID: Media Ponto 20 Saida | Run No: 3693 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 798 | Analysed: 26/2/2015 18:22
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 19.7 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.408 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 140.58 um.

Conc. = 0.0719 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3058 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 29.49 um | D[3, 2] = 19.62 um
D(v, 0.1) = 11.47 um | D(v, 0.5) = 25.19 um | D(v, 0.9) = 53.08 um
Span = 1.652E+00 | Uniformity = 5.232E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.16	12.21	5.60	76.32	1.28
0.36	0.00	2.28	0.20	14.22	7.13	88.91	0.64
0.42	0.00	2.65	0.22	16.57	8.48	103.58	0.31
0.49	0.00	3.09	0.20	19.31	9.52	120.67	0.21
0.58	0.00	3.60	0.16	22.49	10.03	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.16	26.20	9.95	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.26	30.53	9.29	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.53	35.56	8.14	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.02	41.43	6.67	258.95	0.00
1.24	0.04	7.72	1.78	48.27	5.07	301.68	
1.44	0.07	9.00	2.82	56.23	3.55		
1.68	0.11	10.48	4.12	65.51	2.26		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 21:



Result: Analysis Table

ID: Media Ponto 21 ent | Run No: 3712 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 799 | Analysed: 26/2/2015 18:24
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 17.5 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.782 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 0.31 um; > 140.58 um.

Conc. = 0.1127 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1745 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 51.15 um | D[3, 2] = 34.37 um
D(v, 0.1) = 20.52 um | D(v, 0.5) = 45.79 um | D(v, 0.9) = 90.66 um
Span = 1.532E+00 | Uniformity = 4.709E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.04	12.21	1.14	76.32	6.84
0.36	0.00	2.28	0.08	14.22	1.83	88.91	5.05
0.42	0.00	2.65	0.13	16.57	2.80	103.58	3.45
0.49	0.00	3.09	0.17	19.31	4.03	120.67	2.25
0.58	0.00	3.60	0.19	22.49	5.47	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.20	26.20	7.02	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.20	30.53	8.49	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.20	35.56	9.68	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.21	41.43	10.39	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.27	48.27	10.45	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.41	56.23	9.81		
1.68	0.00	10.48	0.68	65.51	8.53		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

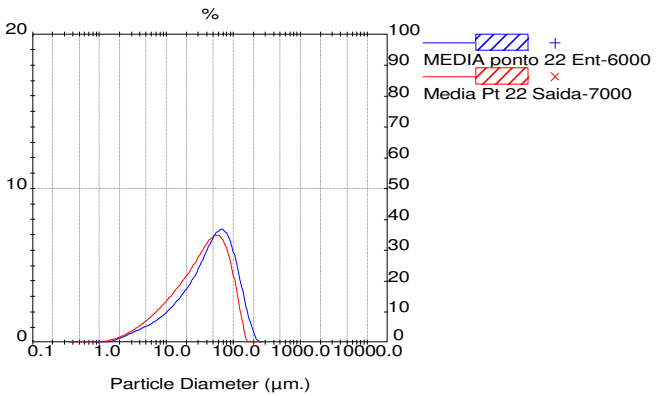
ID: Media Ponto 21 saida | Run No: 3734 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 800 | Analysed: 26/2/2015 18:27
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 19.5 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.503 %
Modifications: - | Killed Result Channels: < 1.06 um; > 301.68 um.

Conc. = 0.0697 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2985 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 33.30 um | D[3, 2] = 20.10 um
D(v, 0.1) = 12.20 um | D(v, 0.5) = 26.61 um | D(v, 0.9) = 57.63 um
Span = 1.708E+00 | Uniformity = 6.048E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.19	12.21	5.06	76.32	1.46
0.36	0.00	2.28	0.23	14.22	6.64	88.91	0.77
0.42	0.00	2.65	0.25	16.57	8.08	103.58	0.41
0.49	0.00	3.09	0.21	19.31	9.25	120.67	0.29
0.58	0.00	3.60	0.15	22.49	9.93	140.58	0.30
0.67	0.00	4.19	0.09	26.20	10.01	163.77	0.35
0.78	0.00	4.88	0.12	30.53	9.48	190.80	0.36
0.91	0.00	5.69	0.31	35.56	8.42	222.28	0.30
1.06	0.11	6.63	0.71	41.43	6.99	258.95	0.16
1.24	0.09	7.72	1.38	48.27	5.39	301.68	
1.44	0.10	9.00	2.35	56.23	3.83		
1.68	0.14	10.48	3.59	65.51	2.49		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 22:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA ponto 22 Ent | Run No: 6000 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 932 | Analysed: 2/3/2015 13:57
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 19.8 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.158 %
Modifications: None

Conc. = 0.0759 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2835 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 55.35 um | D[3, 2] = 21.17 um
D(v, 0.1) = 9.22 um | D(v, 0.5) = 46.29 um | D(v, 0.9) = 114.64 um
Span = 2.277E+00 | Uniformity = 7.105E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.32	12.21	2.50	76.32	6.95
0.36	0.00	2.28	0.45	14.22	2.83	88.91	6.20
0.42	0.00	2.65	0.58	16.57	3.19	103.58	5.11
0.49	0.00	3.09	0.71	19.31	3.59	120.67	3.82
0.58	0.00	3.60	0.84	22.49	4.03	140.58	2.53
0.67	0.00	4.19	0.97	26.20	4.55	163.77	1.40
0.78	0.00	4.88	1.10	30.53	5.14	190.80	0.57
0.91	0.00	5.69	1.26	35.56	5.77	222.28	0.10
1.06	0.01	6.63	1.45	41.43	6.39	258.95	0.00
1.24	0.05	7.72	1.66	48.27	6.93	301.68	
1.44	0.11	9.00	1.91	56.23	7.27		
1.68	0.21	10.48	2.19	65.51	7.31		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

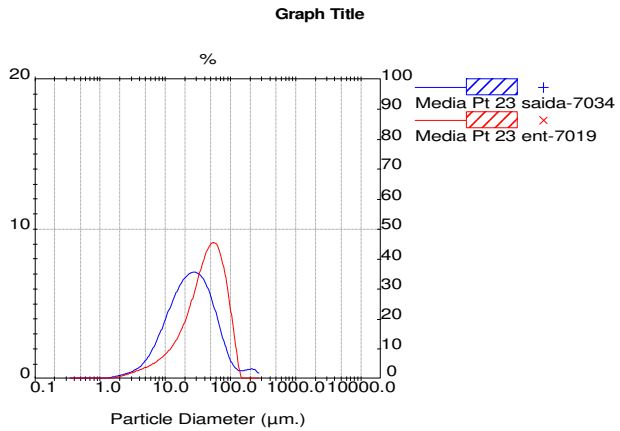
ID: Media Pt 22 Saida | Run No: 7000 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1071 | Analysed: 2/3/2015 16:14
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 20.3 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.444 %
Modifications: None

Conc. = 0.0631 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3660 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 42.66 um | D[3, 2] = 16.39 um
D(v, 0.1) = 7.21 um | D(v, 0.5) = 35.29 um | D(v, 0.9) = 90.02 um
Span = 2.346E+00 | Uniformity = 7.303E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.40	12.21	3.30	76.32	5.87
0.36	0.01	2.28	0.54	14.22	3.66	88.91	4.78
0.42	0.01	2.65	0.69	16.57	4.04	103.58	3.39
0.49	0.01	3.09	0.87	19.31	4.44	120.67	1.86
0.58	0.01	3.60	1.06	22.49	4.86	140.58	0.40
0.67	0.02	4.19	1.27	26.20	5.33	163.77	0.00
0.78	0.03	4.88	1.50	30.53	5.82	190.80	0.00
0.91	0.05	5.69	1.75	35.56	6.29	222.28	0.00
1.06	0.08	6.63	2.03	41.43	6.68	258.95	0.00
1.24	0.13	7.72	2.32	48.27	6.92	301.68	
1.44	0.20	9.00	2.63	56.23	6.92		
1.68	0.29	10.48	2.96	65.51	6.59		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 23:



Result: Analysis Table

ID: Media Pt 23 ent | Run No: 7019 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1072 | Analysed: 2/3/2015 16:19
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 20.3 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 1.951 %
Modifications: None

Conc. = 0.0880 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2532 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 46.86 um | D[3, 2] = 23.70 um
D(v, 0.1) = 11.76 um | D(v, 0.5) = 42.61 um | D(v, 0.9) = 88.18 um
Span = 1.794E+00 | Uniformity = 5.495E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.20	12.21	2.27	76.32	6.98
0.36	0.00	2.28	0.29	14.22	2.74	88.91	5.23
0.42	0.00	2.65	0.38	16.57	3.34	103.58	3.22
0.49	0.00	3.09	0.48	19.31	4.05	120.67	1.21
0.58	0.00	3.60	0.58	22.49	4.90	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.69	26.20	5.87	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.81	30.53	6.90	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.96	35.56	7.87	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.13	41.43	8.64	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	1.34	48.27	9.05	301.68	
1.44	0.01	9.00	1.58	56.23	8.95		
1.68	0.06	10.48	1.89	65.51	8.26		
1.95	0.12	12.21		76.32			

Result: Analysis Table

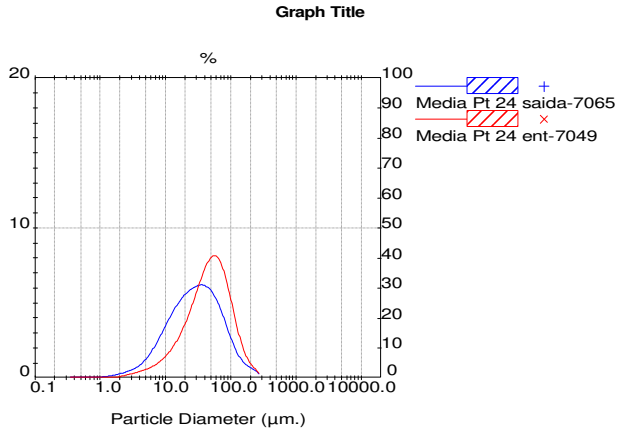
ID: Media Pt 23 saida | Run No: 7034 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1073 | Analysed: 2/3/2015 16:21
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 22.0 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.334 %
Modifications: None

Conc. = 0.0666 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3735 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 35.41 um | D[3, 2] = 16.06 um
D(v, 0.1) = 7.91 um | D(v, 0.5) = 24.83 um | D(v, 0.9) = 68.90 um
Span = 2.456E+00 | Uniformity = 8.703E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.27	12.21	5.27	76.32	2.26
0.36	0.00	2.28	0.35	14.22	5.91	88.91	1.45
0.42	0.00	2.65	0.45	16.57	6.43	103.58	0.88
0.49	0.00	3.09	0.57	19.31	6.82	120.67	0.59
0.58	0.00	3.60	0.75	22.49	7.05	140.58	0.53
0.67	0.00	4.19	1.02	26.20	7.12	163.77	0.60
0.78	0.00	4.88	1.38	30.53	6.98	190.80	0.66
0.91	0.02	5.69	1.85	35.56	6.63	222.28	0.60
1.06	0.04	6.63	2.42	41.43	6.05	258.95	0.36
1.24	0.08	7.72	3.09	48.27	5.25	301.68	
1.44	0.13	9.00	3.82	56.23	4.28		
1.68	0.20	10.48	4.56	65.51	3.25		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 24:



Result: Analysis Table

ID: Media Pt 24 ent | Run No: 7049 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1074 | Analysed: 2/3/2015 16:25
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 17.3 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.431 %
Modifications: None

Conc. = 0.0853 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2181 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 57.67 um | D[3, 2] = 27.51 um
D(v, 0.1) = 13.71 um | D(v, 0.5) = 47.32 um | D(v, 0.9) = 113.40 um
Span = 2.107E+00 | Uniformity = 6.683E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.13	12.21	2.11	76.32	6.79
0.36	0.00	2.28	0.20	14.22	2.58	88.91	5.63
0.42	0.00	2.65	0.27	16.57	3.14	103.58	4.34
0.49	0.00	3.09	0.34	19.31	3.80	120.67	3.11
0.58	0.00	3.60	0.42	22.49	4.55	140.58	2.11
0.67	0.00	4.19	0.50	26.20	5.39	163.77	1.39
0.78	0.00	4.88	0.61	30.53	6.25	190.80	0.91
0.91	0.00	5.69	0.74	35.56	7.06	222.28	0.58
1.06	0.00	6.63	0.92	41.43	7.72	258.95	0.29
1.24	0.00	7.72	1.13	48.27	8.09	301.68	
1.44	0.01	9.00	1.39	56.23	8.09		
1.68	0.06	10.48	1.71	65.51	7.65		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

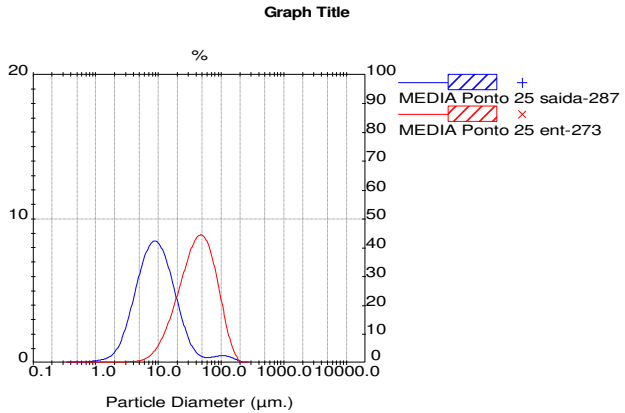
ID: Media Pt 24 saida | Run No: 7065 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1075 | Analysed: 2/3/2015 16:27
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 25.3 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.333 %
Modifications: None

Conc. = 0.0802 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3893 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 41.33 um | D[3, 2] = 15.41 um
D(v, 0.1) = 7.68 um | D(v, 0.5) = 28.73 um | D(v, 0.9) = 89.05 um
Span = 2.833E+00 | Uniformity = 9.235E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.01	1.95	0.32	12.21	4.45	76.32	3.73
0.36	0.02	2.28	0.40	14.22	4.92	88.91	2.91
0.42	0.03	2.65	0.50	16.57	5.32	103.58	2.17
0.49	0.04	3.09	0.63	19.31	5.63	120.67	1.56
0.58	0.04	3.60	0.80	22.49	5.88	140.58	1.13
0.67	0.05	4.19	1.05	26.20	6.06	163.77	0.86
0.78	0.06	4.88	1.38	30.53	6.17	190.80	0.66
0.91	0.07	5.69	1.78	35.56	6.17	222.28	0.48
1.06	0.10	6.63	2.25	41.43	6.03	258.95	0.26
1.24	0.13	7.72	2.79	48.27	5.71	301.68	
1.44	0.18	9.00	3.36	56.23	5.20		
1.68	0.25	10.48	3.92	65.51	4.52		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 25:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 25 ent | Run No: 273 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1313 | Analysed: 3/3/2015 16:51
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 15.6 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.592 %
Modifications: None

Conc. = 0.0875 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1922 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 49.89 um | D[3, 2] = 31.22 um
D(v, 0.1) = 16.33 um | D(v, 0.5) = 42.52 um | D(v, 0.9) = 93.92 um
Span = 1.825E+00 | Uniformity = 5.691E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.00	12.21	2.32	76.32	6.22
0.36	0.00	2.28	0.04	14.22	3.10	88.91	4.80
0.42	0.00	2.65	0.07	16.57	4.00	103.58	3.37
0.49	0.00	3.09	0.09	19.31	4.97	120.67	2.10
0.58	0.00	3.60	0.11	22.49	5.97	140.58	1.11
0.67	0.00	4.19	0.13	26.20	6.95	163.77	0.44
0.78	0.00	4.88	0.18	30.53	7.81	190.80	0.07
0.91	0.00	5.69	0.29	35.56	8.47	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.47	41.43	8.82	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.75	48.27	8.79	301.68	
1.44	0.00	9.00	1.14	56.23	8.33		
1.68	0.00	10.48	1.66	65.51	7.44		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

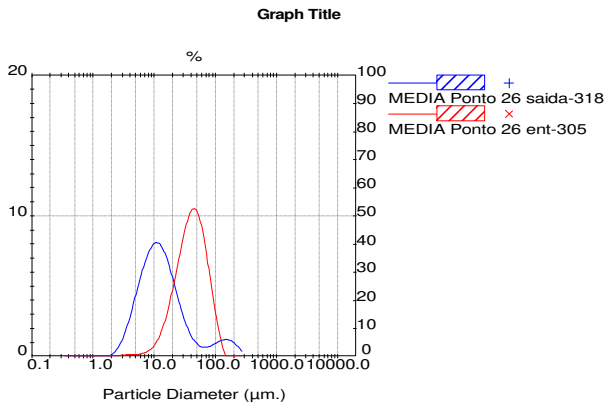
ID: MEDIA Ponto 25 saida | Run No: 287 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1314 | Analysed: 3/3/2015 16:57
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 28.2 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.222 %
Modifications: None

Conc. = 0.0393 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.8633 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 14.34 um | D[3, 2] = 6.95 um
D(v, 0.1) = 3.69 um | D(v, 0.5) = 9.07 um | D(v, 0.9) = 24.19 um
Span = 2.259E+00 | Uniformity = 9.678E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.88	12.21	7.23	76.32	0.45
0.36	0.01	2.28	1.40	14.22	6.24	88.91	0.50
0.42	0.02	2.65	2.14	16.57	5.13	103.58	0.50
0.49	0.03	3.09	3.11	19.31	4.00	120.67	0.45
0.58	0.05	3.60	4.23	22.49	2.94	140.58	0.35
0.67	0.08	4.19	5.41	26.20	2.04	163.77	0.23
0.78	0.11	4.88	6.53	30.53	1.34	190.80	0.10
0.91	0.15	5.69	7.46	35.56	0.86	222.28	0.02
1.06	0.19	6.63	8.11	41.43	0.56	258.95	0.00
1.24	0.26	7.72	8.43	48.27	0.41	301.68	
1.44	0.37	9.00	8.37	56.23	0.37		
1.68	0.56	10.48	7.96	65.51	0.40		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 26:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 26 ent | Run No: 305 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1315 | Analysed: 3/3/2015 16:59
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 13.4 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.416 %
Modifications: None

Conc. = 0.0752 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.1898 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 45.71 um | D[3, 2] = 31.60 um
D(v, 0.1) = 18.09 um | D(v, 0.5) = 41.03 um | D(v, 0.9) = 80.42 um
Span = 1.519E+00 | Uniformity = 4.721E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.00	12.21	1.81	76.32	5.59
0.36	0.00	2.28	0.04	14.22	2.67	88.91	3.69
0.42	0.00	2.65	0.09	16.57	3.81	103.58	2.05
0.49	0.00	3.09	0.12	19.31	5.08	120.67	0.81
0.58	0.00	3.60	0.15	22.49	6.50	140.58	0.00
0.67	0.00	4.19	0.16	26.20	7.94	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.16	30.53	9.23	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.20	35.56	10.15	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.29	41.43	10.48	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.44	48.27	10.15	301.68	
1.44	0.00	9.00	0.69	56.23	9.09		
1.68	0.00	10.48	1.14	65.51	7.48		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

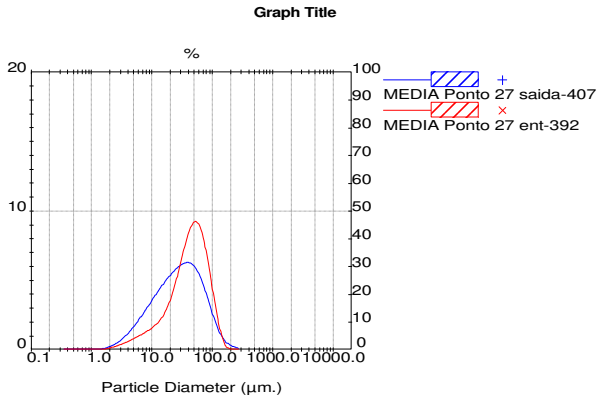
ID: MEDIA Ponto 26 saida | Run No: 318 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1316 | Analysed: 3/3/2015 17:02
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 18.0 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.324 %
Modifications: None

Conc. = 0.0327 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.6043 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 25.70 um | D[3, 2] = 9.93 um
D(v, 0.1) = 4.94 um | D(v, 0.5) = 12.10 um | D(v, 0.9) = 50.42 um
Span = 3.758E+00 | Uniformity = 1.511E+00

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.21	12.21	7.81	76.32	0.74
0.36	0.00	2.28	0.51	14.22	7.21	88.91	0.88
0.42	0.00	2.65	1.00	16.57	6.35	103.58	1.04
0.49	0.00	3.09	1.70	19.31	5.31	120.67	1.16
0.58	0.00	3.60	2.59	22.49	4.23	140.58	1.20
0.67	0.00	4.19	3.63	26.20	3.21	163.77	1.12
0.78	0.00	4.88	4.74	30.53	2.34	190.80	0.94
0.91	0.00	5.69	5.80	35.56	1.65	222.28	0.66
1.06	0.00	6.63	6.74	41.43	1.16	258.95	0.33
1.24	0.00	7.72	7.48	48.27	0.84	301.68	
1.44	0.00	9.00	7.95	56.23	0.68		
1.68	0.05	10.48	8.07	65.51	0.66		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 27:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 27 ent | Run No: 392 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1321 | Analysed: 3/3/2015 17:18
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Averaged

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.4 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.419 %
Modifications: None

Conc. = 0.0754 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2467 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 48.57 um | D[3, 2] = 24.32 um
D(v, 0.1) = 11.90 um | D(v, 0.5) = 43.41 um | D(v, 0.9) = 91.06 um
Span = 1.824E+00 | Uniformity = 5.616E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.16	12.21	2.06	76.32	6.65
0.36	0.00	2.28	0.24	14.22	2.47	88.91	4.95
0.42	0.00	2.65	0.33	16.57	3.04	103.58	3.23
0.49	0.00	3.09	0.45	19.31	3.79	120.67	1.75
0.58	0.00	3.60	0.57	22.49	4.74	140.58	0.66
0.67	0.00	4.19	0.71	26.20	5.84	163.77	0.17
0.78	0.00	4.88	0.86	30.53	7.01	190.80	0.07
0.91	0.00	5.69	1.01	35.56	8.09	222.28	0.04
1.06	0.00	6.63	1.17	41.43	8.89	258.95	0.02
1.24	0.02	7.72	1.34	48.27	9.22	301.68	
1.44	0.05	9.00	1.52	56.23	8.95		
1.68	0.10	10.48	1.75	65.51	8.06		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

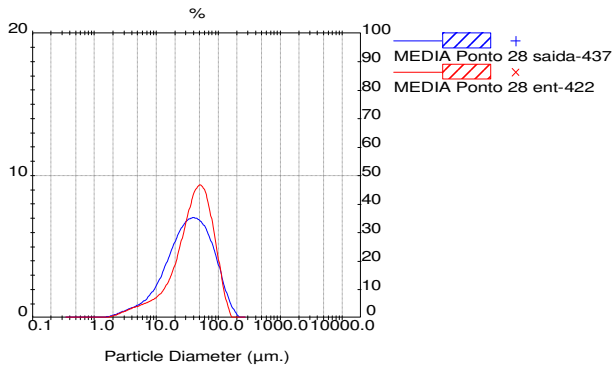
ID: MEDIA Ponto 27 saida | Run No: 407 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1322 | Analysed: 3/3/2015 17:21
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 19.9 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.353 %
Modifications: None

Conc. = 0.0589 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3739 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 38.26 um | D[3, 2] = 16.05 um
D(v, 0.1) = 7.04 um | D(v, 0.5) = 28.00 um | D(v, 0.9) = 82.00 um
Span = 2.677E+00 | Uniformity = 8.600E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.27	12.21	4.33	76.32	3.81
0.36	0.00	2.28	0.41	14.22	4.73	88.91	2.89
0.42	0.00	2.65	0.60	16.57	5.11	103.58	2.02
0.49	0.00	3.09	0.83	19.31	5.44	120.67	1.31
0.58	0.00	3.60	1.12	22.49	5.74	140.58	0.80
0.67	0.00	4.19	1.44	26.20	6.00	163.77	0.48
0.78	0.00	4.88	1.80	30.53	6.20	190.80	0.30
0.91	0.01	5.69	2.19	35.56	6.28	222.28	0.19
1.06	0.03	6.63	2.61	41.43	6.20	258.95	0.10
1.24	0.05	7.72	3.04	48.27	5.92	301.68	
1.44	0.10	9.00	3.47	56.23	5.41		
1.68	0.17	10.48	3.91	65.51	4.68		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 28:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 28 ent | Run No: 422 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1323 | Analysed: 3/3/2015 17:23
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.0 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.558 %
Modifications: None

Conc. = 0.0679 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2508 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 47.07 um | D[3, 2] = 23.93 um
D(v, 0.1) = 12.07 um | D(v, 0.5) = 42.33 um | D(v, 0.9) = 88.13 um
Span = 1.797E+00 | Uniformity = 5.494E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.18	12.21	1.99	76.32	6.40
0.36	0.00	2.28	0.28	14.22	2.48	88.91	4.68
0.42	0.00	2.65	0.40	16.57	3.14	103.58	2.99
0.49	0.00	3.09	0.52	19.31	4.00	120.67	1.53
0.58	0.00	3.60	0.64	22.49	5.03	140.58	0.46
0.67	0.00	4.19	0.76	26.20	6.20	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.87	30.53	7.38	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.98	35.56	8.42	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.09	41.43	9.11	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	1.23	48.27	9.30	301.68	
1.44	0.03	9.00	1.40	56.23	8.89		
1.68	0.10	10.48	1.64	65.51	7.87		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

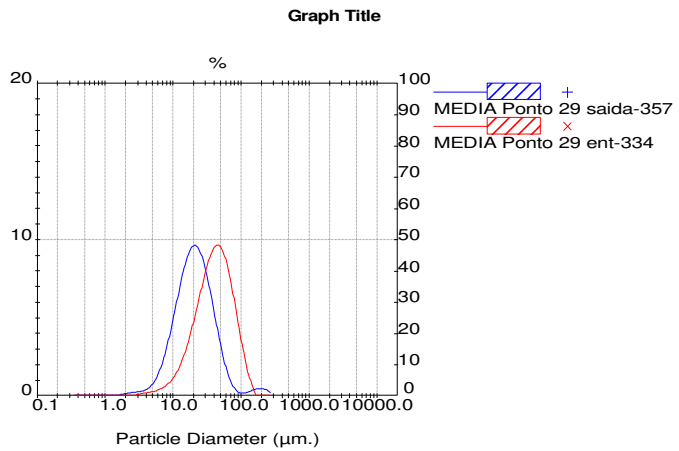
ID: MEDIA Ponto 28 saida | Run No: 437 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1324 | Analysed: 3/3/2015 17:25
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 20.1 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.474 %
Modifications: None

Conc. = 0.0749 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2946 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 44.39 um | D[3, 2] = 20.36 um
D(v, 0.1) = 9.98 um | D(v, 0.5) = 34.86 um | D(v, 0.9) = 92.49 um
Span = 2.367E+00 | Uniformity = 7.347E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.22	12.21	3.37	76.32	5.01
0.36	0.00	2.28	0.33	14.22	4.09	88.91	4.07
0.42	0.00	2.65	0.44	16.57	4.83	103.58	3.04
0.49	0.00	3.09	0.56	19.31	5.53	120.67	2.05
0.58	0.00	3.60	0.68	22.49	6.14	140.58	1.20
0.67	0.00	4.19	0.81	26.20	6.60	163.77	0.58
0.78	0.00	4.88	0.96	30.53	6.89	190.80	0.20
0.91	0.00	5.69	1.15	35.56	7.02	222.28	0.01
1.06	0.03	6.63	1.40	41.43	6.97	258.95	0.00
1.24	0.05	7.72	1.73	48.27	6.76	301.68	
1.44	0.08	9.00	2.17	56.23	6.38		
1.68	0.14	10.48	2.72	65.51	5.80		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 29:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 29 ent | Run No: 334 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1317 | Analysed: 3/3/2015 17:05
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 18.3 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.593 %
Modifications: None

Conc. = 0.1001 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2010 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 46.46 um | D[3, 2] = 29.85 um
D(v, 0.1) = 16.31 um | D(v, 0.5) = 40.80 um | D(v, 0.9) = 84.89 um
Span = 1.681E+00 | Uniformity = 5.223E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.00	12.21	2.14	76.32	5.72
0.36	0.00	2.28	0.03	14.22	2.93	88.91	4.07
0.42	0.00	2.65	0.08	16.57	3.92	103.58	2.56
0.49	0.00	3.09	0.14	19.31	5.05	120.67	1.34
0.58	0.00	3.60	0.20	22.49	6.27	140.58	0.47
0.67	0.00	4.19	0.25	26.20	7.49	163.77	0.00
0.78	0.00	4.88	0.30	30.53	8.56	190.80	0.00
0.91	0.00	5.69	0.40	35.56	9.32	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	0.54	41.43	9.62	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	0.76	48.27	9.38	301.68	
1.44	0.00	9.00	1.06	56.23	8.57		
1.68	0.00	10.48	1.51	65.51	7.29		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

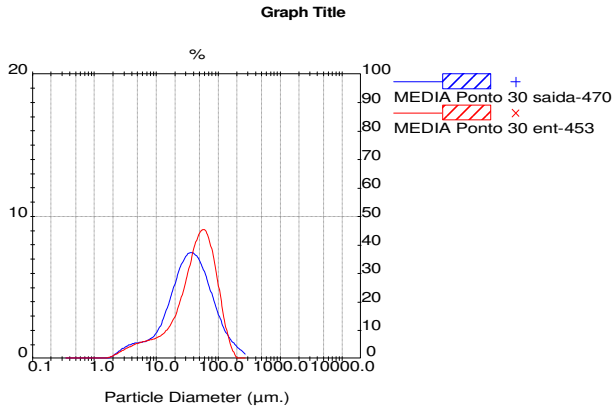
ID: MEDIA Ponto 29 saida | Run No: 357 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1318 | Analysed: 3/3/2015 17:08
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 23.6 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.322 %
Modifications: None

Conc. = 0.0707 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.4195 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 27.20 um | D[3, 2] = 14.30 um
D(v, 0.1) = 8.78 um | D(v, 0.5) = 20.41 um | D(v, 0.9) = 45.63 um
Span = 1.806E+00 | Uniformity = 7.009E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.02	1.95	0.17	12.21	7.37	76.32	0.43
0.36	0.04	2.28	0.22	14.22	8.55	88.91	0.21
0.42	0.06	2.65	0.26	16.57	9.32	103.58	0.19
0.49	0.07	3.09	0.30	19.31	9.61	120.67	0.28
0.58	0.07	3.60	0.38	22.49	9.33	140.58	0.39
0.67	0.06	4.19	0.56	26.20	8.52	163.77	0.47
0.78	0.05	4.88	0.91	30.53	7.30	190.80	0.47
0.91	0.04	5.69	1.48	35.56	5.83	222.28	0.38
1.06	0.03	6.63	2.30	41.43	4.30	258.95	0.21
1.24	0.04	7.72	3.36	48.27	2.90	301.68	
1.44	0.07	9.00	4.64	56.23	1.75		
1.68	0.12	10.48	6.01	65.51	0.92		
1.95		12.21		76.32			

Ponto 30:



Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 30 ent | Run No: 453 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1325 | Analysed: 3/3/2015 17:27
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.1 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.644 %
Modifications: None

Conc. = 0.0635 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.2667 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 51.34 um | D[3, 2] = 22.49 um
D(v, 0.1) = 9.97 um | D(v, 0.5) = 46.17 um | D(v, 0.9) = 98.07 um
Span = 1.908E+00 | Uniformity = 5.805E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.27	12.21	1.79	76.32	7.27
0.36	0.00	2.28	0.42	14.22	2.11	88.91	5.70
0.42	0.00	2.65	0.58	16.57	2.56	103.58	4.00
0.49	0.00	3.09	0.75	19.31	3.18	120.67	2.45
0.58	0.00	3.60	0.90	22.49	4.00	140.58	1.24
0.67	0.00	4.19	1.02	26.20	5.01	163.77	0.45
0.78	0.00	4.88	1.11	30.53	6.16	190.80	0.02
0.91	0.00	5.69	1.20	35.56	7.32	222.28	0.00
1.06	0.00	6.63	1.27	41.43	8.31	258.95	0.00
1.24	0.00	7.72	1.35	48.27	8.94	301.68	
1.44	0.04	9.00	1.44	56.23	9.01		
1.68	0.14	10.48	1.58	65.51	8.44		
1.95		12.21		76.32			

Result: Analysis Table

ID: MEDIA Ponto 30 saida | Run No: 470 | Measured:
File: EXPMRLGL | Rec. No: 1326 | Analysed: 3/3/2015 17:29
Path: C:\SIZERMU\DATA\ | Source: Analysed

Sampler: | Measured Beam Obscuration: 16.9 %
Presentation: 4_EMCAO | Analysis: Polydisperse | Residual: 0.471 %
Modifications: None

Conc. = 0.0582 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 0.3054 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 46.83 um | D[3, 2] = 19.65 um
D(v, 0.1) = 9.27 um | D(v, 0.5) = 34.77 um | D(v, 0.9) = 97.54 um
Span = 2.539E+00 | Uniformity = 8.047E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.31	0.00	1.95	0.29	12.21	2.87	76.32	4.26
0.36	0.00	2.28	0.49	14.22	3.70	88.91	3.38
0.42	0.00	2.65	0.70	16.57	4.62	103.58	2.60
0.49	0.00	3.09	0.89	19.31	5.54	120.67	1.95
0.58	0.00	3.60	1.03	22.49	6.37	140.58	1.46
0.67	0.00	4.19	1.10	26.20	7.00	163.77	1.10
0.78	0.00	4.88	1.14	30.53	7.37	190.80	0.82
0.91	0.00	5.69	1.19	35.56	7.43	222.28	0.55
1.06	0.00	6.63	1.28	41.43	7.20	258.95	0.28
1.24	0.00	7.72	1.44	48.27	6.70	301.68	
1.44	0.01	9.00	1.73	56.23	6.00		
1.68	0.12	10.48	2.21	65.51	5.16		
1.95		12.21		76.32			