UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GOTAS DE EMULSÕES ÁGUA-EM-ÓLEO EM ESCOAMENTO LAMINAR VERTICAL E HORIZONTAL

LIGIA GAIGHER FRANCO

VITÓRIA

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GOTAS DE EMULSÕES ÁGUA-EM-ÓLEO EM ESCOAMENTO LAMINAR VERTICAL E HORIZONTAL

Autora: **Ligia Gaigher Franco**

Orientador: **Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira**

Coorientador: **Prof. Dr. Rogério Ramos**

Curso: **Doutorado em Engenharia Mecânica**

Área de Conhecimento: **Ciências Mecânicas**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica.

VITÓRIA

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GOTAS DE EMULSÕES ÁGUA-EM-ÓLEO EM ESCOAMENTO LAMINAR VERTICAL E HORIZONTAL

Autora: **Ligia Gaigher Franco**

Orientador: **Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira**

Coorientador: **Prof. Dr. Rogério Ramos**

Banca avaliadora:

Prof. Dra. Ana Paula Meneguelo

Programa de Pós-Graduação em Energia
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Prof. Dr. Marcos Aurélio de Souza

Instituto de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Prof. Dr. Oscar Maurício Hernandez Rodriguez

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)
Universidade de São Paulo (USP)

VITÓRIA

2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GOTAS EM EMULSÕES ÁGUA-EM-ÓLEO EM ESCOAMENTO LAMINAR VERTICAL E HORIZONTAL

LIGIA GAIGHER FRANCO

COMISSÃO EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira
Orientador – PPGEM/UFES

_____
Prof. Dr. Rogério Ramos
Coorientador - PPGEM /UFES

_____
Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro
Examinador Interno – DEM/UFES

_____
Profª Drª Ana Paula Meneguelo
Examinadora Interna – PPGEN/UFES

_____
Prof. Dr. Marcos Aurélio de Souza
Examinador Externo – UNIFEI

_____
Prof. Dr. Oscar Maurício Hernandez Rodriguez
Examinador Externo – PPGEM-EESC/USP

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica.

Vitória/ES, 24 de agosto de 2026.

Documento assinado eletronicamente nos moldes do art. 10 da MP 2200/01 e Lei 14063/20
[Hash SHA256] db37a8b9cbcfcac7f51d2a3405e9eb38bf94ef6b9b0e04191e098ca9c5d6d740

Datas e horários baseados em Brasília, Brasil
Sincronizado com o NTP.br e Observatório Nacional (ON) em 28/08/2026 às 16:07:57

Folha aprovação TESE LIGIA GAIGHER FRANCO

Data e Hora de Criação: 27/08/2026 às 23:01:23

Documentos que originaram esse envelope:
- Folha aprovação TESE LIGIA GAIGHER FRANCO.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)

Hashs únicas referente à esse envelope de documentos

[SHA256]: db37a8b9cbcfcac7f51d2a3405e9eb38bf94ef6b9b0e04191e098ca9c5d6d740
[SHA512]: 1f01c09c2421a42f46e9066d4bd04963b3c902e992ac124efb35f5b0e4eb44145f6acf11db99ec209b9bb07010325a66688d5f86127d76699f00ad968d287b68

Lista de assinaturas solicitadas e associadas à esse envelope

ASSINADO - Ana Paula Meneguelo (ana.meneguelo@ufes.br)
Data/Hora: 28/08/2026 - 16:07:57, IP: 179.174.156.111, Geolocalização: [-18.72315, -39.842535]
[SHA256]: 73bc01dc203f70470894e12391df599a5f72b414e7786591a8d8ccb88c1fce51
Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)

ASSINADO - Bruno Venturini Loureiro (bruno.loureiro@ufes.br)
Data/Hora: 28/08/2026 - 08:38:57, IP: 128.201.242.50, Geolocalização: [-20.166658, -40.215536]
[SHA256]: 43e7c0e60908dc3541f1cc0250d888d08785fb72c596d52575e2770c10af62cb
Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)

ASSINADO - Marcos Aurélio de Souza (maurelio@unifei.edu.br)
Data/Hora: 28/08/2026 - 05:07:01, IP: 179.221.49.197, Geolocalização: [-21.7829, -46.5938]
[SHA256]: a8866bf21c74f00eba33defe6aa5027f1e0f8a200e8e2af81dc144fc3fefc5ef
Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)

ASSINADO - Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez (oscarmhr@sc.usp.br)
Data/Hora: 28/08/2026 - 08:25:03, IP: 143.107.184.222
[SHA256]: 9d4dc6b3a530b0c40e6600239f12e067b7506fba59f52b01d446386cacc1b3eb
Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)

ASSINADO - Renato Nascimento Siqueira (renatons.ifes@gmail.com)
Data/Hora: 28/08/2026 - 11:53:12, IP: 177.221.120.242, Geolocalização: [-20.294929, -40.299776]
[SHA256]: 2027eab1a0f4b57277c02006c93da3103f755baf0279c99d51d344ec75ebe275
Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)

ASSINADO - Rogerio Ramos (rogerio.ramos@ufes.br)
Data/Hora: 27/08/2026 - 23:01:56, IP: 187.36.129.35, Geolocalização: [-20.288973, -40.293973]
[SHA256]: f18ff55f34322808f260475b9a7f013a7edb7a87d650f1e4c38a69af111c56a2
Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)

Histórico de eventos registrados neste envelope

28/08/2026 16:07:57 - Envelope finalizado por ana.meneguelo@ufes.br, IP 179.174.156.111
28/08/2026 16:07:57 - Assinatura realizada por ana.meneguelo@ufes.br, IP 179.174.156.111
28/08/2026 16:07:52 - Envelope visualizado por ana.meneguelo@ufes.br, IP 179.174.156.111
28/08/2026 11:53:12 - Assinatura realizada por renatons.ifes@gmail.com, IP 177.221.120.242
28/08/2026 08:38:57 - Signature carried out por bruno.loureiro@ufes.br, IP 128.201.242.50
28/08/2026 08:38:53 - Envelope viewed por bruno.loureiro@ufes.br, IP 128.201.242.50
28/08/2026 08:25:03 - Assinatura realizada por oscarmhr@sc.usp.br, IP 143.107.184.222
28/08/2026 05:07:01 - Assinatura realizada por maurelio@unifei.edu.br, IP 179.221.49.197
28/08/2026 05:06:57 - Envelope visualizado por maurelio@unifei.edu.br, IP 179.221.49.197
27/08/2026 23:01:56 - Assinatura realizada por rogerio.ramos@ufes.br, IP 187.36.129.35
27/08/2026 23:01:41 - Envelope registrado na Blockchain por rogerio.ramos@ufes.br, IP 187.36.129.35
27/08/2026 23:01:41 - Envelope encaminhado para assinaturas por rogerio.ramos@ufes.br, IP 187.36.129.35
27/08/2026 23:01:23 - Envelope criado por rogerio.ramos@ufes.br, IP 187.36.129.35

Documento assinado digitalmente em conformidade com o padrão ICP-Brasil e validado segundo as diretrizes do Instituto Nacional de Tecnologia da Informação (ITI), em atendimento à Medida Provisória nº 2.200-2/2001 e à Lei nº 14.063/2020.

Os registros de assinatura presentes nesse documento pertencem única e exclusivamente a esse envelope.
Documento final gerado e certificado por **Universidade Federal do Espírito Santo**

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

Gaigher Franco, Ligia Gaigher Franco, 1995-

G137p

Estudo Experimental da Evolução da Distribuição do Tamanho de Gotas de Emulsões Água-em-Óleo em Escoamento Laminar Vertical e Horizontal / Ligia Gaigher Franco Gaigher Franco. - 2026.

200 p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Renato do Nacimento Siqueira.

Coorientador: Prof. Dr. Rogério Ramos.

Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Emulsão água-em-óleo. 2. Gotas. 3. Quebra. 4. Coalescência. 5. Distribuição do Tamanho de Gotas. I. do Nacimento Siqueira, Prof. Dr. Renato. II. Ramos, Prof. Dr. Rogério. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621

Aos meus pais, Juscélio e Estélida, e à minha irmã Luisa, pelo amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Jornada da Tese de Doutorado foi longa e árdua, com diversos tropeços e aprendizados no caminho. E se hoje você lê esse texto, saiba que várias pessoas contribuíram expressivamente, de forma direta ou indireta, para a conclusão do doutorado.

Agradeço a Deus pela força, sabedoria e bênçãos ao longo de toda a minha vida.

Agradeço aos meus pais, Juscélio e Estélida, por serem meu maior exemplo de honestidade, força e propósito. Vocês demonstram diariamente que o compromisso e dedicação são o caminho para o progresso. À minha irmã, Luisa, agradeço por se fazer presente mesmo com a distância, com carinho e apoio.

A Rogério Ramos, meu orientador, coorientador, amigo, chefe e parceiro de projetos. Agradeço pelas oportunidades, confiança e paciência nesses 10 anos de trabalho em conjunto na UFES, passando por graduação, mestrado e agora o doutorado. Sua convicção no meu potencial foi fundamental para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao meu orientador, professor Renato do Nascimento Siqueira, minha gratidão pela orientação e ensinamentos durante o doutorado, não só pelo conhecimento técnico-científico transmitido, mas nos ensinamentos valiosos que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Núcleo de Escoamento e Medição de Óleo e Gás (NEMOG), pela disponibilização da infraestrutura e competências tecnológicas, além das experiências profissionais que têm me proporcionado.

Agradeço aos meus colegas do NEMOG, principalmente àqueles que ajudaram diretamente nos experimentos. Murilo Zucatelli, pela ajuda com os tratamentos de dados e organização dos testes. Rayane Corona, pelos ensinamentos de formulação e análise das emulsões. Ulisses Reis, por seu capricho com as instrumentações e calibrações dos sensores utilizados. Felipe Paiva, pela automação e controle do circuito de testes. Aos graduandos Marcos Petroni e Júlia Mathias, pelo auxílio nos experimentos e análises. Aos colegas Edimilson Kempin e Juliana Roberti, meus primeiros orientandos de graduação, pelo projeto conceitual, detalhado e acompanhamento minucioso da montagem e comissionamento do circuito. Ao graduando Rondinelly Soares, pelo auxílio em análises na reta final do doutorado.

Agradeço a empresa 2Solve, representada pelo Maurício Calheiros, pela montagem do circuito de testes e auxílio na realização dos experimentos.

Aos colegas de laboratórios parceiros que auxiliaram na realização de análises: Cristina Sad do Laboratório de Caracterização de Petróleo (LabPetro/NCQP/UFES), Kelvin Barbosa e professor Edson Soares do Laboratório de Reologia (LabReo/UFES), professor Bruno Venturini do Laboratório de Métodos Experimentais em Fenômenos de Transportes (LaMEFT/UFES), Marcos Petroni e professor Wanderson Romão do Laboratório de Petroleômica (IFES). Ao professor Marcos Aurélio de Souza (NUSEC/UNIFEI), pelo empréstimo de instrumentação, em um momento crítico dos testes.

Agradeço a banca examinadora por ter aceitado o convite. Aos professores Ana Paula Meneguelo, Bruno Venturini Loureiro e Oscar Maurício Hernandez Rodriguez, suas ponderações na qualificação foram fundamentais para evolução do trabalho e finalização da tese de doutorado.

A Petrobras, pelo suporte financeiro para realização deste trabalho, através dos projetos 2018/00482-9 e 2018/00483-5. Aos colegas do CENPES com quem trabalhei nos últimos anos: Luiz Augusto de Andrade, Luiz Octávio Pereira e Elpídio Martins Júnior. Em especial, ao Eng. Dr. Erick Fabrizio Quintella Andrade Coêlho (*In memoriam*), idealizador do circuito de emulsões, expresso minha gratidão por suas inúmeras contribuições. Sua visão abrangente, como engenheiro e como pesquisador entusiasta, marcaram todas as etapas do desenvolvimento desta tese, e seu legado permanece inspirando este e futuros projetos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e a Universidade Federal do Espírito Santo, instituição que me proporcionou a formação como graduada, mestre e doutora em Engenharia Mecânica.

RESUMO

Emulsões são frequentemente formadas durante o escoamento de líquidos imiscíveis em sistemas industriais, em decorrência das tensões hidrodinâmicas que promovem a dispersão de uma fase na outra. O cisalhamento e a turbulência modificam a distribuição do tamanho de gotas (DTG), devido à deformação e colisão entre gotas, que podem resultar na quebra ou coalescência. O diâmetro das gotas é um parâmetro de grande relevância em engenharia, pois influência a estabilidade das gotas, a eficiência dos processos de separação de fases, as propriedades físico-químicas e na perda de carga do escoamento. Apesar dos avanços nas pesquisas sobre o tema, ainda há lacunas tanto na modelagem numérica quanto nos modelos empíricos para descrever a evolução da DTG em emulsões concentradas, sobretudo na previsão do tamanho de gotas, pois a quebra e coalescência de gotas são mecanismos concorrentes. Esta tese investiga experimentalmente os mecanismos de evolução da DTG em emulsões água-em-óleo (A/O) escoando em regime laminar nas direções vertical ascendente e horizontal, representando escoamentos típicos da indústria. O estudo pretende contribuir para o entendimento dos mecanismos de quebra e coalescência por cisalhamento em escoamento internos, utilizando emulsões A/O com fração volumétrica de fase dispersa entre 5% e 20% (v/v) de água, em condições pouco exploradas na literatura. As emulsões são compostas por óleo mineral, surfactante Triton X-114, água deionizada e NaCl, gerando emulsões metaestáveis. Os experimentos foram realizados no circuito de escoamento de emulsões do laboratório NEMOG/UFES, em que as emulsões escoam em regime de batelada. Amostras das emulsões são coletadas em dispositivos amostradores de emulsão instalados no início e no fim dos trechos vertical ascendente e horizontal, e DTG é determinada por difração a laser. Foi desenvolvido um método para reciclagem de emulsões, baseado no reaproveitamento da emulsão escoada após cada batelada de teste, com comportamento validado por meio da análise da DTG. No escoamento vertical ascendente, observou-se a predominância da quebra de gotas e relação da evolução da DTG principalmente com o número de Capilaridade e com o diâmetro inicial das gotas, evidenciando que o histórico hidrodinâmico da emulsão afeta sua estabilidade ao escoamento. Já no escoamento horizontal, foi identificado o aumento do tamanho das gotas, consistente com a predominância dos mecanismos de coalescência em tubulações horizontais longas, também relacionado principalmente com o número de Capilaridade. Os resultados demonstram que a evolução da DTG em emulsões A/O escoando em regime laminar não é governada exclusivamente pelas tensões hidrodinâmicas do escoamento sobre as gotas, mas também pela estrutura inicial da emulsão, que determinam a competição entre os mecanismos de quebra e coalescência.

Palavras-chave: Emulsão água-em-óleo, Gotas, Quebra, Coalescência, Distribuição do Tamanho de Gotas.

ABSTRACT

Emulsions are frequently formed during the flow of immiscible liquids in industrial applications due to hydrodynamic stresses that promote the dispersion of one liquid phase into another. Shear and turbulence continuously modify the droplet size distribution (DSD) through droplet deformation and collisions, which may result in droplet breakup or coalescence processes. Droplet size is a key parameter governing emulsion stability, phase separation efficiency, physicochemical properties, and pressure drop during flow. Despite significant advances in this field, important gaps remain in both numerical and empirical approaches for describing the evolution of the DSD in concentrated emulsions, particularly in predicting droplet size owing to the complex interplay mechanisms of droplet breakup and coalescence. This thesis experimentally investigates the mechanisms governing the evolution of the DSD in water-in-oil (W/O) emulsions flowing under laminar conditions through vertical upward and horizontal pipelines, representative of flow configurations commonly encountered in the petroleum industry. The study aims to improve the understanding of shear-induced droplet breakup and coalescence in internal flows by investigating W/O emulsions with dispersed-phase volume fractions ranging from 5% to 20 (v/v) of water under operating conditions that remain scarcely explored in the literature. The emulsions were formulated using mineral oil, Triton X-114 surfactant, deionized water, and sodium chloride (NaCl) to obtain metastable emulsions. The experiments were conducted in the emulsion flow loop at the NEMOG laboratory, operating in batch mode. Emulsion samples were collected at the inlet and outlet of the test sections, and the droplet size distribution was determined by laser diffraction. An emulsion recycling procedure was developed based on the reuse of the emulsion after each batch, and its validity was validated through the analysis of the DSD. In the vertical upward flow, droplet breakup was identified as the predominant mechanism, and the evolution of the DSD was found to be primarily associated with the Capillary number and the initial droplet size, demonstrating that the hydrodynamic history of the emulsion affects its flow stability. In contrast, horizontal flow promoted an increase in droplet size, consistent with the predominance of droplet coalescence in long horizontal pipelines, which was also primarily associated with the Capillary number. This thesis demonstrates that the evolution of the DSD in W/O emulsions flowing under laminar conditions is governed not solely by the hydrodynamic stresses acting on the droplets but also by the initial emulsion structure, which influence the competition between droplet breakup and coalescence.

Keywords: Water-in-oil Emulsion, Drops, Breakup, Coalescence, Droplet Size Distribution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da produção de petróleo no Brasil em 2025, em mil barris de óleo equivalentes por dia (Mboe/d)..... 29

Figura 2 - Produção de petróleo, gás natural e água nos cinco principais produtores de petróleo do pré-sal em dezembro de 2025..... 30

Figura 3 - Produção de petróleo, gás natural e água nos cinco principais produtores de petróleo do pós-sal na Bacia de Campos em dezembro de 2025 30

Figura 4 – Evolução da produção científica anual nos últimos 15 anos conforme pesquisa bibliométrica nas bases de dados Web of Science e Scopus..... 32

Figura 5 - Principais periódicos científicos dos artigos publicados nos últimos 15 anos conforme pesquisa bibliométrica nas bases de dados Web of Science e Scopus 33

Figura 6 - Países com maior número de publicações resultantes da pesquisa bibliométrica ... 33

Figura 7 - Nuvem de palavras resultantes da pesquisa bibliométrica 34

Figura 8 – Classificação de emulsão em emulsões água-em-óleo, óleo-em-água e emulsões múltiplas..... 40

Figura 9 - Distribuição de tamanho de gotas em emulsões estáveis, metaestáveis e instáveis 41

Figura 10 – Emulsões A/O com fração volumétrica de: a) 2% H_2O e b) 20% H_2O..... 42

Figura 11 - Ilustração da quebra de gotas em escoamentos laminares: a) cisalhamento simples e b) escoamento extensional..... 44

Figura 12 – Esquemático da ruptura de uma gota esférica em duas gotas filhas e gota satélite 47

Figura 13 - Curvas de estabilidade de gotas em escoamentos de cisalhamento simples e extensionais em função da razão de viscosidade e número de capilaridade 48

Figura 14 - Deformação de gotas em diferentes tipos de campos de cisalhamento..... 49

Figura 15 – Esquema do regime de quebra de gotas em escoamentos: a) Sub regime inercial e b) Sub regime viscoso 51

Figura 16 - Esquemático da colisão entre duas gotas e subsequente coalescência, aglomeração ou repulsão 55

Figura 17 – Visão geral do procedimento experimental proposto para avaliação da distribuição do tamanho de gotas de emulsões 60

Figura 18 – Processo de preparo de emulsões..... 61

Figura 19 - Laboratório de preparo e caracterização de emulsões (NEMOG/UFES) 62

Figura 20 – Densímetro digital DSA5000M 63

Figura 21 – Célula de medição DG41 com cilindros coaxiais utilizada para caracterização reológica das emulsões 64

Figura 22 – Difratômetro a laser modelo Bettersizer ST 68

Figura 23 - Fotomicrografia de emulsões A/O com fração volumétrica de fase dispersa entre 5% e 20% de água 68

Figura 24 – Titulador Metrohm Titrino Plus 870, utilizado para medição da fração volumétrica de água por Karl Fisher 69

Figura 25 - Tensiômetro SEO Phoenix MT, utilizado para medição da tensão interfacial 70

Figura 26 - Visão geral do circuito de testes para avaliação da DTG de emulsões, detalhando os pontos de extração de emulsões usados neste trabalho 71

Figura 27 - Diagrama P&ID do circuito de testes de emulsão, destacando os trechos em análise de DTG 72

Figura 28 - Croqui do circuito de escoamento de emulsões, com dimensões em metros 73

Figura 29 – Croqui interno do dispositivo de amostragem de emulsão em escoamento 75

Figura 30 - Ilustração do dispositivo utilizado para coleta de emulsões em escoamento 76

Figura 31 – Sistema supervisório – visão geral da bancada de testes 78

Figura 32 – Tela de controle do sistema supervisório 79

Figura 33 – Fotomicrografia da superfície, meio e fundo da emulsão armazenada no tanque TQ-1 81

Figura 34 – Gota da fase óleo imersa em fase água no teste de tensão interfacial 87

Figura 35 - Massa específica da fase óleo e fase água 88

Figura 36 – Caracterização reológica da fase aquosa 88

Figura 37 – Caracterização reológica da fase oleosa 88

Figura 38 - Massa específica das emulsões 90

Figura 39 - Análise da modelagem da massa específica de emulsões pelo modelo homogêneo: a) Previsão do modelo, b) Erro do modelo 91

Figura 40 - Curva de viscosidade das emulsões 91

Figura 41 – Curvas de fluxo das emulsões 92

Figura 42 - Análise de modelos de previsão da viscosidade dinâmica de emulsões 94

Figura 43 – Viscosidade dinâmica em função da temperatura (Taxa de cisalhamento 500 s^{-1}) 95

Figura 44 - Distribuição do tamanho de gotas de emulsões novas (EN): a) A-EN (6,7% A/O), b) B-EN (12,5% A/O), c) C-EN (18,5% A/O) e d) D-EN (22,5% A/O) 96

Figura 45 - Frequência volumétrica acumulada do tamanho de gotas de emulsões novas (EN): a) A-EN (7,0% A/O), b) B-EN (12,7% A/O), c) C-EN (18,8% A/O) e d) D-EN (22,9% A/O) 97

Figura 46 – Distribuição do tamanho de gotas de emulsões reutilizadas (ER): a) A-ER (7,0% A/O), b) B-ER (12,7% A/O), c) C-ER (18,8% A/O) e d) D-ER (22,9% A/O) 99

Figura 47 –Frequência volumétrica acumulada do tamanho de gotas de emulsões reutilizadas (ER): a) A-ER (7,0% A/O), b) B-ER (12,7% A/O), c) C-ER (18,8% A/O) e d) D-ER (22,9% A/O) 100

Figura 48 - Distribuição do tamanho de gotas de emulsões com variação no período de cisalhamento no dispersor (EPV): a) A-EPV (8,3% A/O), b) B-EPV (14,3% A/O), c) C-EPV (20,8% A/O) e d) D-EPV (26,0% A/O) 102

Figura 49 – Frequência volumétrica acumulada do tamanho de gotas de emulsões com variação no período de cisalhamento no dispersor (EPV): a) A-EPV (8,3% A/O), b) B-EPV (14,3% A/O), c) C-EPV (20,8% A/O) e d) D-EPV (26,0% A/O) 103

Figura 50 - Relação entre diâmetros característicos e fração volumétrica de água nas emulsões EN, ER e EPV 105

Figura 51 – Distribuição de tamanho de gotas inicial das emulsões, coletadas antes dos experimentos na bancada de testes 111

Figura 52 - Gráficos tipo violino para parâmetros de dispersão das DTGs iniciais 112

Figura 53 – Fotomicrografia de emulsões com 5% (a) e 20% (b) A/O, imagens obtidas utilizando lente objetiva de 20x 114

Figura 54 - Comparação da DTG de emulsões coletadas no tanque inferior 114

Figura 55 – Validação da bancada de testes com óleo mineral 115

Figura 56 – Validação da bancada de testes com emulsões 116

Figura 57 - Relação entre o número de Capilaridade e o $d_{max} = D_{v99}$ nos dispositivos extratores de emulsão 117

Figura 58 - Relação entre o número de Reynolds, taxa de cisalhamento e taxa de dissipação de energia 118

Figura 59 - DTG de emulsões em sistema de tubulação vertical ascendente, com variação da fração volumétrica de água ($We_{global} = 6$) 120

Figura 60 - DTG em emulsões A/O com 5% H_2O escoando em trecho vertical ascendente com redução do tamanho das gotas 123

Figura 61 - DTG em emulsões A/O com 5% H_2O escoando em trecho vertical ascendente com pequena variação do tamanho de gotas 123

Figura 62 – Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 5% (v/v) H_2O escoando no trecho vertical ascendente em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho 124

Figura 63 - DTG em emulsões A/O com 10% H_2O escoando em trecho vertical ascendente com maior redução dos diâmetros de gotas 127

Figura 64 - DTG em emulsões A/O com 10% H_2O escoando em trecho vertical ascendente em testes com aumento dos diâmetros característicos 128

Figura 65 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 10% (v/v) H_2O escoando no trecho vertical ascendente em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho 128

Figura 66 - DTG em emulsões A/O com 15% H_2O em escoamento vertical ascendente em testes com aumento dos diâmetros característicos 131

Figura 67 - DTG em emulsões A/O com 15% H_2O em escoamento vertical ascendente com redução dos diâmetros de gotas 131

Figura 68 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 15% (v/v) H_2O escoando no trecho vertical ascendente em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho 132

Figura 69 - DTG em emulsões A/O com 20% H_2O escoando em trecho vertical ascendente com redução dos diâmetros de gotas 134

Figura 70 - DTG em emulsões A/O com 20% H_2O escoando em tubulação vertical ascendente em testes com coalescência de gotas 135

Figura 71 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 20% (v/v) H_2O escoando no trecho vertical ascendente em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho 136

Figura 72 - Variação dos diâmetros característicos no trecho vertical ascendente com Weber e Reynolds 138

Figura 73 - DTG de emulsões em sistema de tubulação horizontal com variação da fração volumétrica de água (We_{global} = 6) 141

Figura 74 - DTG em emulsões A/O com 5% H_2O escoando em trecho horizontal com maior aumento no tamanho de gotas 144

Figura 75 - DTG em emulsões A/O com 5% H_2O escoando em trecho horizontal com aumento moderado do tamanho de gotas 144

Figura 76 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 5 % (v/v) H_2O escoando em trecho horizontal em função dos números de Capilaridade, Weber, Reynolds e diâmetro no início do trecho 145

Figura 77 - DTG em emulsões A/O com 10% H_2O escoando em trecho horizontal com redução pequena ou nula do tamanho de gotas 147

Figura 78 - DTG em emulsões A/O com 10% H_2O escoando em trecho horizontal com aumento do tamanho de gotas 148

Figura 79 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 10% (v/v) H_2O escoando em trecho horizontal em função dos números de Capilaridade, Weber, Reynolds e diâmetro no início do trecho 149

Figura 80 - DTG em emulsões A/O com 15% H_2O escoando em trecho horizontal com aumento dos diâmetros característicos 151

Figura 81 - DTG em emulsões A/O com 15% H_2O escoando em trecho horizontal com redução dos diâmetros característicos 152

Figura 82 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 15% (v/v) H_2O escoando no trecho horizontal em função dos números de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho 152

Figura 83 - DTG em emulsões A/O com 20% H_2O escoando em trecho horizontal com maior aumento do tamanho de gotas 155

Figura 84 - DTG em emulsões A/O com 20% H_2O escoando em trecho horizontal com redução pequena ou nula dos diâmetros de gotas 156

Figura 85 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 20% (v/v) H_2O escoando em trecho horizontal em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho 157

Figura 86 - Variação dos diâmetros característicos no trecho horizontal com Weber e Reynolds 159

Figura 87 - Gráficos de dispersão entre pares de diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99} envolvendo todos os experimentos no circuito de escoamento de emulsões, em que *r* é o coeficiente de correlação de Pearson 161

Figura 88 - Gráficos de dispersão entre pares de diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v95} para as emulsões novas - EN, em que *r* é o coeficiente de correlação de Pearson 198

Figura 89 - Gráficos de dispersão entre pares de diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99} para as emulsões reutilizadas - ER, em que *r* é o coeficiente de correlação de Pearson 199

Figura 90 - Gráficos de dispersão entre pares de diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99} para as emulsões com período de agitação variável - EPV, em que *r* é o coeficiente de correlação de Pearson 200

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros técnicos do densímetro digital DSA5000M 63

Tabela 2 – Definições de diâmetros médios característicos..... 66

Tabela 3 – Dimensões relativas dos comprimentos dos trechos de tubos analisados 71

Tabela 4 – Instrumentação da bancada experimental..... 80

Tabela 5 – Fração volumétrica de água das emulsões novas (EN) para análise do impacto da reutilização de emulsão na DTG 83

Tabela 6 – Fração volumétrica de água das emulsões reutilizadas e reagitadas (ER) para análise do impacto da reutilização de emulsão na DTG 84

Tabela 7 - Fração volumétrica de água das emulsões com período de agitação variável (EPV) para análise do impacto da reutilização de emulsão na DTG 85

Tabela 8 – Interpretação coeficiente de correlação de Pearson..... 86

Tabela 9 – Caracterização reológica fase óleo e fase água 89

Tabela 10 – Caracterização reológica das emulsões 92

Tabela 11 – Estimativa de razão de dominância das emulsões novas (EN) 98

Tabela 12 - Estimativa de razão de dominância das emulsões reutilizadas (ER) 101

Tabela 13 - Estimativa da razão de dominância das emulsões com período de agitação variável (EPV)..... 104

Tabela 14 – Coeficiente de correlação de Pearson das emulsões EN, ER e EPV..... 108

Tabela 15 – Matriz de teste com diâmetros característicos da emulsão produzida..... 109

Tabela 16 – Estatística descritiva dos diâmetros característicos inicial das emulsões..... 113

Tabela 17 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E1 e E2 (trecho vertical ascendente) para concentração de 5% (v/v) H_2O 122

Tabela 18 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E1 e E2 (trecho vertical ascendente) para concentração de 10% (v/v) H_2O 126

Tabela 19 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E1 e E2 (trecho vertical ascendente) para concentração de 15% (v/v) H_2O 130

Tabela 20 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E1 e E2 (trecho vertical ascendente) para concentração de 20% (v/v) H_2O 134

Tabela 21 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E3 e E4 (trecho horizontal) para concentração de 5% (v/v) H_2O 143

Tabela 22 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E3 e E4 (trecho horizontal) para concentração de 10% (v/v) H_2O 147

Tabela 23 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E3 e E4 (trecho horizontal) para concentração de 15% (v/v) H_2O 150

Tabela 24 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E3 e E4 (trecho horizontal) para concentração de 20% (v/v) H_2O 154

Tabela 25 – Correlação entre diâmetros característicos mensuradas pelo coeficiente de correlação de Pearson envolvendo todos os experimentos no circuito de escoamento de emulsões 162

Tabela 26 - Diâmetros característicos das emulsões novas (EN), produzidas sem a diluição do surfactante 182

Tabela 27 – Diâmetros característicos das emulsões reutilizadas (ER), produzidas a partir da diluição do surfactante 183

Tabela 28 - Diâmetros característicos das emulsões produzidas com período de agitação variável (EPV) 184

Tabela 29 - Diâmetros característicos emulsões no tanque de armazenamento inferior 186

Tabela 30 - Dados médios do banco de testes 190

Tabela 31 - Diâmetros característicos de emulsões em escoamento vertical ascendente 192

Tabela 32 - Diâmetros característicos de emulsões em escoamento horizontal 194

Tabela 33 – Dados de medição da concentração volumétrica de fase dispersa 196

Tabela 34 - Parâmetros de dispersão da DTG nos dispositivos amostradores de emulsão, conforme ASTM E799-3 (2015) 197

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

ABREVIAÇÕES

ANP	Agência Nacional do Petróleo
A/O	Água-em-óleo
DTG	Distribuição do tamanho de gotas
EN	Emulsões novas
EPV	Emulsões com período de agitação variável
ER	Emulsões reutilizadas e reagitadas
IFES	Instituto Federal do Espírito Santo
LP	Linha principal
NEMOG	Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás
O/A	Óleo-em-água
P&ID	Controlador proporcional integração derivativo (P&ID)
PLC	Programmable Logic Controler
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

SÍMBOLOS

A	Área interna da tubulação [m²]
C_1, C_2	Coeficientes da Lei de Arrhenius
C_f	Fator de atrito de Fanning
d_{max}	Diâmetro máximo estável [m]
D	Diâmetro interno da tubulação [m]
D_g	Diâmetro da gota [m]
$D_{[m,n]}$	Definição geral do diâmetro médio característico [µm]
D_i	Diâmetro de gotas da classe i [µm]
$D_{[3,2]}$	Diâmetro médio de Sauter [µm]
$D_{[4,3]}$	Diâmetro médio de De Brouckere [µm]

D_{v10}	Diâmetro volumétrico que contempla 10% da distribuição do tamanho das gotas [µm]
D_{v50}	Diâmetro volumétrico que contempla 50% da distribuição do tamanho das gotas [µm]
D_{v90}	Diâmetro volumétrico que contempla 90% da distribuição do tamanho das gotas [µm]
D_{v95}	Diâmetro volumétrico que contempla 95% da distribuição do tamanho das gotas [µm]
D_{v99}	Diâmetro volumétrico que contempla 99% da distribuição do tamanho das gotas [µm]
D_{dev}	Desvio relativo médio da distribuição em relação ao D_{v50}
f	Fator de atrito de Darcy
$f(p)$	Função de correção da razão de viscosidades
G	Taxa de cisalhamento [m²/s]
h_{P1}	Frequência volumétrica do primeiro pico em uma DTG bimodal
h_{P2}	Frequência volumétrica do segundo pico em uma DTG bimodal
k	Índice de consistência do modelo Power Law
L_H	Comprimento do trecho horizontal [m]
L_v	Comprimento do trecho vertical [m]
n_i	Frequência numérica de gotas
N	Número de classes em uma DTG
p	Razão de viscosidade entre fase dispersa e fase contínua
$r_{X,Y}$	Coeficiente de correlação de Pearson
Q_m	Vazão mássica [kg/s]
R_g	Raio da gota [m]
RD	Razão de dominância em uma DTG bimodal
s	Desvio padrão amostral dos diâmetros característicos [µm]
$span$	Largura da distribuição relativa ao diâmetro central D_{v50}
T	Temperatura [°C]
T_K	Temperatura absoluta [K]
v/v	Razão de volume de fases
U'	Flutuação da velocidade [m/s]
$\bar{U}$	Velocidade média [m/s]
$\bar{x}$	Média dos diâmetros característicos [µm]
X	Variável aleatória
Y	Variável aleatória

GRUPOS ADIMENSIONAIS

Ca	Número de Capilaridade
N_{vi}	Número de Viscosidade
Re	Número de Reynolds
We	Número de Weber

LETRAS GREGAS

ρ	Massa específica [kg/m³]
$\rho_{m,calc}$	Massa específica estimada por modelo homogêneo [kg/m³]
μ	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
μ_{calc}	Viscosidade dinâmica estimada por modelos empíricos [Pa.s]
ν	Viscosidade cinemática [m²/s]
σ	Tensão interfacial [N/m]
ε	Taxa de dissipação de energia por unidade de massa [W/kg]
τ	Tensão [Pa]
γ	Taxa de deformação [s^{-1}]
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento simples [s^{-1}]
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de elongação [s^{-1}]
λ_k	Escala de comprimento de Kolmogorov
φ	Fração volumétrica de fase dispersa
$\Delta\rho$	Erro do modelo de previsão da massa específica de emulsões
$\Delta\mu$	Erro do modelo de previsão da viscosidade de emulsões
ΔP_L	Pressão de Laplace [Pa]
ΔD	Variação relativa do diâmetro característico [%]
ΔG_{bb}	Variação da energia livre de Gibbs [J]
Δs	Variação de entropia [J/K]

SUBESCRITO

a	Fase aquosa
c	Fase contínua
crit	Crítico
crit_c	Crítico corrigido
d	Fase dispersa
exp	Experimental
g	Gota
m	Média
m, calc	Estimativa de propriedade físico-química por modelo da literatura
o	Fase oleosa
max	Máximo
min	Mínimo
teo	Teórico

SOBREESCRITO

n	Índice de fluidez do modelo de viscosidade *Power-Law*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 26

1.1 Motivação 31

1.2 Estado da arte 32

1.3 Objetivos 38

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 39

2.1 Emulsões 39

2.1.1 Descrição e tipos de emulsão 40

2.1.2 Mecanismos de estabilidade de emulsões 41

2.2 Mecanismos de quebra de gotas 43

2.2.1 Deformação e quebra de gotas em escoamento laminar 46

2.2.2 Deformação e ruptura de gotas em escoamento turbulento 50

2.2.3 Aplicações de quebra de gotas em escoamentos internos 52

2.3 Coalescência de gotas 55

2.4 Fluido modelo 58

3 METODOLOGIA 60

3.1 Preparo das emulsões para testes em escoamento 60

3.2 Caracterização das emulsões 62

3.2.1 Massa específica 62

3.2.2 Reologia 64

3.2.3 Distribuição do tamanho de gotas 65

3.2.4 Fração volumétrica de água 69

3.2.5 Tensão interfacial 69

3.3 Montagem experimental 70

3.3.1 ETAPA 1: Tancagem e transferência 73

3.3.2 ETAPA 2: Geração do escoamento e medição de vazão 74

3.3.3 ETAPA 3: Trecho de testes 74

3.3.4 Procedimento operacional do teste 76

3.3.5 Automação, controle e aquisição de dados 78

3.4 Coleta e análise de amostras 80

3.5 Envelhecimento das emulsões 82

3.6 Estudo da reciclagem de emulsões 82

3.6.1 Preparo das emulsões novas (EN) 83
3.6.2 Preparo de emulsões reutilizadas (ER) 83
3.6.3 Preparo de emulsões com período de agitação variável (EPV) 84
3.7 Avaliação de correlações lineares entre diâmetros característicos 85

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 87
4.1 Caracterização das propriedades termofísicas de emulsões 87
4.2 Impacto da reciclagem de emulsões na DTG 95
4.2.1 Emulsões novas (EN) 96
4.2.2 Emulsões reutilizadas (ER) 99
4.2.3 Emulsões com período de agitação variável (EPV) 101
4.2.4 Avaliação do método de formulação da emulsão no tamanho das gotas 104
4.3 Análise da emulsão produzida 108
4.4 Caracterização da bancada de testes 115
4.5 Quebra e coalescência em escoamento vertical ascendente 118
4.5.1 Emulsão com 5% de água 121
4.5.2 Emulsão com 10% de água 125
4.5.3 Emulsão com 15% de água 130
4.5.4 Emulsão com 20% de água 133
4.5.5 Síntese dos mecanismos de evolução da DTG em escoamento vertical ascendente 137
4.6 Quebra e coalescência de emulsões em escoamento horizontal 140
4.6.1 Emulsão com 5% de água 143
4.6.2 Emulsão com 10% de água 146
4.6.3 Emulsão com 15% de água 150
4.6.4 Emulsão com 20% de água 154
4.6.5 Síntese dos mecanismos de evolução da DTG em escoamento horizontal 158
4.7 Correlação linear entre os diâmetros característicos 160

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 164
5.1 Sugestões de trabalhos futuros 166

6 PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA AO DOUTORADO 168

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 171

APÊNDICE 1 – DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS EMULSÕES NOVAS, REUTILIZADAS E COM PERÍODO DE AGITAÇÃO VARIÁVEL 181

APÊNDICE 2 - DADOS EXPERIMENTAIS DO BANCO DE TESTES..... 186

APÊNDICE 3 – CORRELAÇÕES ENTRE DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS..... 198

1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo e gás em águas profundas, como no pré-sal brasileiro, impõe desafios tecnológicos à indústria, sobretudo em função da alta pressão do hidrocarboneto e longas distâncias de escoamento ao longo da linha de produção de petróleo. Durante a produção de petróleo, há a ocorrência de escoamentos concomitantes de petróleo, água e gás. A água pode ser proveniente do reservatório, denominada água de formação, ou dos processos de recuperação secundária e terciária do petróleo (Silva et al., 2018), a chamada água de produção. No final da linha de produção, a água pode estar separada do petróleo, denominada água livre, ou misturada com o petróleo na forma de emulsão, quando gotas de água estão dispersas em uma fase contínua de óleo ou vice-versa, dentre outras formas de mistura de água e óleo.

Denomina-se emulsão a dispersão de líquidos imiscíveis, em que gotas de fase dispersa estão em uma fase contínua. Segundo Kokal (2005), emulsões de petróleo estão presentes em praticamente todas as etapas da cadeia de produção e processamento do petróleo, incluindo reservatórios, poços produtores e instalações de manuseio de petróleo bruto; transporte através de oleodutos e armazenamento; bem como durante o processamento de petróleo. O cisalhamento entre as frações de petróleo e água escoando ao longo da linha de produção em tubulações, bombas e válvulas, juntamente com outros tipos de acidentes de linha, são algumas das condições que propiciam a formação de emulsão (Keleşoğlu; Pettersen; Sjöblom, 2012). Esse processo de emulsificação é intensificado pelos surfactantes naturais do petróleo, como as resinas, asfaltenos e sais, que conferem elevada estabilidade às emulsões de petróleo (Silva et al., 2018). Grande parte do petróleo produzido no mundo está na forma de emulsão (Abou-Kassem; Ali, 1995; Kokal, 2005).

Na saída do poço de petróleo, as emulsões podem ser formadas com uma vasta possibilidade de diâmetro das gotas, podendo ser na ordem de milímetros ou micrômetros (Janssen; Harris, 1998). Ao longo do escoamento, as gotas diminuem de tamanho ao passar por elementos de alto cisalhamento, resultando em emulsões que alcançam a plataforma com tamanho reduzido (menor que 5 μm). Quanto menor o tamanho de gotas, maior a estabilidade da emulsão e maior a dificuldade em separação das fases água e óleo no processamento e tratamento de petróleo e água (Van der Zande et al., 1999; Van der Zande; Van den Broek, 1998).

O estudo de emulsões permanece altamente relevante na indústria de petróleo e gás. Souza (2024) destaca que a diversidade de óleos produzidos e a variedade dos processos de exploração e produção de petróleo fazem com que a formação, quebra e coalescência de emulsão possam ser desejáveis ou indesejáveis ao processo produtivo, a depender do contexto operacional. Para exemplificar, o escoamento de óleos pesados de alta viscosidade é favorecido quando estes encontram-se dispersos em água na forma de emulsões óleo-em-água (Choudhary et al., 2026), uma vez que a queda de pressão de tais emulsões é significativamente inferior à do escoamento monofásico de óleo pesado. Por outro lado, água livre em tubulações cataliza processos corrosivos. Além disso, a separação de emulsões altamente estáveis demanda aplicação de grandes quantidades de produtos químicos desemulsificantes, implicando no aumento de custos de processamento e refino do petróleo (Sarbar; Wingrove, 1997).

A formação de emulsões é inevitável durante a produção e transporte do petróleo, gerando impactos técnicos e econômicos, tais como: aumento ou redução da viscosidade do fluido, formação de hidratos, corrosão e incrustação em equipamentos, tanques e sistemas de

tubulação. Dessa forma, a compreensão da dinâmica de quebra e coalescência de emulsões em sistemas de tubulação é relevante para o dimensionamento, projeto e operação de sistemas de produção, recuperação e processamento de petróleo e derivados.

A estabilidade de emulsões impacta a separação e processamento do petróleo, uma vez que emulsões estáveis são difíceis de separar, exigindo tanques volumosos, elevado período de residência das emulsões em tanques e alta disponibilidade de produtos químicos desemulsificantes. Para o transporte e estocagem do petróleo, água e óleo devem ser separados e atender critérios rigorosos. Exemplificando, os requisitos para do petróleo geralmente aceito no Brasil por refinarias são: teor de águas e sólidos (BSW, do inglês *basic sediment and water*) inferior a 1% (v/v) e teor salino máximo de 285 mg/L (Thomas, 2004).

Na linha de produção de petróleo, há uma quantidade expressiva de elementos de tubulação, também conhecidos como acidentes de linha, tais como: curvas, válvulas, e ramificações, além de bombas e outros tipos de máquinas de fluxo. Esses elementos de tubulação são indispensáveis para produção e transporte do petróleo e controle da planta de processo. Entretanto, a taxa de cisalhamento imposta por esses elementos e características turbulentas do escoamento favorecem tanto a quebra quanto a coalescência de emulsões, dependendo das condições de escoamento e propriedades do fluido.

Coalescência é agregação de duas ou mais partículas fluidas com perda da identidade das partículas que se agregam, ou seja, duas ou mais gotas formam uma gota maior. Para ocorrer coalescência, deve haver colisão das gotas com tempo de contato suficiente para possibilitar a drenagem do filme da fase contínua entre as gotas da fase dispersa, seguido pela ruptura do filme e agregação das gotas. Durante o período de contato, os vórtices turbulentos da fase contínua podem separar as gotas e prevenir a coalescência (Shinnar, 1961). Chesters (1991) considera a coalescência um processo mais complexo do que a quebra de gotas, pois deve-se conhecer a frequência e eficiência de coalescência.

Junto com a quebra de gotas, a coalescência desempenha função relevante na evolução do tamanho das gotas. A quebra e a coalescência de gotas são processos concorrentes e não concomitantes. Segundo Walsh (2016), a quebra de gotas ocorre em dispositivos altamente cisalhantes, tal como bombas e válvulas de controle. Em dispositivos com turbulência leve, como tubulações verticais, horizontais e inclinadas, a coalescência de gotas é predominante, normalmente resultando em um aumento no tamanho de gotas (Walsh, 2016).

Apesar dos esforços para modelar e prever o comportamento de quebra e coalescência de emulsões desde a década de 1950, com os trabalhos de Hinze (1955), Shinnar (1961) e Davies (1985), os métodos para prever o comportamento de emulsões em escoamentos ainda são baseados em correlações empíricas. Os modelos empíricos são pouco generalistas, pois a literatura reporta inconsistências ao replicá-los em aplicações distintas (Rodriguez et al., 2025). Portanto, ainda não há uma teoria capaz de generalizar a quebra e coalescência de emulsões ou dispersões líquido-líquido. Além disso, a maioria dos estudos sobre quebra e coalescência são realizados em tanques agitados e separadores, havendo poucas pesquisas sobre quebra e coalescência em sistemas de tubulação. Os estudos experimentais com emulsões em sistemas de tubulações são ainda mais escassos.

Voulgaropoulos e Angeli (2017) relatam que experimentos com dispersões líquido-líquido ou emulsões em escala-piloto são capazes de medir diversas características do escoamento e viabilizar estudos de quebra e coalescência de gotas. Os autores explicam que nas

linhas de produção de petróleo e gás, as informações disponíveis do fluido normalmente são limitadas ao gradiente de pressão e *hold-up* (fração de líquidos), pois as condições termodinâmicas e opacidade típica do petróleo restringem a aplicação de técnicas experimentais ópticas mais específicas. Por outro lado, diante das limitações práticas e de segurança envolvidas no manuseio de grandes volumes de petróleo em ambiente laboratorial, os fluidos modelo surgem como uma solução promissora (Rodionova et al., 2014) para mimetizar algumas das propriedades físico-químicas do petróleo puro ou emulsionado (Corona et al., 2023, 2024), permitindo a realização de ensaios experimentais em condições seguras, controladas e de custo relativamente mais baixo quando comparado a testes com fluido real.

Em estudos experimentais envolvendo emulsões em escoamentos por tubulações, a reutilização da emulsão é uma técnica empregada para aumentar a viabilidade operacional de múltiplos ensaios a partir da reciclagem dos fluidos. A reutilização de emulsões é particularmente relevante em experimentos que demandam grande volume de fluidos. Entretanto, o cisalhamento da emulsão ao longo do cisalhamento pode modificar a DTG em virtude dos mecanismos de quebra e coalescência ao longo do escoamento, e os procedimentos de reciclagem do fluido pode ser insuficiente para reutilização do fluido em novas campanhas de testes. Como consequência, a DTG inicial da emulsão reciclada para um novo experimento pode diferir dos experimentos anteriores, influenciando a subsequente análise da evolução da DTG nos testes subsequentes. Embora essa questão seja relevante em estudos experimentais de quebra e coalescência de emulsões, não foi encontrado estudos na literatura que abordam os efeitos da reciclagem e reutilização de emulsões na DTG. Nesse contexto, a investigação da DTG de emulsões após ciclos de escoamento constitui uma etapa fundamental para viabilizar testes com grande volume de fluidos, e também validar metodologia experimentais.

Os elevados custos associados à manutenção e à parada da cadeia de produção e exploração de petróleo, especialmente em ambiente offshore de águas profundas do pré-sal, impõe que a indústria de petróleo e gás demande alto desempenho dos processos e tecnologias empregados. No contexto de emulsões, há buscas por soluções que favoreçam a separação entre óleo e água, seja pela redução da formação de gotas, pela minimização da quebra das gotas e intensificação da coalescência; por meio de otimização construtiva e da aplicação de métodos físicos ou químicos. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo a avaliação experimental dos mecanismos de quebra e coalescência de emulsões através da análise da evolução da distribuição do tamanho de gotas (DTG), em uma bancada de testes que simula o escoamentos industriais.

A Figura 1 apresenta dados da produção de petróleo no Brasil em 2025, expressos em mil barris de óleo equivalente por dia (Mboe/d). Os dados mostram que a produção é predominantemente em ambiente offshore, com apenas 5% do petróleo produzido em terra (*onshore*) e 95% do petróleo produzido no mar (*offshore*). No segmento *offshore*, a produção de petróleo no pré-sal é dominante, correspondendo a 79,4% do petróleo total produzido, enquanto o petróleo produzido no pós-sal equivale a 15,6%.

As características físico-químicas do petróleo variam não apenas entre os campos produtores, mas também entre diferentes poços do mesmo campo. No início da produção de um poço, o volume de água extraído é geralmente nulo ou baixo, pois a pressão intrínseca do reservatório é suficiente para produção do petróleo durante o processo de recuperação primária. Isso é observado nos campos de petróleo mais novos, na região do pré-sal. A produção pode conter a água presente no reservatório, denominada água de formação.

A Figura 2 ilustra a produção de fluidos nos cinco (5) principais produtores de petróleo no pré-sal em dezembro de 2025. A análise foi produzida com dados do Boletim mensal de produção de Petróleo e Gás natural disponibilizados pela ANP (2026b). Nos campos de produção de Búzios e Mero, o volume de água representou menos de 0,2% sobre o volume total produzido (óleo + água + gás). Em Tupi, o volume de água foi 15%, e em Sapinhoá 44%.

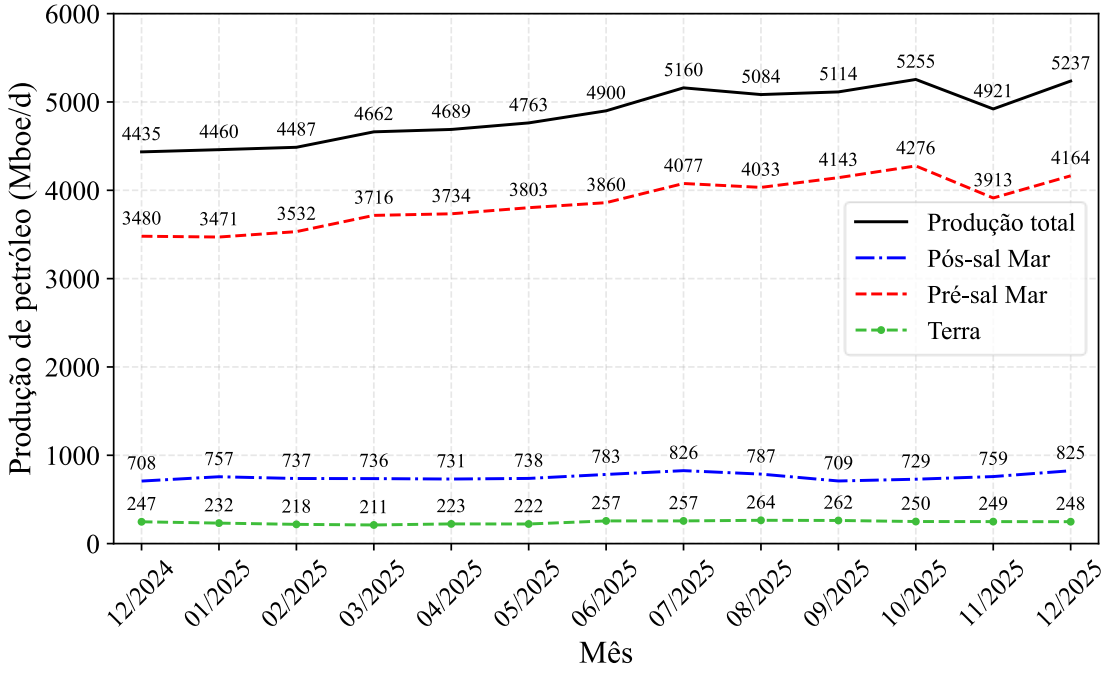


Figura 1 - Evolução da produção de petróleo no Brasil em 2025, em mil barris de óleo equivalentes por dia (Mboe/d)

Fonte: Adaptado de ANP (2026a)

Com o avanço do tempo da atividade de produção de hidrocarbonetos em poços, a pressão natural do reservatório tende a cair em função da explotação de fluidos. Para manter a produção de petróleo em campos maduros, são adotados os métodos de recuperação secundária e terciária, que consistem em injetar fluidos no reservatório, tais como água e polímeros, visando manter a pressão no reservatório e forçar a elevação de petróleo para a superfície. Esse método é comumente aplicado em campos do pós-sal. Como consequência, a produção de petróleo em campos maduros tende a apresentar maior teor de água.

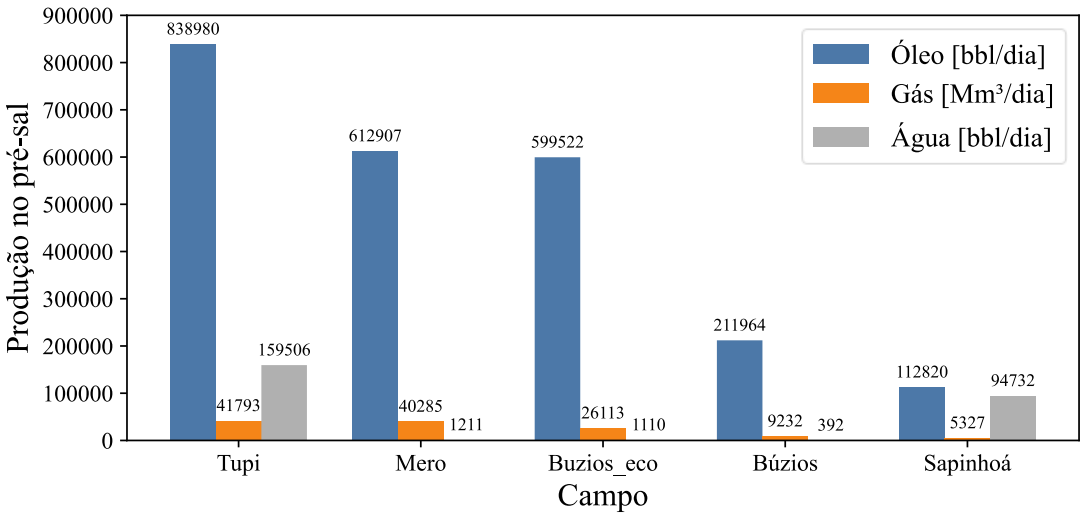


Figura 2 - Produção de petróleo, gás natural e água nos cinco principais produtores de petróleo do pré-sal em dezembro de 2025

A Figura 3 ilustra a produção de fluidos nos cinco principais campos produtores de petróleo nos reservatórios do pós-sal da Bacia de Campos em dezembro de 2025, a partir de dados disponibilizados pela ANP (2026b). Observa-se alta fração de água na produção de líquidos: 75% em Marlim Sul, 71% em Jubarte, 60% em Peregrino e Marlim e 51% em Roncador. Essas frações de água elevadas favorecem a formação de emulsões ao longo da linha de produção de petróleo.

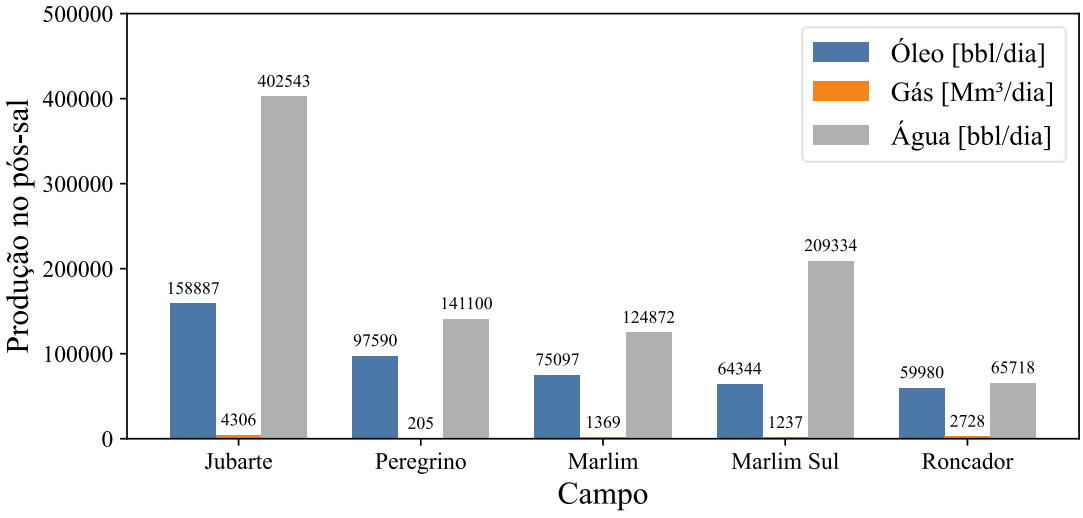


Figura 3 - Produção de petróleo, gás natural e água nos cinco principais produtores de petróleo do pós-sal na Bacia de Campos em dezembro de 2025

A produção simultânea de petróleo e água, tanto no pré-sal quanto no pós-sal, aliada às propriedades físico-químicas desses fluidos, proporciona a formação de emulsões ao longo da linha de produção de petróleo, seja emulsões água-em-óleo (A/O) ou óleo-em-água (O/A). Nesse contexto, o entendimento dos mecanismos de quebra e coalescência de emulsões em sistemas de tubulações é fundamental para otimização de processos e aprimoramento de modelos numéricos mecanicistas.

1.1 MOTIVAÇÃO

Um dos desafios tecnológicos recorrentes na indústria de petróleo é o tratamento de emulsões formadas durante a produção de petróleo, especialmente em águas profundas do pré-sal brasileiro. Essas emulsões impactam desde a operação de equipamentos submarinos até a eficiência dos processos de separação óleo-água em unidades de tratamento, uma vez que emulsões estáveis são difíceis de separar, demandando equipamentos de separação de maior porte e uso de grandes quantidades de produtos químicos, o que eleva os custos operacionais dos processos de separação e tratamento de óleo e água.

Por outro lado, a evolução da distribuição do tamanho de gotas de emulsões em escoamento é governada pelos mecanismos de quebra e coalescência, que são processos concorrentes. A compreensão desses mecanismos ainda apresenta lacunas significativas de entendimento, relacionada tanto a modelagem mecanicista e matemática desses processos, bem como também à dificuldade de acesso e disponibilidade a pontos de amostragem em ambiente relevante similar aos escoamentos de produção e transporte de petróleo. A DTG influencia as propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido, como viscosidade, perda de carga e eficiência de separação entre água e óleo.

A maioria dos estudos reportados na literatura sobre escoamento de emulsões em sistemas de tubulações concentra-se em baixa fração volumétrica de fase dispersa, fase contínua de baixa viscosidade ou em dispersões líquido-líquido obtidas a partir da injeção separada de óleo e água. Os modelos de previsão dos diâmetros de gota são, em sua maioria, empíricos ou semiempíricos. Por outro lado, abordagens numéricas de emulsões apresentam precisão dependente de parametrizações da quebra e coalescência, cujos modelos ainda carecem de validação experimental generalizável. Diante dessas lacunas, evidencia-se a necessidade de pesquisas experimentais em escala laboratorial voltados à análise de DTG de emulsões escoando sob condições representativas de sistemas reais.

Esse trabalho propõe contribuir para o entendimento dos mecanismos de quebra e coalescência de emulsões viscosas, com fração volumétricas de fase dispersa entre 5% e 20% (v/v) de H_2O, escoando em tubulações nas orientações vertical ascendente e horizontal. Busca-se, assim, avaliar a influência das tensões dominantes no escoamento na fragmentação e agregação de gotas.

A proposta desta tese consiste na investigação experimental da quebra e coalescência de gotas de emulsões água-em-óleo em uma bancada de testes com escoamento em diferentes orientações. Para isso, será analisada a evolução da distribuição do tamanho de gotas em escoamento vertical ascendente e escoamento horizontal.

1.2 ESTADO DA ARTE

O estudo da quebra e coalescência de emulsões em sistemas de tubulação é de grande relevância para setores industriais como petroquímico, alimentício e farmacêutico. A compreensão dos mecanismos que governam a quebra e coalescência das emulsões em sistemas de tubulações é fundamental para otimização de processos e redução de custos operacionais (EL-Hamouz; Stewart, 1996).

Para evidenciar a relevância científica deste tema, uma pesquisa bibliométrica foi realizada em abril de 2026 nas bases de dados Web of Science e Scopus, utilizando as seguintes expressões: *emulsion* ou *dispersions* ou *drop*, *break* ou *coalescence*, *pipe* ou *restriction* ou *valve* ou *flow loop*, e *droplet size* ou *size distribution*. A busca restringiu as publicações para artigos escritos no idioma inglês e publicados entre os anos de 2010 até 2026, resultando em 155 resultados. Os dados foram processados usando a biblioteca *bibliometrix,* no software R-Studio. A Figura 4 apresenta a tendência de crescimento na produção científica anual do tema abordado, com publicação média anual de 9 artigos e pico de publicações em 2019 com 18 artigos publicados.

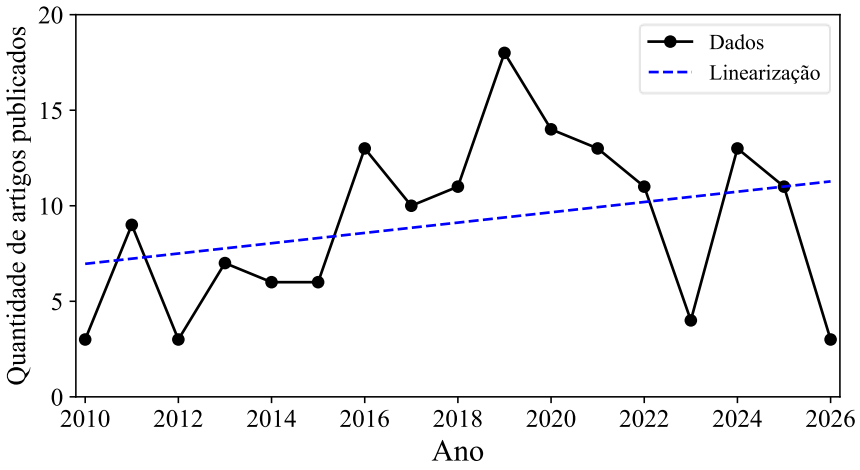


Figura 4 – Evolução da produção científica anual nos últimos 15 anos conforme pesquisa bibliométrica nas bases de dados Web of Science e Scopus

Os dez (10) periódicos com mais publicações nesta pesquisa bibliométrica são mostrados na Figura 5. Observa-se que os periódicos são na área de engenharia, escoamento multifásico, ciências térmicas, petróleo e energia.

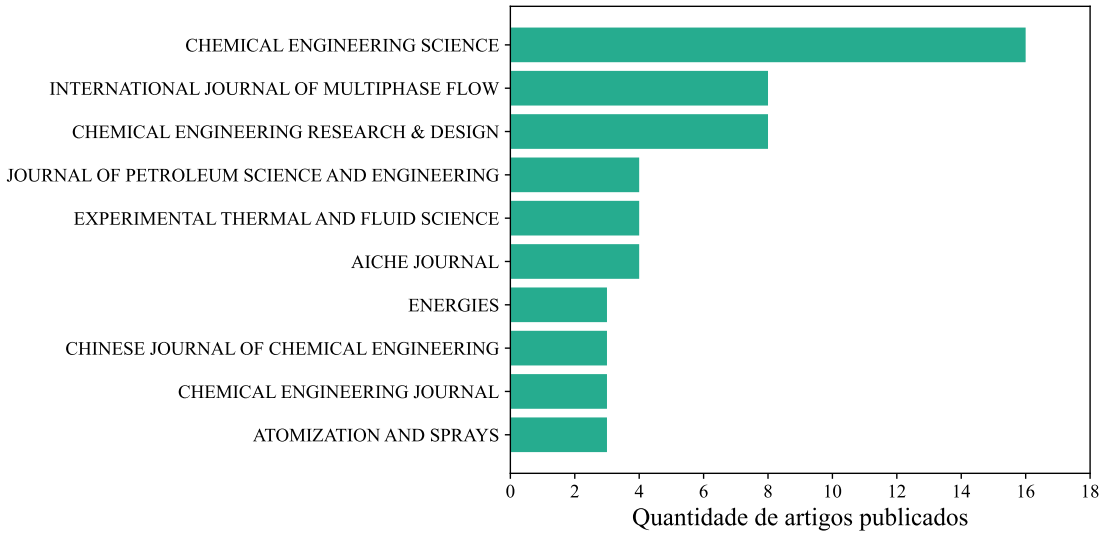


Figura 5 - Principais periódicos científicos dos artigos publicados nos últimos 15 anos conforme pesquisa bibliométrica nas bases de dados Web of Science e Scopus

A Figura 6 ilustra os dez (10) países com mais publicações em periódicos científicos. A China lidera as publicações, seguido por Estados Unidos, Alemanha e Noruega. O Brasil ocupa a décima posição, com três (3) contribuições científicas de relevância na área.

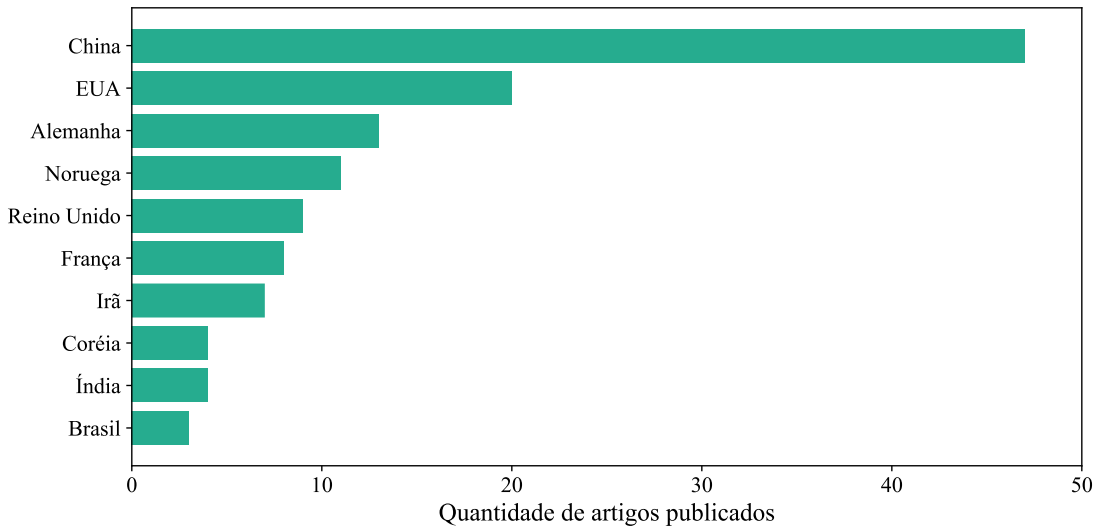
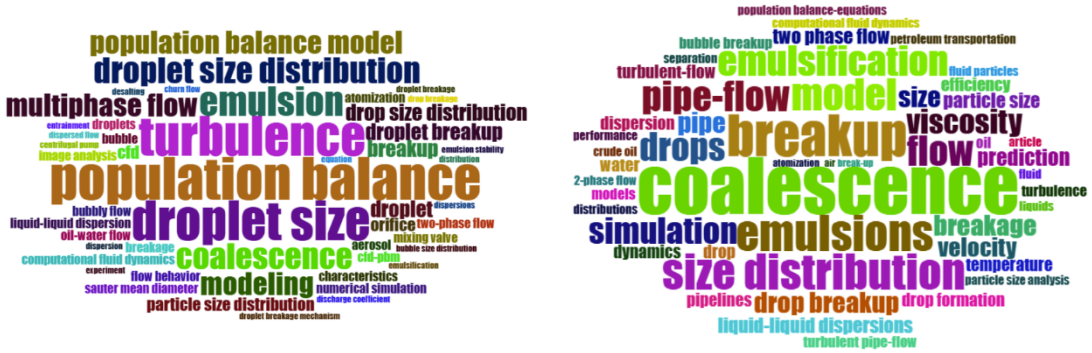


Figura 6 - Países com maior número de publicações resultantes da pesquisa bibliométrica

Em relação às palavras-chaves mais recorrentes nos artigos resultantes da bibliometria, a Figura 7 apresenta nuvens de palavras, em que as palavras maiores são as que apareceram com maior frequência. A Figura 7(a) corresponde às palavras-chave fornecidas pelos autores. As palavras com maior incidência são: *population balance*, *turbulence* e *droplet size*, indicando destaque das pesquisas nos últimos 15 anos para análise do tamanho de gotas no regime

turbulentos e uso do método numéricos do balanço populacional para previsão do diâmetro das gotas. Também há forte presença dos termos *coalescence*, *breakup*, *emulsion* e *turbulent flow*, confirmando que os mecanismos de quebra e coalescência de gotas vêm sendo amplamente investigados na literatura. Por outro lado, termos como *orifice* e *flow behavior* aparecem com menor destaque, sugerindo que estudos em condições mais representativas de sistemas reais ainda são pouco explorados.

Uma segunda nuvem de palavras foi construída a partir das *Keywords Plus*, que são palavras ou termos em títulos das referências citadas nos artigos resultantes da pesquisa bibliométrica (Clarivate, 2025), o que refletem o contexto científico ampliado da pesquisa bibliométrica. A nuvem de palavras geradas é ilustrada na Figura 7(b), em que se observa mudanças nos termos de maior destaque em relação apenas as palavras-chave. Há forte concentração temática nos termos *coalescence*, *breakup*, *emulsion*, *size distribution* e *pipe-flow*, evidenciando que a literatura está orientada a compreensão dos mecanismos de quebra e coalescência de gotas em escoamento. Outros termos em evidência são *emulsification*, *model*, *simulation* e *viscosity.*



a) Palavras-chave b) *Keywords Plus*

Figura 7 - Nuvem de palavras resultantes da pesquisa bibliométrica

Taylor (1934) foi um dos pioneiros no estudo de gotas dispersas em escoamento, observando por fotografias a deformação de uma única gota sob cisalhamento simples e escoamento extensional. Seus resultados demonstram que gotas inicialmente esféricas, ao serem deformadas, assumem forma de elipsoide, podendo ou não sofrer ruptura (quebra). Taylor relacionou a deformação das gotas discretas com a razão entre tensões viscosas e interfaciais, representada como o parâmetro adimensional número de Capilaridade - *Ca*.

Hinze (1955) desenvolveu um estudo abrangente sobre quebra de gotas em dispersões diluídas, com baixa fração volumétrica de fase dispersa, desprezando a coalescência. Baseado em dados experimentais das décadas anteriores feitos por Taylor (1934) e Clay (1940), Hinze explica os regimes de quebra de gota e introduz a um modelo de previsão do diâmetro máximo de gotas por quebra no regime inercial sob hipótese de turbulência homogênea isotrópica, relacionando o diâmetro máximo das gotas com taxa de dissipação de energia. Hinze introduz o número de Weber - *We*, que é a razão entre as tensões inerciais e interfaciais, como parâmetro adimensional dominante para quebra de gotas no regime inercial.

A coalescência em dispersões foi abordada por Shinnar (1961), que explica que os processos de quebra e coalescência de líquidos imiscíveis são mecanismos concorrentes. No processo de quebra de gotas, a energia cinética deve ser suficiente para sobrepor a tensão interfacial, enquanto a coalescência de gotas ocorre quando a energia de adesão das gotas supera a energia cinética do escoamento.

As primeiras pesquisas sobre quebra de gotas em tubulações foram conduzidas por Sleicher (1962), em dispersões O/A. A partir de fotografias, foi observado que a quebra de gotas ocorre principalmente na região próxima à parede da tubulação, onde a turbulência é anisotrópica e os efeitos viscosos são relevantes. Também por visualização de gotas, Karabelas (1978) avaliou a DTG de dispersões A/O escoando em tubulações, verificando que os diâmetros de gota obtidos apresentaram boa concordância com o modelo de Hinze (1955).

A relação entre tensões viscosas e interfaciais, representada pelo número de Capilaridade – *Ca*, é introduzida por Grace (1982). O autor realizou estudos em escoamentos laminares com gotas, avaliando escoamentos extensionais (*extensional flow*) e cisalhamento simples (*simple shear flow*), relacionando o diâmetro máximo estável das gotas com a razão de viscosidade entre fase dispersa e fase contínua e características do escoamento. O estudo indica que a adequação do tipo de escoamento com a quebra de gotas deve ser avaliada caso a caso. Nos experimentos conduzidos por Rueger e Calabrese (2013) em dispersões diluídas, com fração volumétrica de fase dispersa de 0,1%, a quebra de gotas em escoamentos laminares foi mais bem prevista por cisalhamento simples do que por escoamento extensional.

Na década de 1980, surgiram estudos para analisar gotas em dispositivos que promovem queda de pressão localizada. Percy e Sleicher (1983) observaram a redução do tamanho de gotas próximo a flanges e estudaram a quebra de gotas de emulsões ao passar por orifícios concêntricos, simulando dispositivos industriais que promovem aceleração local do fluido. Davies (1985) relacionaram a taxa de cisalhamento imposta por válvula homogeneizadora e impelidores com o tamanho de gotas em emulsões, modificando o modelo de Hinze (1955) para incorporar a viscosidade da fase dispersa.

Hesketh et al. (1991) avaliaram a quebra de gotas e bolhas em tubulações horizontais, identificando que há uma zona ativa, em que a turbulência é suficiente para causar quebra de gotas, e uma zona neutra, em que pode haver deformação das gotas, porém sem ruptura. El-Hamouz e Stewart (1996) observaram o coalescência de gotas em elementos de tubulação de baixo cisalhamento, como curvas e tubulações horizontais, mesmo com número de Reynolds no regime turbulento. Em elementos que promovem maior cisalhamento, como válvula agulha, foi observada redução do tamanho das gotas.

Trallero, Sarica e Brill (1997) realizaram experimentos com óleo mineral e água em tubulações horizontais para investigar padrões de escoamento. Nos padrões dispersos, tanto em dispersões A/O quanto O/A, os autores avaliam que os tamanhos de gota previstos no modelo de Hinze (1955) subestimam o diâmetro de gotas experimental. Além disso, o trabalho relaciona a coalescência com aumento da fração de fase dispersa, ocorrendo mesmo em altas velocidades de mistura.

Ainda nos estudos em tubulações, Angeli e Hewitt (2000) constataram que, sob mesmas condições de escoamento em dispersões líquido-líquido, tubulações de aço promovem a formação de gotas com diâmetros inferiores do que em tubulações de acrílico. Isso reforça a importância das interações interfaciais e superficiais na dinâmica de quebra e coalescência de

gotas. Simmons e Azzopardi (2001) avaliaram a DTG em dispersões de querosene e água salina em tubulações verticais e horizontais, concluindo que a teoria de Hinze é adequada apenas para baixas frações volumétricas de fase dispersa, destacando a necessidade de um novo desenvolvimento teórico para prever diâmetros de gota para frações volumétricas elevadas. Lovick e Angeli (2004) avaliaram a DTG em dispersões de água e óleo em tubulações horizontais usando óleo mineral de baixa viscosidade. Os diâmetros de gotas obtidos experimentalmente foram comparados aos diâmetros obtidos por modelos de outros autores, mas todos subestimaram o diâmetro máximo das gotas.

Kelesoglu et al. (2012) estudaram o tamanho de gotas de emulsões A/O em escoamentos laminares em tubulações horizontais, identificando redução da DTG com aumento da vazão do escoamento e aumento da DTG com aumento da fração volumétrica de água.

Walsh (2016) apresenta uma revisão de fundamentos de formação de gotas por cisalhamento em tubulações, válvulas e bombas em sistemas de tratamento de água produzida. O autor explica que, em tubulações e *flowlines*, a dissipação de energia é significativamente menor em comparação a energia dissipada em bombas e válvulas de controle. Como consequência, a coalescência é predominante em tubulações, enquanto a quebra de gotas é dominante em bombas e válvulas de controle.

Voulgaropoulos e Angeli (2017) apresentam um estudo experimental sobre escoamentos dispersos de líquido-líquido em escoamento horizontal com $L/D = 400$, com 12% O/A e 21% A/O. Água e óleo foram injetados separadamente e misturados por um misturador estático helicoidal, formando dispersões. Os resultados demonstraram gotas menores na entrada da tubulação e gotas maiores formando ao longo da tubulação devido à coalescência de gotas.

Partindo para trabalhos de tamanho de gotas em restrições e acidentes de linha, Van der Zande et al. (1998) estudaram a quebra de gotas de emulsões óleo-em-água em um orifício simulando uma válvula *choke*, mostrando que a quebra de gotas aumenta com a vazão. Posteriormente, Van der Zande et al. (1999) ampliaram os estudos com até 1% de fase dispersa, demonstrando que o diâmetro de gotas a jusante do orifício é proporcional à energia dissipada no orifício. Janssen et al. (2001) realizaram estudos em orifícios simulando a válvula *choke* com emulsões água em petróleo, com concentrações de fase dispersa de até 50%.

Galinat et al. (2005) investigaram a quebra de gotas a jusante de uma restrição em escoamento turbulento vertical, observando quebra de gotas imediatamente a jusante do orifício na zona de difusão do jato, região de maior velocidade. Khalil et al. (2011) avaliou o escoamento de emulsões O/A em acidentes de linha, como curvas, expansões, reduções e válvulas, observando a maior perda de energia em curvas de 90°, seguido por válvula gaveta aberta, expansão e redução.

O trabalho de Kelemen et al. (2014) avaliou o efeito do regime de escoamento de emulsões A/O no coeficiente de descarga (*Cd*) em orifícios de alta pressão, observando variação do *Cd* no regime laminar e uniformidade no regime turbulento. Outro resultado relevante desse estudo foi a redução do tamanho de gotas com aumento da taxa de dissipação de energia.

Mitre et al. (2014) conduziram um estudo experimental e teórico sobre a evolução do tamanho de gotas de emulsões A/O ao passar por uma restrição simulando uma válvula globo. No experimento, água e petróleo foram bombeados separadamente e misturados em linha, formando emulsões A/O com 8% e 15% de fase dispersa. O modelo de balanço populacional desenvolvido contempla tanto quebra quanto a coalescência de gotas. Simulações por balanço

populacional também foram conduzidas por Aryafard, Farsi e Rahimpour (2015), avaliando válvulas de mistura em escoamentos água-óleo. Os autores mostram o aumento da taxa de quebra de gotas com aumento da queda de pressão na válvula.

Silva, Medronho e Barca (2019) estudaram a quebra de gotas de emulsões tipo A/O com até 10% de fase dispersa ao escoar por uma restrição, simulando a queda de pressão localizada em válvulas gaveta. Apesar do regime da quebra predominante ser inercial, os modelos previsão de diâmetro de gota baseados na teoria de Hinze não apresentaram boa aderência aos resultados experimentais. Os autores sugerem que a teoria de quebra de gotas por tensões viscosa é aderente ao fenômeno observado, além da possibilidade de ocorrer o fenômeno da coalescência em frações de água acima de 7,5% A/O, pois quanto maior quantidade de gotas, maior a possibilidade de colisões e subsequente adesão e coalescência.

Entre as pesquisas de emulsões escoando através de dispositivos comerciais, Fossen e Schümann (2017) avaliaram o efeito da queda de pressão, concentração volumétrica de fase dispersa e vazão volumétrica na quebra de gotas de escoamentos óleo/água ao passar por uma válvula borboleta, demostrando que a queda de pressão é o fator mais influente na quebra de gotas. Paolinelli, Rashedi e Yao (2018) estudaram o tamanho de gotas pela passagem de dispersões água/óleo através de uma válvula globo em escala industrial. Os diâmetros de gotas experimentais foram comparados com os sub-regimes de quebra viscosa e inercial, apresentando maior aderência ao modelo inercial proposto por Percy e Sleicher (1983).

Schümann, Simonsen e Brekken (2023) realizaram experimentos com dispersões água/óleo estabilizadas por surfactantes em tubulações horizontais com L/D = 2000 a jusante de uma válvula, observando aumento do tamanho de gotas com o distanciamento da válvula, indicando coalescência. A coalescência foi menos pronunciada em testes com queda de pressão na válvula mais elevados, que geraram gotas iniciais menores.

Recentemente, Rodriguez et al. (2025) apresenta uma visão abrangente de escoamentos contendo gotas dispersas. Os autores compilaram 13 modelos para previsão do diâmetro das gotas em tubulações, nos quais apenas 2 se aplicam em escoamentos laminares. Para escoamentos turbulentos, observam-se grande variabilidade na previsão dos diâmetros de gota nos diferentes modelos, atribuída ao caráter semiempírico dos modelos. Ou seja, os modelos de previsão do diâmetro de gotas apresentam coeficientes que precisam ser ajustados com base em dados experimentais para cada condição específica.

A quebra e coalescência de gotas são mecanismos concorrentes em sistemas com frações volumétricas de fase dispersa superior a 5%, nos quais a interação entre gotas é significativa. Em contrapartida, em dispersões diluídas ou experimentos com injeção controlada de gotas individuais, é viável avaliar a ruptura de gotas isoladamente, desprezando a coalescência. Por exemplo, Rueger e Calabrese (2013) avaliaram a quebra de gotas de emulsões diluídas, com 0,1% de fase dispersa em um sistema rotor-estator, para avaliar isoladamente a quebra de gota. Essa predominância de estudos de emulsões diluídas corrobora a necessidade de pesquisas aprofundadas sobre quebra de emulsões, quando comparado com a coalescência. Além disso, a literatura é ainda mais escassa para emulsões escoando em regime laminar (Grace, 1982; Mitre et al., 2014; Rueger; Calabrese, 2013; Silva; Medronho; Barca, 2019), especialmente sobre condições representativas de processos industriais reais, o que reforça a motivação para o desenvolvimento desta tese.

O estado da arte evidencia que os mecanismos de quebra e coalescência de emulsões são dependentes, dentre outros fatores, do regime de escoamento (laminar, turbulento, transição), das propriedades dos fluidos que compõe a emulsão, da fração volumétrica de fase dispersa e do arranjo do sistema de tubulação. A compreensão integrada desses fatores é essencial para o desenvolvimento de modelos mecanicistas mais precisos e para a otimização de processos industriais que envolvem escoamento de emulsões.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo desta tese de doutorado é investigar experimentalmente os mecanismos de quebra e coalescência de gotas em emulsões água-em-óleo (A/O) escoando em um sistema de tubulação. A ênfase da tese será na evolução da distribuição do tamanho de gotas (DTG). As emulsões em estudo são metaestáveis e formuladas em laboratório compostas por óleo mineral e água deionizada, com fração volumétrica de fase dispersa entre 5% e 20% (v/v) de H_2O, representando condições de escoamento encontradas em sistemas industriais. Para tanto, os seguintes objetivos específicos devem ser atingidos:

- Desenvolver e validar um procedimento experimental em escala laboratorial para caracterizar a DTG de emulsões escoando em sistemas de tubulações;
- Desenvolver e validar uma metodologia experimental para reciclagem e reutilização de emulsões e o respectivo impacto na DTG;
- Investigar o efeito da fração volumétrica da fase dispersa, entre 5% e 20% (v/v) H_2O, na quebra e coalescência de gotas de emulsões A/O;
- Analisar a influência dos número de Capilaridade, Reynolds e Weber na quebra e coalescência de gotas em escoamento vertical ascendente e horizontal;
- Avaliar o desempenho dos processos de reaproveitamento da emulsão escoada, com fins de economia e redução de resíduos por reciclagem de fluidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EMULSÕES

Pode-se definir emulsão como a mistura de dois líquidos imiscíveis, como água e óleo, em que um líquido está disperso no outro na forma de gotas. Na presença de agentes emulsificantes e energia mecânica, esses líquidos podem formar uma emulsão. Do ponto de vista termodinâmico, emulsões são sistemas termodinamicamente instáveis.

Emulsões estão presentes em diversas aplicações, como em fármacos, cosméticos, pesticidas e alimentos, e em diversos setores industriais, como: mecânico, metalúrgico e petroquímico. Em alguns casos, as emulsões são desejáveis, sendo sua formação induzida na mistura (Choudhary et al., 2026); em outros casos, sua existência é evitada ao máximo (Souza, 2024).

A estabilização das emulsões ocorre pela ação dos agentes emulsificantes, também conhecidos como surfactantes, que formam um filme interfacial, atuando na interface água-óleo de forma a reduzir a tensão interfacial entre as fases. A estrutura molecular dos surfactantes pode apresentar afinidade com água (hidrofílica) ou com óleo (hidrofóbica). Em emulsões de petróleo, a presença de surfactantes naturais, como asfaltenos, resinas e ácidos naftênicos, favorecem a formação de emulsões estáveis.

Na produção de petróleo, à medida que o fluido escoa por um sistema de tubulações, compostos por tubos (lisos ou rugosos) em diferentes orientações (horizontal, vertical ou inclinada), por acidentes de linha (curvas, joelhos, válvulas), e máquinas de fluxo (como bomba centrífuga submersa – BCS), ocorre dissipação de energia mecânica. Elementos com alta dissipação de energia favorecem a formação e estabilização de emulsões, além da quebra de emulsões em gotas pequenas.

A formação de emulsão não ocorre espontaneamente, sendo necessário fornecer ao sistema energia suficiente para promover aumento da área interfacial entre as fases, resultando na formação de gotas dispersas em uma fase contínua (Oliveira; Gonçalves; Marques, 2018). A Eq. (1) apresenta a definição da variação da energia livre de Gibbs em sistemas compostos por fase aquosa, fase oleosa e surfactante.

$$\Delta G_{bb} = \sigma \Delta A - T_K \Delta s \tag{1}$$

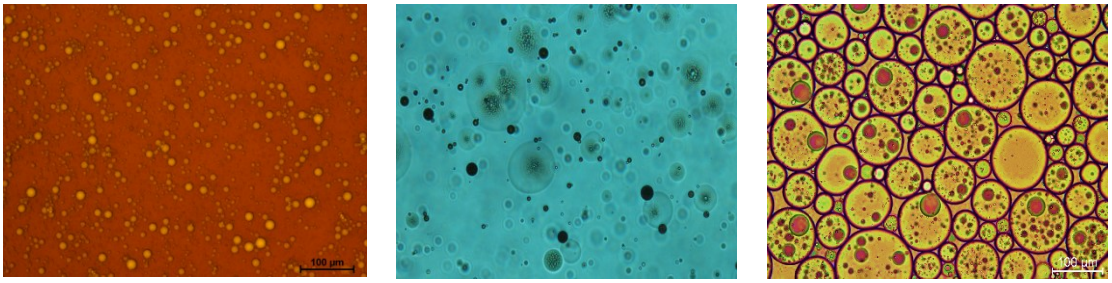
Em que ΔG_{bb} [J] é a variação da energia livre de Gibbs, ΔA [m²] é a variação da área interfacial, σ [J/m²] é a tensão interfacial água-óleo, T_K [K] é a temperatura absoluta e Δs [J/K] é a variação da entropia do sistema.

A energia fornecida ao sistema corresponde ao produto da tensão interfacial σ e a variação da área interfacial ΔA. O termo $\sigma.\Delta A$ deve ser superior a variação do termo entrópico do sistema ($T_k \Delta s$), para que a energia livre de Gibbs seja positiva ($\Delta G_{bb}>0$).

2.1.1 Descrição e tipos de emulsão

A classificação das emulsões pode ser determinada com base na identificação do fluido que compõe a fase contínua e a fase dispersa, entre outras possibilidades de critérios de classificação de emulsões. Conforme ilustrado na Figura 8, as emulsões podem ser do tipo água-em-óleo, óleo-em-água ou emulsões múltiplas.

- Emulsões água-em-óleo (A/O): consistem em gotas de água dispersas em uma fase contínua de óleo. Esse tipo de emulsão é observado em estágios iniciais da produção de petróleo ocorre, em reservatórios com baixa fração de água, como em campos de produção no pré-sal brasileiro.
- Emulsões óleo-em-água (O/A): consistem em gotas de óleo dispersas em uma fase contínua de água. Geralmente formadas após o processamento do petróleo, na chamada água oleosa, que contém teor de petróleo residual disperso. Esse tipo de emulsão ocorre em poços de produção mais maduros, com reinjeção de água. Um exemplo é a produção de petróleo no pós-sal e *onshore* do Brasil.
- Emulsões múltiplas: correspondem a gotas pequenas dentro de gotas maiores imersas em uma fase contínua. Por exemplo, emulsão água-em-óleo-em-água corresponde a gotas de água em gotas maiores de óleo suspensas em uma fase contínua de água.



a) Emulsões água-em-óleo b) Emulsões óleo-em-água c) Emulsões múltiplas

Figura 8 – Classificação de emulsão em emulsões água-em-óleo, óleo-em-água e emulsões múltiplas

Outra classificação relaciona o grau de estabilidade cinética (Kokal, 2005). Essa classificação considera a resistência da emulsão a separação de fases. A Figura 9 ilustra a classificação de emulsões estáveis, instáveis e metaestáveis.

- Emulsões estáveis: são emulsões fortes, com alto período de estabilidade. A separação de fases, ao menos parcial, pode levar dias. Emulsões estáveis apresentam diâmetro de gotas na ordem de 1 a 10 µm.
- Emulsões instáveis: são emulsões fracas, com baixo período de estabilidade. A separação de fases leva minutos. As emulsões instáveis apresentam diâmetro de gotas superior a 50 µm.
- Emulsões metaestáveis: apresentam comportamento intermediário. A separação de fases leva dezenas de minutos a algumas horas. As emulsões metaestáveis apresentam diâmetro de gotas entre 10 µm e 50 µm.

2.1.2 Mecanismos de estabilidade de emulsões

A estabilidade das emulsões é relacionada a sua resistência à separação da fase dispersa com o tempo, sendo influenciada por fatores como: i) tamanho de gotas, ii) agentes emulsificantes, iii) presença de partículas sólidas e iv) temperatura.

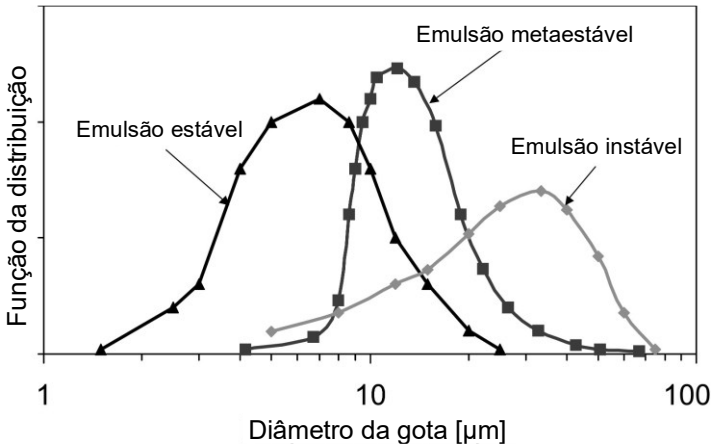


Figura 9 - Distribuição de tamanho de gotas em emulsões estáveis, metaestáveis e instáveis

Fonte: Adaptado de Kokal (2005)

2.1.2.1 Tamanho de gotas

Os diâmetros de gotas de emulsões em escoamento podem variar da ordem de micrômetros [µm] até milímetros [mm]. Usualmente, o tamanho de gotas de emulsões não é descrito através de diâmetros absolutos, mas por faixas de diâmetros de gotas com uma certa frequência volumétrica ou numérica, que caracteriza a Distribuição de Tamanho de Gotas – DTG.

A estabilidade da emulsão é relacionada à respectiva DTG. Quanto menor o tamanho médio de gotas, mais estável a emulsão. Por outro lado, quanto maior o tamanho médio de gotas, menor a estabilidade da emulsão. As chamadas emulsões metaestáveis apresentam comportamento intermediário, com diâmetro de gotas e tempo de estabilidade também intermediários**.**

As propriedades termofísicas das emulsões também apresentam impacto no tamanho das gotas. A viscosidade da fase contínua, por exemplo, exerce influência na DTG, apresentando correlação inversa com o diâmetro de gotas, ou seja, viscosidade de fase contínua mais elevadas resultaram em emulsões com gotas menores (Lv et al., 2024; Yao et al., 2019).

À medida que as gotas se aproximam, aumentam as interações entre elas, e aumenta-se a probabilidade de coalescência e formar um empacotamento no qual as gotas menores ocupam o espaço livre entre as gotas maiores (Oliveira; Gonçalves, 2005). Quanto maior a fração de fase dispersa nas emulsões, mais próximas estão as gotas, e maior a probabilidade de colisão, agregação e coalescência. Como consequência, em emulsões formuladas com mesmo procedimento de preparo, aquelas com maior fração de fase dispersa tendem a apresentar maior tamanho de gotas, como exemplificado nas fotomicrografias da Figura 10 para emulsões A/O

com 2% e 20% de fração volumétrica de água como fase dispersa. Nesse exemplo, as emulsões foram produzidas pela mesma técnica, exceto pela concentração de fase dispersa.

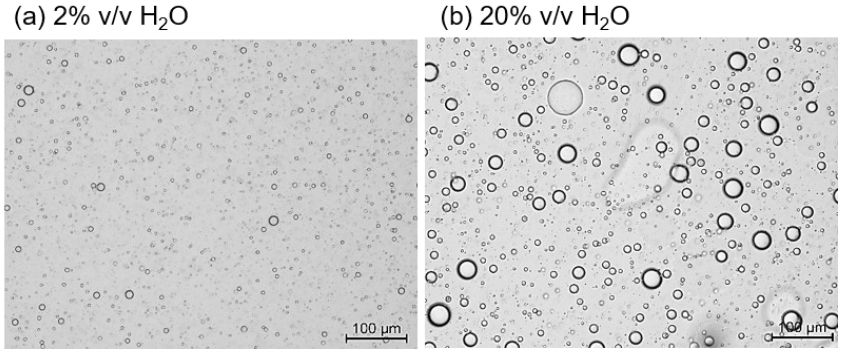


Figura 10 – Emulsões A/O com fração volumétrica de: a) 2% H_2O e b) 20% H_2O

Como técnicas para medição da distribuição do tamanho de gotas, destaca-se microscopia óptica e difração a laser. Na difração a laser, um feixe de laser colimado incide sobre a amostra, é difratado ao incidir sobre gotas ou partículas sólidas. Os feixes difratados são focados em um detector e o sinal recebido é convertido para tamanho de partículas em função do índice de refração. Para que não ocorra espalhamento excessivo de luz, normalmente a amostra de emulsão deve ser diluída em um solvente incolor. Essa técnica apresenta vantagens da rapidez na análise (Oliveira; Gonçalves; Marques, 2018) e boa representatividade estatística.

Na microscopia óptica, obtém-se imagens ampliadas das emulsões em um plano, as quais devem ser processadas em software de tratamento de imagens para obtenção do tamanho de partículas da amostra. Essa técnica permite visualização da morfologia das gotas, porém é limitada quanto à representatividade estatística da amostra.

2.1.2.2 Agentes emulsificantes

Os agentes emulsificantes, ou surfactantes, atuam na chamada estabilização estérica das emulsões (Oliveira; Gonçalves; Marques, 2018). Esses compostos formam uma barreira física na interface das emulsões, reduzindo a mobilidade da interface (Liu; Li, 1999), o que reduz a aproximação das gotas e, consequentemente, a coalescência.

As características estruturais do surfactante definem o tipo de emulsão formada (Oliveira; Gonçalves; Marques, 2018), representadas pelo balanço hidrofílico-lipofílico (HLB), que fornece um valor correspondente à razão entre a porção hidrofílica e lipofílica da molécula. Os surfactantes lipofílicos favorecem a formação de emulsões A/O, enquanto os hidrofílicos favorecem a formação de emulsões O/A.

No caso de emulsões de petróleo, as resinas e os asfaltenos são compostos aromáticos de alto peso molecular que, em determinadas condições, podem precipitar na solução (Sarbar; Wingrove, 1997). É amplamente descrito na literatura os efeitos de resinas e asfaltenos como agentes emulsificantes para formação e estabilidade de emulsões de petróleo. Em determinados casos, as resinas são agentes de emulsificação primários, enquanto em outros casos os asfaltenos desempenham esse papel (Petroni et al., 2024). Os experimentos de Sarbar et al.

(1997) indicam que os asfaltenos são importantes na estabilização de emulsões. Segundo Silva et al. (2018), as resinas e asfaltenos conferem elevada estabilidade às emulsões de petróleo. Janssen et al. (2001) realizaram estudos de formação de emulsões em orifícios, e observaram que em petróleos com maior fração de resina e asfaltenos, a emulsificação ocorreu no sub-regime viscoso.

2.1.2.3 Temperatura

A temperatura atua tanto como mecanismo de estabilidade quanto de instabilidade de emulsões, uma vez que influencia as propriedades físico-químicas dos fluidos e a solubilização dos agentes emulsificantes. Segundo Kokal (2005), a viscosidade é muito sensível à temperatura, sendo que a redução da temperatura implica no aumento da viscosidade, favorecendo a estabilidade das gotas.

A elevação da temperatura promove a redução da viscosidade, aumentando a mobilidade e favorecendo a colisão de gotas por intensificação do movimento Browniano (Oliveira; Gonçalves; Marques, 2018), além de reduzir a rigidez do filme interfacial. É importante destacar que, em escoamento de emulsões em processos industriais, as interações entre as gotas são predominantemente governadas por efeitos hidrodinâmicos, sendo o movimento Browniano um efeito secundário.

Outro efeito relevante do aumento da temperatura é a redução da viscosidade interfacial, resultando em uma taxa de drenagem de filme mais rápida, favorecendo a coalescência das gotas.

2.2 MECANISMOS DE QUEBRA DE GOTAS

Considerado uma das principais contribuições no estudo de quebra de gotas, Hinze (1955) estabeleceu os fundamentos para compreensão da ruptura de gotas de líquidos em escoamentos turbulentos e de gotas em escoamentos viscosos. O autor descreve três formas de deformação de gotas:

- Tipo 1 (lenticular ou *simple shear*): a gota é achatada, assumindo forma de um elipsoide.
- Tipo 2 (forma de charuto ou extensional): a gota é alongada, adquirindo forma de um esferoide.
- Tipo 3 (protuberâncias): deformações locais na superfície da gota levam à formação de protuberâncias, que podem se desprender e originar gotas menores.

Essas formas de deformação de gotas representam diferentes caminhos para deformação e ruptura das gotas, dependendo do campo do escoamento aplicado.

A Figura 11 ilustra as deformações de gotas sob cisalhamento simples e escoamento extensional. Esses mecanismos de deformação podem ser induzidos por diversos tipos de escoamentos, tais como: escoamento laminar ou turbulento, escoamento de *Couette*, escoamento rotacional (como em um misturador ou bomba) e escoamento hiperbólico.

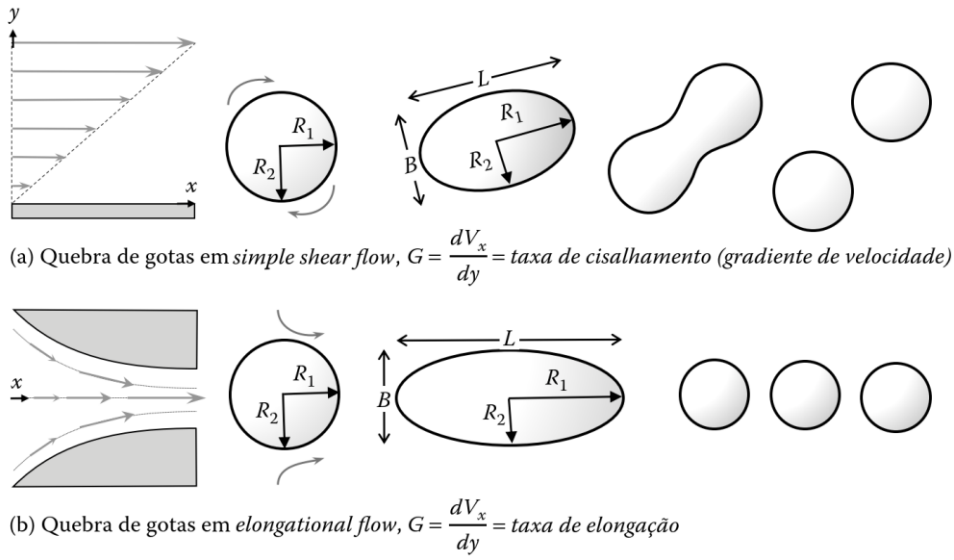


Figura 11 - Ilustração da quebra de gotas em escoamentos laminares: a) cisalhamento simples e b) escoamento extensional

Fonte: Adaptado de Rayner e Dejmek (2015)

Considerando uma gota imersa em uma fase contínua, a quebra de gota ocorre pela interação entre tensões externas e internas (Hinze, 1955). As tensões externas são induzidas pelo campo de escoamento, e podem ser de natureza viscosa ou inercial. Tais tensões externas promovem a deformação de gotas e eventual ruptura. As tensões interfaciais tentam manter as gotas no formato esférico original, se opondo a deformação da gota.

A equação de Young-Laplace, Eq. (2), relaciona a diferença de pressão através da interface com a tensão interfacial do fluido σ e a curvatura da interface $\nabla \cdot \hat{n}$. A tensão exercida pela pressão de Laplace se opõe a deformação das gotas, seja essa de origem viscosa ou interfacial.

$$\Delta P_L = \sigma \nabla \cdot \hat{n} \tag{2}$$

Considerando a curvatura média da interface como função dos raios principais da curvatura R_1 e R_2, a pressão de Laplace pode ser calculada conforme a Eq. (3). Para uma a gota esférica, com $R_1 = R_2 = D_g/2$ em que D_g é o diâmetro da gota, pode-se simplificar mais a equação.

$$\Delta P_L = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$
$$\Delta P_L = \frac{4\sigma}{D_g} \tag{3}$$

A pressão de Laplace representa a resistência interna da gota à deformação, sendo um dos principais parâmetros que governam a estabilidade da gota. Walstra (1993) destaca que gotas pequenas apresentam maior resistência à quebra devido à pressão de Laplace, pois a energia requerida para quebrar gotas pequenas é consideravelmente alta. A adição de

surfactantes reduz a tensão interfacial, tornando necessário menos energia para promover a ruptura de gotas.

Os principais grupos adimensionais relacionados a quebra de gotas são: o número de Reynolds (*Re*), o número de Capilaridade (*Ca*) e o número de Weber (*We*).

O número de Reynolds (*Re*) relaciona as tensões inerciais e as tensões viscosas do escoamento, definido conforme a Eq. (4). Em escoamentos monofásicos internos em tubulações, o regime de escoamento laminar ocorre para $Re < 2300$ e o regime turbulento em $Re > 10^4$. No caso de escoamento laminar, a quebra de gotas é predominantemente governada por tensões viscosas, que induzem gradientes de velocidade na interface da gota (Lemenand et al., 2013; Walstra, 1993), enquanto no regime de escoamento turbulento as tensões inerciais dominam a deformação e ruptura de gotas (Taylor, 1955).

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \bar{U} D}{\mu} \tag{4}$$

Em que ρ [kg/m³] é a massa específica do fluido, μ [Pa.s] é a viscosidade dinâmica do fluido, D [m] é o diâmetro interno da seção transversal e $\bar{U}$ [m/s] é a velocidade média.

O número de Capilaridade - *Ca* um número adimensional que expressa a razão entre as tensões viscosas e a tensão interfacial, sendo calculado através da Eq. (5). Esse adimensional governa a deformação e ruptura de gotas em escoamento laminar. Quando o número de Capilaridade excede um valor crítico Ca_{crit}, as tensões viscosas passam a superar a resistência imposta pela tensão interfacial, resultando na ruptura das gotas.

$$Ca = \frac{\mu G R_g}{\sigma} \tag{5}$$

Em que μ [Pa.s] é a viscosidade dinâmica do fluido, R_g [m] é o raio das gotas, G [s^{-1}] é a taxa de cisalhamento e σ [N/m] é a tensão interfacial.

O número de Weber (*We*) relaciona as tensões inerciais atuando sobre as gotas com à tensão interfacial, sendo calculado conforme a Eq. (6). Em regimes turbulentos, esse parâmetro governa a deformação e a ruptura de gotas. Quando o número de Weber supera um valor crítico We_{crit}, a tensão interfacial não é capaz de manter a integridade da gota, levando à sua ruptura.

$$We = \frac{\rho \bar{U}^2 D_g}{\sigma} \tag{6}$$

Em que: ρ [kg/m³] é a massa específica do fluido, $\bar{U}$ [m/s] é a velocidade média, D_g [m] é o diâmetro da gota e σ [N/m] é a tensão interfacial.

Os mecanismos de quebra de gotas envolvem a deformação da gota sob ação de tensões externas, as quais se opõe à tensão interfacial associada a pressão de Laplace, responsável por preservar a integridade da gota. Essas tensões externas podem ter diferentes origens, como: tensão de cisalhamento, gradiente de velocidade ou queda de pressão. Quando a deformação da gota atinge uma deformação crítica, desenvolvem-se instabilidades interfaciais que promovem sua ruptura. Caso o estado crítico não seja atingido, a gota retorna ao formato esférico original após a remoção ou a redução das tensões externas.

2.2.1 Deformação e quebra de gotas em escoamento laminar

Os estudos sobre deformação e quebra de gotas em dispersões líquido-líquido remontam a quase um século. Grande parte das pesquisas concentra-se na análise de gotas isoladas em escoamentos idealizados, com controle do cisalhamento imposto sobre gotas, buscando compreender os mecanismos fundamentais da deformação e ruptura de gotas. Tais escoamentos idealizados são aparatos com controle da tensão imposta, com a aplicação de cisalhamento simples (Grace, 1982; Janssen; Boon; Agterof, 1994; Megias-Alguacil et al., 2005; Taylor, 1934) ou extensional (Grace, 1982) sobre as gotas.

Taylor (1934) foi um dos pioneiros no estudo de gotas dispersas em escoamento, em que uma única gota era injetada através de uma pipeta em outro líquido confinado em aparatos que promoviam escoamentos do tipo *simple shear* (cisalhamento simples) e *hiperbolic flow* (escoamento hiperbólico). Seus resultados demonstraram que gotas inicialmente esféricas se deformam sob a ação do cisalhamento imposto, adquirindo formato elipsoidal e havendo alongamento progressivo até a ruptura em gotas menores.

A partir desse estudo, Taylor introduziu o número de Capilaridade - *Ca*, um parâmetro adimensional que relaciona as tensões viscosas e a tensão interfacial, calculado através da Eq. (7). Essa equação do *Ca* se diferencia da Eq. (5) por incorporar o parâmetro $f(p)$, que é uma função das viscosidades da fase contínua e fase dispersa.

$$Ca = \frac{\mu G R_g f(p)}{\sigma} \tag{7}$$

O parâmetro $f(p)$ proposto por Taylor (1934) é calculado conforme a Eq. (8), utilizando a razão de viscosidade p entre a viscosidade da fase dispersa μ_d [Pa.s] e a viscosidade da fase contínua μ_c [Pa.s].

$$\begin{aligned} p &= \frac{\mu_d}{\mu_c} \\ f(p) &= \frac{19p+16}{16p+16} \end{aligned} \tag{8}$$

A taxa de cisalhamento G [s^{-1}] é a soma das taxas de cisalhamento simples $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] e taxa de elongação $\dot{\varepsilon}$ [s^{-1}] (Fournanty et al., 2008; Grace, 1982), conforme a Eq. (9). Lemenand et al. (2003) destacam que a taxa de deformação por cisalhamento simples $\dot{\gamma}$ pode ser representada a partir do gradiente de velocidade G.

$$G = |\dot{\gamma}| + |\dot{\varepsilon}| \tag{9}$$

Segundo Grace (1982), para escoamento laminar completamente desenvolvido, a taxa de cisalhamento máxima G_{max} [s^{-1}] em que gotas com diâmetro máximo d_{max} resistem à quebra pode ser pode ser estimada através da Eq. (10), utilizando o diâmetro interno D [m] e a velocidade média $\bar{U}$ [m/s].

$$G_{\max} = \frac{8\bar{U}}{D} \tag{10}$$

Segundo Taylor (1934), o número de Capilaridade governa a deformação e ruptura das gotas. Sob ação de um cisalhamento simples sobre uma gota, ocorre alongamento da gota na direção da máxima extensão, deformando-a para forma de um filamento. Após uma determinada taxa de cisalhamento, a gota deformada é gradualmente fragmentada em gotas muito menores.

Para $Ca = 1$, as tensões viscosas e interfaciais apresentam magnitudes semelhantes. Para $Ca > 1$, as tensões viscosas superam as tensões interfaciais, favorecendo a quebra de gotas. Por outro lado, para $Ca < 1$, a tensão interfacial é maior que a tensão viscosa, favorecendo a manutenção da integridade do filme interfacial e estabilidade da gota. Em todos os casos, o critério para quebra das gotas é quando o número de Capilaridade excede um valor crítico Ca_{crit}. Para $Ca > Ca_{crit}$, a tensão interfacial não é suficiente para manter a integridade da interface da gota deformada, resultando na quebra de uma única gota mãe em duas ou mais gotas filhas.

A Figura 12 apresenta um esquema da quebra de uma gota em duas gotas filhas e uma gota satélite, baseado nas fotografias de ruptura de gotas de Leal (2004). Considerando uma gota esférica não deformada, a tensão do escoamento imposta sobre a gota impõe a deformação e consequente alongamento desta gota. Quando $Ca > Ca_{crit}$, a deformação resulta em rompimento das gotas em pelo menos duas gotas de diâmetros menores que a gota esférica original. Esse processo ocorre tanto em escoamento laminar quanto em escoamento turbulento, valendo que para escoamento turbulento o critério de ruptura é $We > We_{crit}$.

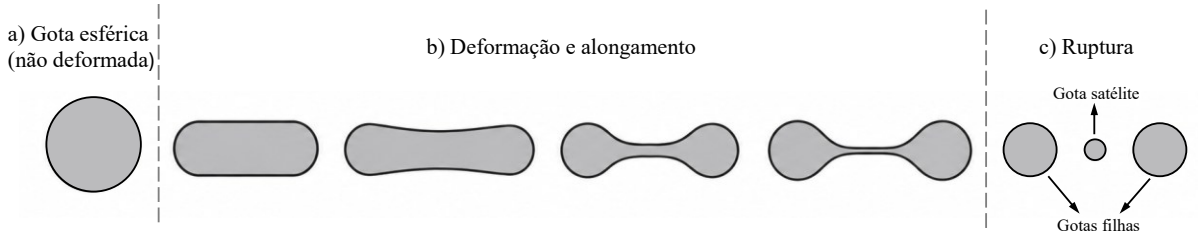


Figura 12 – Esquemático da ruptura de uma gota esférica em duas gotas filhas e gota satélite

A razão de viscosidade p exerce grande impacto na deformação e quebra da gota. Quanto mais próximas as viscosidades, menor é o cisalhamento necessário para quebrar a gota. Karam e Bellinger (1968) avaliaram deformação e quebra de gotas em um escoamento de Couette, submetendo a gota a cisalhamento simples. Os resultados demonstraram que a viabilidade da quebra gotas com razão de viscosidade p entre 0,005 e 4. Além disso, os autores observaram que quanto menor o tamanho da gota maior é o cisalhamento necessário para quebrá-la.

Em trabalho abrangente, Grace (1982) analisou dispersões líquido-líquido em escoamentos rotacionais em escoamento de Couette e extensionais a partir de um aparato tipo *four-roll-mill*, englobando ampla faixa de razão de viscosidade e tensões interfaciais. Os resultados indicam que o Ca_{crit} mínimo para quebrar gotas em escoamento rotacional ocorre na faixa de $0{,}01 < p < 1$, enquanto razões de viscosidade muito altas (>4) ou muito baixas ($<10^{-3}$) demandam maiores intensidades de cisalhamento viscoso para quebrar de gota, o que dificulta a quebra de gotas. Grace demonstra que o escoamento extensional é mais efetivo para quebra

de gotas do que escoamento de cisalhamento simples, pois requerer menor nível de tensão para promover a quebra de gotas.

A Figura 13 apresenta curvas de estabilidade de gotas em escoamentos com cisalhamento simples e extensionais, derivadas de Grace (1982). O eixo das abscissas é a razão de viscosidade, enquanto o eixo das ordenadas é o número de capilaridade crítico. Para escoamentos com Capilaridade abaixo da curva ($Ca < Ca_{crit}$), a tensão viscosa imposta pode deformar a gota, porém sem quebrá-la. Para Capilaridade acima da curva ($Ca > Ca_{crit}$), a tensão viscosa é capaz de deformar e quebrar as gotas. Destaca-se que o cisalhamento necessário para superar o Ca_{crit} é mínimo em razões de viscosidade p entre 0,1 e 1 (Grace, 1982; Lemenand et al., 2003; Walstra, 1993).

Em um exemplo prático, considerando emulsões A/O com razão de viscosidade p na ordem de 10^{-2}, o número de Capilaridade crítico para cisalhamento simples $Ca_{crit} = 2{,}5$ e para escoamento extensional $Ca_{crit} = 0{,}4$.

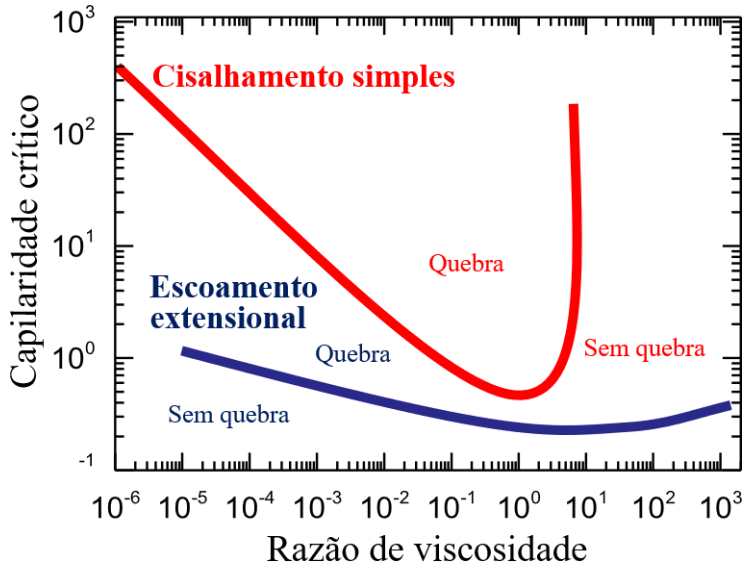


Figura 13 - Curvas de estabilidade de gotas em escoamentos de cisalhamento simples e extensionais em função da razão de viscosidade e número de capilaridade

Fonte: Adaptado de García-Masabet et al. (2020)

As curvas do número de Capilaridade crítico - Ca_{crit} em função da razão de viscosidade p foram obtidas a partir de experimentos com a injeção de gotas isoladas em dispositivos com escoamentos idealizados, do tipo cisalhamento simples e extensional. É importante ressaltar que tais configurações não representam fielmente as condições de escoamentos de fluidos em sistemas de tubulação, mesmo sob regime laminar, em que os campos de cisalhamento são mais complexos, resultando de combinações de cisalhamento e extensão de gotas (Fournanty et al., 2008; Paul; Atiemo-Obeng; Kresta, 2004), além da interação entre múltiplas gotas.

Em escoamentos laminares industriais, os campos de escoamento apresentam tanto efeitos de cisalhamento simples quanto de escoamento extensional (Fournanty et al., 2008; Windhab et al., 2005). O cisalhamento extensional pode ser subdividido em extensional

uniaxial, planar e equibiaxial (Windhab et al., 2005). A Figura 14 ilustra a deformação de gotas em diferentes tipos de cisalhamento.

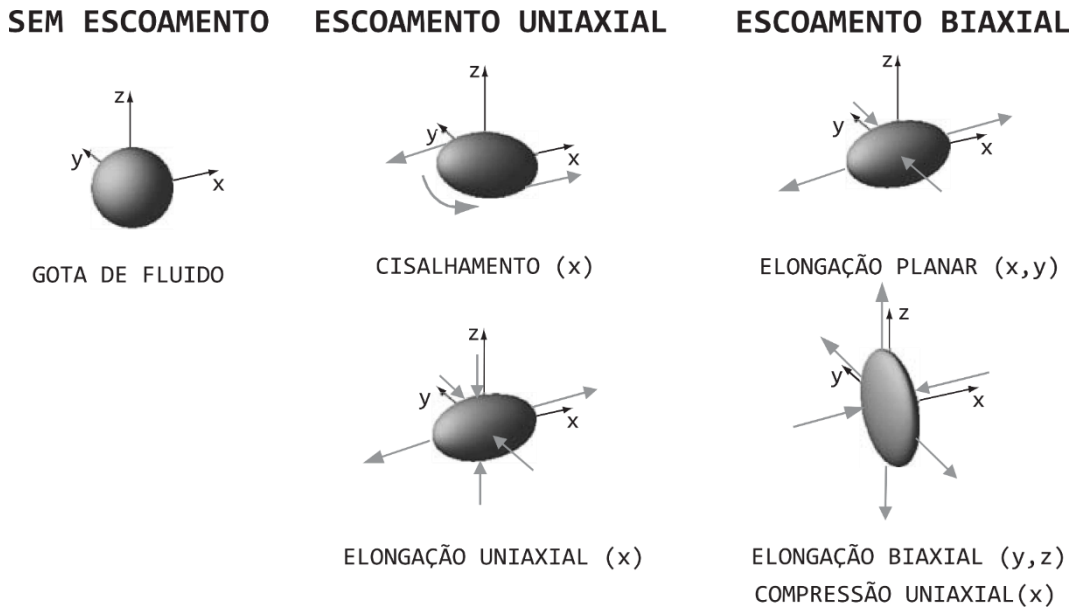


Figura 14 - Deformação de gotas em diferentes tipos de campos de cisalhamento

Fonte: Adaptado de Windhab et al. (2005)

Bentley e Leal (1986) avaliaram a deformação e ruptura de gotas por meio do aparato do tipo *four-roll mill* com fluidos com diversas razões de viscosidade *p* e avaliando proporções entre taxas de deformação e vorticidade. Os autores demonstraram escoamentos predominantemente extensionais favorecem a quebra de ruptura das gotas em baixos números de Capilaridade, enquanto escoamentos em cisalhamento simples gotas viscosas tendem a permanecer estáveis e sem quebra, tal como observado por Taylor (1934) e Grace (1982). De forma complementar, Stone e Leal (1989) investigaram a resposta das gotas a mudanças no escoamento, como por exemplo na alteração do *Ca* e variação do tipo do escoamento.

Janssen et al. (1994) demonstram que a quebra binária de gotas ocorre próximos a Ca_{crit}, enquanto quebra de uma gota mãe em múltiplas gotas filhas ocorrem em *Ca* acima do valor crítico - Ca_{crit}. Em experimentos fluidos com a presença de emulsificantes, dois mecanismos adicionais de quebra de gotas foram observados, denominados *tip-streaming* e *tip-dropping*. Nesses mecanismos, as gotas deformadas assumem estrutura com extremidade pontiaguda, que geram gotas muito pequenas de forma contínua (*tip-streaming*) ou intermitente (*tip-dropping*).

A deformação de gotas submetidas a cisalhamento simples foi objeto de estudo de Megias-Alguacil et al. (2005). O estudo demonstrou que, sob ação de uma taxa de cisalhamento constante, uma gota inicialmente em repouso é deformada progressivamente até atingir um estado estacionário em regime permanente. Fournanty et al. (2008) investigaram a emulsificação de óleos viscosos em regime laminar, demonstrando que a quebra de gotas nesse regime resulta de mecanismos de deformação progressiva, instabilidades capilares e alongamento em campos de cisalhamento e extensão. Os autores destacam que a gota deve atingir um estado crítico de deformação para haver instabilidade do filme interfacial e quebra

da gota. Caso o cisalhamento não seja suficiente para superar esse limiar, a gota retorna ao formato esférico original cessado o escoamento.

Segundo Lemenand et al. (2013), gotas podem ser deformadas em escoamento laminar quando o escoamento induz tensões normais ao longo da trajetória da gota. Nesse caso, as gotas transportadas ao longo das linhas de corrente do escoamento sofrem taxa de deformação não uniforme devido à heterogeneidade espacial do campo de velocidades, tipicamente em escoamentos extensionais.

Em estudos mais recentes, Bigio e Sangli (2024) investigaram a deformação e quebra de gotas em escoamentos extensionais laminares, observando que a deformação das gotas é semelhante para escoamentos abaixo e acima do Ca_{crit}. Os autores propuseram o número de capilaridade baseado na denominada dimensão semi-menor da gota deformada, que é a dimensão perpendicular à maior dimensão da gota, argumentando que é uma métrica mais representativa da deformação e ruptura das gotas. Os resultados indicam que as gotas deformadas atingem valores semelhantes do número de capilaridade baseado na dimensão semi-menor, sendo uma função da razão de viscosidade.

Em termos de modelos para previsão do tamanho de gota em regime laminar, Rodriguez et al. (2025) utilizaram a modelagem teórica de Acrivos e Lo (1978) para escoamentos extensionais uniaxiais, obtendo relações críticas de diâmetro máximo de gotas e o diâmetro da tubulação, conforme Eq. (11).

$$\frac{d_{\max}}{D} = 0,074 \frac{\sigma}{\mu \overline{U}} \left(\frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{1/6} \tag{11}$$

2.2.2 Deformação e ruptura de gotas em escoamento turbulento

Considerando uma gota imersa em uma fase contínua, a quebra de gota ocorre pela interação entre forças externas e forças internas (Hinze, 1955). As tensões externas da gota são induzidas pelo campo de escoamento, seja por um sub-regime viscoso ou inercial, que tentam deformar as gotas. A tensão interfacial σ atua para manter as gotas no seu tamanho e formato esférico original, se opondo às deformações externas sobre as gotas.

A Figura 15 ilustra os sub-regimes inercial ($D_g > \lambda_k$), em que as gotas são maiores que os menores vórtices de comprimento λ_k, e o sub-regime viscoso ($D_g < \lambda_k$), em que as gotas são menores que os menores vórtices.

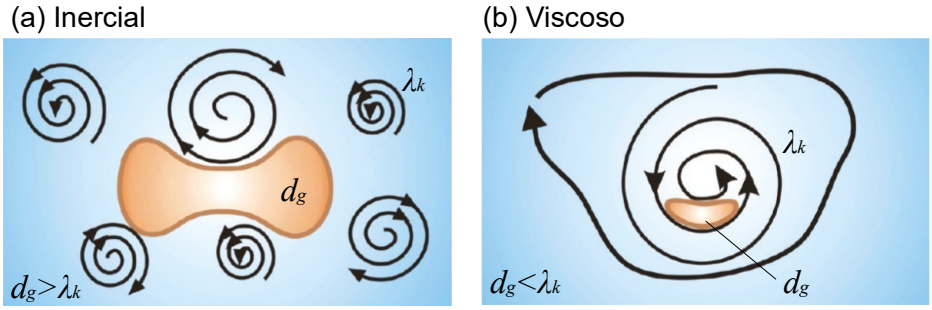


Figura 15 – Esquema do regime de quebra de gotas em escoamentos: a) Sub regime inercial e b) Sub regime viscoso

Fonte: Adaptado de Tcholakova et al. (2011)

Segundo Hinze (1955), quando a tensão viscosa é predominante, as forças viscosas governam a quebra de gotas. Boxall et al. (2012) destaca que, no sub-regime viscoso, o diâmetro máximo estável das gotas d_{max} é inferior ao comprimento da menor escala turbulenta do escoamento ($D_g < \lambda_k$), que pode ser estimada a partir da escala de comprimento de Kolmogorov. Nesse caso, a teoria de quebra de gotas em regime laminar pode ser aplicada.

No sub-regime inercial, a deformação e quebra das gotas são governadas pelas tensões inerciais. As flutuações de velocidade induzidas pelos vórtices atuam na gota ao longo do volume de dissipação de energia. As gotas que apresentam diâmetro D_g maior que a escala de comprimento de Kolmogorov ($D_g > \lambda_k$) são deformadas e quebradas pela ação das tensões inerciais.

A teoria de Hinze (1955) relaciona a quebra de gotas com as tensões inerciais atuando sobre as gota $\tau_{inercial}$ e com a tensão interfacial, essa última representada pela pressão de Laplace. Hinze propõe dois grupos adimensionais. O primeiro é o número de Weber - We, conforme Eq. (12), para escoamentos turbulentos, em que a tensão viscosa pode ser desprezada. Quanto maior o número de Weber, maior a tensão externa comparada a tensão interfacial que mantém a gota coesa. Em valores críticos – We_{crit}, ocorre a quebra de gotas.

$$We = \frac{\tau_{inercial}}{\sigma / D_g} \tag{12}$$

O segundo adimensional proposto por Hinze (1955) é o número de viscosidade – N_{vi}, calculado através da Eq. (13). Esse adimensional é utilizado para considerar o efeito da viscosidade da fase dispersa, tipicamente em emulsões O/A.

$$N_{vi} = \frac{\mu_d}{\sqrt{\rho_d \sigma D_g}} \tag{13}$$

Em que μ_d [Pa.s] é a viscosidade da fase dispersa, ρ_d [kg/m³] é a viscosidade da fase dispersa, σ [N/m] é a tensão interfacial e D_g [m] é o diâmetro das gotas.

O N_{vi} é utilizado para corrigir o We_{crit}, no caso de dispersões com fase dispersa de viscosidade superior à viscosidade da fase contínua, conforme a Eq. (14).

$$We_{crit,c} = We_{crit}(1 + \varphi N_{vi}) \tag{14}$$

Em que $We_{crit,c}$ é o número de Weber crítico corrigido e φ é a fração volumétrica de fase dispersa.

Em escoamentos turbulentos, a tensão inercial é resultante das flutuações de velocidade U' [m/s], conforme Eq. (15).

$$\tau_{inercial} \sim \rho(U')^2 \tag{15}$$

A razão entre a tensão inercial e a tensão interfacial definem o número de Weber para escoamentos turbulentos, calculado conforme a Eq. (16). A quebra de gotas ocorre quando o número de Weber excede um valor crítico We_{crit}.

$$We = \frac{\rho(U')^2 D_g}{\sigma} \tag{16}$$

2.2.3 Aplicações de quebra de gotas em escoamentos internos

Adotando as hipóteses de: i) turbulência isotrópica e homogênea, ii) fluido invíscido e iii) baixa fração volumétrica de fase dispersa, Hinze (1955) fundamentou sua teoria de quebra de gotas em escoamentos turbulentos no trabalho de Taylor (1934). Essas simplificações permitiram estabelecer relações para o diâmetro máximo estável de gotas d_{max} em condições ideais. O modelo resultante é apresentado na Eq. (17), válido para razões de viscosidade $p < 1$, sendo a constante de 0,725 obtida analiticamente para gotas escoando no sub-regime inercial.

$$d_{\max}\left(\frac{\rho_c}{\sigma}\right)^{3/5} \varepsilon^{2/5} = 0,725 \tag{17}$$

A taxa de dissipação de energia ε [$m^2\,s^{-3}$] é de fundamental importância no modelo de Hinze, porém sua determinação experimental é complexa, sobretudo em escoamentos reais em sistemas de tubulação nos quais a turbulência é tipicamente anisotrópica. Técnicas experimentais como anemometria por laser doppler e velocimetria por imagem de partículas podem ser utilizadas para medir o campo de velocidades. No entanto, tais métodos apresentam limitações como alto custo, complexidade operacional em fluidos multifásicos opacos e restrições em ambientes industriais. Consequentemente, normalmente as abordagens experimentais e empíricas de diâmetros de gotas assumem uma taxa de dissipação de energia média (John et al., 2020).

Sleicher (1962) investigou o diâmetro máximo estável de gotas em escoamentos de dispersões O/A, observando que a quebra de gotas ocorre próximo à parede da tubulação, região caracterizada por maiores gradientes de velocidade, em que os efeitos viscosos são dominantes. No centro do duto, a variação da DTG foi pouco significativa. Sleicher (1962) propôs o modelo da Eq. (18), em que d_{max} é independente do diâmetro da tubulação, mas função da propriedades das fases, como massa específica e viscosidade.

$$\frac{d_{\max}\rho_c \bar{U}^2}{\sigma}\sqrt{\frac{\mu_c \bar{U}}{\sigma}} = 38\left[1 + 0,7\left(\frac{\mu_D \bar{U}}{\sigma}\right)^{0,7}\right] \tag{18}$$

Nos trabalhos de Sleicher (1962) e Karabelas (1978), a taxa de dissipação de energia por unidade de massa ε [m²/s³] é calculada através da Eq. (19). Essa abordagem é baseada em médias globais, que não detectam variações locais do escoamento.

$$\varepsilon = \frac{2C_f \bar{U}^3}{D} \tag{19}$$

Em que C_f é o fator de atrito de Fanning, D [m] o diâmetro interno da tubulação e $\overline{U}$ [m/s] a velocidade média na tubulação.

Angeli e Heweitt (2000) investigaram o efeito do material da tubulação na DTG, mantendo rugosidades semelhantes na tubulações avaliadas. Os resultados identificaram gotas menores em tubulações de aço e gotas maiores em tubulações de acrílico, evidenciando efeitos da interação parede-fluido na quebra de gotas. Além disso, foi observado redução do d_{max} com aumento da velocidade do escoamento. Os autores utilizaram a Eq. (19), porém usando o fator de atrito de Darcy.

Karabelas (1978) realizou uma avaliação experimental da DTG em dispersões A/O em tubulações de 50 mm de diâmetro em um trecho de testes com 32 metros de comprimento, utilizando fração volumétrica de fase dispersa de 0,2% (v/v) de água. Os resultados foram comparados com os modelos de Hinze (1955) e Sleicher (1962), obtendo maior concordância com o modelo de Hinze. O estudo identifica que a quebra de gotas é mais intensa próxima à parede da tubulação. Baseando-se nos modelos de Hinze e na teoria de cascata de energia de Kolmogorov, Karabelas (1978) propôs a Eq. (20) para predição do diâmetro de gotas no regime inercial, no qual o número de Weber - We é definido a partir do diâmetro da tubulação D.

$$\frac{D_{v95}}{D} = 4.We^{-3/5} \tag{20}$$

Hesketh, Etchells e Russel (1991) avaliaram o tamanho de gotas em tubulações horizontais, identificando que há uma zona ativa, próxima à parede ($r/R > 0{,}5$), onde a turbulência é suficiente para causar quebra de gotas e uma zona neutra ($r/R < 0{,}5$), próxima ao centro da tubulação, em que pode haver deformação das gotas sem ruptura. Além disso, o estudo propõe correção no We_{crit}, incorporando a razão entre as massa específica da fase dispersa e fase contínua.

Van der Zande e Van den Broek (1998) observaram que o diâmetro máximo das gotas diminui com o aumento da vazão e aumenta com a viscosidade da fase dispersa, evidenciando que gotas viscosas apresentam maior resistência contra a tensão externa do escoamento. Os autores destacam limitação dos modelos clássicos (Hinze, 1955; Karabelas, 1978; Sleicher, 1962) na previsão do diâmetro máximo de gotas. Simmons e Azzopardi (2001) avaliaram a DTG em dispersões de querosene e água salina em tubulações verticais e horizontais de 63 mm de diâmetro, concluindo que a teoria de Hinze é adequada apenas para baixas frações volumétricas de fase dispersa, destacando a necessidade de novos desenvolvimentos para frações volumétricas elevadas. Lovick e Angeli (2004) avaliaram a DTG em dispersões de água e óleo em tubulações horizontais de 38 mm de diâmetro. Os diâmetros de gotas experimentais foram comparados a modelos de outros autores (Hinze, 1955; Sleicher, 1962; Tsouris; Tavlarides, 1994), mas todos subestimaram o d_{max}, indicando limitações nas modelagens existentes.

Kelesoglu et al. (2012) estudaram emulsões A/O em escoamentos laminares em tubulações horizontais de 3 metros de comprimento com diâmetro interno de 22 mm, observando redução da DTG com aumento da vazão e aumento da DTG com aumento da fração volumétrica de água. Para previsão da perda de carga em escoamentos laminares, os autores usaram a equação de Hagen-Poiseuille.

Os modelos clássicos de previsão do diâmetro máximo de gotas em escoamento através de tubulações apresentam limitações significativas quando aplicados a sistemas com emulsões com frações volumétricas superiores a 5% (v/v), justificando a necessidade de investigações experimentais mais representativas. Além disso, não foi encontrada na literatura modelos empíricos relacionando o diâmetro de gotas em escoamento em tubulações com o número de Capilaridade, que é o principal grupo adimensional para escoamento laminar de emulsões.

Em dispositivos de restrição geométrica, como válvulas e orifícios, a alta taxa de dissipação de energia típica de tais elementos favorece a deformação e quebra de gotas, tanto em escoamento laminar quanto em escoamento turbulento. Percy e Sleicher (1983) verificaram a redução do diâmetro de gotas próximo a flanges. Van der Zande e Van der Broek (1998) demonstraram em dispersões A/O com 0,5% de fase dispersa que o aumento da velocidade do escoamento intensifica a quebra de gotas. Em estudos posteriores com emulsões O/A com até 1% de fase dispersa, Van der Zande et al. (1999) demonstraram que o diâmetro das gotas a jusante do orifício é diretamente relacionado à energia dissipada.

Estudos posteriores ampliaram as pesquisas sobre diferentes condições operacionais. Galinat et al. (2005) identificaram que a quebra ocorre predominantemente na região imediatamente a jusante do orifício, onde se concentram elevados níveis de dissipação de energia. Estudos experimentais sobre quebra de gotas foram realizados em acidentes de linha e válvulas de diversos tipos (como borboleta, *choke*, gaveta, globo e de mistura), demonstrando que o aumento da queda de pressão local intensifica a quebra de gotas (Aryafard; Farsi; Rahimpour, 2015; Fossen; Schümann, 2017; Janssen; Boon; Agterof, 1994; Paolinelli; Rashedi; Yao, 2018; Silva; Medronho; Barca, 2019). Além da modificação do tamanho de gotas, as emulsões modificam a perda de carga do escoamento. Khalil et al. (2011) e El-Askary et al. (2013) verificaram que emulsões apresentam maior queda de pressão e maior coeficiente de perda de carga localizada, superiores a fluidos monofásicos.

De forma geral, a literatura estabelece que a intensidade da quebra de gotas aumenta com a dissipação local de energia e com a queda de pressão imposta pela restrição. Assim como no caso de escoamento por tubulações, a maior parte dos estudos sobre quebra de gotas por restrições foi realizada em emulsões diluídas, normalmente com frações volumétricas de fase dispersa inferiores a 5%. Em emulsões com frações volumétricas mais elevadas, as interações entre gotas tornam-se mais frequentes, favorecendo a competição entre os mecanismos de quebra e coalescência de gotas, o que reduz a capacidade preditiva dos modelos analíticos existentes. Essa lacuna evidencia a necessidade de estudos experimentais em condições mais amplas, particularmente utilizando emulsões com frações de fase dispersa mais elevadas escoando em tubulações sob regime laminar.

2.3 COALESCÊNCIA DE GOTAS

A coalescência é um fenômeno de elevada complexidade física, envolvendo a aproximação das gotas, drenagem do filme interfacial e eventual ruptura desse filme interfacial (Liu; Li, 1999). Essas etapas são governadas por propriedades interfaciais, propriedades termofísicas das fases e pelas tensões dominantes no escoamento. Para que a coalescência ocorra, as gotas devem colidir e permanecer em contato durante um período suficiente que o filme líquido aprisionado entre as gotas seja drenado em uma espessura crítica, quando ocorre a ruptura do filme interfacial e agregação das gotas (Coulaloglou; Tavlarides, 1977; Liu; Li, 1999). Durante esse processo, as tensões dominantes do escoamento, seja de origem viscosa ou inercial, podem separar as gotas antes da ruptura do filme, impedindo a coalescência. Para prevenir a coalescência, a energia cinética das gotas deve ser superior à energia de adesão entre as gotas (Shinnar; Church, 1960).

A Figura 16 apresenta um esquema da colisão entre duas gotas e dos processos subsequentes de coalescência, aglomeração ou repulsão. A primeira etapa consiste na aproximação de gotas, em que as gotas se aproximam com diferentes velocidades relativas. Durante essa etapa, as gotas desaceleram e surgem deformação na interface, formando um filme de fase contínua entre as gotas.

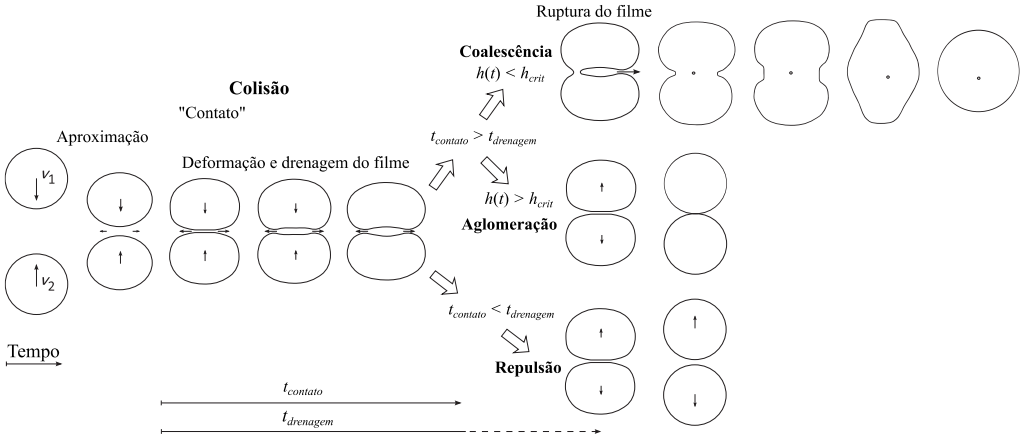


Figura 16 - Esquemático da colisão entre duas gotas e subsequente coalescência, aglomeração ou repulsão

Fonte: Adaptado de Kamp, Villwock e Kraume (2017)

Em seguida, na colisão, há o contato entre as gotas e a deformação interfacial. Nesse etapa, ocorre a drenagem do filme interfacial. O intervalo de tempo entre o contato das gotas e o término da drenagem do filme ($t_{contato}$) represente o tempo requerido para o filme interfacial atingir uma espessura de filme h. A coalescência ocorre somente se o tempo de contato entre as gotas superar o tempo de drenagem do filme interfacial ($t_{contato} > t_{drenagem}$), e também quando a espessura crítica do filme interfacial for atingida ($h < h_{critica}$).

Se o critério do tempo de contato for satisfeito, mas a espessura crítica do filme não for alcançada, as gotas retornam ao estado esférico original após atingirem a deformação máxima e se mantêm unidas temporariamente, caracterizando o processo de aglomeração. Por outro

lado, caso o tempo de contato for inferior ao tempo de drenagem do filme ($t_{contato} < t_{drenagem}$), resulta na repulsão entre as gotas.

A colisão é consequência da existência de velocidades relativas entre as gotas. Em escoamentos viscosos cisalhantes, como em tubulação, a velocidade relativa é determinada pela taxa de cisalhamento G e por uma distância característica na magnitude do diâmetro da gota. Gotas escoando em linhas de corrente podem colidir com outra gota quando o diâmetro da menor gota corresponder a pelo menos 15% do diâmetro da maior gota (Chesters, 1991).

Conforme Lee e Hodson (1968), as forças primárias que causam a drenagem do filme interfacial podem ser: 1) forças hidrodinâmicas associadas ao movimento das gotas; 2) força van der Waals; 3) forças eletroestáticas entre as moléculas adsorvidas na interface e 4) demais forças intermoleculares. Kamp, Villwock e Kraume (2017) destacam o número de Capilaridade e a força de atração van der Waals adimensional constituem os principais parâmetros adimensionais associados aos mecanismos de coalescência de gotas.

A estabilidade do filme interfacial é fortemente influenciada pela presença de componentes ativos na interface. Os surfactantes são componentes que se agregam na interface entre as gotas, geralmente reduzem a probabilidade de coalescência. Tais componentes diminuem a tensão interfacial, e retardam a drenagem do filme devido à redução da mobilidade interfacial e a barreira estérica (Lee; Hodgson, 1968).

Kamp, Villwock e Kraume (2017) apresentam uma revisão abrangente dos fundamentos teóricos, métodos experimentais e métodos numéricos sobre coalescência de gotas em dispersão líquido-líquido. Os autores destacam que não há abordagem determinística consistente para descrever a coalescência, pois a ruptura do filme interfacial é governada por interações em escala microscópica, como por forças van der Waals e flutuações térmicas. Segundo Kamp, Villwock e Kraume (2017), a natureza estocástica dessas interações limita descrições determinística para a coalescência, inclusive de eventos individuais. Como consequência, a representação da coalescência por meio de números adimensionais ou correlações simples torna-se insuficiente.

A abordagem da modelagem numérica da coalescência não será detalhada nesta tese. Tipicamente, assume-se que a fase contínua controla a frequência, intensidade e duração das colisões entre gotas. Sob a ação das tensões dominantes do escoamento, as gotas dispersas sofrem deformações. A taxa de coalescência é frequentemente expressa como o produto entre a frequência de colisão entre gotas e a eficiência de coalescência, sendo essa última função da razão entre o tempo drenagem do filme e o tempo de contato entre gotas após a colisão (Tcholakova; Politova; Denkov, 2016). Liao e Lucas (2010) compilam diversos modelos físicos e empíricos para a modelagem da frequência de coalescência, e discutem as limitações inerentes às abordagens empíricas, cuja aplicabilidade é restrita às condições experimentais para as quais foram originalmente desenvolvidos.

As tensões que regem as colisões entre gotas podem ser viscosas ou inerciais, sendo o regime de escoamento caracterizado pelo número de Reynolds. Além disso, as propriedades interfaciais desempenham papel fundamental na modelagem da coalescência, principalmente quanto a mobilidade da interface. Interfaces rígidas são associadas a fases dispersas de alta viscosidade, enquanto interfaces móveis ocorrem em sistemas de viscosidade baixa ou moderada (Chesters, 1991).

Kamp, Villwock e Kraume (2017) reúnem fatores que promovem ou retardam a coalescência de gotas. Os fatores cujo aumento favorecem a coalescência são: i) tensão interfacial, ii) campo eletroestático, iii) temperatura, iv) molhabilidade e v) transferência de massa. Como fatores cujo aumento dificultam a coalescência, estão: i) pH, ii) viscosidade e iii) componentes ativos na interface. Há ainda fatores classificados como neutros, uma vez que não é possível definir de forma generalista se promovem ou retardam a coalescência. Os fatores neutros são: i) pressão, ii) diâmetros de gota e iii) massa específica. A coalescência é favorecida em emulsões ou dispersões com frações volumétricas de fase dispersa elevadas, pois quanto menor a distância entre as gotas maior a probabilidade de colisão (EL-Hamouz; Stewart, 1996; Rueger; Calabrese, 2013; Trallero; Sarica; Brill, 1997).

Em relação ao impacto da viscosidade na coalescência, gotas com viscosidade inferior à da fase contínua apresentam maior tendência à coalescência (Chesters, 1991). Isso contribui para maior estabilidade das emulsões O/A quando comparadas a emulsões A/O.

O estudo de Coulaloglou e Tavlarides (1977) é um dos pioneiros na modelagem numérica via balanço populacional da quebra e coalescência de dispersões em tanques agitados, servindo como base para desenvolvimentos posteriores como Tsouris e Tavlarides (1994). Os autores desenvolveram um modelo mecanicista com hipóteses simplificadoras, como turbulência isotrópica, gotas esféricas e distribuição normal de energia cinética turbulenta. A partir dessas premissas, o estudo indica que quanto maior a taxa de cisalhamento imposta ao sistema menor a coalescência.

Chesters (1991) aprofundou a modelagem da coalescência em dispersões ao incorporar a mobilidade da interface, demonstrando que interfaces móveis favorecem a coalescência. Segundo o estudo, os modelos de drenagem do filme interfacial diferenciam-se pela rigidez e mobilidade da interface, ou seja, a habilidade da superfície da gota mover com o filme à medida que o filme é comprimido durante a colisão entre gotas. Nessas condições, as superfícies podem ser rígidas ou móveis, e a interface pode ser imóvel, totalmente móvel ou parcialmente móvel.

Em escoamentos turbulentos, a coalescência pode ocorrer tanto no sub-regime viscoso quanto no sub-regime inercial. Entretanto, quebra e coalescência são processos concorrentes e não concomitantes, ou seja, não há coalescência em zonas onde ocorre a quebra das gotas (Chesters, 1991). Liu e Li (1999) demonstram que o aumento da taxa de dissipação de energia reduz a probabilidade de coalescência.

Diversos estudos evidenciam relação entre o tipo de escoamento e a coalescência. El-Hamouz e Stewart (1996) observaram predominância da coalescência em regiões de baixo cisalhamento, como curvas e tubulações horizontais, enquanto a quebra de gotas ocorreu em regiões de alto cisalhamento, como válvulas e orifícios. Trallero, Sarica e Brill (1997) relacionaram a coalescência ao aumento da fração volumétrica da fase dispersa, mesmo em altas velocidades. Walsh (2016) avaliou a formação de gotas por cisalhamento em sistemas de tratamento de água produzida, concluindo que, em tubulações e *flowlines*, a coalescência predomina sobre a quebra de gotas devido à menor taxa de dissipação de energia. Resultados semelhantes foram obtidas por Voulgaropoulos e Angeli (2017) em escoamento de dispersões em tubulações horizontais usando técnicas ópticas como PIV para visualizar escoamentos, identificando crescimento gradual do tamanho das gotas ao longo da tubulação atribuído à coalescência. Mitre et al. (2014) e Aryafard, Farsi e Rahimpour (2015) também demonstram que a coalescência é dominante em escoamentos com baixo cisalhamento, como tubulações. Silva, Medronho e Barca (2019) estudaram emulsões A/O escoando em uma geometria

simulando válvulas gaveta, identificando coalescência para frações de água acima de 7,5%, atribuindo a maior probabilidade de colisão e subsequente adesão das gotas.

Em síntese, o levantamento bibliográfico demonstra que a coalescência é favorecida em escoamentos com baixa dissipação de energia (Tcholakova; Politova; Denkov, 2016), mesmo em escoamentos turbulentos. Por outro lado, a quebra de gotas ocorre em regiões com alta taxa de dissipação de energia, como válvulas e orifícios. Deve-se considerar que a evolução da DTG resulta de um balanço entre tais mecanismos concorrentes. Isso reforça a necessidade de investigações experimentais da evolução da DTG em sistemas representativos.

2.4 FLUIDO MODELO

A realização de testes com petróleo é frequentemente limitada ou mesmo inviável, devido suas características físico-químicas como volatilidade, inflamabilidade, toxidade e riscos ambientais de contaminação (Rodionova et al., 2014). Além disso, a utilização de grandes volumes de petróleo implica desafios logísticas de manuseio, estocagem, transporte e destinação (Naccache et al., 2021). Nesse sentido, o uso de um fluido modelo constitui uma alternativa atrativa, viável, econômica, ambientalmente e operacionalmente e segura para estudos experimentais controlados.

Fluido modelo é um fluido de referência, formulado para mimetizar características físico-químicas de um fluido real, porém sem as desvantagens ambientais e de segurança do manuseio do petróleo. Esses fluidos podem reproduzir propriedades físico-química relevantes como viscosidade, massa específica e tensão interfacial. Rodionova et al. (2014) destacam que um novo fluido modelo deve ser avaliado e preparado para mimetizar cada petróleo em específico, devido à variação composicional e de propriedades do petróleo.

Nesse sentido, ao investigar a emulsificação de emulsões formuladas a partir de diferentes fluidos, Vankova et al. (2007) constataram que emulsões formuladas com óleos mais viscosos apresentam DTGs mais polidispersas. Por outro lado, a polidispersão da DTG não apresentou relação com a tensão interfacial nem com a taxa de dissipação de energia.

Em emulsões A/O produzidas com fluido modelo, a fase dispersa (água) tipicamente é composta por água (potável, filtrada ou deionizada) contendo sais dissolvidos, como NaCl. A fase contínua é composta por um óleo sintético e surfactante adequado. Os surfactantes são responsáveis pelas propriedades interfaciais, como a tensão interfacial e a rigidez da interface (Naccache et al., 2021). Consequentemente, os surfactantes atuam na estabilidade das emulsões e interação entre gotas.

Posteriormente, Rodionova et al. (2014) desenvolveram um fluido de referência para simular as propriedades de um petróleo pesado do Mar do Norte com API 19. Emulsões A/O com frações volumétricas de água entre 10% e 60% foram avaliadas nos critérios de estabilidade, DTG, reologia e comportamento em escoamento. As emulsões foram formuladas com óleo mineral, surfactante não iônico (Span 83) e água salina sintética com 3,5% de NaCl. As emulsões apresentaram perfil reológico e DTG semelhante às emulsões com petróleo de referência, embora não ser viável reproduzir integralmente todas as propriedades do petróleo devido à complexidade composicional do petróleo como fluido real.

Ainda sobre o tema, Brasil et al. (2020) utilizaram emulsões modelo tipo A/O com fração volumétrica de 15% e 20% de água, formuladas com óleo mineral, surfactantes (Span 80 e AOT) e água destilada para analisar a estabilidade após aplicação de um campo elétrico. Os autores destacam como principal vantagem de fluido modelo a alta reprodutibilidade experimental.

Naccacche et al. (2021) propuseram um método para desenvolver fluidos de referência para avaliar emulsões em separadores gravitacionais. Os principais parâmetros avaliados foram: massa específica, viscosidade da fase contínua e tensão interfacial. O óleo-modelo foi composto por óleo mineral (Exxon Primol 352), vaselina e dois surfactantes (Span 85 e Tween 85).

Trabalhos relevantes sobre mimetizar escoamento de petróleo por fluidos-modelo também foram desenvolvidos no Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás (NEMOG/UFES), como o trabalho de Corona et al. (2023), em que são avaliados fluidos sintéticos com potencial para produzir emulsões estáveis tipo A/O simulando emulsão do pré-sal. Baseada em uma emulsão A/O de petróleo real, foram formuladas emulsões modelo compostas por óleo lubrificante médio, surfactantes não-iônicos, água deionizada e NaCl. Foram avaliadas propriedades físico-químicas e o perfil composicional de emulsões sintéticas. Naquele trabalho, é concluído que o método de homogeneização e rotação do impelidor são determinantes nas características da emulsão formulada.

Recentemente, Corona et al. (2024) investigaram a formulação e estabilidade de emulsões modelo que simulam emulsão de petróleo, com ênfase na sua aplicação em circuitos de escoamento em escala laboratorial. As emulsões foram preparadas com diferentes fases óleo e surfactantes não iônicos. Os parâmetros avaliados incluíram separação de fases, distribuição de tamanho de gotas, viscosidade dinâmica e tensão interfacial. O estudo revelou que emulsões preparadas com surfactante não iônico Span 80 apresentaram a melhor potencialidade para testes em escoamento, por proporcionar estabilidade de até 72 horas e diâmetros de gotas entre 0.2 e 100 μm.

3 METODOLOGIA

A Figura 17 apresenta uma visão geral da metodologia de testes adotada neste trabalho. O processo inicia-se com o preparo e caracterização de emulsões em laboratório, com volume total de aproximadamente 400 litros. Em seguida, as emulsões são transferidas para o circuito de testes. Posteriormente, define-se o modo de indução do escoamento, por bombeamento mecânico ou por pressurização do vaso de pressão. Na sequência, o operador deve escolher qual linha de teste será utilizada, linha de referência ou linha principal. Por fim, realiza-se os experimentos de emulsões escoando em sistemas de tubulação, com extração de amostras de emulsão para análise da evolução da distribuição do tamanho de gotas sob diferentes condições experimentais.

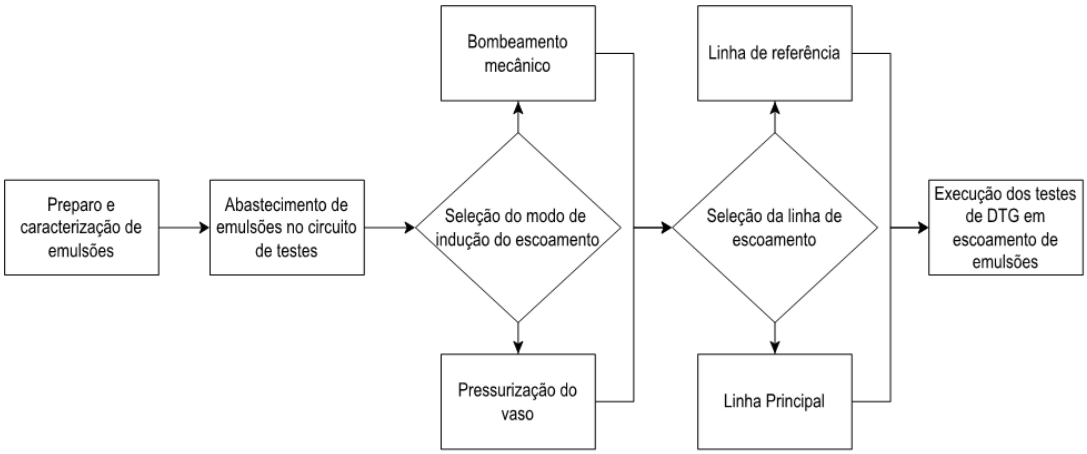


Figura 17 – Visão geral do procedimento experimental proposto para avaliação da distribuição do tamanho de gotas de emulsões

O procedimento experimental é descrito detalhadamente nas seções subsequentes.

3.1 PREPARO DAS EMULSÕES PARA TESTES EM ESCOAMENTO

Os fluidos de testes utilizados neste trabalho são emulsões do tipo água-em-óleo (A/O), compostas por óleo como fase contínua e água como fase dispersa, com fração volumétrica de água entre 5% e 20% (v/v). Essas emulsões são denominadas como “emulsões modelo” ou “fluido modelo”, pois foram formuladas em laboratório para uma aplicação específica. Neste trabalho, os fluidos simulam propriedades de emulsões A/O de petróleo, formadas ao longo da linha de produção de petróleo *offshore*. Como principais vantagens, as emulsões modelo podem ser preparadas com fluidos sintéticos com protocolo reprodutível, reduzindo riscos ambientais, riscos patrimoniais e riscos operacionais (Corona et al., 2023, 2024).

Para preparo de uma emulsão, deve-se selecionar os fluidos que compõe as fases contínua e dispersa e agitá-las suficientemente para obter um sistema homogêneo. O preparo das emulsões foi baseado em Corona et al. (2024), que obteve emulsões modelo com

similaridade diversas propriedades, como massa específica, viscosidade e DTG, com emulsões de petróleo.

A Figura 18 apresenta, de forma esquemática, o procedimento adotado para preparo de emulsões. O procedimento é dividido em três etapas: i) produção da fase oleosa (etapa 1), ii) produção da fase aquosa (etapa 2) e iii) produção da emulsão A/O (etapa 3).

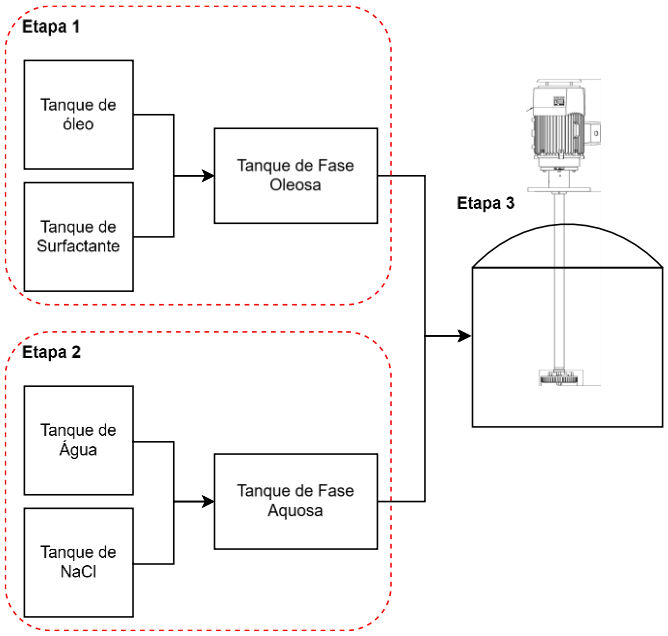


Figura 18 – Processo de preparo de emulsões

A fase contínua é composta pelo óleo mineral hidráulico Mobil AW68 HLP com 0,1% (v/v) do surfactante não iônico Triton X-114. A mistura óleo e surfactante é homogeneizada em bateladas de 50 litros em estufa de homogeneização orbital na rotação de 100 rpm, temperatura de 40°C por 6 horas. Essas condições foram definidas para garantir a completa solubilização do surfactante na fase contínua. Segundo a FISPQ, o AW68 é um óleo sintético composto por óleo básico e aditivos de ação antioxidante, com altas temperaturas de ponto de fulgor (>218°C) e ponto de ebulição (>316°C), e solubilidade em água desprezível (ExxonMobil, 2018).

A fase dispersa é composta por água deionizada e 35 g/L de NaCl, homogeneizadas na estufa orbital a 100 rpm e 40°C, por um período de 1 hora. A adição de sal reproduz a salinidade típica da água do mar, além de influenciar as propriedades interfaciais e estabilidade da emulsão.

Após a preparação de cada fase, água e óleo são misturados em bateladas de 50 L por agitação mecânica a 2500 rpm pelo período de 1 hora, utilizando o dispersor Ika modelo Ultra Turrax T65 com haste dispersora 65G. O fluido produzido em cada batelada é armazenado em um tanque de armazenamento com capacidade de 500L. O fluido resultante desse procedimento apresenta fração de fase dispersa de 1% H_2O.

Cada experimento requer entre 350 e 400 L de emulsão, demandando a repetição do procedimento de preparo de emulsões por 7 ou 8 vezes. Um aspecto fundamental para as emulsões produzidas é garantir um elevado período de estabilidade, tanto em relação à

separação de fases quanto à distribuição do tamanho de gotas. O período de estabilidade das emulsões deve ser suficiente para abranger todas as etapas do experimento, desde a produção das bateladas de emulsão, a homogeneização do fluido produzido, a caracterização das emulsões e a realização dos testes no circuito de escoamentos com medição da DTG de amostras.

Para as demais frações volumétricas de fase dispersa, entre 5% e 20% (v/v) H_2O, o procedimento de produção da emulsão utilizando o dispersor Ultra Turrax também se mostrou aplicável. Entretanto, durante a realização dos experimentos em escoamento, observou-se que as emulsões retornam ao perfil de DTG original característico de cada fração volumétrica de H_2O, sendo possível reciclagem da emulsão para reaproveitamento em novas campanhas de teste. Dessa forma, finalizado o teste, as emulsões retornavam para o tanque de armazenamento, onde ficavam armazenadas em repouso por pelo menos 24 horas. Posteriormente, antes da próxima bateria de experimentos, as emulsões foram homogeneizadas manualmente utilizando uma haste para garantir homogeneidade da fração de fase dispersa e DTG em todo o tanque.

Para modificação da fração volumétrica de fase dispersa, por meio da adição de um volume de fase água, a homogeneização manual foi adequada para produzir uma emulsão metaestável, apresentando com vantagens: a rapidez operacional, simplicidade do procedimento e redução de custos, visto que a emulsão previamente utilizada pôde ser reciclada.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS EMULSÕES

O preparo e caracterização das emulsões foram realizados no Laboratório de Preparo e Caracterização de Emulsão do NEMOG/UFES. Após o preparo dos fluidos, são feitas as caracterizações quanto às seguintes propriedades: massa específica, viscosidade dinâmica, tensão interfacial, DTG e fração de água.



Figura 19 - Laboratório de preparo e caracterização de emulsões (NEMOG/UFES)

3.2.1 Massa específica

A massa especifica dos fluidos foi caracterizada utilizando o analisador digital Anton Paar modelo DSA5000M, conforme norma ASTM D5002 (2019). O equipamento possui

pastilhas termoelétricas de Peltier para controle de temperatura, operando na faixa de 0°C a 100°C, e dois sensores do tipo PT100 para monitoramento da temperatura. O volume de amostra requerido para cada medição é de 5 mL.

A célula de medição consiste em um tubo de borossilicato em formato de “U”. O equipamento excita a célula de medição para oscilar na sua frequência característica. Tanto a massa específica da amostra quanto a temperatura do fluido que preenche o tubo em “U” alteram o padrão de vibração da célula de medição, que é correlacionado com a massa específica da amostra a partir de conversões matemáticas.

Antes das medições com o fluido de interesse, são feitas verificações no DSA5000M primeiro com ar e em seguida com água deionizada, ambos a 20°C, para verificar a calibração do equipamento e garantir a precisão do analisador. Em seguida, para cada amostra de fluido, seja emulsão, fase água ou fase óleo, foi realizada uma varredura de massa específica na faixa de temperaturas entre 20°C e 36°C, com intervalo de 2°C. Todas as medições foram realizadas em duplicata.

A Figura 20 ilustra o analisador digital DSA5000M, enquanto a Tabela 1 apresenta as especificações técnicas do equipamento.



Figura 20 – Densímetro digital DSA5000M

Fonte: Anton Paar (2018)

Tabela 1 – Parâmetros técnicos do densímetro digital DSA5000M

Faixa de medição de massa específica	0 a 3 g/cm³
Faixa de medição de temperatura	0 a 100°C
Repetibilidade da massa específica	0,000001 g/cm³
Reprodutibilidade da massa específica	0,000005 g/cm³
Precisão massa específica	0,000007 g/cm³
Precisão da temperatura	0,01°C

Fonte: Anton Paar (2018)

3.2.2 Reologia

A viscosidade de uma emulsão pode ser significativamente superior à viscosidade da fase contínua (Kokal, 2005), seja óleo ou água, tornando-se um parâmetro de previsão não trivial. Além disso, as emulsões podem exibir comportamento reológico de fluido não-newtoniano, o que justifica a necessidade de caracterização reológica.

A caracterização reológica das emulsões foi realizada no Laboratório de Métodos Experimentais em Fenômenos de Transporte (LAMEFT/UFES), por reômetro da Thermo Fisher Scientific modelo Haake Mars 60, acoplado a um banho termostático da Thermo Scientific modelo Phoenix II para controle de temperatura. Os ensaios visaram determinar propriedades viscosimétricas, incluindo: viscosidade dinâmica, tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento.

A geometria utilizada foi o cilindro coaxial de folga dupla (DG 41), ilustrada na Figura 21, adequada para líquidos com viscosidade de até 1000 mPa.s (Thermo Scientific, 2014). Essa geometria consiste em duas geometrias cilíndricas posicionadas de forma coaxial, projetada para que as razões entre os raios das duas geometrias R_1/R_2 e R_3/R_4 sejam as mesmos, garantindo mesma taxa de cisalhamento entre as geometrias. O volume de amostras requerido é de 6 mL.

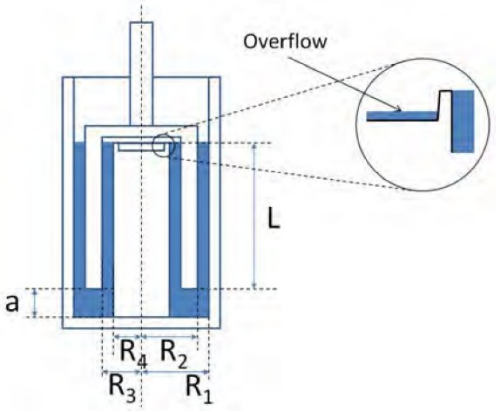


Figura 21 – Célula de medição DG41 com cilindros coaxiais utilizada para caracterização reológica das emulsões

Fonte: Thermo Scientific (2014)

As curvas de fluxo foram obtidas nas temperaturas de 25°C e 35°C e em taxas de cisalhamento entre 1 e 3000 s^{-1}; totalizando 600 pontos experimentais por amostra. Essa faixa foi selecionada para abranger condições representativas dos testes no circuito de escoamento.

Para fluidos newtonianos, nos quais a viscosidade não varia com a taxa de deformação, a viscosidade dinâmica μ é definida como a razão entre a tensão de cisalhamento $\tau_{cisalhamento}$ [Pa] e a taxa de deformação γ [1/s], conforme Eq. (21).

$$\mu = \frac{\tau_{cisalhamento}}{\gamma} \tag{21}$$

Em fluidos não newtonianos, a viscosidade é função da taxa de deformação. Um dos modelos amplamente utilizado é o modelo *Power-Law* ou modelo de Ostwald-de Waele, em que a viscosidade é descrita por uma lei de potência, conforme a Eq. (22).

$$\tau = k\gamma^n \tag{22}$$

Em que k é o índice de consistência e n é o índice de fluidez.

O índice de consistência está relacionado com a viscosidade, quanto maior k maior a energia é necessária para movimentar o fluido. O índice de fluidez pode ser utilizado para determinar o comportamento do fluido, em que $n = 1$ o fluido apresenta comportamento newtoniano, com a viscosidade constante com a taxa de deformação. Para $n < 1$, a viscosidade reduz com aumento da taxa de deformação e o fluido é denominado como pseudoplástico. Para $n > 1$, o fluido apresenta comportamento de fluido dilatante, em que a viscosidade aumenta com aumento da taxa de deformação.

Em líquidos, a mudança da viscosidade em função da temperatura de óleos derivados do petróleo pode ser descrita pela Lei de Arrhenius (Rønningsen, 1995), conforme a Eq. (23), em que C_1 e C_2 são constantes e T_K [K] é a temperatura absoluta. Ou seja, o gráfico de $1/T_K$ por $\ln(\mu)$ deve ser linear.

$$\mu = C_1 e^{C_2/T_K} \tag{23}$$

3.2.3 Distribuição do tamanho de gotas

A distribuição do tamanho de gotas (DTG) descreve a população de gotas presente em uma emulsão, sendo definida como a fração da quantidade ou volume de gotas dentro de uma faixa de tamanhos em relação ao número total de gotas ou volume total ocupado pelas gotas (Dandong Bettersize Instruments Ltd., 2020). A DTG é um dos principais parâmetros utilizados neste trabalho para avaliação da quebra e coalescência.

A DTG pode apresentar comportamento unimodal ou multimodal (Allen, 1990). Como formas de representação, pode-se utilizar gráficos, tabelas ou funções matemáticas. Há ainda a representação via diâmetros característicos, em que é feita uma combinação entre duas das seguintes propriedades: comprimento, superfície, volume e momento. Os diâmetros característicos sintetizam a DTG e simplificam a comparação entre distribuições distintas.

A Eq. (24) apresenta a definição geral do diâmetro característico $D_{[m,n]}$, enquanto a Tabela 2 apresenta os diâmetros característicos.

$$D_{[m,n]} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} n_i D_i^m}{\sum_{i=1}^{N} n_i D_i^n} \right)^{\frac{1}{m-n}} \tag{24}$$

Em que n_i é a frequência numérica da dispersão de gotas no domínio, N é o número de classes ($N = \sum n_i$), D_i é o diâmetro da gota e m,n são números inteiros que definem o tipo de média.

Tabela 2 – Definições de diâmetros médios característicos

Nome	Símbolo	Definição
Número/Comprimento ou Média aritmética	$X_{NL} = D_{[1,0]}$	$\left(\sum_{i=1}^{N} n_i D_i \middle/ N \right)$
Número/Área ou Média de área superficial	$X_{NS} = D_{[2,0]}$	$\left(\sum_{i=1}^{N} n_i D_i^2 \middle/ N \right)^{\frac{1}{2}}$
Número/Volume ou Média volumétrica	$X_{NV} = D_{[3,0]}$	$\left(\sum_{i=1}^{N} n_i D_i^3 \middle/ N \right)^{\frac{1}{3}}$
Comprimento/Área	$X_{LS} = D_{[2,1]}$	$\left(\sum_{i=1}^{N} n_i D_i^2 \middle/ \sum_{i=1}^{N} n_i D_i \right)$
Comprimento/Volume	$X_{LV} = D_{[3,1]}$	$\left(\sum_{i=1}^{N} n_i D_i^3 \middle/ \sum_{i=1}^{N} n_i D_i \right)^{\frac{1}{2}}$
Área/Volume ou Diâmetro de Sauter	$X_{SV} = D_{[3,2]}$	$\left(\sum_{i=1}^{N} n_i D_i^3 \middle/ \sum_{i=1}^{N} n_i D_i^2 \right)$
Momento/Volume ou Diâmetro de De Broukere	$X_{VM} = D_{[4,3]}$	$\left(\sum_{i=1}^{N} n_i D_i^4 \middle/ \sum_{i=1}^{N} n_i D_i^3 \right)$

Para representação do diâmetro característico de emulsões, destacam-se o diâmetro de Sauter - $D_{[3,2]}$ e o diâmetro característico de De Brouckere ou Herdan - $D_{[4,3]}$. O diâmetro volumétrico D_{v50}, que representa a mediana da distribuição, também é utilizado para representar o diâmetro médio de uma DTG. John et al. (2020) defendem que em DTGs multimodais, o diâmetro de Sauter $D_{[3,2]}$ não é métrica adequada para caracterizar o comportamento da DTG, pois o $D_{[3,2]}$ apresenta uma ponderação para as menores gotas da distribuição, que representa gotas satélites, ou seja, gotas que foram quebradas.

Quanto aos diâmetros volumétricos que representam o tamanho das maiores gotas na amostra, o D_{v99} é o diâmetro no qual 99% do volume das gotas está abaixo desse valor, representando o máximo diâmetro estável de gotas na amostra de emulsão. Entretanto, em amostragens em escala semi-industrial, o D_{v99} é sensível a *outliers* e erros sistemáticos da retirada e análise de alíquotas. Por outro lado, os diâmetros D_{v90} e D_{v95} são menos sujeitos a erros experimentais e são comuns de serem usados para representar o diâmetro máximo estável de gotas. Eles representam, respectivamente, o diâmetro de partículas no qual 90% ou 95% das gotas estão abaixo desse valor. Neste trabalho, as análises do diâmetro máximo estável das gotas neste trabalho são baseadas no D_{v95}. Na literatura, não há consenso sobre a métrica mais adequada para representar o d_{max}, sendo encontrado pesquisas utilizando D_{v90} (Silva, Medronho e Barca, 2019), o D_{v95} (Hinze, 1955; Karabelas, 1978) ou mesmo o D_{v100} (Percy e Sleicher, 1983; Van der Zande e Van der Broek, 1998).

Como métricas para avaliar a dispersão nas DTGs, a norma ASTM E799-3 (2015) sugere dois métodos. O primeiro, denominado *span*, é calculado através da Eq. (25), utilizando os diâmetros volumétricos D_{v90}, que representa as maiores partículas, o D_{v10}, que representa as menores partículas, e o D_{v50}, representando a mediana da DTG. O *span* é um adimensional que quantifica a largura da distribuição relativa ao diâmetro central D_{v50}. Valores menores no *span* refletem DTG mais estreita, enquanto maiores valores do *span* refletem distribuição mais larga.

$$span = \frac{D_{v90} - D_{v10}}{D_{v50}} \tag{25}$$

O segundo método sugerido pela ASTM E799-3 (2015) para avaliar a dispersão da distribuição é o D_{dev}, que corresponde a uma média ponderada dos desvios relativos em relação ao D_{v50}, calculada conforme Eq. (26).

$$D_{dev} = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_i \left| D_{v50} - D_i \right|}{\sum_{i=1}^{N} n_i D_{v50}} \tag{26}$$

Neste trabalho, foram utilizados o $D_{[3,2]}$, $D_{[4,3]}$ e D_{v50} para representação do diâmetro médio das gotas. Para os diâmetros máximos, foram utilizados o D_{v95} e D_{v99}. Os parâmetros *span* e D_{dev} foram adotados para avaliar a polidispersão das emulsões.

A medição da DTG foi avaliada utilizando a técnica de difração a laser, que é baseada na propagação de um feixe de luz através de um meio contendo partículas, que por sua vez promovem o espalhamento do feixe de luz. A intensidade e o ângulo de espalhamento do feixe de luz incidente são relacionados com o tamanho das partículas que, neste trabalho, são gotas de líquido dispersas em uma fase contínua de líquido. Neste trabalho, as medições de DTG por difração a laser foram realizadas com o analisador Bettersizer ST, ilustrado na Figura 22, utilizando isoparafina como meio dispersante. O equipamento opera na faixa de 0,1 a 1000 micrômetros (μm), com repetibilidade e precisão inferiores a 1%. Foram adotadas potência do laser superior a 65%, obscuridade de aproximadamente 10%, espalhamento do laser pela teoria de Mie e distribuição do tamanho de gotas na base volumétrica. O volume de amostra de emulsão necessário para análise de DTG é 10 mL. Para cada amostra em análise, são necessários pelo menos 150 mL de dispersante.

O Bettersizer ST é um analisador *offline*, ou seja, opera em bancada analisando amostras. A DTG resultante da medição por difração a laser é uma distribuição acumulada, em que a somatória da frequência volumétrica ou numérica dos diâmetros das gotas resulta em 1.

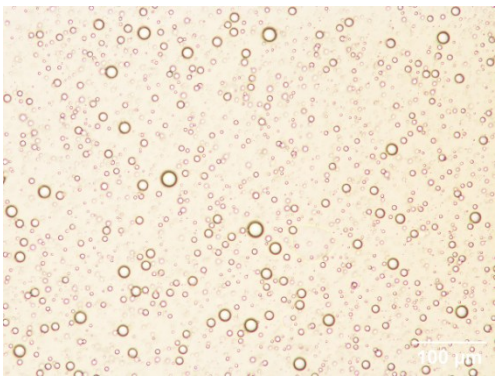
Para análise da DTG por difração a laser, foi adotado um procedimento em triplicata. Assim, para cada amostra de emulsão coletada, foram realizadas três (3) medições de DTG. Nesse procedimento, as medições apresentaram repetibilidade e reprodutibilidade, com variação dos diâmetros característicos na ordem da segunda casa decimal. No pós-processamento dos resultados, a DTG volumétrica foi convertida em DTG numérica, visando à determinação dos diâmetros característicos apresentados na Tabela 2.

A microscopia óptica é uma técnica visual para avaliação da DTG, que possibilita a avaliação do tamanho das gotas, formato das partículas, filme interfacial e dispersão do sistema (Rawle, 2002). São realizadas medidas diretas da amostra por meio da análise da

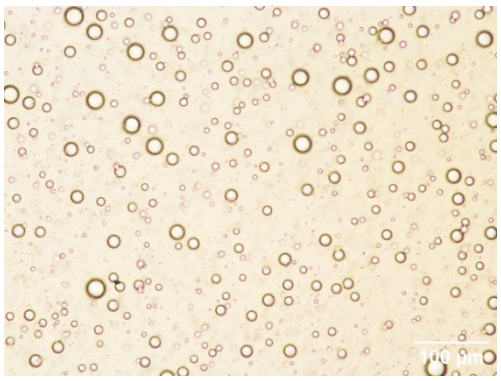
fotomicrografia (Sjöblom et al., 2003) para obtenção de valores numéricos para o tamanho das partículas que compõe a amostra. Entretanto, a quantificação da DTG por microscopia é limitada, pois a amostra é avaliada em um plano. Por outro lado, a fotomicrografia permite analisar a morfologia das gotas.



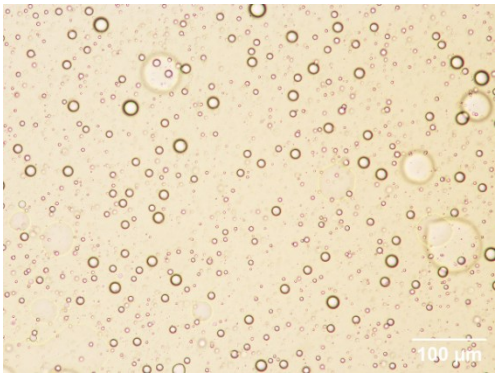
Figura 22 – Difratômetro a laser modelo Bettersizer ST



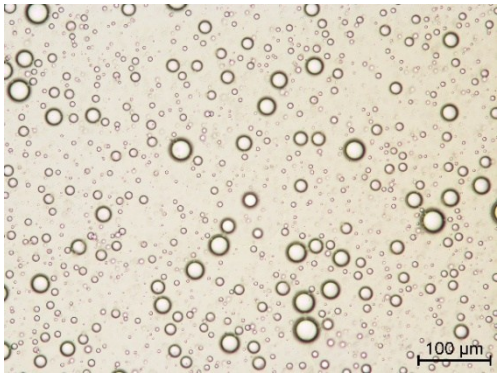
a) Emulsão A/O com 5% (v/v) H_2O



b) Emulsão A/O com 10% (v/v) H_2O



c) Emulsão A/O com 15% (v/v) H_2O



d) Emulsão A/O com 20% (v/v) H_2O

Figura 23 - Fotomicrografia de emulsões A/O com fração volumétrica de fase dispersa entre 5% e 20% de água

A aquisição das imagens foi realizada no microscópio óptico de luz polarizada Nexcope modelo NP900TRF com lente objetiva de 20x e câmera PrimeCam 12 PRO. As imagens foram processadas no software Image J para obtenção do diâmetro de gotas $D[1,0]$. Exemplos de fotomicrografias são apresentados na Figura 23 para emulsões com fração volumétrica de fase dispersa entre 5% e 20% (v/v) H_2O, com escala de 100 µm. As imagens foram obtidas a partir de amostras coletadas no tanque de armazenamento de emulsões, o qual será detalhado adiante neste capítulo. A Figura 23 permite identificar as gotas presentes na emulsão, bem como evidenciar que o aumento da fração volumétrica de fase dispersa resulta na formação de gotas com maiores diâmetros.

3.2.4 Fração volumétrica de água

A fração volumétrica de água na emulsão produzida foi confirmada pela técnica de titulação potenciométrica usando o reagente Karl Fisher em um titulador Metrohm modelo Titrino Plus 870 com eletrodo duplo de platina, conforme norma a norma ASTM D4377 (2011). A amostra foi solubilizada em um solvente contendo 50% (v/v) de metanol e 50% (v/v) de xileno e titulada com reagente Karl Fischer. As medições da fração de água foram feitas em triplicata. A Figura 24 apresenta o titulador Karl Fischer utilizado.



Figura 24 – Titulador Metrohm Titrino Plus 870, utilizado para medição da fração volumétrica de água por Karl Fisher

Fonte: Metrohm (2019)

3.2.5 Tensão interfacial

A tensão interfacial desempenha um papel fundamental na deformação, quebra e coalescência de emulsões, pois é a tensão restauradora do sistema, afetando diretamente a área interfacial entre as fases continua e dispersa. Na quebra de gotas, ocorre aumento da área interfacial total, enquanto na coalescência essa área é reduzida (Ho et al., 2022).

A tensão interfacial é o limite entre dois ou mais fluidos imiscíveis por coexistência. É um fenômeno físico causado pelas forças de coesão entre moléculas semelhantes em uma

interface líquido-líquido ou líquido-gás. A tensão interfacial é medida na interface entre dois fluidos com diferentes massas específicas.

A tensão interfacial σ entre a fase oleosa e a fase aquosa foi medida em triplicata utilizando o tensiômetro Surface Electro Optics (SEO) modelo Phoenix MT, apresentado na Figura 25, do Laboratório de Caracterização e Processamento Primário (LabPetro/UFES). O equipamento emprega o método da gota pendente.

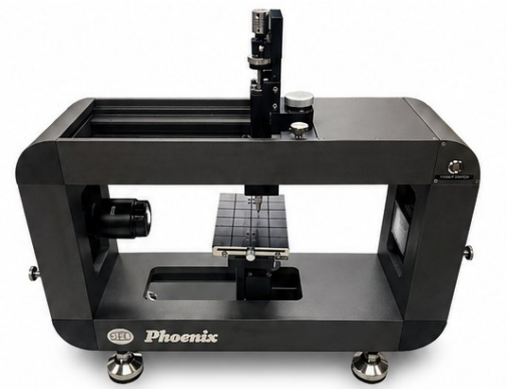


Figura 25 - Tensiômetro SEO Phoenix MT, utilizado para medição da tensão interfacial

Fonte: Surface Electro Optics

Uma seringa plástica com uma agulha na ponta, preenchida com fase oleosa, foi fixada no pistão manual do tensiômetro, de forma que a ponta da agulha se manteve imersa em uma cubeta transparente contendo a fase aquosa. O pistão foi levemente pressionado, de forma a formar gota na ponta da agulha. Uma câmera CCD acoplada ao tensiômetro capturou imagens da gota gerada. As imagens foram processadas digitalmente utilizando a equação de Young-Laplace para obtenção da tensão interfacial.

Neste trabalho, a tensão interfacial é utilizada como propriedade necessária para cálculo dos parâmetros adimensionais número de Weber e número de Capilaridade. Nesse sentido, as análises de tensão interfacial devem ser realizadas sempre que houver alteração da composição das fases (óleo e água), como mudança do inventário.

3.3 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Os estudos de quebra e coalescência de gotas propostos nesta tese foram realizados no Circuito de Escoamento de Emulsões, localizado no Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás (NEMOG), na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Os aspectos de projeto mecânico, operação e similaridade hidrodinâmica do circuito estão detalhados por Kempin et al. (2022).

O circuito experimental pode ser dividido em três etapas principais: (i) Etapa 1: Tancagem e transferência; (ii) Etapa 2: Geração do escoamento e medição de vazão; e (iii) Etapa 3: Trecho de testes.

A Figura 26 apresenta a visão geral do circuito, destacando pontos de amostragem de emulsão utilizados neste trabalho.

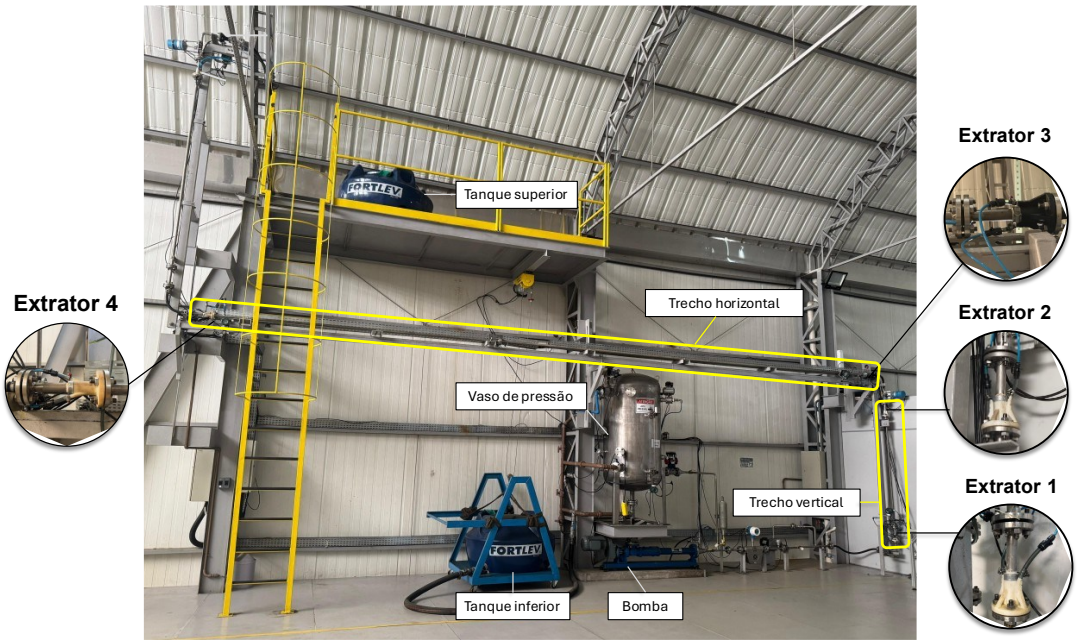


Figura 26 - Visão geral do circuito de testes para avaliação da DTG de emulsões, detalhando os pontos de extração de emulsões usados neste trabalho

Para a análise da DTG e da quebra e coalescência de emulsões, foram considerados dois trechos principais: (i) trecho vertical ascendente (EXT 1 – EXT 2) e (ii) trecho horizontal (EXT 3 – EXT 4). Com esses trechos, pode-se avaliar a influência da orientação do escoamento nos mecanismos de quebra e coalescência de emulsões.

Os comprimentos L dos trechos analisados são apresentados na Tabela 3, tanto em milímetros quanto adimensional (L/D), sendo D = 20,88 mm medido com micrômetro interno.

Tabela 3 – Dimensões relativas dos comprimentos dos trechos de tubos analisados

Trecho	Comprimento L [mm]	L/D
Trecho vertical (EXT 1 - 2)	1835	87,8
Trecho horizontal (EXT 3 - 4)	9095	435,1

A Figura 27 ilustra o diagrama de tubulação e instrumentação (P&ID) da bancada de testes, apresentando as identificações das instrumentações, máquinas de fluxo, tanques e dispositivos amostradores de emulsão.

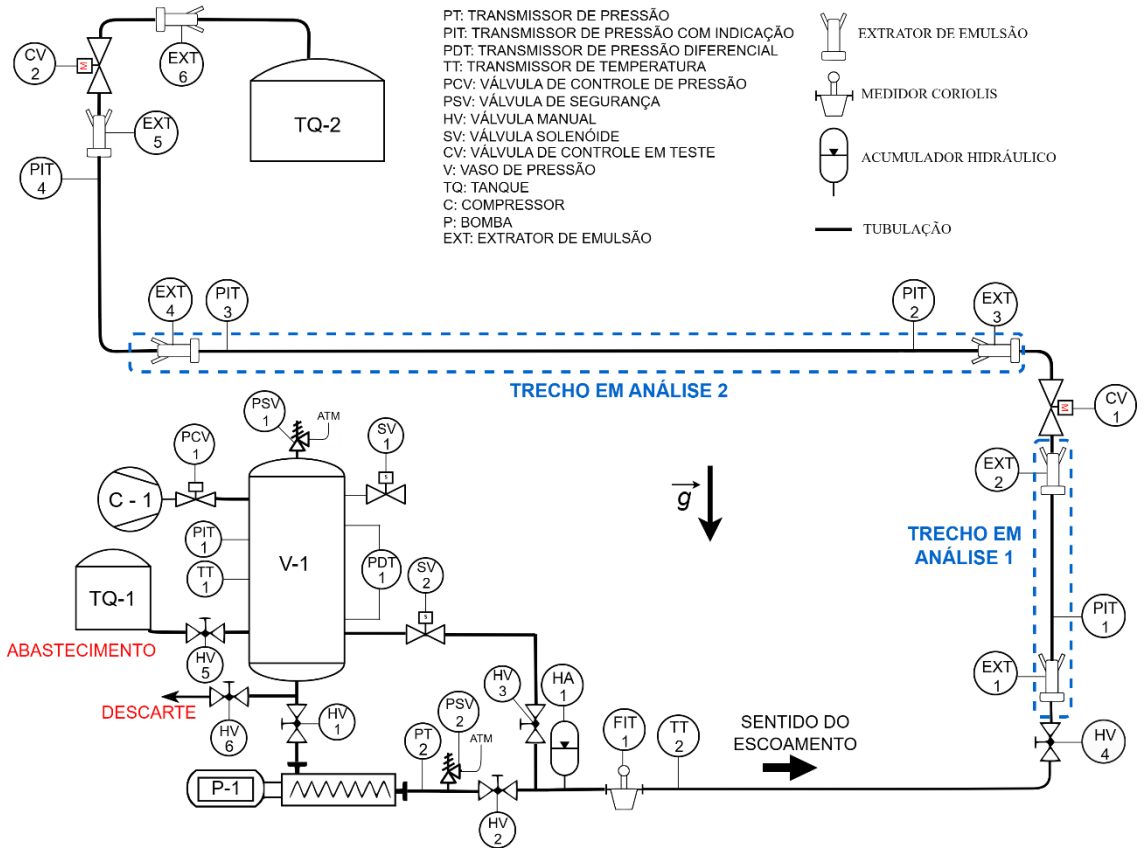


Figura 27 - Diagrama P&ID do circuito de testes de emulsão, destacando os trechos em análise de DTG

Os experimentos foram conduzidos em regime de batelada, sem recirculação de emulsão em circuito fechado. Após cada ensaio, todo o volume de emulsão chega ao tanque superior (TQ-2). Para o teste seguinte, o fluido é transferido para o tanque inferior (TQ-1), onde era novamente homogeneizado e caracterizado quanto à DTG e fração volumétrica de H_2O. Esse procedimento é fundamental para assegurar as características da emulsão, bem como garantir a estabilidade das gotas e reprodutibilidade das condições iniciais entre os testes.

O circuito experimental é composto por um conjunto de equipamentos e instrumentos de medição, bombas, compressores e linhas de teste emulsões. Os experimentos descritos neste trabalho foram conduzidos na chamada Linha Principal (LP), composta por trechos de tubulação verticais e horizontal, equipada com válvulas de estrangulamento e dispositivos amostradores de emulsões.

A Figura 28 apresenta o esquema da bancada de testes com dimensões em metros, destacando as dimensões entre os transmissores de pressão e os extratores de emulsão.

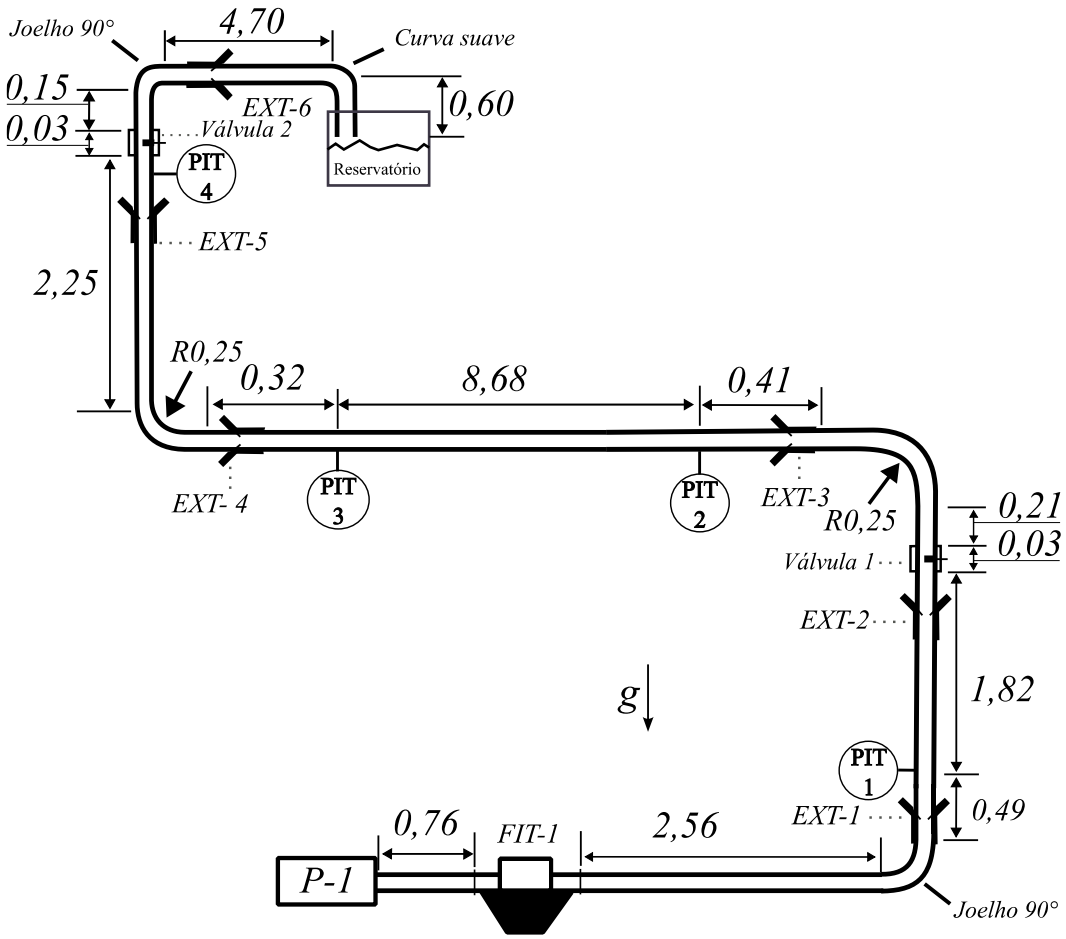


Figura 28 - Croqui do circuito de escoamento de emulsões, com dimensões em metros

3.3.1 ETAPA 1: Tancagem e transferência

Um tanque de armazenamento de emulsão de 500 L (TQ-1, Fortelev) é utilizado para armazenamento, homogeneização e amostragem de emulsão. Uma vez abastecido com emulsão, são retiradas amostras na superfície, meio e fundo do tanque para análise da DTG.

O tanque inferior TQ-1 é içado por uma talha elétrica e transfere o fluido por gravidade para o vaso de pressão de 750 L (V-1, Engetank). Durante essa etapa, assume-se que não há alteração da DTG, uma vez que não há imposição de cisalhamento ou gradientes de velocidade, mas apenas transferência de fluido por gravidade.

O vaso de pressão (V-1) é equipado com válvula de segurança (PSV-1, Fluid Controls VS-140N), sensor de pressão manométrica (PT-1, Warme WTP4010), sensor de temperatura (TT-1, Zurich T.420.I.H), sensor de pressão diferencial (PDT-1, Yokogawa EJA110E) para monitoramento de nível e uma válvula de controle de pressão (PCV-1, Samson 3241) para regular a entrada de ar comprimido e válvula solenoide (SV-1) para regular a saída de ar.

3.3.2 ETAPA 2: Geração do escoamento e medição de vazão

O escoamento pode ser gerado por dois métodos: (i) bombeamento mecânico ou (ii) pressurização do vaso de pressão.

No bombeamento mecânico, o escoamento é promovido por uma bomba de cavidades progressivas (P-1, modelo Helibombas 2HT-32), acionada por um motor elétrico de 4 CV acoplado a um inversor de frequências (modelo WEG CFW500). Esse tipo de bomba fornece escoamento com menor pulsação e baixa quebra de gotas do que bombas centrífugas. Na operação por bombeamento, a válvula solenoide SV-1 é aberta para manter o vaso de pressão em pressão atmosfera, a válvula HV-1 é aberta e a válvula solenoide SV-2 é mantida fechada. Um sensor de pressão manométrica (PT-2, modelo Microsensor M20), instalado imediatamente a jusante da bomba, monitora a pressão na saída da bomba. Além disso, há uma válvula de alívio (PSV-2, modelo Fluid Controls VS-12N) regulada em 11,5 bar para proteger a bomba contra sobrepressão. O operador da planta pode realizar o teste definindo o ponto de operação da bomba manualmente na operação por malha aberta, definindo uma frequência para o inversor de frequência, ou por malha fechada de controle, em que o operador define um ponto de operação de vazão mássica e o sistema supervisório (Figura 31) ajusta a instrumentação da planta para atingir o *set point* desejado.

A jusante da bomba, os tubos têm diâmetro ¾" polegadas (classe de pressão 150 psi), feitos em aço inoxidável, com diâmetro interno de 20,88 mm.

A segunda forma de gerar o escoamento é a partir da pressurização do vaso de pressão V-1. Nesse caso, a válvula manual HV-1 é fechada para impedir vazão para a bomba, a válvula solenoide SV-1 é fechada para bloquear a saída de ar do vaso de pressão, a válvula solenoide SV-2 é aberta para permitir saída de emulsão pelo bocal lateral do vaso de pressão. Em seguida, o compressor de parafusos (C-1, modelo Chiaperini COPA 30G2) é acionado e a válvula de controle PCV-1 regula a entrada de ar comprimido no vaso de pressão V-1. A válvula solenoide SV-2 regula a saída de ar no vaso de pressão, caso necessária. O operador pode optar pela operação em malha aberta, regulando a entrada de ar comprimido no vaso de pressão, ou operação em malha fechada, definindo um ponto de operação de vazão mássica ou pressão no vaso V-1. Entretanto, nessa operação, observa-se não-linearidades entre a pressão do V-1 e a vazão na planta. Nesse caso, a vazão é sensível a temperatura do fluido e fração volumétrica de água nas emulsões.

Após a geração do escoamento, o fluido passa por um acumulador hidráulico (HA-1, modelo Ciltech), cuja função é mitigar flutuações de pressão devido às máquinas de fluxo de deslocamento positivo (bomba helicoidal ou compressor). A vazão mássica e a massa específica são medidas por um medidor de vazão mássico tipo Coriolis (FIT-1, modelo Metroval SMT-20), e a temperatura do fluido é medida por um transmissor de temperatura (TT-2, Zurich T.420.I.H). Os experimentos são conduzidos à temperatura ambiente local, em temperaturas entre 22°C e 30°C.

3.3.3 ETAPA 3: Trecho de testes

A linha principal (LP) possibilita testes com acidentes de linha, como válvulas e restrições, e extração de amostras de emulsão em até sete (7) pontos diferentes para análise da DTG. A LP contempla diferentes tipos de válvulas de controle para teste (CV-1 e CV-2) para

induzir perda de carga localizada e alteração da DTG por variações locais da taxa de dissipação de energia. Por exemplo, as válvulas CV-1 e CV-2 podem simular válvulas de controle e válvulas de bloqueio, como válvulas globo, válvulas agulha, válvulas gaveta, entre outras.

A seção de testes de DTG está localizada após o medidor de vazão Coriolis, iniciando no primeiro trecho vertical ascendente de tubulação. Essa seção tem 2,7 metros de comprimento na vertical. Na parte inferior, há um amostrador de emulsão e um sensor de pressão manométrica (PIT-1, Yokogawa EJA530E). Uma curva suave de 90º, fabricada por mangote flexível, conecta o primeiro trecho vertical ascendente a uma seção horizontal de 9,7 metros de comprimento. A pressão manométrica é monitorada por 2 sensores de pressão, localizados no início e no final desta seção (PIT-2 e PIT-3, Yokogawa EJA530E). A distância entre essas tomadas de pressão é de 8,7 metros.

O segundo trecho vertical ascendente tem 3,0 metros de comprimento. Ao final desta seção, há um sensor de pressão manométrica (PIT-4, Yokogawa EJA530E). Após esse trecho, o fluido escoa através de uma mangueira maleável para o tanque superior de emulsão (TQ-2), para armazenamento temporário.

Os dispositivos amostradores de emulsão, apresentados na Figura 29 e Figura 30, foram instalados em posições estratégicas na bancada de testes para a coleta de amostras destinadas a análises posteriores. Os amostradores de emulsão foram projetados e fabricados no Laboratório de Métodos Experimentais em Fenômenos de Transportes (LaMEFT/UFES), utilizando manufatura aditiva por impressão 3D em resina. Esses dispositivos foram dimensionados para minimizar as perturbações no escoamento durante a amostragem, evitando alterações na DTG.

Os amostradores de emulsão possuem o mesmo diâmetro interno da tubulação da bancada de testes e são equipados com um par de canais de saída de amostras. Esses canais têm a função de captar fluidos próximos à parede interna da tubulação e conduzi-los para um recipiente externo. Quando instalados em tubulações horizontais, os amostradores são posicionados nas geratrizes inferior e superior da tubulação.

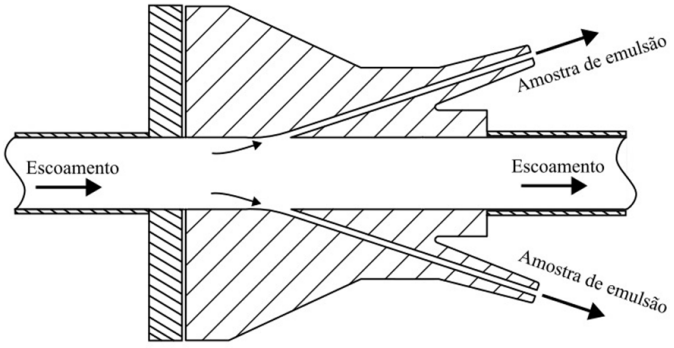
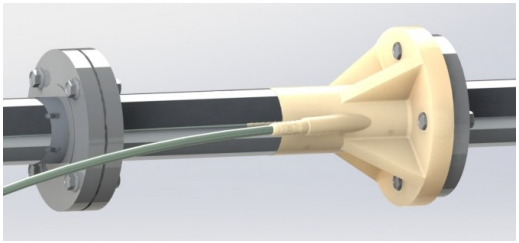
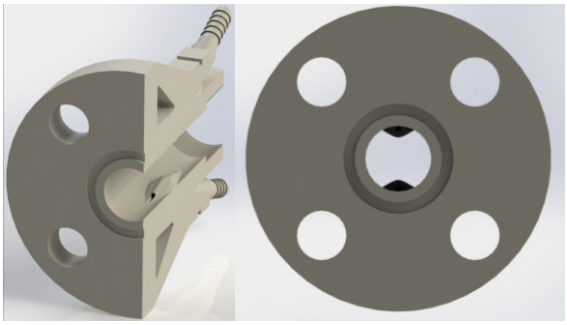


Figura 29 – Croqui interno do dispositivo de amostragem de emulsão em escoamento

Os dispositivos amostradores foram operados individualmente e instalados em posições estratégicas entre os trechos que serão avaliados para a verificação no impacto na DTG. Foram utilizados seis (6) dispositivos de amostragem de emulsão, nas localizações indicadas na Figura 27 e Figura 28.



a) Representação do dispositivo de amostragem de emulsão instalado na tubulação



b) Detalhe no interior do dispositivo

Figura 30 - Ilustração do dispositivo utilizado para coleta de emulsões em escoamento

3.3.4 Procedimento operacional do teste

O procedimento experimental foi projetado para operar em condição de similaridade hidrodinâmica parcial, tomando como referência simulações numéricas de escoamento de emulsão em uma linha de produção em escala real (Kempin et al., 2022), juntamente com dados de emulsão de petróleo tipo A/O (Corona et al., 2023, 2024). O número de Weber (*We*) é um número adimensional que relaciona as tensões inerciais do escoamento sobre gotas com tensões interfaciais que atuam na interface da gota para mantê-la coesa. O *We* é amplamente utilizado em escoamentos líquido-líquido contendo gotas dispersas, seja emulsões ou dispersões, principalmente em regime de escoamento turbulento.

As emulsões armazenadas no vaso de pressão V-1 encontram-se inicialmente em repouso. Assume-se que, ao serem submetidas ao escoamento, as gotas são aceleradas até uma velocidade representada pela velocidade média do escoamento. Nessas condições, o número de Weber do experimento é definido como na Eq. (27). Foi adotado o diâmetro médio característico $D_{[4,3]}$ para cálculo do número de Weber, por representar a média volumétrica da DTG. Além disso, foi observado que o $D_{[4,3]}$ apresenta boa correspondência com a mediana da distribuição - D_{v50}.

$$We = \frac{\rho_m \bar{U}^2 D_{[4,3]}}{\sigma} \tag{27}$$

Em que: σ [N/m] é a tensão interfacial, ρ_m [kg/m³] é a massa específica da emulsão, $\bar{U}$ [m/s] é a velocidade média do fluido e $D_{[4,3]}$ [m] é o diâmetro da gota.

O número de Capilaridade (*Ca*) também apresenta função relevante na evolução da DTG, principalmente para escoamentos laminares ou turbulentos no sub-regime viscoso, ao relacionar as tensões viscosas e as tensões interfaciais. Para fins das análises neste trabalho, a Eq. (28) foi utilizada para cálculo do número de Capilaridade, usando o diâmetro de gotas como D_{v99}, ou seja, considerando as maiores gotas na distribuição.

$$Ca = \frac{\mu_m G D_g}{2\sigma} \tag{28}$$

Em que: μ_m [Pa.s] é a viscosidade da emulsão, G [m/s²] é o gradiente de velocidades sobre a gota, σ [N/m] é a tensão interfacial e D_g [m] é o diâmetro de gota.

Os testes foram parametrizados com base no número de Weber. A condição alvo foi $We_{crit} = 6$, que corresponde a condição de similaridade hidrodinâmica para o qual o circuito foi projetado, conforme descrito por Kempin et al. (2022). Utilizando a DTG da emulsão coletada no tanque inferior, a Eq. (27) é utilizada para calcular a velocidade média do escoamento para manter o Weber desejado. O número de Capilaridade foi utilizado como parâmetro complementar para avaliar a influência das tensões viscosas na evolução da DTG.

O cálculo da vazão mássica alvo do teste Q_m [kg/s] é realizado conforme a Eq. (29), utilizando a massa específica ρ_m [kg/m³], a área do duto A [m²] e a velocidade média $\bar{U}$ [m/s]. Essa vazão é configurada no sistema supervisório, e monitorada por meio das medições do medidor de vazão mássico Coriolis FIT-1.

$$Q_m = \rho_m \bar{U} A \tag{29}$$

Ao longo dos testes, foi observado que o aumento da fração volumétrica de H_2O na emulsão resulta no aumento dos diâmetros de gotas. Consequentemente, quanto maior o diâmetro médio das gostas D_g, menor deve ser a velocidade média do escoamento para garantir o número de Weber definido para o experimento. Essa condição implica na redução da vazão e, consequentemente, diminuição do número de Reynolds, comprometendo a viabilidade operacional do procedimento experimental para coleta de amostras. Por isso, nos testes com fração de fase dispersa entre 5% e 15% H_2O, o Weber máximo foi $We_{max} = 6$, enquanto nos testes com 20% H_2O, o número de Weber mínimo foi $We_{min} = 6$.

Após o início do escoamento e definição da vazão mássica, aguarda-se a estabilização das variáveis operacionais (pressão, temperatura, vazão mássica e massa específica), bem como a renovação do fluido nas tubulações e nos dispositivos amostradores de emulsão. A coleta de amostras de emulsão é iniciada 1 minuto após a estabilização de toda a instrumentação.

As análises da DTG por difração a laser são conduzidas imediatamente após a coleta, concomitante ao teste, com objetivo de minimizar alterações na DTG devido ao tempo entre coleta e análise.

A execução de cada experimento requer uma equipe de seis (6) pessoas atuando de forma síncrona, sendo um (1) para operar o sistema supervisório, quatro (4) para retirada de amostras e um (1) para análise de DTG por difração a laser. Esse procedimento permite obtenção simultânea de amostras de emulsão em diferentes posições ao longo do experimento.

Os experimentos conduzidos nesta tese foram conduzidos em testes induzidos por bomba de deslocamento positivo (P-1), com as válvulas de controle CV-1 e CV-2 completamente abertas, ou seja, sem promover queda de pressão local.

3.3.5 Automação, controle e aquisição de dados

A automação da bancada de testes utiliza o computador lógico programável (*Programmable Logic Controler* - PLC) da National Instruments modelo cRIO 9053, equipado com os módulos de aquisição e controle NI 9208, NI 9266 e NI 9375. A resolução dos módulos da conversão analógica-digital é de 16 e 24 bits. O PLC é responsável por receber sinais de sensores, processamento das informações em tempo real e envio comandos para dispositivos de saída, como máquinas de fluxo e atuadores, garantido a operação controlada e segura do circuito de testes.

O processamento, controle e aquisição de dados são integrados em um sistema de supervisão e aquisição de dados (*Supervisory Control and Data Acquisition* - SCADA) desenvolvido na plataforma LabView. O sistema apresenta funcionalidades como: leitura de dados de instrumentação na planta, cadastro do range de medição de cada sensor, conversão de unidades, geração de gráficos, controle da planta de forma remota e criação de um banco de dados integrando toda a instrumentação do experimento com frequência de aquisição de dados de 10 Hz.

Entre as principais interfaces gráficas do sistema supervisório, destacam-se a visão geral da bancada (Figura 31) e a tela de controle (Figura 32). Na tela de controle integra todas a instrumentação do experimento. Na parte superior da tela, são exibidos gráficos das pressões manométricas ao longo do circuito de testes, da vazão mássica e do nível de líquidos no vaso de pressão. O monitoramento dessas variáveis é fundamental para garantir o regime permanente do experimento e evitar condições de operação fora dos limites de segurança do circuito de testes.

O operador do teste deve definir o modo de operação do experimento: (i) bombeamento mecânico ou (ii) pressurização. Em seguida, deve-se definir entre controle da planta de forma (i) manual ou (ii) automática.

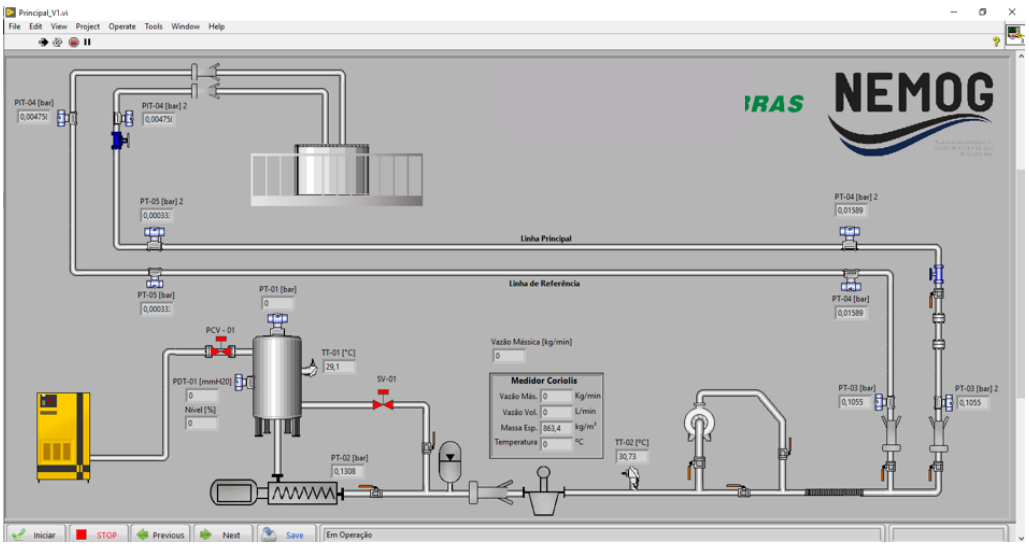


Figura 31 – Tela de visão geral da bancada de testes no sistema supervisório

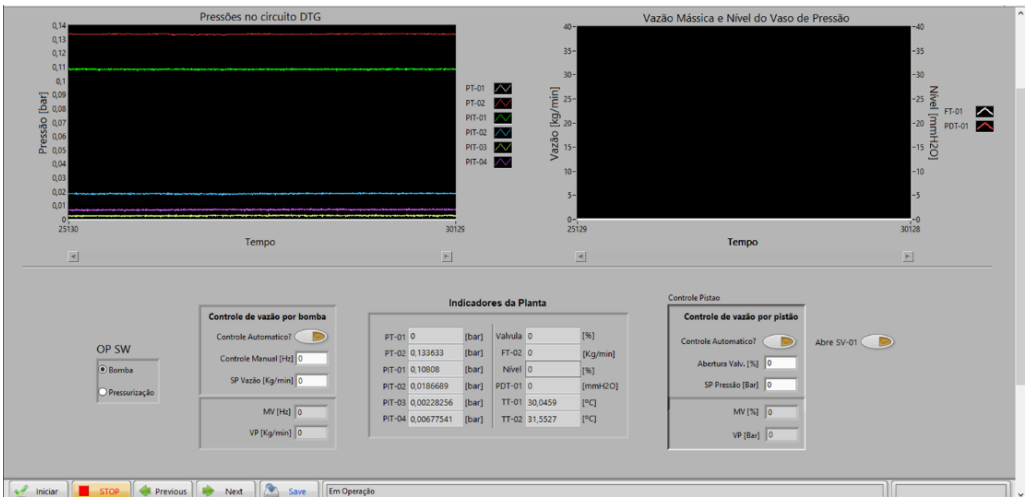


Figura 32 – Tela de controle do sistema supervisório

No modo de operação por bombeamento, o controle manual consiste na definição da frequência do inversor de frequência (0 a 60 Hz), resultando em rotações da bomba de até 400 rpm. A rotação da bomba é proporcional à vazão mássica. Embora simples, esse modo apresenta menor precisão no ajuste do ponto de operação, pois fica integralmente a cargo do operador. Para operação em regime permanente, foi implementado um controlador do tipo proporcional integração derivativo (P&ID) com ação anti-*windup*, no qual o operador define um *setpoint* de vazão mássica, e o sistema ajusta automaticamente a rotação da bomba com base na leitura do medidor mássico Coriolis.

No modo de operação por pressurização, a vazão é induzida por pressurização de ar comprimido no vaso de pressão. Em controle manual, o operador define a abertura da válvula de controle PCV-1 (0 a 100%, em que 100% a válvula está totalmente aberta), regulando a entrada de ar e gerando uma vazão no bocal lateral do vaso de pressão. Entretanto, esse modo apresenta alta sensibilidade às propriedades do fluido e às condições operacionais, como o nível de fluido no vaso de pressão, dificultando a operação em regime permanente de vazão mássica, pois o operador precisa ajustar continuamente a abertura da válvula.

Para contornar esse desafio, foi implementado um controlador automático tipo P&ID com anti-*windup*, no qual o operador define o *setpoint* de pressão manométrica no vaso de pressão, relacionada à vazão mássica. Contudo, a relação entre a pressão no vaso de pressão e a vazão mássica exige conhecimento prévio da planta, demandando testes prévios para levantamento de curvas de pressão por vazão. Observou-se também que variações de temperatura ambiente superiores a 1°C impacta a resposta do sistema, devido à relação entre perda de carga e as propriedades da emulsão.

Diante disso, foi desenvolvido um controlador mais robusto tipo P&ID com anti-*windup* em cascata. Nesse, define-se uma vazão mássica, e o controlador ajusta a abertura da válvula de controle para atingir uma pressão no vaso de pressão suficiente para atingir a vazão mássica desejada. Essa estratégia aumentou a robustez do controlador, resultando em maior estabilidade na operação em regime permanente.

A Tabela 4 apresenta as instrumentações utilizadas no Circuito de Escoamento de Emulsões, com seus respectivos modelos, faixas de medição e precisão. Os instrumentos

operam com tensão de alimentação de 24 Vcc. Os protocolos de comunicação utilizados são: analógico 4-20 mA para transmissores de pressão e temperatura, Modbus para o medidor de vazão mássico e inversor de frequência, analógico 4-20 mA para válvula de controle e digital para as válvulas esfera com atuador eletropneumático.

Tabela 4 – Instrumentação da bancada experimental

TAG	Fabricante	Faixa de medição	Exatidão
PDT-01	Yokogawa EJA110E	0 – 800 mmca	0,05%
PT-01	Warme WTP.4010	0 – 10 bar	0,25%
PT-02	Warme WTP.4010	0 – 10 bar	0,25%
PIT-01	Yokogawa EJA530E	0 – 10 bar	0,05%
PIT-02	Yokogawa EJA530E	0 – 10 bar	0,05%
PIT-03	Yokogawa EJA530E	0 – 10 bar	0,05%
PIT-04	Yokogawa EJA530E	0 – 10 bar	0,05%
TIT-01	Zurich T420.IH	0 – 100°C	0,15%
TIT-02	Zurich T420.IH	0 – 100°C	0,15%
FIT-01 – Q_m Vazão	Metroval	0,2 – 3,0 m³/h	0,20%
FIT-01 – ρ Densidade	Metroval	780 – 1000 kg/m³	0,05%
PCV-01	Samson 3241	0 – 100%	-
SV-01	GBI AT075	Aberto/Fechado	-
SV-02	Microkits MKN 75S12	Aberto/Fechado	-

3.4 COLETA E ANÁLISE DE AMOSTRAS

A ASTM 5002 (2019) define amostragem como conjunto de procedimentos necessários para obtenção de uma alíquota representativa de um fluido confinado em tanques ou sistemas de tubulações, destinada à realização de testes laboratoriais. Nesse contexto, a representatividade e homogeneidade da amostra são requisitos fundamentais para garantir confiabilidade da amostragem.

Na Etapa 1 da realização dos experimentos, a emulsão previamente preparada é armazenada no tanque TQ-1. Com objetivo de verificar a homogeneidade da DTG e da fração volumétrica de fase dispersa, são coletadas amostras em três posições distintas: superfície, meio e fundo. Essas amostras são analisadas e comparadas por difração a laser em triplicata e fração de água por Karl Fischer.

A Figura 33 apresenta fotomicrografias das emulsões na superfície, meio e fundo em uma batelada de testes. A semelhança observada na morfologia das imagens e similaridade da DTG indicam ausência de separação de fases significativa, validando a homogeneidade.

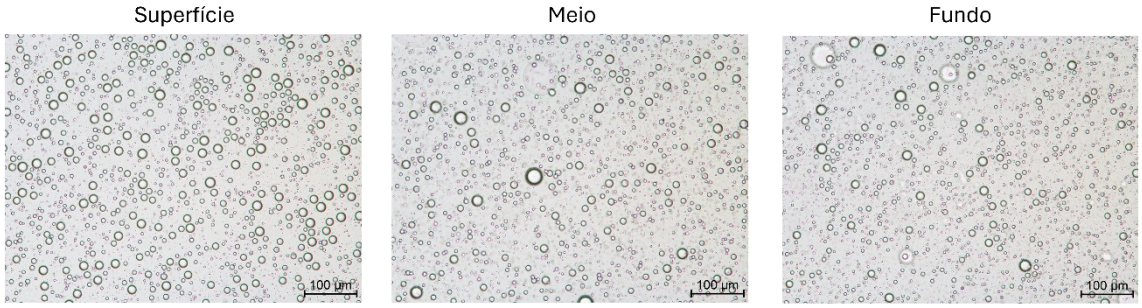


Figura 33 – Fotomicrografia da superfície, meio e fundo da emulsão armazenada no tanque TQ-1

Em seguida, o tanque TQ-1 é içado por uma talha elétrica, válvulas manuais são abertas para que a emulsão seja transferida por gravidade para o vaso de pressão (V-1). O período entre o abastecimento completo do vaso de pressão e o teste em vazão não excede 30 minutos, sendo inferior ao tempo característico para separação de 10% do volume de água emulsionada reportado na literatura (Corona et al., 2023), o que minimiza alterações da DTG inicial.

Após o início do escoamento, a coleta de amostras ocorre um (1) minuto após a estabilização das variáveis operacionais (pressão, vazão mássica e massa específica), garantindo a renovação completa do fluido no experimento. Imediatamente após a coleta das amostras, procede-se a análise de DTG por difração a laser. Para cada amostra, são realizadas medições de DTG em triplicata, permitindo a identificação de erros e avaliação de repetitividade.

Os experimentos são conduzidos em regime de batelada, sem recirculação de fluido. Em cada teste, uma nova emulsão é preparada ou homogeneizada, e caracterizada para DTG e fração volumétrica de água. Portanto, as análises de comportamento da DTG serão conduzidas com base na variação relativa dos diâmetros de gotas para um mesmo teste entre o amostrador de emulsão no final e no início do trecho em análise, conforme Eq. (30). Essa equação será aplicada aos diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95}.

$$\Delta D = 100.\frac{(D_{saida} - D_{entrada})}{D_{entrada}} \tag{30}$$

Em que $D_{entrada}$ é o diâmetro de gotas no extrator no início do trecho em análise e D_{saida} é o diâmetro das gotas no extrator localizado no final do trecho em análise. Valores positivos do ΔD indicam aumento do tamanho de gotas, ou seja, predominância da coalescência, enquanto valores negativos do ΔD refletem a redução do tamanho de gotas, caracterizando predominância da quebra de gotas.

3.5 ENVELHECIMENTO DAS EMULSÕES

O envelhecimento de emulsões é um processo de alteração gradual das funções e propriedades físico-químicas ao longo do tempo, podendo envolver oxidação da fase oleosa, degradação do surfactante e modificação da estrutura interfacial. Esses processos podem impactar a estabilidade da emulsão. O envelhecimento das emulsões pode ser verificado através da mudança de suas propriedades e características típicas, como DTG, massa específica e viscosidade efetiva.

Neste trabalho, o critério de análise do envelhecimento das emulsões foi baseado na capacidade de retornar ao perfil de DTG inicial após escoamento e reagitação da emulsão armazenada no tanque inferior TQ-1. Para isto, antes de cada teste no circuito de escoamentos, foram coletadas amostras de emulsão no TQ-1 após a homogeneização, em diferentes posições do tanque (superfície, meio e fundo). As amostras foram comparadas para garantir uma amostragem representativa e analisadas quanto ao envelhecimento e segregação de gotas.

A integridade da emulsão foi analisada quanto ao perfil da distribuição volumétrica do tamanho das gotas e através dos diâmetros médios característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95}.

O critério estatístico utilizado para comparação entre os diâmetros característicos foi o critério de detecção de falhas de Chauvenet (Taylor, 1997), que consiste em um teste estatístico para detecção de valores discrepantes. Esse critério foi utilizado para identificação e remoção de dados anômalos de diâmetros característicos.

Considerando um espaço amostral com N medições, representadas por um valor médio $\bar{x}$ e um desvio padrão s, calcula-se o quanto cada medição x_i difere do desvio padrão s, através do parâmetro z_i conforme Eq. (31). Em seguida, calcula-se a probabilidade P(Z) de cada valor x_i estar distante da média em uma distribuição normal padrão. De acordo com o critério de Chauvenet, para N*P(Z) < 1/2 o valor x_i pode ser rejeitado.

$$z_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \tag{31}$$

Após a aplicação do critério de rejeição de dados, as DTGs iniciais serão comparadas entre si, considerando cada fração volumétrica de fase dispersa.

3.6 ESTUDO DA RECICLAGEM DE EMULSÕES

O procedimento operacional para realização de testes no circuito de escoamento de emulsões envolveu a recirculação e reutilização de emulsões. A recirculação refere-se à realização de dois ou mais experimentos utilizando a mesma emulsão. A reutilização consiste na modificação da emulsão por meio da adição controlada de fase dispersa em uma emulsão previamente existente, e homogeneização desse fluido por cisalhamento.

Para avaliação do impacto da reutilização da emulsão na DTG, foram conduzidos testes analíticos com a preparação de pequenos volumes de emulsão, cerca de 200 mL, e análise das DTGs para diferentes protocolos de formulação de emulsão. Foram definidos três (3) protocolos experimentais para preparo de emulsões, visando analisar o efeito do cisalhamento sucessivo e do período de agitação na DTG. Os procedimentos de preparo de emulsão foram: (i) Emulsões

novas – EN; (ii) Emulsões reutilizadas e reagitadas – ER; e (iii) Emulsões com período de agitação variável – EPV.

Foram preparadas novas amostras de fase óleo e fase água, com volumes de 4,5 litros e 2 litros, respectivamente, seguindo o procedimento descrito na Seção 3.1. A utilização de um mesmo inventário de fases oleosa e aquosa no preparo das emulsões EN, ER e EPV teve como objetivo minimizar variações composicionais e garantir a semelhança entre as amostras.

As emulsões dos testes analíticos foram preparadas utilizando o dispersor Ultra Turrax IKA T25 com haste 18G, operando com a rotação de 3600 rpm em um período de agitação controlado, produzindo emulsões com fração volumétrica de H_2O entre 5% e 25%.

3.6.1 Preparo das emulsões novas (EN)

As emulsões novas (EN) foram formuladas diretamente a partir das fases óleo e água, submetidas à cisalhamento no dispersor Ultra Turrax T25 com a rotação de 3600 rpm por 4 minutos, produzindo 200 mL de emulsão por amostra. A Tabela 5 apresenta a fração de água medida em triplicata para as emulsões EN, incluindo o valor médio e o desvio padrão das medições. Os limites inferior e superior foram definidos como média ± desvio padrão.

Tabela 5 – Fração volumétrica de água das emulsões novas (EN) para análise do impacto da reutilização de emulsão na DTG

Nome da amostra	% H_2O
A-EN	6,7 ± 0,2
B-EN	12,5 ± 0,3
C-EN	18,5 ± 0,3
D-EN	22,5 ± 0,3

3.6.2 Preparo de emulsões reutilizadas (ER)

As emulsões reutilizadas e reagitadas (ER) foram preparadas a partir de uma emulsão previamente existente, com objetivo de reproduzir a reutilização de emulsões realizadas no circuito de escoamentos e avaliar o impacto de reagitações sucessivas na DTG. As emulsões ER envolvem o reaproveitamento de uma emulsão existente, adição de fase aquosa e agitação por cisalhamento no dispersor Turrax T25 a 3600 rpm por 4 minutos.

Em cada etapa, a fração volumétrica de água foi medida por titulação por Karl Fischer em triplicata imediatamente após a agitação, garantido controle da composição da emulsão e permitindo o cálculo do volume de fase dispersa necessário para a etapa subsequente.

A formulação das emulsões reutilizadas seguiu um procedimento sequencial de preparo, divido em 4 etapas, com armazenamento de 200 mL da emulsão em cada etapa para realização das caracterizações das propriedades termofísicas e análise da DTG.

- Etapa preliminar: preparo da emulsão com fração de fase dispersa de 1,5% A/O.
- Etapa 1: preparo da emulsão A-ER, com fração de água similar à emulsão A-EN, ou seja, fração de água semelhante à 6,7% A/O utilizando a emulsão da etapa preliminar.
- Etapa 2: preparo da emulsão B-ER a partir da emulsão A-ER, com fração de água similar à emulsão B-EN, ou seja, fração de água semelhante à 12,5% A/O.
- Etapa 3: preparo da emulsão C-ER a partir da emulsão B-ER, com fração de água similar à emulsão C-EN, ou seja, fração de água semelhante à 18,5% A/O.
- Etapa 4: preparo da emulsão D-ER a partir da emulsão C-ER, com fração de água similar à emulsão D-EN, ou seja, fração de água semelhante à 22,5% A/O.

O procedimento sequencial de preparo visa reproduzir o efeito do cisalhamento sucessivo nas emulsões ER para avaliar o efeito da reutilização de emulsão e cisalhamento sucessivo na DTG de emulsões, tal como conduzido nos experimentos no circuito de escoamento de emulsões.

A Tabela 6 apresenta a fração volumétrica de água medida nas emulsões ER, obtidas em triplicata.

Tabela 6 – Fração volumétrica de água das emulsões reutilizadas e reagitadas (ER) para análise do impacto da reutilização de emulsão na DTG

Nome da amostra	% H_2O
A-ER	7,0 ± 0,1
B-ER	12,7 ± 0,2
C-ER	18,8 ± 0,5
D-ER	22,9 ± 0,5

Comparando os limites superior e inferior das emulsões reutilizadas - ER (Tabela 6) e emulsões novas - EN (Tabela 5), observa-se que os pares apresentam composições estatisticamente semelhantes: A-EN e A-ER, B-EN e B-ER, C-EN e C-ER, e D-EN e D-ER.

3.6.3 Preparo de emulsões com período de agitação variável (EPV)

Na avaliação do impacto da reutilização de emulsões na DTG, surgem também o efeito do período de agitação, pois o período de agitação total das emulsões ER são: 4 minutos para a A-ER, 8 minutos para a B-ER, 12 minutos para a C-ER e 16 minutos para a D-ER.

Para avaliação do efeito do período de agitação na DTG, foram preparadas quatro (4) amostras de emulsão com período de agitação variável (EPV), com objetivo de interpretar as mudanças da DTG nas emulsões ER se são resultantes das reagitações sucessivas ou do período total de cisalhamento de cada emulsão no dispersor.

O preparo das emulsões EPV foi feito a partir da agitação mecânica no dispersor Ultra Turrax T25 na rotação de 3600 rpm, usando os seguintes tempos de agitação:

- A-EPV: 4 minutos de agitação;
- B-EPV: 8 minutos de agitação;
- C-EPV: 12 minutos de agitação;
- D-EPV: 16 minutos de agitação.

A Tabela 7 apresenta a fração volumétrica de água medida em triplicata para as emulsões EPV.

Tabela 7 - Fração volumétrica de água das emulsões com período de agitação variável (EPV) para análise do impacto da reutilização de emulsão na DTG

Nome da amostra	% H_2O
A-EPV	8,2 ± 0,1
B-EPV	14,3 ± 0,3
C-EPV	20,8 ± 0,2
D-EPV	26,0 ± 0,7

As emulsões EPV apresentam fração volumétrica de água levemente superior às emulsões EN e ER. Entretanto, as frações volumétricas de fase dispersa contemplam a faixa entre 5% e 25% de H_2O, o que é suficiente para realização de estudos analíticos sobre a reutilização de emulsões com foco na DTG.

3.7 AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÕES LINEARES ENTRE DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS

Correlação é uma medida do grau da relação existente entre duas ou mais variáveis aleatórias. Sendo X e Y variáveis aleatórias, caso X e Y forem correlacionados, então as realizações de X podem ser usadas para predizer as realizações de Y.

O coeficiente de correlação de Pearson $r_{X,Y}$ quantifica a relação linear entre duas variáveis e é descrito pela razão entre a covariância de X e Y e o produto dos desvios padrão das variáveis. Para amostras, a covariância é calculada através da (32).

$$r_{X,Y} = \frac{\operatorname{cov}(X,Y)}{s_X s_Y}$$

$$r_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \overline{Y})^2}} \quad (32)$$

Em que cov(X, Y) é a covariância entre as variáveis X e Y, e s_x e s_y são o desvio padrão amostral das variáveis aleatórias X e Y.

O coeficiente de correlação de Pearson é uma grandeza adimensional que pode ser usada para comparar relações lineares entre pares de variáveis em diferentes unidades. O coeficiente

de correlação de Pearson é limitado ao intervalo [-1, 1], sendo interpretado da seguinte forma: (i) $r_{X,Y} = 1$ indica correlação linear perfeita e direta; (ii) $r_{X,Y} = 0$ indica ausência de dependência linear; e (iii) $r_{X,Y} = -1$ indica correlação linear perfeita e inversa.

A interpretação usual do coeficiente de correlação de Pearson é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Interpretação coeficiente de correlação de Pearson

Valor do coeficiente	Interpretação
$0,9 \leq r_{X,Y} \leq 1$ // $-1 \leq r_{X,Y} \leq -0,9$	Correlação muito forte
$0,7 \leq r_{X,Y} < 0,9$ // $-0.9 < r_{X,Y} \leq -0,7$	Correlação forte
$0,5 \leq r_{X,Y} < 0,7$ // $-0.7 < r_{X,Y} \leq -0,5$	Correlação moderada
$0,3 \leq r_{X,Y} < 0,5$ // $-0.5 < r_{X,Y} \leq -0,3$	Correlação fraca
$r_{X,Y} = 0$	Sem correlação

É importante destacar que correlação não implica em causalidade. Ou seja, a existência de correlação significa que há semelhanças na distribuição estatística das variáveis. Além disso, o coeficiente de correlação de Pearson descreve apenas a dependência linear, sendo importante também analisar a dispersão dos dados para identificar possíveis relações não lineares.

Neste trabalho, foi feita a avaliação de correlações lineares entre os diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99} utilizando o coeficiente de correlação de *Pearson* e gráficos de dispersão. Essa análise foi realizada para verificar se as diferentes métricas de diâmetros característicos são relacionadas, considerando que as DTGs podem ser monodispersas ou polidispersas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e discussões da investigação dos mecanismos de quebra e coalescência de gotas em emulsões água-em-óleo em escoamento vertical ascendente e escoamento horizontal, a partir da análise da evolução da distribuição do tamanho de gotas. A metodologia contempla ensaios analíticos, para caracterização dos fluidos e análise da DTG, e experimentos em escala piloto no circuito de escoamento de emulsões.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE EMULSÕES

Após o preparo das fases oleosa e aquosa, foi realizada a caracterização de propriedades termofísicas de interesse desses fluidos. As propriedades avaliadas foram: tensão interfacial, massa específica e reologia para determinação da viscosidade.

A tensão interfacial entre fase oleosa e fase aquosa foi de 4,5 ± 0,1 mN/m, obtida a partir de medições em triplicata. A Figura 34 apresenta uma imagem da gota de óleo imersa na fase aquosa, obtida no tensiômetro utilizando o método da gota pendente.

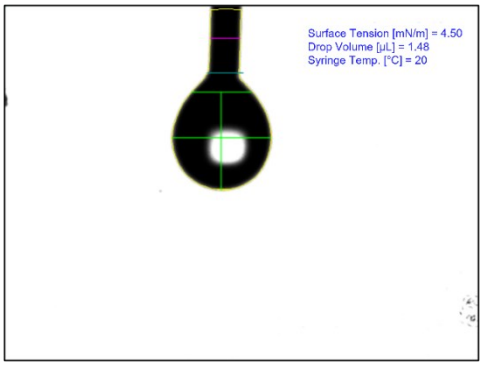


Figura 34 – Gota da fase óleo imersa em fase água no teste de tensão interfacial

A Figura 35 apresenta a variação da massa específica das fases óleo e água na faixa de temperaturas entre 20°C e 50°C, totalizando 16 pontos experimentais. As medições foram realizadas no analisador DSA5000M. Para cada temperatura, a diferença entre as massas específicas das fases água e óleo variou entre 150 kg/m³ (a 20°C) e 157 kg/m³ (a 50°C).

Para a fase óleo, o decaimento da massa específica foi de 0,625 kg/m³ por 1°C. Para a fase água, também houve redução da massa específica com aumento de temperatura, com decréscimo de 0,325 kg/m³ por 1°C. Esses resultados indicam maior sensibilidade térmica da massa específica para fase oleosa em comparação à fase aquosa.

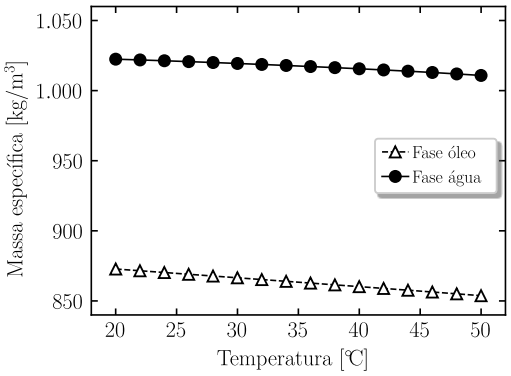
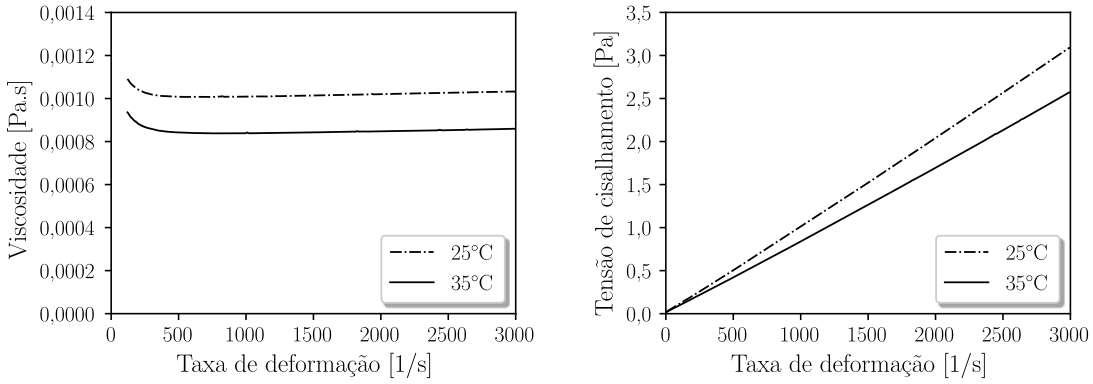


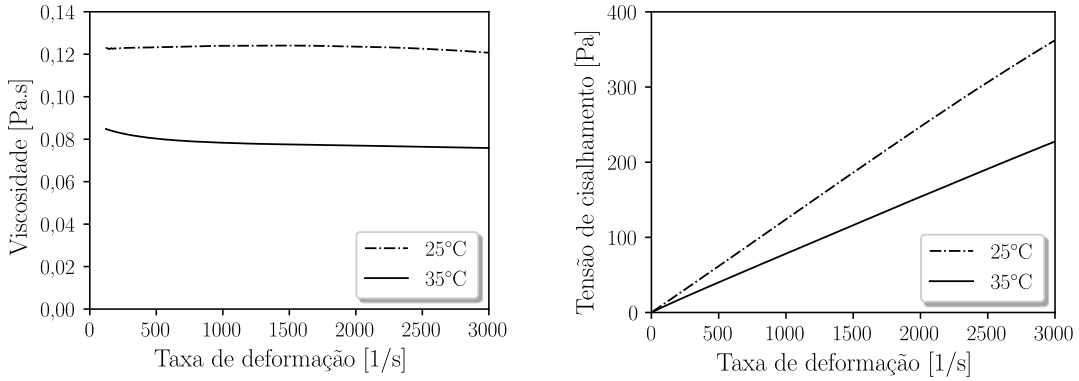
Figura 35 - Massa específica da fase óleo e fase água

A Figura 36 e Figura 37 apresentam as curvas de viscosidade e curvas de fluxo para as fases aquosa e oleosa, respectivamente, em taxas de deformação de até 3000 s^{-1}.



a) Curva de viscosidade b) Curva de fluxo

Figura 36 – Caracterização reológica da fase aquosa



a) Curva de viscosidade b) Curva de fluxo

Figura 37 – Caracterização reológica da fase oleosa

Os dados da curva de fluxo foram processados para determinação dos índices de consistência *k* e índice de fluidez *n*, conforme Eq. (22). Os parâmetros reológicos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Caracterização reológica fase óleo e fase água

Fase	Temperatura [°C]	Viscosidade μ [Pa.s]	Índice de fluidez *n*	Índice de consistência *k*
Água	25	0,0010	0,989	0,001
	35	0,0008	0,977	0,001
Óleo	25	0,1219	1,006	0,118
	35	0,0755	0,960	0,103

Avaliando o índice de fluidez para as fases analisadas, os valores de *n* são entre 0,98 e 0,99 para fase água e entre 0,96 e 1,00 para fase óleo. Tais valores indicam comportamento de fluido newtoniano para as fases oleosa e aquosa nas temperaturas de 25°C e 35°C, ou seja, a viscosidade é independente da taxa de deformação nas condições avaliadas.

Para a fase aquosa, o índice de consistência é 0,001. Para a fase oleosa, o índice de consistência são entre 0,103 e 0,118, ou seja, duas (2) ordens de grandeza superior ao índice *k* da fase aquosa. Esses resultados refletem a viscosidade dinâmica, que para a fase água é 0,0010 Pa.s a 25°C e 0,0008 Pa.s a 35°C e para a fase óleo é 0,1219 Pa.s a 25°C e 0,0755 Pa.s a 35°C.

Para caracterização de cada emulsão formulada, foram coletadas três (3) amostras de fluido para análise da massa específica e viscosidade, nas mesmas condições utilizadas para caracterizar as fases oleosa e aquosa. Essa abordagem permite avaliar a influência da fração volumétrica de fase dispersa nas propriedades termofísicas das emulsões.

A Figura 38 apresenta a massa específica de emulsões com frações volumétricas entre 7% e 20% (v/v) de H_2O em temperaturas entre 20°C e 36°C, com incremento de 2°C. Observa-se que a faixa de temperatura adotada para caracterização da massa específica das emulsões é mais restrita que aquela utilizada para as fases oleosa e aquosa (20°C a 50°C). Essa limitação da temperatura ocorreu por alertas de medição no analisador DSA5000M associado à presença de gotas. Esse aviso ocorreu nas temperaturas superiores a 36°C, especialmente para a frações volumétrica de 15% e 20% H_2O. Acredita-se que temperaturas acima de 36°C aceleram o processo de separação de fases, uma vez que a metodologia de formulação de emulsões foi avaliada até 35°C, conforme descrito por Corona et al. (2024).

Para cada fração volumétrica de água, observa-se redução da massa específica com o aumento da temperatura. Em contrapartida, a massa específica aumenta a fração volumétrica de água, sendo a emulsão com 7% (v/v) H_2O apresentando valores mais baixos de massa específica e a emulsão com 20% (v/v) H_2O apresentando os valores mais elevados de massa específica. Esses comportamentos foram observados na faixa de temperatura em análise, entre 20°C e 36°C.

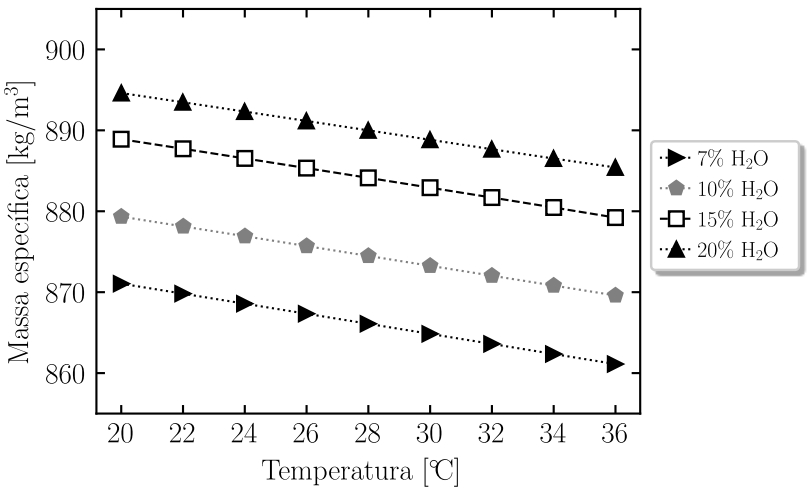


Figura 38 - Massa específica das emulsões

Segundo Wallis (2020), a massa específica de uma mistura homogênea pode ser expressa como uma função das massas específicas de cada fase, ponderadas por suas respectivas frações volumétricas, conforme a Eq. (33).

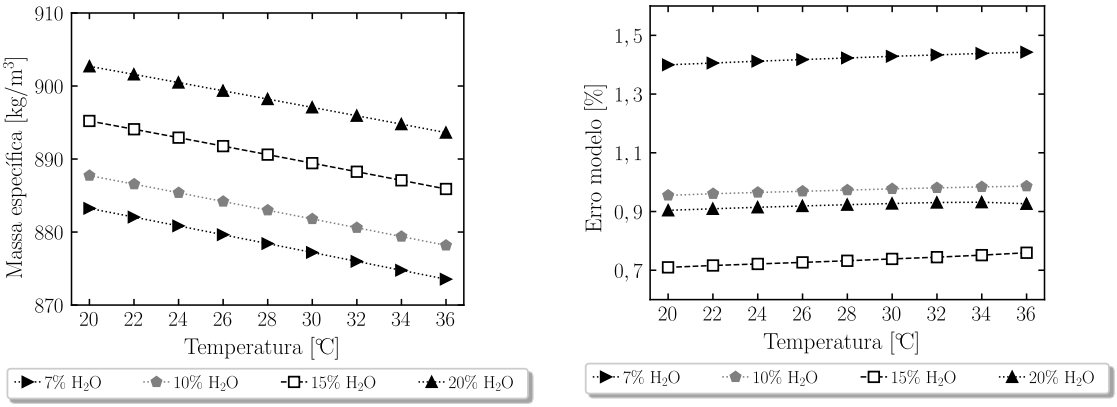
$$\rho_{m,calc} = \rho_a \varphi + \rho_o (1 - \varphi) \tag{33}$$

Em que $\rho_{m,calc}$ [kg/m³] é a massa específica estimada, ρ_a [kg/m³] e ρ_o [kg/m³] são a massa específica da fase aquosa e oleosa, respectivamente, e φ [%] é a fração volumétrica de água.

Com base nos dados de massa específica obtidos no DSA5000M para as fases oleosa e aquosa, a massa específica da emulsão foi estimada utilizando a Eq. (33) e comparadas com os dados experimentais de massa específica da emulsão - ρ_{exp} apresentados na Figura 38. O erro da previsão do modelo foi calculado através da Eq. (34).

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{m,calc} - \rho_{\text{exp}}}{\rho_{\text{exp}}} \tag{34}$$

Os resultados da previsão da massa específica pelo modelo homogêneo e erro do modelo são apresentados na Figura 39. Os resultados do modelo homogêneo seguem o comportamento observado nas medições da massa específica das emulsões. Em relação aos erros do modelo, os resultados da Figura 39 b) mostram baixa sensibilidade do erro à temperatura na faixa avaliada (20 a 36°C). A aplicação do modelo para a massa específica da emulsão com 15% A/O apresentou os menores erros, entre 0,70% e 0,75%, enquanto a aplicação do modelo para emulsão com 7% A/O apresentou os maiores desvios, entre 1,40% e 1,45%. Esses resultados indicam que o modelo homogêneo é capaz de prever a massa específica da emulsão com boa precisão na faixa de temperatura investigada, com erros menores que 1,5%.

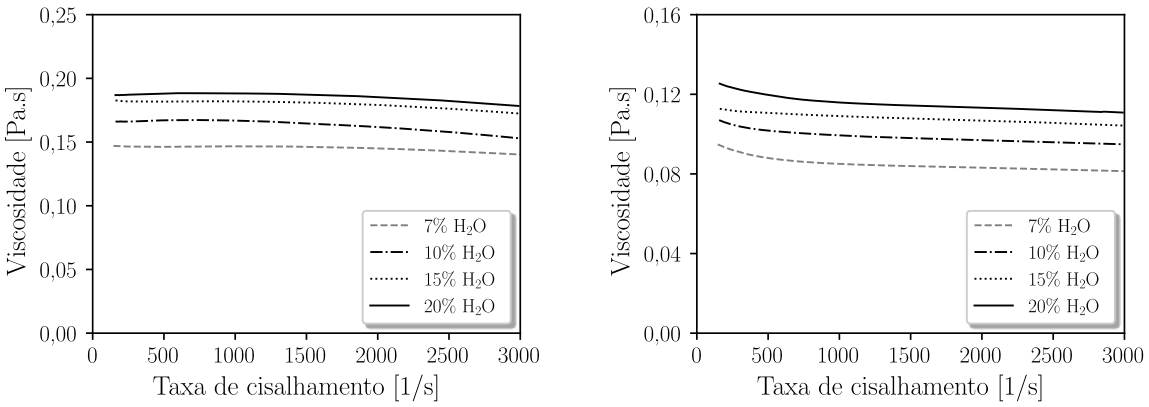


a) Modelo b) Erro

Figura 39 - Análise da modelagem da massa específica de emulsões pelo modelo homogêneo: a) Previsão do modelo, b) Erro do modelo

A Figura 40(a) apresenta curvas de viscosidade das emulsões na temperatura de 25°C, compreendendo taxas de cisalhamento entre 100 e 3000 s^{-1}. Observa-se que a viscosidade das emulsões aumenta com a elevação da fração volumétrica de água, de modo que a emulsão com 7% H_2O é a de menor viscosidade (0,141 Pa.s) e a emulsão com 20% H_2O é a de maior viscosidade (0,180 Pa.s).

As curvas de viscosidade das emulsões na temperatura de 35°C são apresentadas na Figura 40(b), também em taxas de cisalhamento entre 100 e 3000 [1/s]. Tal como observado a 25°C, quanto maior a fração volumétrica de fase dispersa maior a viscosidade das emulsões. Em relação ao efeito da temperatura, as viscosidades a 35°C são menores do que em 25°C, refletindo o efeito da temperatura na redução da viscosidade. A emulsão com 7% H_2O apresenta a menor viscosidade (0,080 Pa.s), enquanto a emulsão com 20% H_2O apresenta a maior viscosidade (0,110 Pa.s).

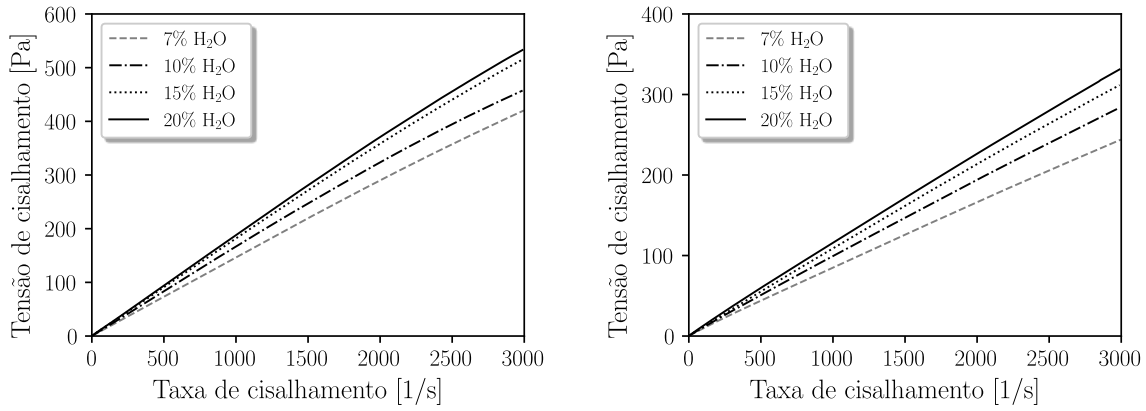


a) 25°C b) 35°C

Figura 40 - Curva de viscosidade das emulsões

Os resultados do comportamento da viscosidade das emulsões com a variação da fração volumétrica de fase dispersa estão de acordo com a literatura (Ariffin; Yahya; Husin, 2016; Choudhary et al., 2026), em que o aumento da fração volumétrica promove o aumento da viscosidade aparente ou dinâmica. Choudhary (2026) explica que a presença de maior quantidade de gotas e de gotas com pequeno tamanho resultam em maior área interfacial e interações entre gotas.

As curvas de fluxo das emulsões nas temperaturas de 25°C e 35°C são apresentadas na Figura 41. Verifica-se que a tensão de cisalhamento aumenta linearmente com a fração volumétrica de água. As curvas de fluxo foram processadas matematicamente para determinação do índice de consistência *k*, índice de fluidez *n* e viscosidade dinâmica μ das emulsões, cujos resultados são apresentados na Tabela 10.



a) 25°C b) 35°C

Figura 41 – Curvas de fluxo das emulsões

Tabela 10 – Caracterização reológica das emulsões

%H_2O	Temperatura [°C]	Viscosidade dinâmica μ [Pa.s]	Índice de fluidez *n*	Índice de consistência *k*
7	25	0,141	1,002	0,145
	35	0,080	0,942	0,126
10	25	0,155	1,007	0,160
	35	0,095	0,958	0,132
15	25	0,174	0,998	0,180
	35	0,104	0,985	0,122
20	25	0,180	1,007	0,184
	35	0,110	0,958	0,156

O índice de fluidez *n* é um parâmetro importante para a classificação reológica do fluido, em que $n = 1$ indica comportamento de fluido newtoniano, $n < 1$ comportamento de fluido pseudoplástico e $n > 1$ comportamento de fluido dilatante. Na temperatura de 25°C, o índice de fluidez variou entre 0,998 e 1,007. Em 35°C, o índice de fluidez variou entre 0,942 e 0,985. Assim, com *n* próximo de 1, as emulsões podem ser consideradas como fluidos newtonianos para fins das análises deste trabalho.

O índice de consistência *k* é diretamente relacionado à viscosidade dinâmica, sendo este superior em 25°C do que em 35°C, tal como observado para as fases óleo e fase água. Observa-se também aumento do índice de consistência com incremento da fração volumétrica da fase água, o que é consistente com o aumento da viscosidade com a fração volumétrica de água.

A Tabela 10 também apresenta a viscosidade dinâmica μ das emulsões nas temperaturas de 25°C e 35°C, em que se verifica o aumento da viscosidade com aumento da fração volumétrica de fase dispersa.

A previsão da viscosidade de fluidos multifásicos é essencial para cálculo de números adimensionais como *Re, Ca* e *We*, estimativa do gradiente de pressão e uso na modelagem mecanicista e numérica do escoamento. Nesse contexto, diversos modelos foram propostos na literatura para descrever o comportamento da viscosidade de dispersões líquido-líquido homogêneas. Foram selecionados quatro (4) modelos em destaque na literatura para avaliação da performance de predição da viscosidade dinâmica das emulsões.

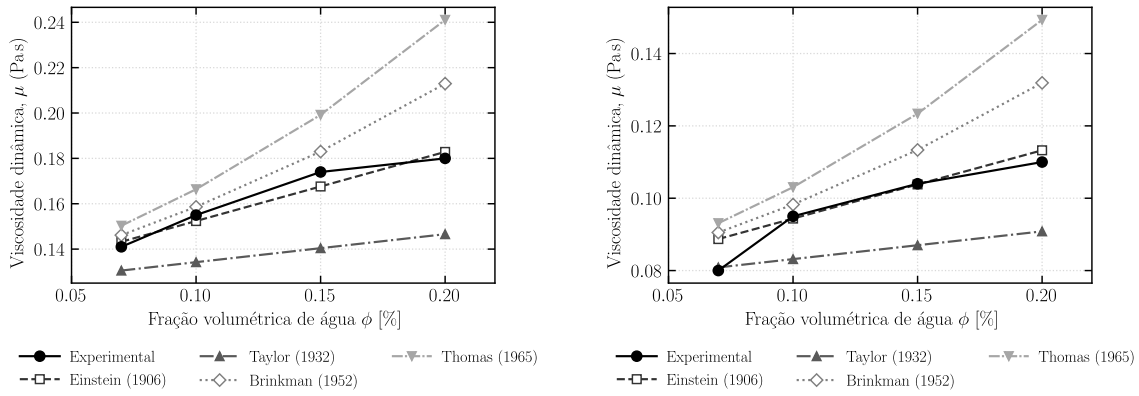
O modelo de Einstein (1906) - $\mu_{calc,1}$ é aplicável a sistemas diluídos com baixa fração de fase dispersa (φ<0,02). O modelo de Taylor (1932) - $\mu_{calc,2}$ foi desenvolvido para a partir do modelo de Einstein, incorporando efeitos de circulação interna causado por tensões tangenciais na interface da gota. O modelo de Brinkman (1952) - $\mu_{calc,3}$ também é derivado da formulação de Einstein, e aplicável em concentrações moderadas da fase dispersa. Por fim, o modelo de Thomas (1965) é uma correlação empírica para viscosidade obtida a partir de extensa base de dados experimentais para partículas esféricas. A equação de cada modelo é apresentada na no sistema de equações (35), e os resultados da aplicação dos modelos são apresentados na Figura 42.

$$\begin{cases} \mu_{calc,1} = \mu_c(1+2,5\varphi) \\ \mu_{calc,2} = \mu_c\left[1+2,5\varphi\left(\dfrac{0,4\mu_c+\mu_d}{\mu_c+\mu_d}\right)\right] \\ \mu_{calc,3} = \mu_c(1-\varphi)^{-2,5} \\ \mu_{calc,4} = \mu_c(1+2,5\varphi+10,05\varphi^2+0,00273e^{16,6\varphi}) \end{cases} \tag{35}$$

Utilizando a viscosidade dinâmica das fases oleosa e aquosa e a fração volumétrica de fase dispersa, foram feitas estimativas da viscosidade da emulsão pelos modelos da Eq. (35). Os modelos foram comparados com os dados experimentais de viscosidade das emulsões - $\mu_{\exp}$ apresentados na Tabela 10. O erro da previsão do modelo de viscosidade foi calculado através da Eq. (36).

$$\Delta\mu = \frac{\mu_{m,calc} - \mu_{\exp}}{\mu_{\exp}} \tag{36}$$

Os resultados da aplicação dos modelos de previsão da viscosidade de emulsões mostram que todos os modelos capturam o aumento da viscosidade com incremento da fração volumétrica de fase dispersa, tanto a 25°C quanto a 35°C. Entretanto, a capacidade preditiva dos modelos em relação aos dados experimentais de viscosidade dinâmica obtidos no reômetro varia significantemente, evidenciando a importância da caracterização reológica das emulsões para seleção do modelo mais adequado. De modo geral, o modelo de Einstein (1906) apresentou melhor concordância com os dados experimentais e menor sensibilidade à fração volumétrica de água. Em contrapartida, os demais modelos apresentaram desvios maiores e relacionados com a fração volumétrica de fase dispersa, com erros de previsão maiores para emulsões com maior teor de água.



a) 25°C b) 35°C

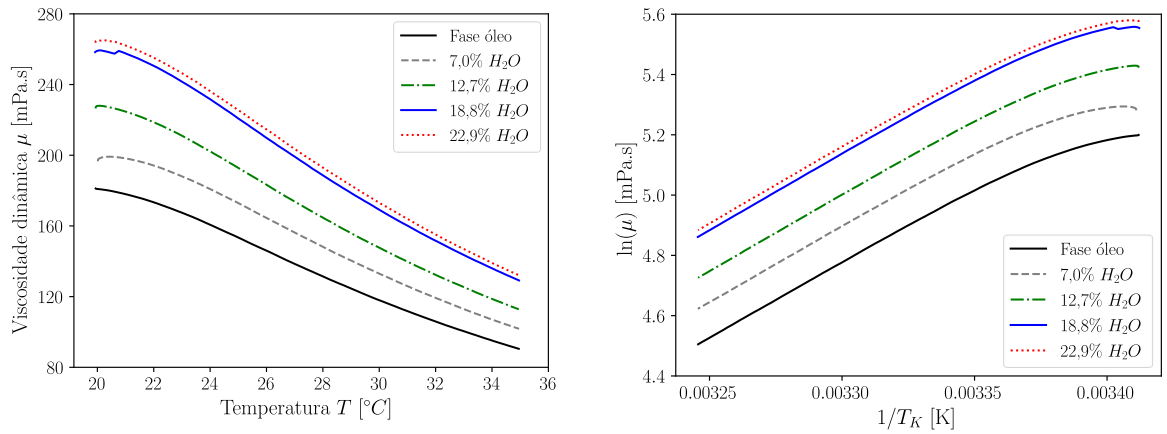
Figura 42 - Análise de modelos de previsão da viscosidade dinâmica de emulsões

Em relação ao erro dos modelos avaliados, o modelo de Einstein (1906) foi o que apresentou a melhor concordância com os dados experimentais, com desvios entre -3,7% e 1,7% a 25°C e entre -0,7% e 10,9% a 35°C. Por sua vez, o modelo de Taylor foi o único que subestimou a viscosidade em todas as condições avaliadas, com desvios entre -18,6% e -7,4% a 25°C e entre -17,4% e -1,1% a 35°C. Em contrapartida, o modelo de Brinkman (1952) superestimou a viscosidade das emulsões, com desvios entre 3,7% e 18,3% a 25°C e entre 3,4% e 19,9% a 35°C. O modelo de Thomas (1965) apresentou os maiores desvios da previsão da viscosidade, com erros de previsão entre 6,6% e 33,9% a 25°C e entre 8,5% e 35,7% a 35°C. Observa-se aumento dos desvios com a fração volumétrica de água para os modelos de Taylor (1932), Brinkman (1953) e Thomas (1965).

Uma vez que tanto a fase óleo quanto as emulsões se comportam como fluido newtoniano, foram feitos ensaios para avaliar o comportamento da viscosidade em função da temperatura. Para isso, o reômetro foi mantido na taxa de cisalhamento constante de 500 s^{-1}, representando taxa de cisalhamento típica dos testes no circuito de escoamento de emulsões, e o reômetro foi programado para fazer uma varredura de temperatura na célula de medição entre 20°C e 35°C. Os resultados são das medições apresentados na Figura 43(a), e apontam que a viscosidade segue a Lei de Arrhenius, conforme a Eq. (23). Ou seja, há redução da viscosidade com o aumento da temperatura, e o decaimento da viscosidade segue uma função exponencial em temperaturas entre 23°C e 35°C.

Tal como observado nas curvas de fluxo, a viscosidade do fluido aumenta com acréscimo da fração volumétrica de água na emulsão, sendo a fase óleo o fluido de menor viscosidade e a emulsão com 22,9% H_2O o fluido de maior viscosidade. Para as demais emulsões, quanto maior a fração volumétrica de fase dispersa maior a viscosidade das emulsões.

Em relação a adaptação a Lei de Arrhenius, que prevê uma redução exponencial da viscosidade com a temperatura, as medições realizadas são aderentes com o comportamento previsto, principalmente nas temperaturas entre 23°C e 35°C. Para demonstrar a compatibilidade com a Lei de Arrhenius, o comportamento dos dados de $1/T_K$ e $\ln(\mu)$ foram analisados. A Figura 43(b) apresenta graficamente os resultados, em que se pode observar a linearidade dos dados, o que reforçam as medições são coerentes com a Lei de Arrhenius. As curvas dos fluidos são praticamente paralelas, o que indica que tanto a fase óleo quanto as emulsões respondem de maneira semelhante a variação da temperatura. Os coeficientes de determinação dessas curvas variam entre 0,982 e 0,989, demonstrando que o modelo de Arrhenius descreve adequadamente a influência da temperatura na viscosidade das emulsões nas condições avaliadas.



a) Resultados medição no reômetro b) Adaptação à lei de Arrhenius

Figura 43 – Viscosidade dinâmica em função da temperatura (Taxa de cisalhamento 500 s^{-1})

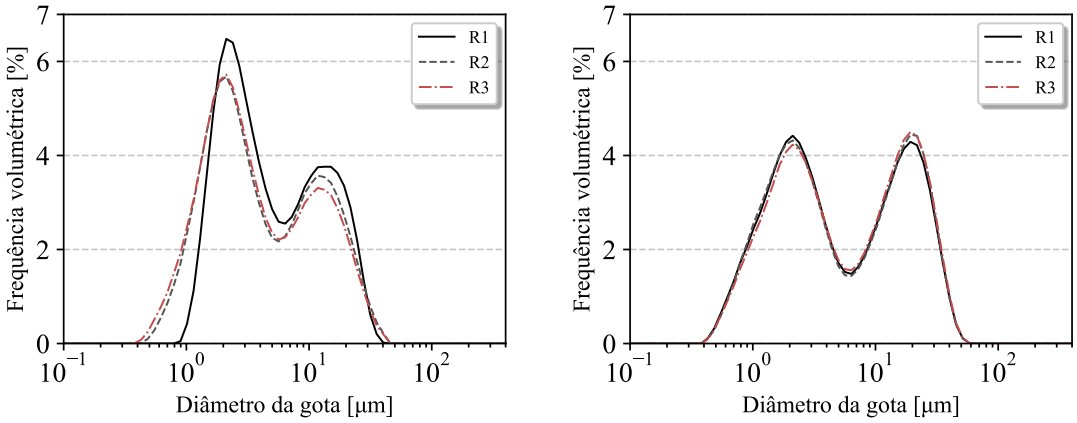
4.2 IMPACTO DA RECICLAGEM DE EMULSÕES NA DTG

A metodologia de testes empregada nesta tese envolveu a reciclagem das emulsões, a partir da recirculação e reutilização das emulsões na bancada de testes em experimentos por bateladas. A recirculação consiste na utilização da mesma emulsão em múltiplos experimentos, sem alteração de sua composição. A reutilização é definida como modificação da fração volumétrica de fase dispersa da emulsão por adição de fase dispersa seguida por agitação mecânica para cisalhamento da emulsão resultante.

Este capítulo dedica-se a estudos analíticos da reciclagem de emulsões. As análises foram feitas em triplicata, ou seja, substituindo o inventário de fluidos no difratômetro a laser por três (3) vezes, em medições codificadas como R1, R2 e R3. Para cada amostra, foram realizadas três (3) submedições.

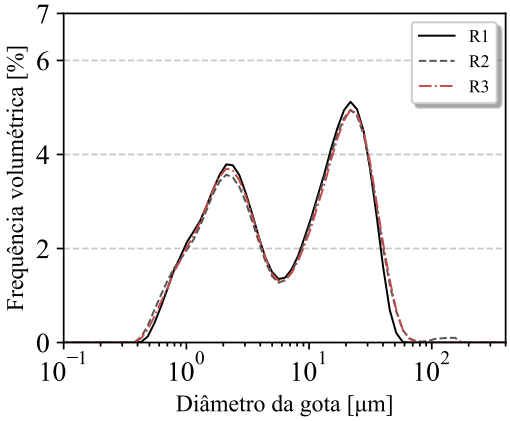
4.2.1 Emulsões novas (EN)

A Figura 44 apresenta a DTG das emulsões novas – EN, produzidas a partir do cisalhamento entre as fases oleosa e aquosa no dispersor. O eixo das abscissas representa o diâmetro das gotas em micrômetros - µm, em escala logarítmica. O eixo das ordenadas é a frequência volumétrica de gotas. De forma complementar, a Figura 45 apresenta as distribuições acumuladas de diâmetros, permitindo observar parâmetros como a mediana da distribuição - D_{v50} e o diâmetro máximo de gotas d_{max}.

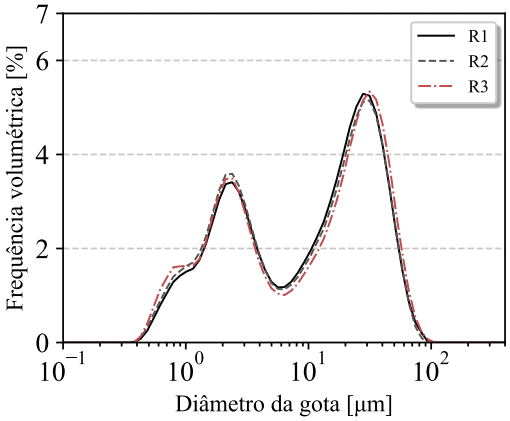


a) A-EN (6,7% A/O)

b) B-EN (12,5% A/O)



c) C-EN (18,5% A/O)



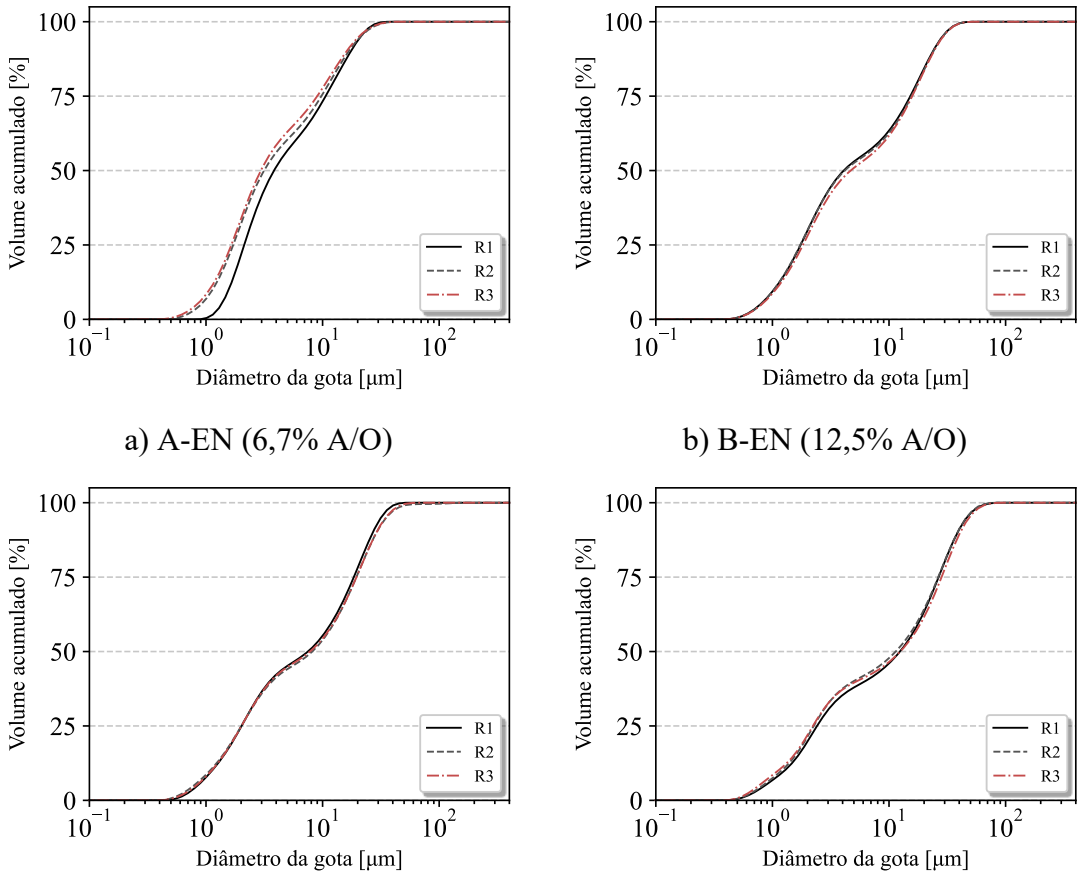
d) D-EN (22,5% A/O)

Figura 44 - Distribuição do tamanho de gotas de emulsões novas (EN): a) A-EN (6,7% A/O), b) B-EN (12,5% A/O), c) C-EN (18,5% A/O) e d) D-EN (22,5% A/O)

As Figura 44(a) e Figura 45(a) referem-se a emulsão A-EN, com fração de água de 6,7 ± 0,2 % H_2O. A DTG apresenta comportamento bimodal. O primeiro pico é centrado em 2 µm e o segundo pico entre 10 e 15 µm. O D_{v50} é 3,5 µm, ou seja, próximo ao primeiro pico, indicando predominância de gotas pequenas na emulsão A-EN. Os diâmetros característicos e volumétricos das repetições R1, R2 e R3 são semelhantes. Os diâmetros máximos de gotas obtidos são por volta de 30 µm, representado pelo diâmetro volumétrico D_{v99}. As submedições

R2 e R3 são semelhantes e, apesar do pequeno deslocamento da R1 em relação as demais amostras, os diâmetros característicos em R1, R2 e R3 são semelhantes.

Aumentando a fração volumétrica de água para 12,5 ± 0,3 % H_2O, a Figura 44(b) e Figura 45(b) apresentam os resultados da DTG e frequência acumulada para emulsões B-EN. A emulsão B-EN permanece com formato bimodal, porém com equilíbrio entre os picos, ambos com fração volumétrica próxima a 4,4%. O primeiro pico ocorre em 2 µm, e o segundo pico está em 20 µm. Como consequência, o D_{v50} aumentou para 4,6 µm. Isso sugere o início de uma transição de regimes, em que gotas maiores ganham maior contribuição volumétrica. As submedições R1, R2 e R3 são praticamente sobrepostas. Os diâmetros máximos de gotas são 40 µm.



a) A-EN (6,7% A/O)

b) B-EN (12,5% A/O)

c) C-EN (18,5% A/O)

d) ‘D-EN (22,5% A/O)

Figura 45 - Frequência volumétrica acumulada do tamanho de gotas de emulsões novas (EN): a) A-EN (7,0% A/O), b) B-EN (12,7% A/O), c) C-EN (18,8% A/O) e d) D-EN (22,9% A/O)

Os resultados para emulsão C-EN, com fração volumétrica de água de 18,5 ± 0,3 % H_2O, são apresentados na Figura 44(c) para DTG e na Figura 45(c) para frequência acumulada. A DTG continua com formato bimodal, mas a emulsão C-EN marca a predominância do segundo pico, representado a maior presença volumétrica de gotas maiores. O primeiro pico é mantido em 2 µm, e o segundo pico em 25 µm. As sub submedições amostras R1, R2 e R3

garantem a confiabilidade dos resultados, sendo essas praticamente sobrepostas. A mediana da distribuição – D_{v50} aumenta para 8,3 µm, e o D_{v99} atingem 50 µm.

Para a emulsão D-EN, composta por 22,5 ± 0,3 % H_2O, os resultados são apresentados na Figura 44(d) para DTG e na Figura 45(d) para o volume acumulado. A DTG é bimodal com assimetria mais acentuada no segundo pico, representando a predominância de gotas maiores. O primeiro pico segue em 2 µm e o segundo pico em 30 µm. A mediana da distribuição – D_{v50} aumenta para 12,8 µm. As submedições R1, R2 e R3 são praticamente sobrepostas. Os diâmetros máximos de gotas, visualizados no gráfico da frequência acumulada, atingem cerca de 70 µm.

Os resultados da Figura 44 e Figura 45 evidenciam uma evolução do tamanho das gotas de emulsões A/O com o aumento da fração volumétrica de água. Na faixa de fração volumétrica analisada, entre 6,7% e 22,5% de A/O, o aumento da fase dispersa provoca geração de gotas maiores. Todas as DTGs são bimodais, com a posição do primeiro pico em 2 µm para todas as emulsões e deslocamento progressivo do segundo pico para a direita, região com maiores diâmetros de gotas.

Uma vez que gotas pequenas são mais estáveis, o aumento da fração volumétrica de fase dispersa gera emulsões com diâmetros de gotas maiores, o que pode favorecer a coalescência de gotas nos testes em escoamento.

Para quantificar a inversão de dominância observadas nas distribuições bimodais, define-se a Razão de Dominância - *RD* conforme a Eq. (37), como a razão entre a altura do segundo pico – h_{P2} e a altura do primeiro pico – h_{P1}, em que altura é a frequência volumétrica da DTG.

$$RD = \frac{h_{P2}}{h_{P1}} \tag{37}$$

A interpretação do *RD* é definida por:

- $RD < 1$: predominância de gotas pequenas;
- $RD = 1$: equilibro;
- $RD > 1$: predominância de gotas moderadas ou grandes.

Os resultados da razão de dominância são apresentados na Tabela 11, comprovando o domínio de gotas pequenas na emulsão A-EN, equilíbrio de gotas pequenas e grossas na B-EN e domínio de gotas moderadas ou grandes nas emulsões C-EN e D-EN. Esse resultado reforça que o aumento da fração volumétrica de fase dispersa promove aumento do tamanho das gotas.

Tabela 11 – Estimativa de razão de dominância das emulsões novas (EN)

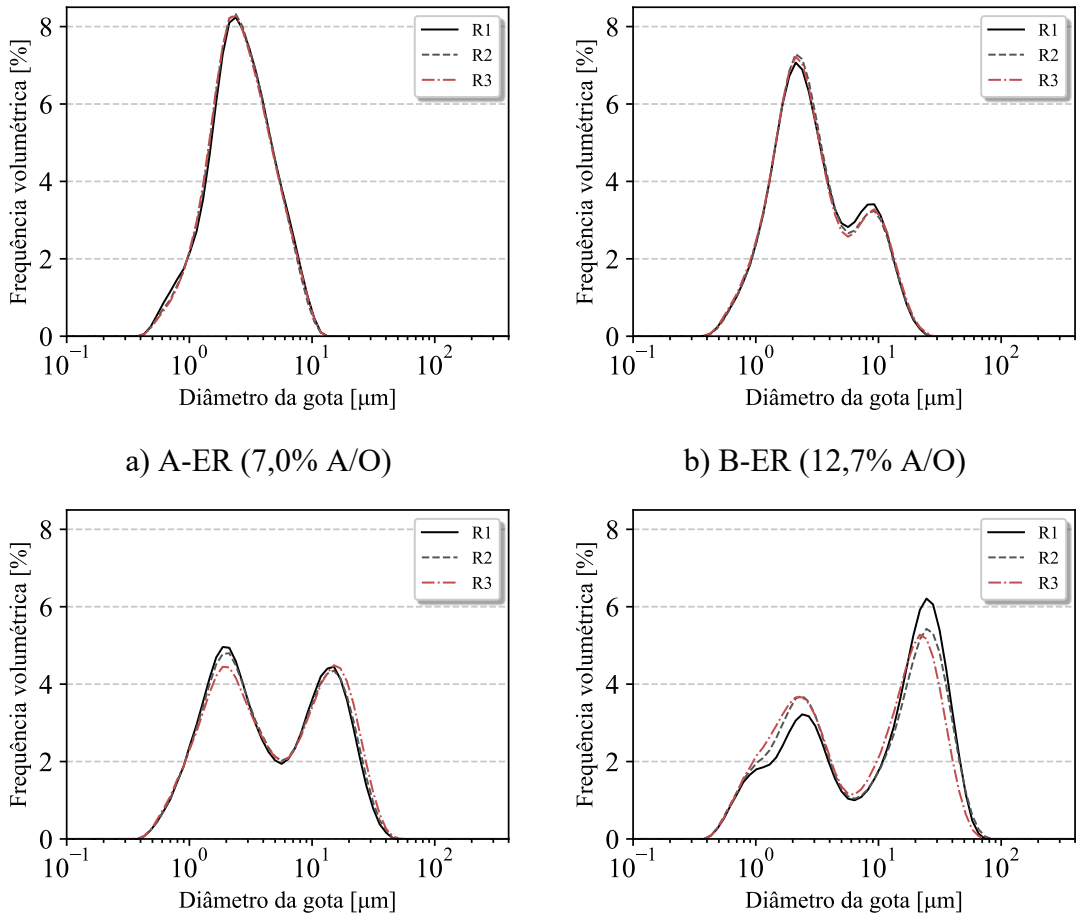
Amostra	Pico 1 [%]	Pico 2 [%]	*RD*	Domínio
A-EN	5,7	3,6	0,63	Gotas pequenas
B-EN	4,4	4,3	0,98	Equilíbrio
C-EN	3,8	5,1	1,34	Gotas moderadas ou grandes
D-EN	3,4	5,3	1,56	Gotas moderadas ou grandes

4.2.2 Emulsões reutilizadas (ER)

A Figura 46 apresenta a DTG das emulsões reutilizadas – ER, preparadas a partir da adição de um volume de fase dispersa em uma emulsão previamente existente, e cisalhamento para mistura das fases. A Figura 47 presenta gráficos da frequência acumulada de diâmetros de gotas.

Para a emulsão A-ER (7,0 ± 0,1 % H_2O), os resultados são apresentados na Figura 46(a) e Figura 47(a). Observa-se que as DTGs são monodispersas e unimodais, com pico centrado entre 2 µm e 3 µm. O D_{v50} é 2,6 µm e os diâmetros máximos não ultrapassam 10 µm. As repetições R1, R2 e R3 são praticamente sobrepostas.

Aumentando a fração volumétrica de água para 12,7 ± 0,2 % H_2O, as Figura 46(b) e Figura 47(b) apresentam os resultados para emulsões B-ER. Essas emulsões apresentam DTG bimodais com predominância do primeiro pico em torno de 2 µm e o segundo pico em 10 µm. A mediana da distribuição – D_{v50} teve pouca alteração: 2,7 µm, enquanto os diâmetros máximos de gotas atingem 17 µm. As submedições R1, R2 e R3 são praticamente sobrepostas.



a) A-ER (7,0% A/O)

b) B-ER (12,7% A/O)

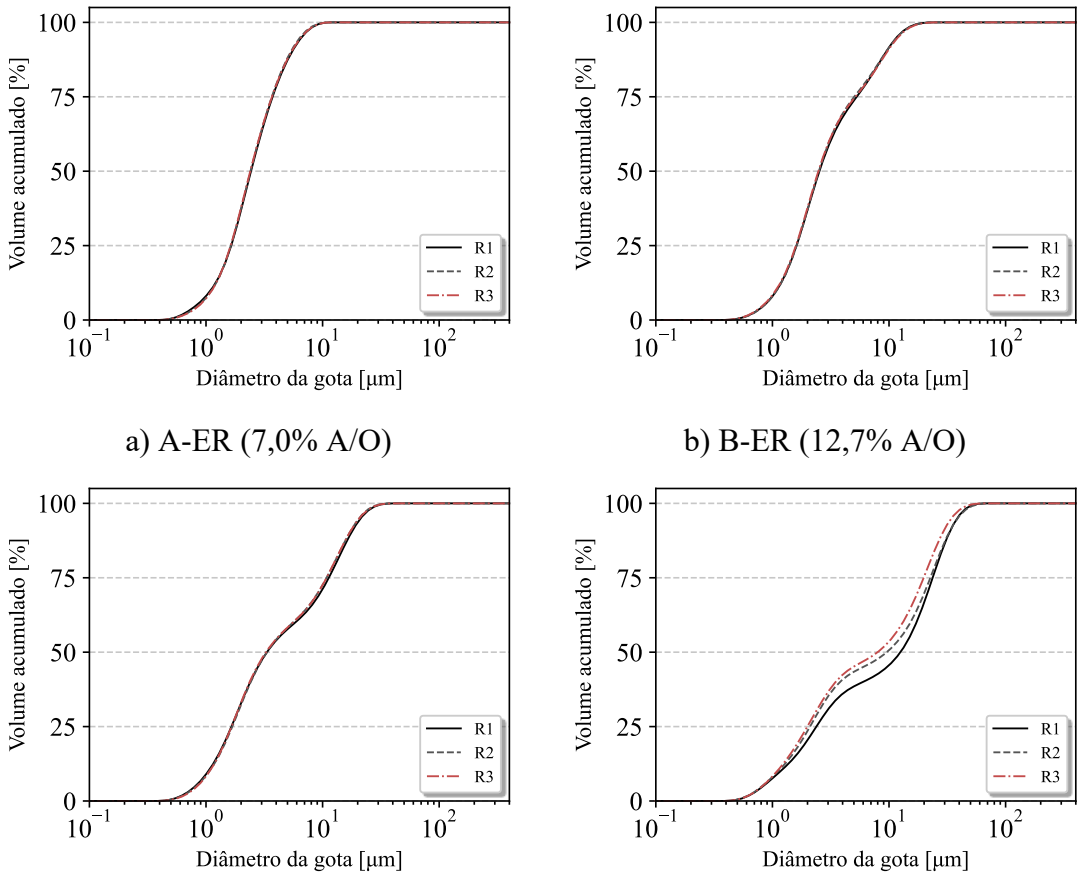
c) C-ER (18,8% A/O)

d) D-ER (22,9% A/O)

Figura 46 – Distribuição do tamanho de gotas de emulsões reutilizadas (ER): a) A-ER (7,0% A/O), b) B-ER (12,7% A/O), c) C-ER (18,8% A/O) e d) D-ER (22,9% A/O)

Os resultados para emulsão C-ER, com fração volumétrica de água de 18,8 ± 0,5 % H_2O, são apresentados na Figura 46(c) para DTG e na Figura 47(c) para frequência acumulada. A DTG também apresenta formato bimodal, com frequências volumétricas semelhantes entre os dois picos, indicando a transição para um regime de maior participação de gotas moderadas ou grandes. O primeiro pico permanece em 2 µm e o segundo pico desloca-se para 15 µm. O D_{v50} é 4,2 µm e os diâmetros máximos atingem 30 µm. As submedições R1, R2 e R3 são semelhantes.

Por fim, os resultados de DTG e frequência acumulada para emulsão D-ER (22,9 ± 0,5 % H_2O), são mostrados na Figura 46(d) na Figura 47(d). A DTG mantém-se bimodal, com predominância do segundo pico, centrado em 20 µm, representando maior presença volumétrica de gotas moderadas e grandes. O primeiro pico mantém-se em 2 µm. O D_{v50} é 10,6 µm e os diâmetros máximos de gotas atingem 50 µm. As submedições R2 e R3 mantém boa repetibilidade, apesar do pequeno deslocamento da R1, sem impacto significativo nos diâmetros característicos, vide Tabela 27 no Apêndice 1.



a) A-ER (7,0% A/O)

b) B-ER (12,7% A/O)

c) C-ER (18,8% A/O)

d) D-ER (22,9% A/O)

Figura 47 –Frequência volumétrica acumulada do tamanho de gotas de emulsões reutilizadas (ER): a) A-ER (7,0% A/O), b) B-ER (12,7% A/O), c) C-ER (18,8% A/O) e d) D-ER (22,9% A/O)

Os resultados da Figura 46 e Figura 47 evidenciam a evolução da distribuição do tamanho das gotas de emulsões A/O relacionadas à fração volumétrica de fase dispersa. O aumento da fração de água promove transição de DTG dominada por gotas pequenas para DTGs bimodais com crescente participação de gotas moderadas ou grandes. O pico da DTG em 2 μm permanece constante em todas as DTGs, enquanto o segundo pico surge na emulsão B-ER e desloca-se progressivamente para os maiores diâmetros conforme aumento da concentração de H_2O na emulsão. Nota-se também a tendência de aumento da frequência volumétrica do segundo pico com aumento da fração volumétrica de água. Ou seja, o aumento da fração de água altera a morfologia da DTG, que é dominada por gotas pequenas nas frações volumétricas mais baixas (A-ER) para distribuição bimodal dominada por gotas moderadas ou grandes (D-ER). Todas as emulsões apresentaram repetibilidade nas subamostras, validando os resultados obtidos.

Comparando as emulsões novas – EN com as emulsões reutilizadas – ER, observa-se que as emulsões ER apresentam menores diâmetros característicos, sugerindo que a reciclagem modifica a DTG, possivelmente devido ao cisalhamento acumulado.

A razão de dominância foi calculada usando a Eq. (37) e os resultados são apresentados na Tabela 12. Observa-se domínio de gotas pequenas nas emulsões A-ER e B-ER, transição de gotas pequenas para equilíbrio na emulsão C-ER, e domínio de gotas moderadas ou grandes na emulsão D-ER. Exceto para a emulsão D-ER, o primeiro pico é sempre dominante. A análise comprova a tendência de aumento do tamanho de gotas com aumento da fração de fase dispersa, apesar da transição ocorrer de forma mais gradual quando comparada às emulsões EN.

Tabela 12 - Estimativa de razão de dominância das emulsões reutilizadas (ER)

Amostra	Pico 1 [%]	Pico 2 [%]	*RD*	Domínio
A-ER	8,3	-	0,00	Gotas pequenas
B-ER	7,2	3,3	0,45	Gotas pequenas
C-ER	4,8	4,3	0,90	Gotas pequenas/Equilíbrio
D-ER	3,5	5,4	1,54	Gotas moderadas ou grandes

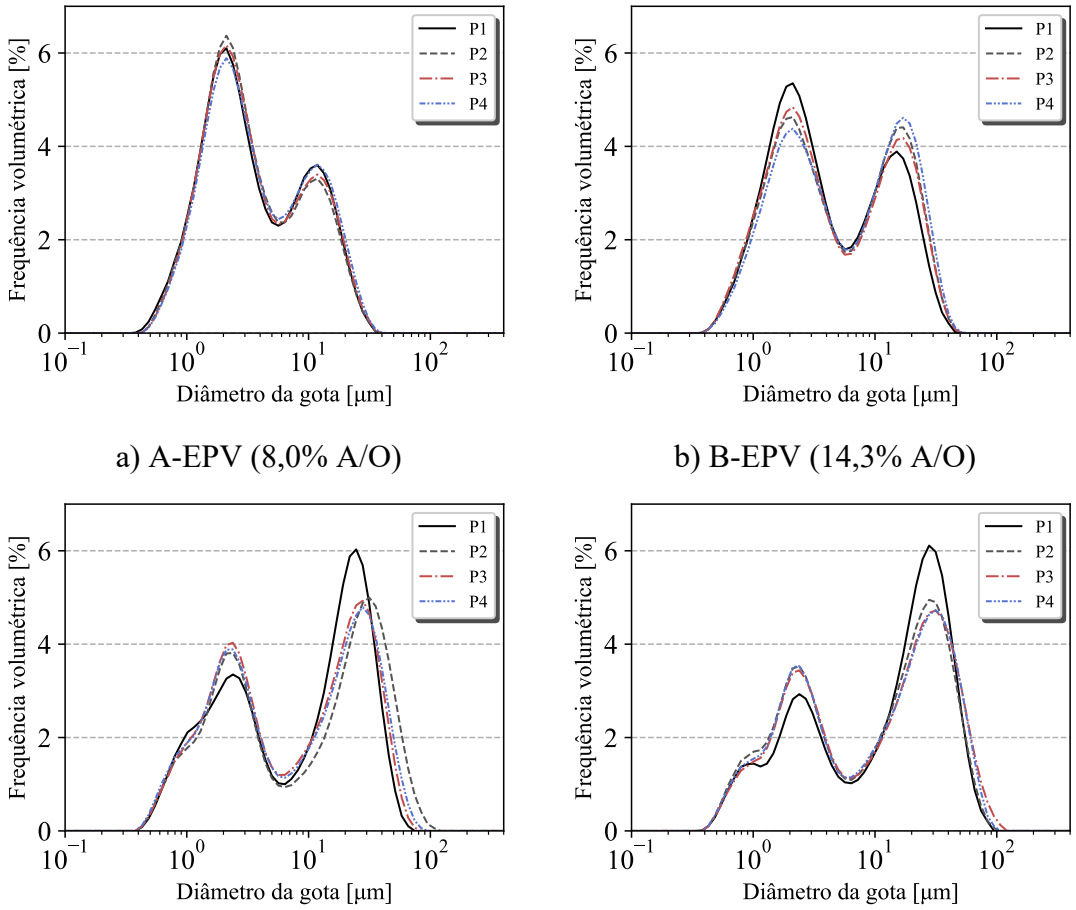
4.2.3 Emulsões com período de agitação variável (EPV)

A Figura 48 apresenta a DTG das emulsões com período de agitação variável - EPV, formuladas com diferentes períodos de cisalhamento no dispersor, e a Figura 49 apresenta gráficos do volume acumulado dos diâmetros de gotas. As amostras são identificadas como: A-EPV agitada por 4 minutos, B-EPV agitada por 8 minutos, C-EPV agitada por 12 minutos e D-EPV agitada por 16 minutos. Observa-se que todas as distribuições apresentam comportamento polidisperso e bimodal.

Uma vez que as amostragens das DTGs foram repetitivas para as emulsões EN e ER, a análise das emulsões EPV contemplam avaliação da estabilidade das DTGs no período de 0 até 60 minutos. Por isso, cada gráfico contém quatro curvas, identificadas como P1, P2, P3 e P4,

correspondentes aos períodos de análise da DTG após o cisalhamento no dispersor. Entre os períodos descritos abaixo, não há aplicação de cisalhamento adicional para análise da DTG. Os períodos de cisalhamento analisados foram: (i) P1: imediatamente após o cisalhamento (Δt = 0); (ii) P2: 20 minutos após o cisalhamento (Δt = 20 min); (iii) P3: 40 minutos após o cisalhamento (Δt = 40 min); e (iv) P4: 60 minutos após o cisalhamento (Δt = 60 min).

A Figura 48(a) e Figura 49(a) correspondem à emulsão A-EPV, formulada com fração volumétrica de água de 8,0% (v/v) H_2O. A DTG é bimodal, com primeiro pico em 2,1 µm e segundo pico em 11,7 µm. A mediana das distribuições D_{v50} é 3,0 µm e os diâmetros máximos de gotas são na ordem de 20 µm. As curvas correspondentes aos períodos P1 a P4 são coincidentes, indicando estabilidade temporal na DTG.



a) A-EPV (8,0% A/O)

b) B-EPV (14,3% A/O)

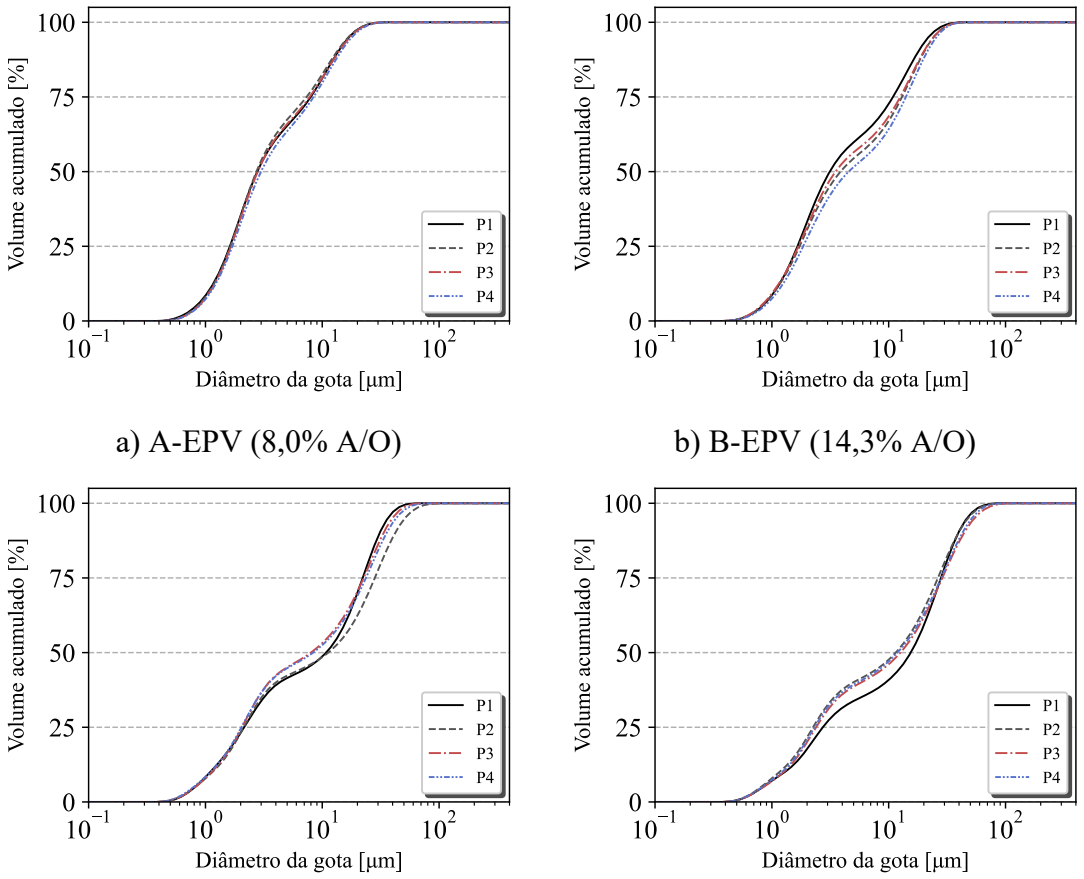
c) C-EPV (20,8% A/O)

d) D-EPV (26,0% A/O)

Figura 48 - Distribuição do tamanho de gotas de emulsões com variação no período de cisalhamento no dispersor (EPV): a) A-EPV (8,3% A/O), b) B-EPV (14,3% A/O), c) C-EPV (20,8% A/O) e d) D-EPV (26,0% A/O)

Para a emulsão B-EPV, com fração volumétrica de fase dispersa de 14,3% (v/v) H_2O, o período de cisalhamento na formulação da emulsão foi de 8 minutos. Os resultados são apresentados na Figura 48(b) e Figura 49(b). A DTG imediatamente após o cisalhamento, representada pela curva em P1, apresenta gotas menores em relação aos P2, P3 e P4, indicando

crescimento das gotas após o cisalhamento no dispersor, mas que mantém a estabilidade entre 20 e 60 minutos. Os diâmetros característicos aumentam em relação à emulsão A-EPV, com D_{v50} = 4,0 µm e D_{v95} = 25,4 µm. A DTG mantém-se bimodal, com primeiro pico em 2,1 µm e o segundo pico em 17,0 µm.



a) A-EPV (8,0% A/O)

b) B-EPV (14,3% A/O)

c) C-EPV (20,8% A/O)

d) D-EPV (26,0% A/O)

Figura 49 – Frequência volumétrica acumulada do tamanho de gotas de emulsões com variação no período de cisalhamento no dispersor (EPV): a) A-EPV (8,3% A/O), b) B-EPV (14,3% A/O), c) C-EPV (20,8% A/O) e d) D-EPV (26,0% A/O)

Os resultados para a emulsão C-EPV, com fração volumétrica de H_2O de 20,8% A/O, são apresentados na Figura 48(c) e Figura 49(c). Essa emulsão foi formulada com 12 minutos de cisalhamento. A DTG é bimodal, observando-se aumento da frequência volumétrica do segundo pico próximo a 30 µm, representando predominância de gotas moderadas e grandes. A curva correspondente ao período P1 encontra-se deslocada para esquerda em relação às DTGs obtidas nos demais períodos (P2, P3 e P4), as quais são praticamente coincidentes. Isso indica que entre 20 e 60 minutos após a formulação da emulsão, o fluido mantém o tamanho de gotas estabilizado. A mediana das distribuições D_{v50} é 10,2 µm, e o diâmetro máximo de gotas, representado por D_{v95}, é 45,2 µm.

Os resultados para a emulsão D-EPV (26% H_2O), submetida a cisalhamento no dispersor por 16 minutos, são apresentados na Figura 48(d) e Figura 49(d). As DTGs são

polidispersas e bimodais, com D_{v50} = 13,6 µm e D_{v95} = 53,2 µm, havendo predominância de gotas superiores a 10 µm. As DTGs se estabilizam 20 minutos após a formulação da emulsão, semelhante ao observado na emulsão C-EPV.

A análise da razão de dominância das emulsões EPV é apresentada na Tabela 13, e indica predominância de gotas pequenas na emulsão A-EPV, equilíbrio na emulsão B-EPV e domínio de gotas moderadas ou grandes nas emulsões C-EPV e D-EPV. Esse comportamento é consistente com o observado para as emulsões novas (EN).

Tabela 13 - Estimativa da razão de dominância das emulsões com período de agitação variável (EPV)

Amostra	Pico 1 [%]	Pico 2 [%]	*RD*	Domínio
A-EPV	6,2	3,4	0,55	Gotas pequenas
B-EPV	4,6	4,4	0,96	Equilíbrio
C-EPV	4,0	4,9	1,22	Gotas moderadas ou grandes
D-EPV	3,4	4,7	1,38	Gotas moderadas ou grandes

4.2.4 Avaliação do método de formulação da emulsão no tamanho das gotas

O Apêndice 1, localizada na página 181, apresenta o processamento das DTGs para as emulsões EN, ER e EPV, incluindo diâmetros característicos, diâmetros volumétricos e parâmetros de dispersão D_{dev} e *span*, conforme ASTM E799-3 (2015). Foram utilizados os diâmetros característicos $D_{[4,3]}$ e $D_{[3,2]}$, e os diâmetros volumétricos D_{v50}, D_{v95} e D_{v99}. Os diâmetros volumétricos D_{v10} e D_{v90} foram incorporados na tabela, pois são utilizados para cálculo do *span*.

Para as emulsões codificadas como EN e ER, as tabelas apresentam os resultados dos diâmetros característicos em três subamostras independentes, intituladas R1, R2 e R3, além dos valores da média e desvio padrão para cada fração volumétrica de água. No caso das emulsões EPV, para sintetização, os diâmetros característicos são apresentados em função dos períodos de análise da DTG após a formulação da emulsão, codificados como P1, P2, P3 e P4.

Para ilustrar as diferenças entre os diâmetros característicos e parâmetros de polidispersão, a Figura 50 reúne gráficos com a comparação do método de formulação da emulsão, sendo esse emulsões novas (EN), emulsões recicladas (ER) e emulsões com período de agitação variável (EPV), em função da fração volumétrica de H_2O, como fase dispersa.

A análise dos diâmetros característicos e volumétricos das emulsões novas (EN), cujos dados estão detalhados na Tabela 26 do Apêndice 1, evidencia o aumento de todos os diâmetros característicos com acréscimo da fração volumétrica de H_2O na emulsão. O D_{v50} foi entre de 3,5 µm e 12,8 µm; o $D_{[4,3]}$ entre 7,0 µm e 17,6 µm; o D_{v95} entre 22,3 µm e 50,1 µm; o $D_{[3,2]}$ entre 2,9 µm e 3,6 µm. Em relação a variabilidade da DTG, o desvio relativo D_{dev} variou de 0,7 e 0,9, e os resultados indicam que o aumento da fração de fase dispersa aumenta a variabilidade da DTG. Por outro lado, o *span* apresentou tendência de redução aumento da fração de fase

dispersa, exceto na fração de fase dispersa mais baixa (A-EN), apresentando valores entre 3,2 µm e 4,7 µm.

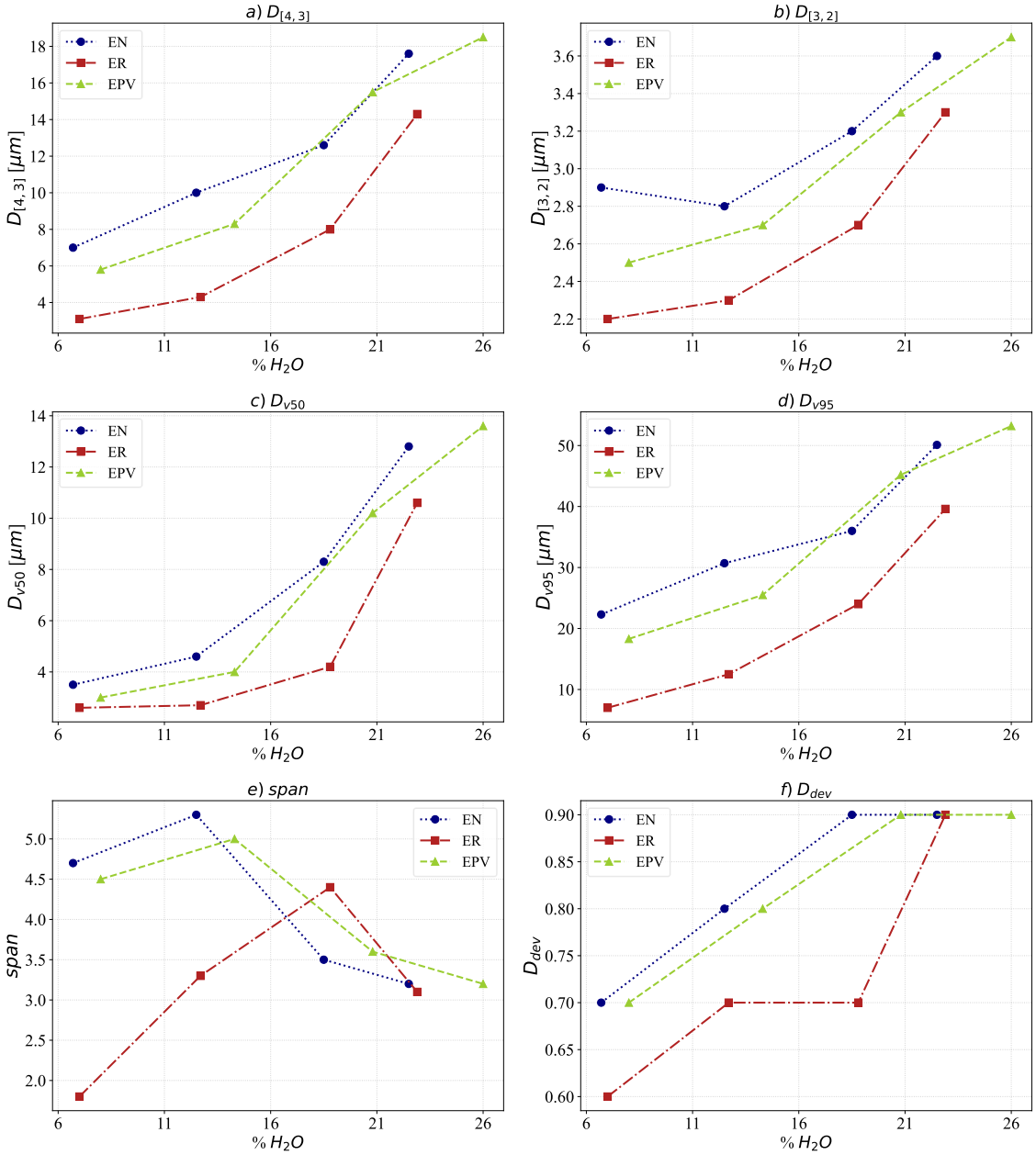


Figura 50 - Relação entre diâmetros característicos e fração volumétrica de água nas emulsões EN, ER e EPV

Para as emulsões reutilizadas (ER), cujo método de formulação da emulsão envolve reciclagem de fluidos, os dados resultantes da medição da DTG são apresentados na Tabela 27 do Apêndice 1. Os resultados indicam aumento dos diâmetros de gotas com aumento da fração de fase dispersa na emulsão. Entretanto, os diâmetros característicos são intrinsicamente menores em relação às emulsões EN, evidenciando que a reutilização e cisalhamento sucessivo nas emulsões atuam na redução dos diâmetros das gotas. Os principais diâmetros característicos apresentaram valores nos seguintes intervalos: D_{v50} entre 2,6 µm e 10,6 µm; $D_{[4,3]}$ entre 4,3 µm

e 14,3 µm; D_{v95} entre 7,0 µm e 39,6 µm; e $D_{[3,2]}$ entre 2,2 µm e 3,3 µm. Em relação a variabilidade da DTG, exceto na fração volumétrica mais alta (D-ER), o *span* apresentou tendência de aumento com aumento da fração de água na emulsão, com valores entre 1,8 e 4,4. O D_{dev} manteve comportamento aproximadamente linear com a fração volumétrica de H_2O, com valores entre 0,6 e 0,9.

Diante da redução dos diâmetros de gota observada nas emulsões ER em comparação às emulsões EN, torna-se pertinente discutir a contribuição dos parâmetros envolvidos no procedimento de formulação da emulsão nos diâmetros característicos. O procedimento de formulação das emulsões ER envolveu reciclagem de emulsões previamente formuladas, com a adição de um volume controlado de fase dispersa, seguido de uma nova etapa de cisalhamento. Como resultado, as emulsões ER apresentam período de agitação mecânica total superior às emulsões EN. Quantificando: a emulsão D-ER foi cisalhada por 16 minutos, a C-ER por 12 minutos, a D-ER por 8 minutos de agitação, enquanto a A-ER foi cisalhada por 4 minutos.

Nesse contexto, as emulsões EPV foram formuladas diretamente a partir da fase água e fase óleo cisalhadas no dispersor Ultra Turrax IKA T25, porém com período de agitação equivalente ao período de cisalhamento total das emulsões recicladas - ER. Essa abordagem permite isolar o efeito do período de cisalhamento na DTG, possibilitando a comparação direta entre emulsões submetidas a históricos de agitação semelhantes, porém obtidas por procedimentos de formulação distintos.

A Tabela 28 no Apêndice 1 apresenta os dados dos diâmetros característicos e os parâmetros de variabilidade das DTGs das emulsões EPV. De forma semelhante ao observado para as emulsões EN e ER, os diâmetros característicos aumentam com o acréscimo da fração volumétrica de água na emulsão. O D_{v50} ficou entre 3,0 µm e 13,6 µm; $D_{[4,3]}$ entre 5,8 µm e 18,5 µm; $D_{[3,2]}$ entre 2,5 µm e 3,7 µm; D_{v95} entre 8,3 µm e 53,2 µm. Em relação à variabilidade da distribuição, o *span* apresentou redução com aumento da fração volumétrica de água, exceto para a menor fração volumétrica de água, com valores entre 3,2 e 4,5. Por outro lado, o D_{dev} manteve comportamento de aumento com a fração de água, com valores entre 0,7 e 0,9. Destaca-se que o comportamento do *span* e D_{dev} são semelhantes ao observado para as emulsões EN.

Os diâmetros característicos evidenciam que tanto o período de cisalhamento quanto a reciclagem da emulsão atuam na redução do tamanho de gotas. Isso foi observado em todos os diâmetros médios característicos e diâmetros volumétricos, e pode ser associado ao maior período cisalhamento utilizado nas emulsões ER e EPV quando comparadas às emulsões EN.

Os gráficos apresentados na Figura 50 consolidam que, independentemente do método de formulação da emulsão, o aumento da fração volumétrica de fase dispersa (% H_2O) promove formação de emulsões com gotas de diâmetros moderados ou grandes. Esse comportamento é observado nas emulsões EN, ER e EPV, considerando os diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95}.

Ao comparar os diferentes métodos de formulação da emulsão, as emulsões EN apresentam os maiores diâmetros característicos, enquanto as emulsões ER os exibem os menores diâmetros característicos. As emulsões EPV apresentam tamanhos de gota intermediário, aproximando-se mais do comportamento das emulsões EN. Isso indica que, embora o período de cisalhamento seja um fator relevante na DTG, a reutilização e

cisalhamentos sucessivos nas emulsões também exercem um papel importante no tamanho das gotas.

Em relação aos parâmetros de polidispersão da DTG, os resultados da Figura 50 mostram que *span* e D_{dev} no geral são menores nas emulsões recicladas (ER) quando comparados com as emulsões novas (EN) e emulsões com período de agitação variável (EPV), refletindo que o reaproveitamento das emulsões reduz os tamanhos de gotas, resultando em emulsões com menor polidispersão. O D_{dev} apresenta tendência de aumento com a fração de água, particularmente nas emulsões codificadas como A, B e C. Nas emulsões EN e EPV, o D_{dev} manteve-se constante nas amostras C e D, já nas emulsões ER o D_{dev} foi invariável entre as amostras B e C, e aumentando na amostra D.

O parâmetro *span* não apresentou linearidade com a fração de H_2O, considerando as 4 emulsões produzidas a partir dos protocolos de preparo EN, ER e EPV. Nas emulsões EN e EPV, o *span* apresentou aumento entre as emulsões A e B, seguido por redução entre as emulsões B, C e D. Entretanto, para as emulsões ER, formuladas a partir de reciclagem de emulsões, houve aumento do *span* entre as amostras A, B e C, seguido pela redução do *span* na emulsão D.

A semelhança no comportamento observado para o *span* e D_{dev} entre as emulsões EN e EPV evidencia que, embora o cisalhamento influencie fortemente os diâmetros característicos, a dispersão relativa da DTG é pouco sensível ao período de agitação, e mais sensível à fração de água e aos fluidos utilizados na formulação da emulsão, ou seja, se a emulsão foi formulada a partir de fluidos monofásicos ou a partir de outra emulsão previamente existente.

Os resultados indicam que as emulsões novas (EN), as emulsões fabricadas a partir de reciclagem (ER) e as emulsões fabricadas com período de cisalhamento variável (EPV) são qualitativamente semelhantes em termos de diâmetros de gotas, com aumento do tamanho das gotas com aumento da fração de fase dispersa na emulsão. No entanto, as emulsões EN apresentam gotas maiores do que nas EPV, e as emulsões ER são as que apresentam os menores diâmetros de gotas. Em todas as famílias de emulsões – EN, ER e EPV – o aumento da concentração da fase dispersa impactou a distribuição do tamanho de gota. Isso pode ser observado no aumento em todos os diâmetros característicos, exceto pelo D_{v10} que se mantem entre 1,1 μm e 1,3 μm.

Os resultados demonstram que a fração volumétrica da fase dispersa é o principal parâmetro responsável nos diâmetros característicos das emulsões, independentemente do método de formulação. No entanto, as diferenças quantitativas observadas entre as emulsões EN, ER e EPV evidenciam que o procedimento de formulação da emulsão também é relevante na DTG. As emulsões EN, formuladas diretamente a partir das fases óleo e água e submetidas a um único cisalhamento por 4 minutos, apresentam os maiores diâmetros característicos. As emulsões ER, obtidas por reaproveitamento de emulsões e reagitação, exibem os menores diâmetros característicos, resultante do cisalhamento sucessivo sobre uma emulsão previamente existente, o que resulta na quebra das gotas da emulsão prévia. As emulsões EPV, formuladas a partir das fases água e óleo, porém com tempos de agitação equivalentes ao tempo total de cisalhamento das emulsões ER, apresentam comportamento intermediário, confirmando que o período de cisalhamento é um fator de influência no tamanho das gotas.

Foi realizada uma análise de correlação linear entre os diâmetros característicos para cada família de emulsões – EN, ER e EPV – por meio do coeficiente de correlação de Pearson.

Os gráficos de dispersão entre os diâmetros característicos são apresentados no Apêndice 3 (página 198), enquanto os valores do coeficiente de correlação de Pearson encontram-se sintetizados na Tabela 14.

Para as emulsões novas (EN), observa-se correlações lineares muito fortes ($r > 0,90$) entre os pares de diâmetros característicos: $D_{[4,3]}$ e D_{v50}, $D_{[4,3]}$ e D_{v95}; D_{v50} e D_{v95}. As correlações envolvendo o diâmetro médio de Sauter - $D_{[3,2]}$ são classificadas como moderadas, com coeficiente de correlação de Pearson de 0,73 (com D_{v95}), 0,76 (com $D_{[4,3]}$) e 0,81 (com D_{v50}).

Tabela 14 – Coeficiente de correlação de Pearson das emulsões EN, ER e EPV

Diâmetros relacionados	Emulsões EN	Emulsões ER	EmulsõesEPV
$D_{[4,3]}$ e $D_{[3,2]}$	0,76	0,99	0,97
$D_{[4,3]}$ e D_{v50}	0,98	0,96	0,97
$D_{[4,3]}$ e D_{v95}	1,00	0,99	0,99
$D_{[3,2]}$ e D_{v50}	0,81	0,95	0,99
$D_{[3,2]}$ e D_{v95}	0,73	0,99	0,94
D_{v50} e D_{v95}	0,97	0,96	0,94

Para as emulsões reutilizadas (ER), os coeficientes de correlação de Pearson indicam correlações lineares muito fortes entre todos os diâmetros característicos, com coeficientes *r* entre 0,95 e 0,99. As correlações fortes observadas nas emulsões ER podem ser associadas com o fato dessas emulsões apresentarem menores diâmetros característicos quando comparadas às emulsões EN, consequentemente maior estabilidade e menor polidispersão.

Para as emulsões formuladas com período de agitação variável (EPV), todas os diâmetros característicos apresentam correlações lineares muito fortes, com coeficiente de correlação de Pearson entre 0,94 e 0,99.

A existência de correlações fortes, em sua maioria, reforça a existência de correlações estatísticas entre os diversos diâmetros característicos que caracterizam uma distribuição de tamanho de gotas, independentemente do método de formulação da emulsão avaliado neste trabalho.

4.3 ANÁLISE DA EMULSÃO PRODUZIDA

Para cada emulsão produzida, foram realizados diversos experimentos no circuito de escoamento de emulsões. A Tabela 15 apresenta a matriz de testes, incluindo a fração volumétrica de água medida por Karl Fischer e os grupos adimensionais Weber, Reynolds e Capilaridade. O código do teste segue o formato Tx_Wy, em que x é o número do teste de 1 a 33 e y é a fração volumétrica de água do teste.

A fração volumétrica de água foi medida imediatamente após a homogeneização do fluido no tanque de armazenamento inferior TQ-1. Uma vez definida a concentração de fase dispersa alvo do teste, foram aceitas variações de até 15% na fração de fase aquosa.

O número de Weber calculado através da Eq. (27), utilizando o diâmetro médio volumétrico $D_{[4,3]}$ de emulsões amostradas no tanque de armazenamento inferior (TQ-1 da Figura 27). A adoção do $D_{[4,3]}$ é justificada pela sua representatividade de tamanho médio de gotas em emulsões com DTG polidispersa.

Tabela 15 – Matriz de teste com diâmetros característicos da emulsão produzida

Código do teste	%H_2O KF	Weber We_{global}	Reynolds Re	Capilaridade Ca_{Dv99}	Diâmetros característicos [µm]			
					$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	D_{v50}	D_{v95}
T1_W05	4,8	5	228	0,48	9,8	2,9	4,1	37,1
T2_W05	4,8	6	183	0,61	14,6	3,7	8,5	46,8
T3_W05	4,8	6	213	0,41	10,9	3,7	8,1	30,0
T4_W05	4,8	11	212	1,43	22,4	4,3	9,7	97,1
T5_W05	4,8	2	100	0,55	16,9	4,4	9,1	67,5
T6_W05	5,5	1	79	0,34	16,3	5,3	10,3	57,9
T7_W05	5,5	3	160	0,54	14,4	3,9	9,5	49,3
T8_W05	5,4	4	150	0,72	15,3	4,3	10,5	51,6
T9_W10	10,0	6	96	1,14	48,6	7,1	26,9	158,3
T10_W10	8,9	4	104	0,75	33,0	6,9	22,6	105,2
T11_W10	8,9	3	111	0,59	26,3	5,4	17,7	89,1
T12_W10	9,6	2	76	0,55	26,7	6,6	18,4	88,3
T13_W10	9,8	5	116	0,90	29,0	6,7	21,0	94,9
T14_W10	9,8	4	101	0,80	28,6	6,7	20,5	91,6
T15_W10	10,0	3	99	0,61	26,2	6,1	19,6	82,2
T16_W10	10,0	2	80	0,54	27,6	5,9	19,0	92,3
T17_W10	10,0	6	156	0,78	27,2	6,3	19,8	86,3
T18_W10	9,9	5	127	0,82	27,3	6,3	19,7	88,3
T19_W15	14,3	6	86	1,20	54,1	9,7	34,8	165,2
T20_W15	13,6	5	84	0,92	45,6	12,6	34,3	127,9
T21_W15	14,9	6	96	1,04	39,4	8,0	29,5	115,5
T22_W15	15,2	5	87	0,89	43,8	9,9	33,5	123,1
T23_W15	13,0	4	90	0,74	38,5	8,5	29,8	109,6
T24_W15	13,0	3	84	0,65	35,0	8,1	26,6	104,7
T25_W15	13,2	4	80	0,82	48,1	10,0	35,0	139,9
T26_W15	13,2	3	87	0,60	36,8	8,5	28,3	107,5
T27_W20	19,7	6	73	0,97	59,7	18,2	53,6	137,2
T28_W20	20,8	10	87	1,53	67,9	14,5	55,2	174,2
T29_W20	20,7	15	122	2,60	71,6	14,6	51,3	202,9
T30_W20	21,2	20	153	1,68	61,1	15,2	50,8	150,9
T31_W20	21,2	6	92	0,89	54,7	11,7	43,1	144,9
T32_W20	20,5	10	100	1,35	57,1	13,0	46,5	147,6
T33_W20	21,0	15	131	1,54	61,2	13,8	50,7	154,6

O número de Reynolds foi calculado conforme Eq. (4), a partir da vazão mássica e massa específica medidas pelo medidor de vazão mássico Coriolis (FIT-1), do diâmetro interno da tubulação e da viscosidade dinâmica. Os testes no circuito de escoamento de emulsões foram

conduzidos no regime laminar, com número de Reynolds entre 70 e 230. O baixo número de Reynolds da bancada pode ser atribuído a dois fatores. Primeiro, tanto a fase oleosa quanto as emulsões apresentam viscosidade dinâmica considerável, superior a 100 vezes a viscosidade da água, o que aumenta o gradiente de pressão na tubulação, principalmente em tubulações longas com $L_{total} / D > 600$, em que L_{total} é o comprimento total da tubulação. Segundo, por questões operacionais do laboratório, há limitação da pressão máxima admissível na bancada de testes em 10 bar.

Considerando o regime de escoamento laminar, torna-se relevante analisar o número de Capilaridade, que relaciona as tensões viscosas e as tensões interfaciais. Para isso, a Eq. (28) foi utilizada utilizando $D_g = D_{v99}$, e adotando a hipótese de Grace (1982), na qual a taxa de cisalhamento G é aproximada como a máxima tensão de cisalhamento em um escoamento laminar plenamente desenvolvido, conforme a Eq. (10). Os valores do número de Capilaridade dos testes variam entre 0,34 e 2,60. Comparando com as curvas de capilaridade críticas - Ca_{crit} apresentadas na Figura 13 para razões de viscosidade na ordem de $p = 10^{-2}$, característico dos fluidos que compõe as emulsões analisadas neste trabalho, o Ca dos experimentos estão abaixo da curva de Ca_{crit} para escoamentos de cisalhamento simples, o que implica que estão em uma região que não há quebra de gotas por cisalhamento simples. No entanto, para escoamentos extensionais, os valores de Ca dos experimentos abrangem tanto regiões abaixo como acima da curva de Ca_{crit}, indicando que a quebra de gotas é possível de ocorrer em determinadas condições locais.

Vale destacar que as curvas clássicas de Ca_{crit} foram obtidas analiticamente em condições idealizadas e não representam integralmente o campo de escoamento em sistema de tubulações reais, especialmente em casos de perfis de velocidades que não são completamente desenvolvidos. Nesse caso, os campos de escoamentos são uma combinação entre efeitos de cisalhamento simples e extensão (Fournanty et al., 2008; Paul; Atiemo-Obeng; Kresta, 2004). Dessa forma, a aplicação direta do critério de ruptura por $Ca > Ca_{crit}$ apresenta limitações, não sendo suficiente para prever a ocorrência de quebra de gotas em regime laminar no circuito de testes.

A análise conjunta dos números de Re, We e Ca e os fundamentos de quebra e coalescência de gotas indica que os mecanismos de quebra e coalescência podem coexistir nas condições experimentais investigadas. O regime laminar promove menores taxas de cisalhamento, mas no caso de trechos em que perturbações no escoamento, como acidentes de linha, desenvolvimento do escoamento e o próprio procedimento de amostragem de fluidos, é possível atingir regiões tanto abaixo quanto acima das curvas teóricas de Ca_{crit}.

Por outro lado, em emulsões não diluídas, ou seja, com frações volumétricas de fase dispersa não desprezíveis nas propriedades termofísicas, as interações entre gotas aumentam a probabilidade de coalescência, mesmo em condições nas quais os critérios clássicos de ruptura indicariam quebra de gotas por $We > We_{crit}$ ou $Ca > Ca_{crit}$, conforme observado por Silva, Medronho e Barca (2019) para emulsões A/O com fração de fase dispersa acima de 7,5% (v/v) H_2O. Ou seja, a magnitude da fração volumétrica de fase dispersa também é de relevância nos processos de quebra e coalescência.

A Figura 51 apresenta a DTG inicial das emulsões, coletadas no tanque de armazenamento TQ-1. Observa-se que em alguns testes, as curvas de DTG se afastam da tendência das demais, considerando a mesma fração volumétrica de H_2O do teste. Isso pôde ser observado na emulsão T1_W05 em 5% H_2O, a emulsão T9_W10 em 10% H_2O, a emulsão

T19_W15 para 15% H_2O e a emulsão T27_W20 para 20% H_2O. Entretanto, a avaliação da quebra e coalescência não será limitada na comparação qualitativa das DTGs em relação ao formato de gráficos, mas também na comparação quantitativa entre os diâmetros característicos e volumétricos, com aplicação de critérios estatísticos para identificação e exclusão de dados que destoam da tendência dos demais.

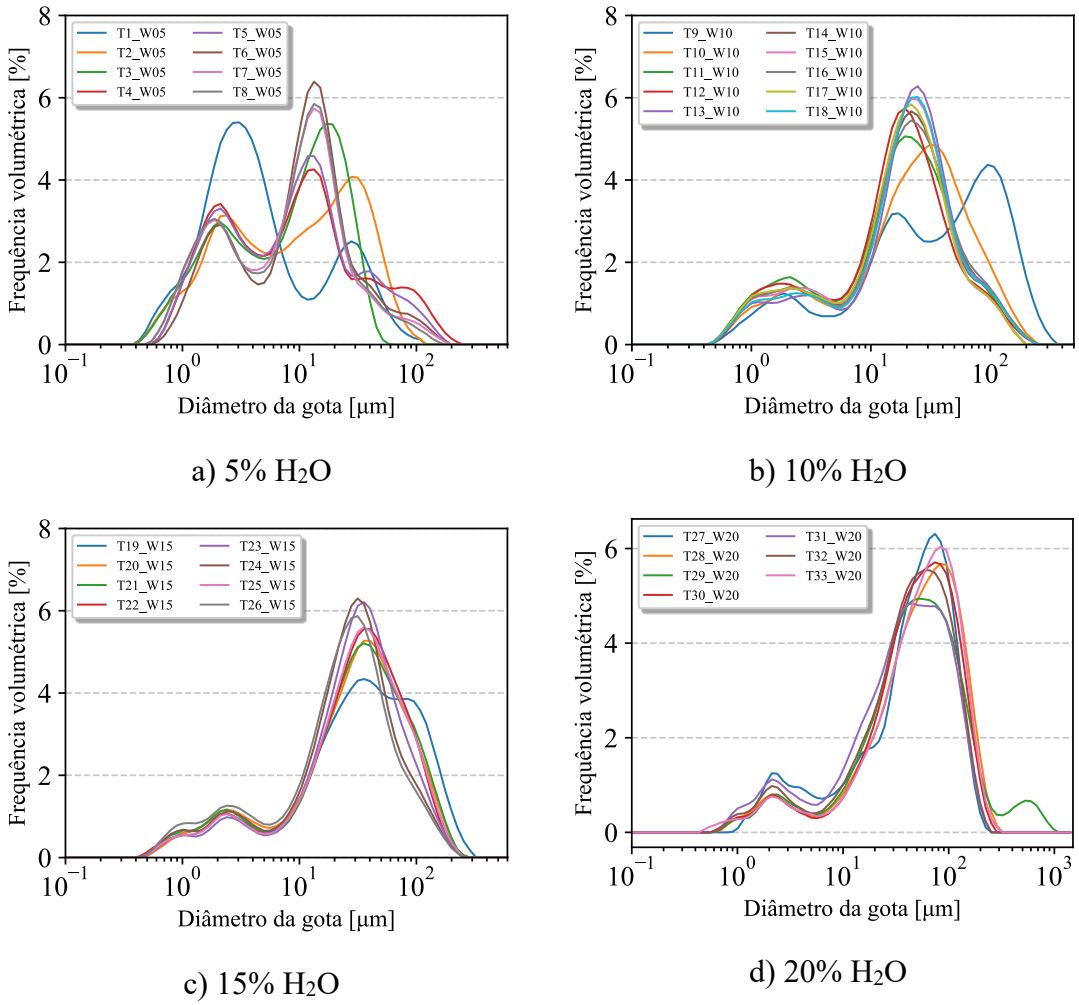


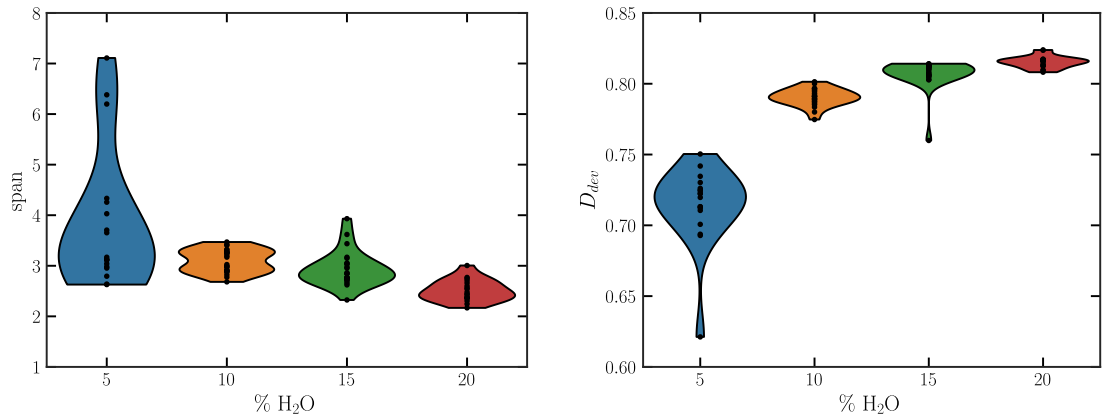
Figura 51 – Distribuição de tamanho de gotas inicial das emulsões, coletadas antes dos experimentos na bancada de testes

As DTGs iniciais apresentam comportamento bimodal em todas as frações volumétricas analisada, sendo esse efeito mais pronunciado para as frações volumétricas de 5% e 10% A/O. A bimodalidade pode ser atribuída, em partes, à formação de gotas pequenas, também conhecidas como gotas satélite, a partir das gotas maiores (John et al., 2020) no procedimento de formulação e homogeneização das emulsões. Nesse contexto, observa-se que o primeiro pico, centrado em 2 µm, é recorrente em todas as emulsões produzidas, o que pode representar as gotas satélites. Adicionalmente, segundo Windhab et al. (2005), o uso de surfactantes na formulação da emulsão promove redução da tensão interfacial entre as fases aquosa e oleosa, favorecendo a quebra em gotas de diâmetro pequeno, que tendem a apresentar maior estabilidade, o que explica a polidispersão das DTGs obtidas.

Os parâmetros de dispersão da DTG foram calculados conforme norma ASTM E799-3 (2015). A Figura 52 apresenta a evolução dos parâmetros *span* e D_{dev} em função da fração volumétrica de água, calculados a partir das DTGs iniciais das emulsões. O *span*, definido na Eq. (25), quantifica a largura da DTG relativa ao D_{v50}. O D_{dev}, definido na Eq. (26), mensura o desvio médio dos diâmetros de gotas em relação ao D_{v50}. Os gráficos são do tipo violino, apresentando a distribuição estatística completa dos dados, sendo os pontos cada medição individual.

Na análise do *span*, através da Figura 52(a), indica que o aumento da fração de fase dispersa é associado à formação de DTGs com largura mais estreita, ou seja, com menor polidispersão, o que resulta na redução do *span* com aumento da fração volumétrica de H_2O. A mediana do *span* é 3,2 para emulsões com 5% e 10% H_2O, reduzindo para 2,9 com 15% de H_2O e 2,4 para 20% de H_2O.

Os resultados do desvio médio D_{dev} para as emulsões iniciais são apresentados na Figura 52(b), e mostram aumento do D_{dev} com a fração de H_2O. Isso reflete o aumento dos tamanhos de gota com a fração volumétrica de fase dispersa. Nota-se que a dispersão dos valores de D_{dev} reduz com aumento da fração volumétrica de H_2O, indicando menor polidispersão nas DTGs, tal como observado no parâmetro *span*. A análise combinada do *span* e D_{dev} são complementares, e sugere que embora o aumento da fração volumétrica de fase dispersa promova o aumento no tamanho médio das gotas, a DTG torna-se mais concentrada, ou seja, abrangendo faixas mais restritas de tamanhos de gotas.



a) span b) D_{dev}

Figura 52 - Gráficos tipo violino para parâmetros de dispersão das DTGs iniciais

Para estabelecer uma base comparativa de um conjunto de experimentos compostos por emulsões estatisticamente semelhantes, torna-se necessário aplicar critérios de detecção de valores discrepantes nos diâmetros característicos das emulsões armazenada no tanque TQ-1. Essa etapa é fundamental para garantir que as análises subsequentes não sejam influenciadas por amostras não representativas do sistema experimental. Para isso, foi adotado o critério de detecção de falhas de Chauvenet conforme Taylor (1997).

O critério de Chauvenet foi aplicado aos diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} para as emulsões fração volumétrica de água de 5%, 10%, 15% e 20% de H_2O, com

tamanho da amostra de 8, 10, 8 e 7, respectivamente. Os valores da média e desvio padrão utilizados na aplicação do critério de falha estão apresentados na Tabela 16.

A aplicação do critério de Chauvenet identificou como valores discrepantes os experimentos T1_W05 (5% H_2O) pelo critério do $D_{[3,2]}$ e D_{v50}, T9_W10 (10% H_2O) pelo critério do $D_{[4,3]}$ e T27_W20 (20% H_2O) pelo critério do $D_{[3,2]}$. Logo, dos 33 experimentos da matriz de teste, 3 foram descartados, resultando em um conjunto de 30 experimentos para as análises de quebra e coalescência de emulsões em escoamentos vertical ascendente e horizontal.

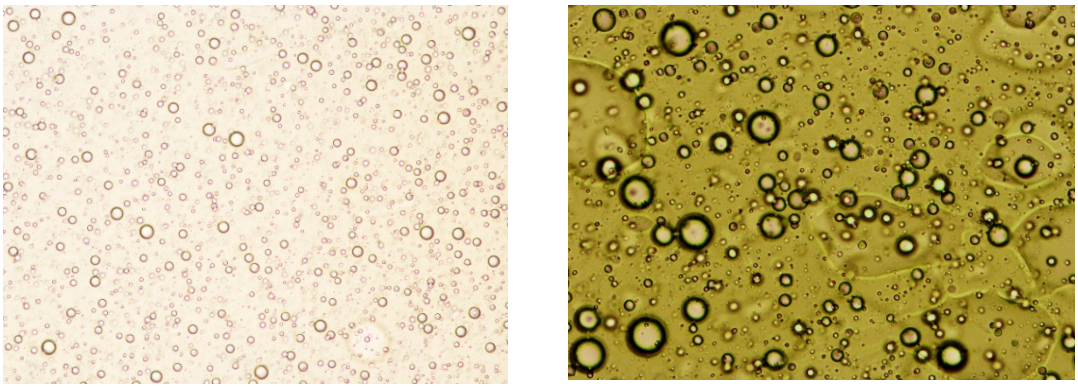
Tabela 16 – Estatística descritiva dos diâmetros característicos inicial das emulsões

Diâmetro característico	% H_2O	Média [μm]	Desvio padrão [μm]	*Outliers*
$D_{[4,3]}$	5	15,1	3,9	-
	10	30,1	6,8	T9_W10
	15	42,7	6,5	-
	20	61,9	5,9	-
$D_{[3,2]}$	5	4,1	0,7	T1_W05
	10	6,6	0,6	-
	15	9,5	1,7	-
	20	14,4	2,0	T27_W20
D_{v50}	5	8,7	2,0	T1_W05
	10	21,2	3,3	-
	15	31,4	3,3	-
	20	50,2	4,1	-
D_{v95}	5	54,7	20,7	-
	10	104,6	27,0	-
	15	124,3	21,8	-
	20	158,9	22,5	-

Os resultados de DTG apresentados na Figura 51, Tabela 15 e Tabela 16 indicam que a reutilização de emulsões não promove alterações estatisticamente significativas na DTG e nos diâmetros característicos, considerando mesma fração volumétrica de fase dispersa. A homogeneização de emulsões previamente utilizadas no circuito de testes é capaz de reestabelecer o perfil da DTG inicial, considerando emulsões com mesma fração volumétrica de água. Dessa forma, pode-se afirmar que a reutilização de emulsões não compromete as propriedades de interesse das emulsões, em particular a estabilidade, a DTG e características interfaciais associadas ao surfactante.

Em relação ao efeito da concentração de fase dispersa sobre os diâmetros característicos e volumétricos, os resultados apresentados na Tabela 16 estão em concordância com a literatura sobre emulsões. Fournanty et al. (2008) realizaram um estudo paramétrico de variáveis envolvidas na formulação de emulsões, demonstrando que menores frações de fase dispersas estão associadas a DTGs com gotas menores.

Para ilustrar esse comportamento, a Figura 53 apresenta fotomicrografias de emulsões contendo 5% e 20% de H_2O, obtidas com ampliação de 20x. As amostras foram coletadas no meio do tanque de armazenamento de emulsões (TQ-1). Observa-se que a emulsão com 20% H_2O apresentam gotas intrinsicamente maiores em comparação com a emulsão com 5% H_2O. Esse aumento do diâmetro de gotas com a fração volumétrica de fase dispersa também é refletido na DTG caracterizada por difração a laser. Conforme ilustrado na Figura 54, as curvas de distribuição volumétrica das gotas apresentam deslocamento progressivo para a direita, região que compreende diâmetros maiores, à medida que a fração volumétrica de água aumenta.



a) 5% H_2O b) 20% H_2O

Figura 53 – Fotomicrografia de emulsões com 5% (a) e 20% (b) A/O, imagens obtidas utilizando lente objetiva de 20x

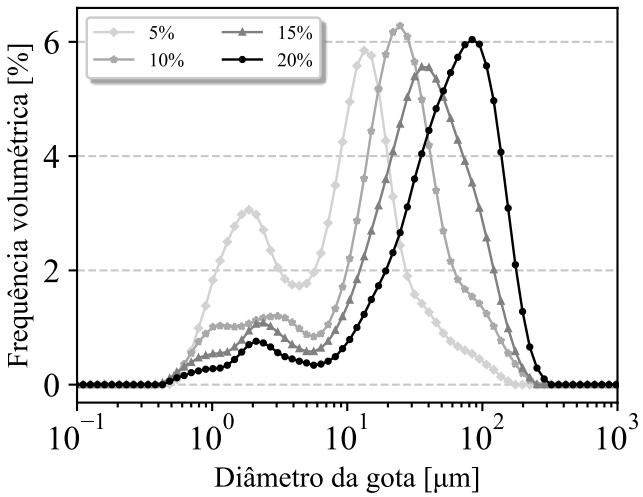


Figura 54 - Comparação da DTG de emulsões coletadas no tanque inferior

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA BANCADA DE TESTES

Antes da realização dos experimentos com emulsões, o circuito de testes foi caracterizado com escoamento monofásico da fase oleosa, com intuito de validar a medição de perda de carga a partir do fator de atrito. O procedimento experimental consistiu em bombear o fluido a partir do vaso de pressão V-1 até o tanque superior TQ-2, em regime de batelada.

A partir dos dados experimentais, foi calculado o fator de atrito teórico para regime laminar conforme Eq. (38) e o fator de atrito experimental através da Eq. (39). Para o f_{exp}, foi calculada a queda de pressão entre os sensores PIT-2 e PIT-3, instalados em um trecho horizontal e com distância entre as tomadas de pressão de L_H = 8,68 m.

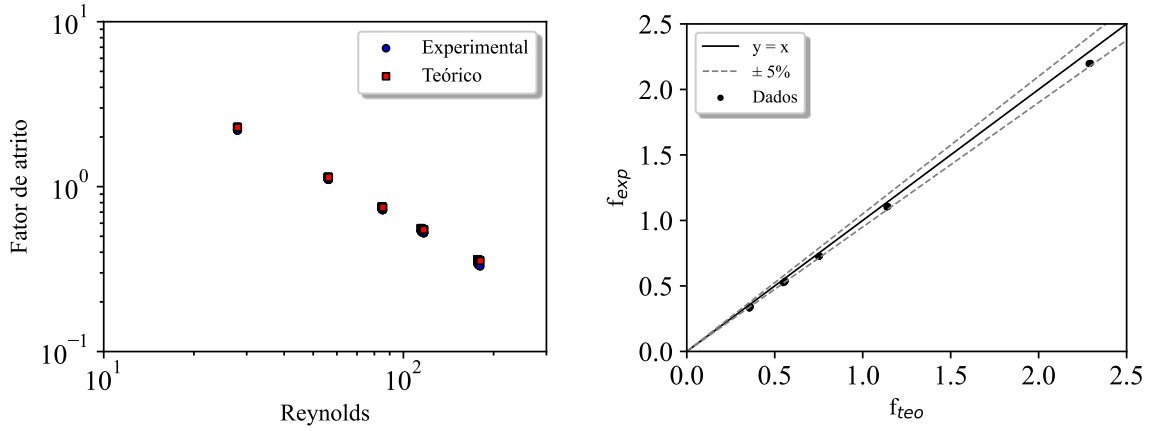
$$f_{teo} = \frac{64}{\mathrm{Re}} \tag{38}$$

$$\Delta P = f_{\exp} . \frac{L_H}{D} . \frac{\rho_m \bar{U}^2}{2} \tag{39}$$

Em que f_{exp} [-] é o fator de atrito experimental, f_{teo} [-] é o fator de atrito teórico, L_H [m] é a distância entre os sensores de pressão, D [m] é o diâmetro interno da tubulação, ρ_m [kg/m³] é a massa específica do fluido e $\bar{U}$ [m/s] é a velocidade média do fluido.

As leituras de temperatura do sensor TIT-2, localizado a jusante do medidor de vazão Coriolis, foram utilizadas para interpolação da viscosidade dinâmica da fase oleosa em cada temperatura média do teste. Para a massa específica ρ_m, foi considerada a medição do medidor de vazão mássico Coriolis, uma vez que o Coriolis é calibrado para tanto vazão mássica quanto para massa específica.

Os resultados do fator de atrito experimental são apresentados na Figura 55. Na Figura 55(a), os resultados indicam que o comportamento do fator de atrito experimental apresenta comportamento semelhante ao fator de atrito teórico. Em um gráfico com eixos na escala logarítmica, o fator de atrito reduz linearmente com o aumento do número de Reynolds.



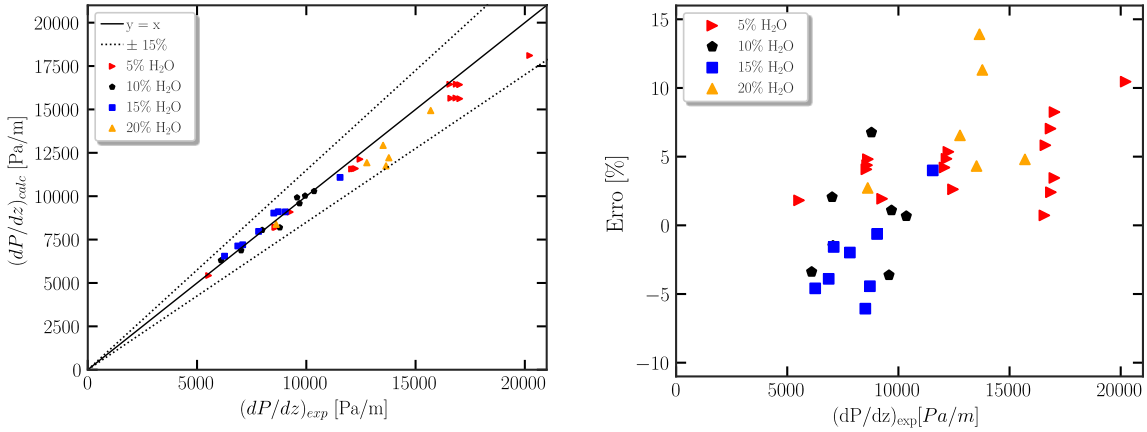
a) Fator de atrito vs. número de Reynolds

b) Comparação do fator de atrito experimental e teórico

Figura 55 – Validação da bancada de testes com óleo mineral

A Figura 55(b) compara os fatores de atrito teórico e experimental, observando as diferenças sistemáticas na faixa de -5%. A proximidade dos dados à reta de correlação perfeita $y = x$ indica que o experimento está validado e que a instrumentação apresenta exatidão adequada para os testes com emulsão. As diferenças sistemáticas podem ser atribuídas ao conjunto de instrumentação utilizado, ou mesmo a variações do lote do óleo mineral utilizado.

A Figura 56 apresenta a comparação entre o gradiente de pressão *dP/dz* experimental e teórico para emulsões A/O com frações volumétricas de água entre 5% e 20%. Cada marcador corresponde a um teste distinto. Observa-se que os dados experimentais apresentam boa concordância com o modelo teórico, com desvios relativos no gradiente de pressão de até ±15%. Esse valor é superior ao observado no escoamento monofásico da fase óleo, o que pode ser atribuído à maior complexidade das emulsões, aos fenômenos interfaciais das gotas e as incertezas associadas à viscosidade efetiva do modelo teórico.



a) Comparação queda de pressão b) Erro cálculo vs. Medição

Figura 56 – Validação da bancada de testes com emulsões

Uma vez caracterizado a bancada e validada a partir da análise do fator de atrito, foi feita a avaliação quanto a modificação do tamanho de gota das emulsões em escoamento. Conforme fundamentos de quebra de gotas (Grace, 1982; Taylor, 1934), em regime laminar o número de Capilaridade é o principal parâmetro adimensional que governa a deformação e quebra de gotas. No caso de $Ca > 1$, as tensões viscosas superam as tensões interfaciais e para $Ca < 1$ as tensões interfaciais são superiores às tensões viscosas. Entretanto, a condição de instabilidade e quebra de gotas não depende apenas da comparação entre tensões interfaciais e viscosas, mas das propriedades do sistema e tipo do escoamento. Usualmente, a literatura utiliza como critério de quebra de gotas $Ca > Ca_{crit}$.

Para avaliar a faixa do número de Capilaridade compreendida nos experimentos realizados no circuito de escoamentos, o número de Capilaridade foi calculado nos dispositivos extratores de emulsão E1, E2, E3 e E4, utilizando $d_{max} = D_{v99}$ como maior tamanho de gotas na amostra. Os resultados estão apresentados na Figura 57 em gráficos de número de Capilaridade nos dispositivos amostradores de emulsão por diâmetro de gotas D_{v99}. De forma geral, quanto maior a fração de água na emulsão, maior o valor de Ca. Isso é resultado do aumento do tamanho máximo de gotas, pois o D_{v99} aumenta com a fração de fase dispersa na emulsão. Os

maiores valores de *Ca* foram observados nos extratores E1 e E4, atingindo valores entre 0,5 (emulsão 5% A/O) e 1,3 (emulsão 20% A/O).

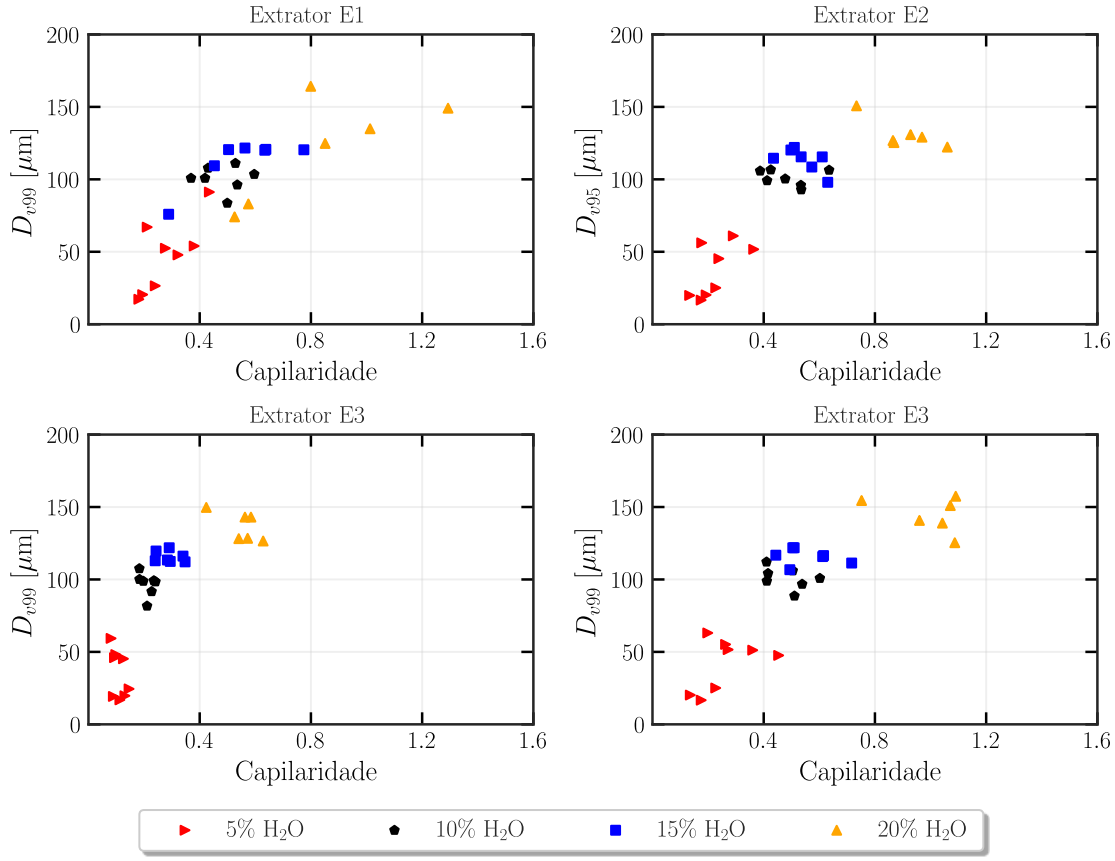


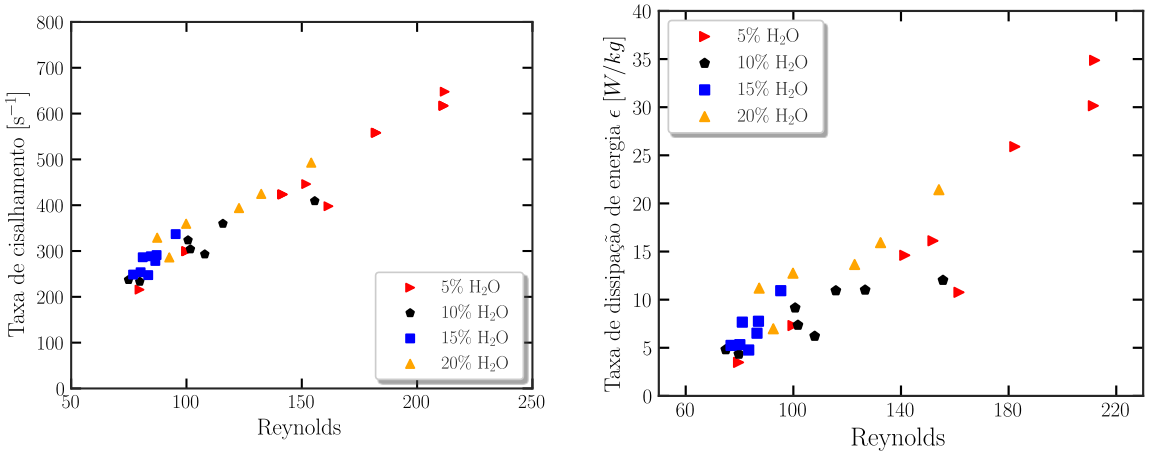
Figura 57 - Relação entre o número de Capilaridade e o $d_{max} = D_{v99}$ nos dispositivos extratores de emulsão

A Figura 58(a) analisa a relação entre a taxa de cisalhamento *G*, calculada através da Eq. (10), e o número de Reynolds *Re*. Observa-se tendência de aumento de *G* com *Re* para todas as frações volumétricas de fase dispersa. Os experimentos no circuito de escoamento de emulsões contemplaram taxa de cisalhamento entre 200 e 700 s^{-1} e faixa de número de Reynolds entre 70 e 220. As emulsões com 5% A/O apresentam as maiores taxas de cisalhamento, e as emulsões com 15% e 20% A/O apresentam os menores valores de taxa de cisalhamento.

O aumento na taxa de cisalhamento também resulta em aumento do número de Capilaridade e aumento na taxa de dissipação de energia. Assim, quanto maior a taxa de cisalhamento maior o potencial de quebra de gotas, mesmo em escoamento laminar em que as tensões viscosas dominam a deformação e ruptura de gotas.

A taxa de dissipação de energia por unidade de massa ε foi calculada conforme a Eq. (19), e os resultados, apresentados na Figura 58(b), indicam que quanto maior o número de Reynolds maior a taxa de dissipação de energia. Os experimentos com emulsões de 5% H_2O apresentaram maior Reynolds e maior taxa de dissipação de energia, seguido por emulsões com 10% H_2O e 15% H_2O. Para emulsão com 20% H_2O, os testes abrangeram faixa mais ampla de

número de Reynolds, por isso não foi possível estabelecer um padrão entre a taxa de dissipação de energia e a fração volumétrica de fase dispersa.



a) Taxa de cisalhamento b) Taxa de dissipação de energia

Figura 58 - Relação entre o número de Reynolds, taxa de cisalhamento e taxa de dissipação de energia

4.5 QUEBRA E COALESCÊNCIA EM ESCOAMENTO VERTICAL ASCENDENTE

Neste trabalho, a avaliação da quebra e coalescência de gotas foi realizada em dois trechos distintos no circuito de escoamento de emulsões. O primeiro corresponde a um trecho vertical ascendente, que contempla os dispositivos amostradores de emulsão EXT-1 e EXT-2, identificados doravante como E1 e E2, respectivamente. O extrator E1 está localizado no início do trecho vertical, enquanto o E2 encontra-se posicionado no final do trecho. A posição dos extratores na bancada experimental está apresentada na Figura 27 e Figura 28.

O escoamento vertical ascendente impõe simultaneamente efeitos de desenvolvimento do perfil de velocidades, efeitos gravitacionais e gradientes de velocidade, além da tensão interfacial, que podem promover deformação, quebra ou coalescência de gotas, impactando a evolução da DTG neste trecho entre os dispositivos amostradores de emulsão E1 e E2.

Além dos efeitos gravitacionais no escoamento vertical ascendente, um ponto relevante que diferencia a evolução da DTG nos trechos é o tempo de contato entre gotas, pois no escoamento vertical L_V/D = 90 e no escoamento horizontal L_H/D = 435, ou seja, considerando interação entre gotas entre o extrator 1 e 2 e entre os extratores 3 e 4, o tempo de contato entre gotas no escoamento vertical é inferior ao tempo de contato na tubulação horizontal. Conforme fundamentação teórica, um dos critérios para ocorrência de coalescência é o tempo de contato entre gotas ser superior ao tempo de drenagem do filme interfacial.

A Figura 59 apresenta os resultados da DTG para emulsões A/O em escoamento no circuito de escoamento de emulsões, sob condição de número de Weber global We_{global} = 6. A análise contempla emulsões com frações de água de 5% (Re = 212, Ca_{E1} = 0,24), 10% (Re = 155, Ca_{E1} = 0,60), 15% (Re = 95, Ca_{E1} = 0,77) e 20% (Re = 92, Ca_{E1} = 0,80). Apesar da

parametrização do teste pelo número de Weber aproximadamente constante, há variação do número de Reynolds (entre 92 e 212) e número de Capilaridade (entre 0,24 e 0,80), decorrente das mudanças de propriedades termofísicas do fluido com a modificação da fração volumétrica de fase dispersa, sendo as propriedades: massa específica, viscosidade e diâmetro médio de gotas.

Considerando que os experimentos ocorrem em regime laminar, espera-se que a evolução da DTG seja governada por efeitos das tensões viscosas locais e interações entre as gotas. Dessa forma, o número de Capilaridade deve apresentar maior relevância com a variação dos diâmetros característicos. Além disso, os resultados da reciclagem de emulsões do Capítulo 4.2 indica que o tamanho de gotas inicial pode afetar a DTG e, consequentemente, impactar os processos de quebra e coalescência de gotas.

Na Figura 59, cada subfigura apresenta simultaneamente a frequência volumétrica da DTG, representada por linhas contínuas com marcadores, e a frequência acumulada, representada como linha tracejada. As curvas na cor preta correspondem às emulsões coletadas no extrator 1, localizado no início do trecho vertical, enquanto as curvas na cor cinza representam emulsões coletadas no extrator 2, ao final do trecho vertical. A comparação entre as distribuições em E1 e E2 permite avaliar a evolução da DTG em escoamento vertical ascendente, possibilitando identificar os mecanismos de quebra e coalescência.

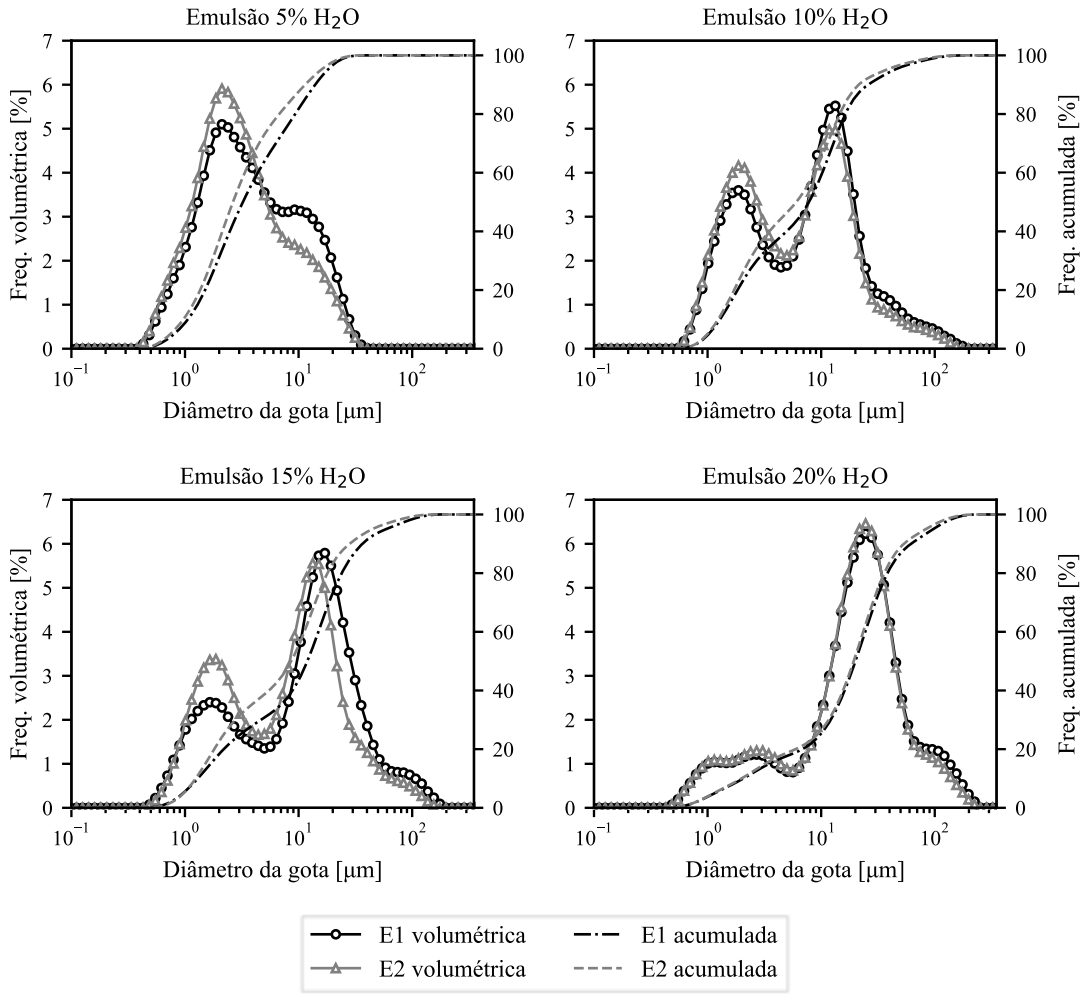


Figura 59 - DTG de emulsões em sistema de tubulação vertical ascendente, com variação da fração volumétrica de água (We_{global} = 6)

Para a emulsão com 5% H_2O, a DTG apresenta comportamento bimodal em E1 e praticamente unimodal em E2. O D_{v50} reduz de 3,4 µm no extrator E1 para 2,8 µm no extrator E2, equivalente a uma redução de 21%. Além disso, observa-se o deslocamento da DTG para a esquerda entre E1 e E2 ao longo do trecho vertical ascendente, indicando a redução do diâmetro das gotas. O D_{v95} também apresenta redução, passando de 19,1 µm em E1 para 16,7 µm em E2.

Na emulsão com 10% H_2O, a DTG passa a apresentar comportamento bimodal tanto em E1 quanto em E2, com primeiro pico centrado em 2 µm e um segundo pico em torno de 10 µm. A bimodalidade indica coexistência de populações de gotas pequenas e moderadas, característica típica de emulsões polidispersas e metaestáveis. O segundo pico da distribuição apresenta maior contribuição volumétrica, conforme evidenciado na curva de frequência acumulada. O D_{v50} reduz de 8,3 µm no extrator E1 para 6,4 µm no extrator E2, equivalente a uma redução de 23%, indicando quebra de gotas. O D_{v95} reduz de 46 µm no extrator E1 para 39,3 no extrator E2, indicando quebra de gotas e redução de 14% no valor de D_{v95}. A redução dos diâmetros característicos e deslocamento da DTG para região de menores diâmetros sugere

predominância dos mecanismos de quebra de gotas no trecho vertical ascendente para emulsão A/O com 10% H_2O.

A emulsão com 15% de H_2O também apresenta comportamento bimodal, com o primeiro pico em 2 µm e o segundo pico em 20 µm. A frequência volumétrica associada ao segundo pico é superior ao observado para emulsão com 10% H_2O, indicando aumento no tamanho das gotas associadas ao aumento da fração volumétrica. O D_{v50} reduz 28%, passando de 12,7 µm em E1 para 9,1 µm em E2. O D_{v95} reduziu 24%, diminuindo de 62,6 µm em E1 para 47,3 µm em E2. A DTG em E1 está mais à direita que em E2, reforçando a predominância da quebra de gotas no trecho vertical ascendente para emulsão A/O com 15% H_2O.

Por fim, para a emulsão com 20% H_2O, as DTGs em E1 e E2 são praticamente sobrepostas. As distribuições são assimétricas, com predominância de gotas por volta de 20 µm. Em E1, o D_{v50} é 21,3 µm e em E2 20,5 µm, indicando uma pequena redução no tamanho das gotas na ordem de 3%. O D_{v95} reduziu 14%, partindo de 102,9 µm em E1 para 88,4 µm em E2. A semelhança entre o formato da DTG em E1 e E2 e semelhança entre os diâmetros característicos indicam uma discreta redução no tamanho das gotas, típico da quebra de gotas.

De forma geral, as DTG em E1 e E2 apresentam comportamento semelhante. As observações visuais das DTGs para emulsões com fração de fase dispersa entre 5% e 15% (v/v) H_2O indicam a quebra de gotas como fenômeno preponderante. Para a emulsão com 20% (v/v) H_2O, a interpretação dos processos de quebra e coalescência de gotas baseada apenas em observação visual é limitada, pois as distribuições em E1 e em E2 são praticamente sobrepostas. No entanto, a análise conjunta com os diâmetros característicos D_{v50} e D_{v95} confirma o predomínio da quebra de gotas no trecho vertical ascendente em testes com $We = 6$.

Os resultados indicam relação entre a fração volumétrica de água e os tamanhos das gotas, sendo que quanto maior fração volumétrica de água, maiores são os diâmetros das gotas. Esse comportamento é consistente com os resultados obtidos no Capítulo 4.2, com aumento do D_{dev} com a fração de fase dispersa.

As seções a seguir analisam a evolução da distribuição do tamanho de gotas em diferentes condições de escoamento, a partir da variação do Re, We_{global} e Ca_{E1}. As diferenças relativas entre os diâmetros característicos serão calculadas conforme a Eq. (30).

4.5.1 Emulsão com 5% de água

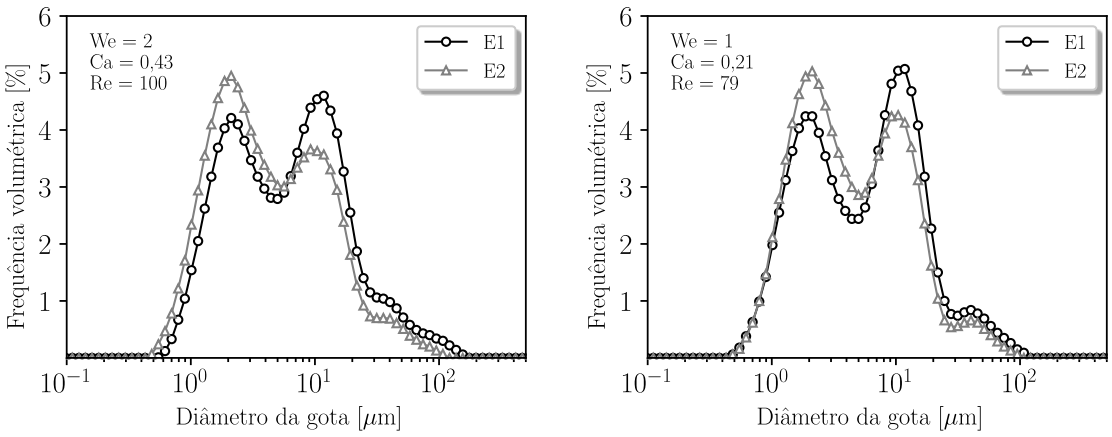
A Tabela 17 apresenta os diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E1 e E2 em função do número de Capilaridade baseado no D_{v99} no extrator E1 para concentração de 5% (v/v) H_2O, além das respectivas variações de ΔD [%]. Nesse trecho vertical ascendente, houve redução no tamanho de gotas, que reflete os mecanismos de quebra de gotas por forças viscosas. A redução nos diâmetros característicos foi constatada em todos os diâmetros característicos e em todos os experimentos com 5% (v/v) H_2O.

Tabela 17 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E1 e E2 (trecho vertical ascendente) para concentração de 5% (v/v) H_2O

Teste Id	Ca_{E1} D_{v99}	$D_{[4,3]}$ [µm]			$D_{[3,2]}$ [µm]			D_{v50} [µm]			D_{v95} [µm]		
		E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]
T2_W05	0,24	6,0	4,9	-18,3	2,5	2,2	-12,2	3,4	2,8	-18,4	19,1	16,7	-12,5
T3_W05	0,18	4,1	3,8	-6,6	2,2	2,1	-4,0	2,8	2,7	-4,7	11,8	11,0	-6,9
T4_W05	0,19	5,1	4,7	-6,3	2,6	2,4	-4,5	3,3	3,1	-5,3	15,0	14,5	-3,5
T5_W05	0,43	11,2	8,0	-28,3	3,5	2,8	-21,6	6,1	3,9	-36,7	40,4	27,5	-31,9
T6_W05	0,21	9,5	7,8	-18,4	3,2	2,9	-9,0	5,7	4,0	-30,0	33,2	24,3	-26,8
T7_W05	0,28	7,0	6,0	-13,4	2,7	2,5	-6,1	3,5	3,1	-11,5	21,3	18,8	-11,7
T8_W05	0,38	7,4	6,2	-15,9	2,9	2,5	-10,8	4,0	3,2	-19,7	22,9	19,1	-16,6

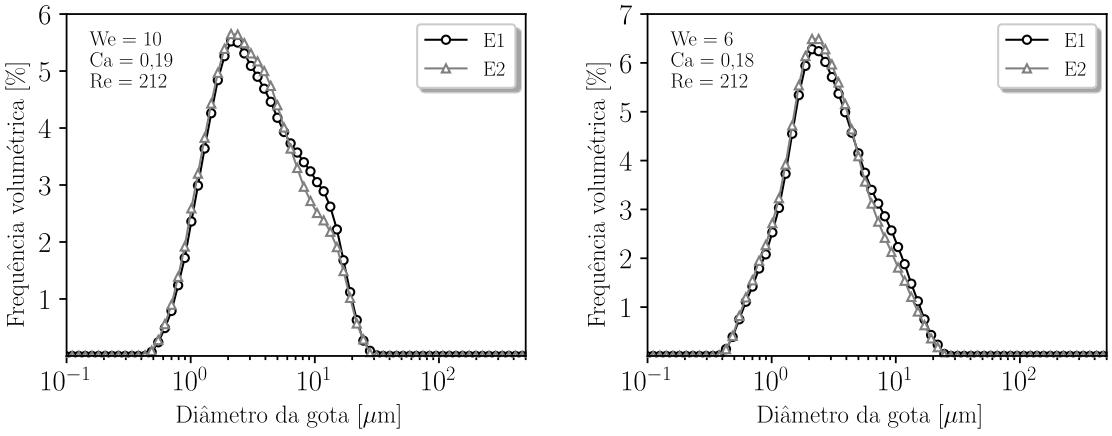
O teste T5_W05 (We = 2 e Ca = 0,43), foi o que apresentou maior redução do tamanho de gotas, com variação dos diâmetros característicos entre -21,6% no $D_{[3,2]}$ e -36,7% no D_{v50}. O segundo teste com maior redução no tamanho das gotas foi o teste T6_W05 (We = 1 e Ca = 0,21), com redução do diâmetro entre -9,0% no $D_{[3,2]}$ e -30,0% no D_{v50}. A Figura 60 apresenta a evolução da DTG nesses experimentos. Pode-se observar que as DTGs são bimodais, tanto em E1 quanto em E2, com aumento da frequência volumétrica do primeiro pico em E2, centrado em 2 µm, e redução da frequência volumétrica do segundo pico em E2, em cerca de 10 µm, evidenciando a predominância dos mecanismos de quebra de gotas.

O teste com menor variação no tamanho das gotas foram o T4_W05 (We = 11 e Ca = 0,19), com variação dos diâmetros característicos entre -3,5% no D_{v95} e -6,3% no $D_{[4,3]}$, seguido pelo teste T3_W05 (We = *6* e Ca = 0,18), com variações entre -4,0% no $D_{[3,2]}$ e -6,9% no D_{v95}. Analisando os diâmetros característicos, esses testes são os que apresentam menores diâmetros no início do trecho, ou seja, no extrator E1. O estado da arte da quebra e coalescência de gotas indica que gotas pequenas são mais estáveis e com menor tendência a quebra ou coalescência de gotas. Considerando a pressão de Laplace ΔP_L, quanto menor o diâmetro das gotas maior a pressão de Laplace que se opõe às tensões externas que tendem a deformar as gotas, seja de origem viscosa ou inercial. A Figura 61 apresenta a DTG de tais testes. Pode-se observar alta sobreposição entre os diâmetros de gota em E1 e E2, principalmente nas caudas das distribuições.



a) T5_W05 b) T6_W05

Figura 60 - DTG em emulsões A/O com 5% H_2O escoando em trecho vertical ascendente com redução do tamanho das gotas



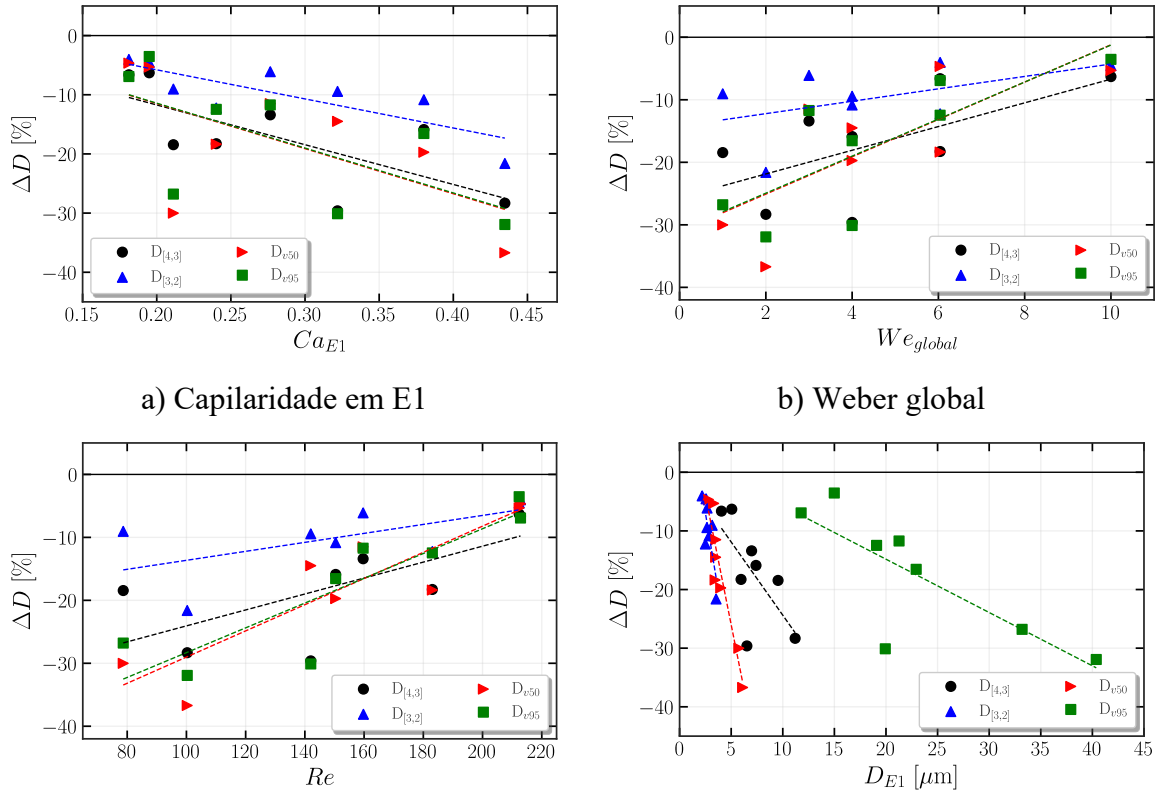
a) T4_W05 b) T3_W05

Figura 61 - DTG em emulsões A/O com 5% H_2O escoando em trecho vertical ascendente com pequena variação do tamanho de gotas

A Figura 62 sintetiza a influência dos parâmetros adimensionais e do tamanho inicial das gotas na evolução dos diâmetros característicos da emulsão A/O com 5% (v/v) H_2O em escoamento ascendente, compreendendo trecho entre os extratores E1 e E2. Os marcadores são medições experimentais, e as retas tracejadas são linearizações dos dados para cada diâmetro característico, visando destacar a tendência de cada conjunto de dados.

Conforme apresentado na Tabela 17, todos os valores de ΔD são negativos, evidenciando a quebra de gotas em escoamento vertical ascendente para emulsões com 5% (v/v) H_2O. A magnitude da redução dos diâmetros característicos depende do parâmetro analisado e do diâmetro característico considerado. O $D_{[3,2]}$ é o diâmetro característico mais estável entre os demais, ou seja, é o que menos apresenta variação com a modificação dos números de Capilaridade, Weber e Reynolds. O $D_{[3,2]}$ é um diâmetro médio ponderado pela

área superficial, por isso dá mais peso às gotas menores, que por definição apresentam maior estabilidade.



a) Capilaridade em E1

b) Weber global

c) Reynolds

d) Diâmetro no início do trecho

Figura 62 – Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 5% (v/v) H_2O escoando no trecho vertical ascendente em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho

A Figura 62(a) relaciona a variação dos diâmetros característicos com o número de Capilaridade em E1 baseado no D_{v99}, com número de Capilaridade entre 0,18 e 0,43. Os resultados evidenciam o aumento da intensidade da quebra de gotas com aumento do número de Capilaridade, principalmente para o D_{v95}, D_{v50} *e* $D_{[4,3]}$. Esse comportamento converge com a teoria de quebra e coalescência de gotas, uma vez que o número de Capilaridade representa a razão entre tensões viscosas e tensões interfaciais, parâmetro relevante em escoamento de emulsões em regimes laminares. Quanto maior o número de Capilaridade, maior a tensão viscosa do escoamento atuando sobre as gotas, e maior a propensão a deformação e ruptura das gotas. O $D_{[3,2]}$ apresenta menor sensibilidade ao aumento de *Ca*, o que comprova que as menores gotas têm menor propensão à quebra.

A Figura 62(b) apresenta a influência do número de Weber global do experimento sobre a variação dos diâmetros característicos no trecho vertical ascendente para emulsão A/O com 5% (v/v) H_2O. O We_{global} é o número de Weber em que o experimento foi parametrizado, calculado através da Eq. (27) com base no $D_{[4,3]}$ da emulsão no tanque TQ-1. O We_{global} variou entre 1 e 11. Os resultados indicam redução da intensidade da quebra de gotas com aumento do

número de Weber. Do ponto de vista clássico dos fundamentos de quebra de gotas, este resultado é aparentemente contraditório, uma vez que Weber alto indica maior intensidade das tensões inerciais quando comparadas às tensões interfaciais. Entretanto, considerando que os experimentos foram realizados em regime laminar, os resultados da Figura 62(b) indicam que o número de Weber não representa adequadamente os mecanismos de deformação e quebra de gotas em regime laminar. Além disso, o We_{global} não contempla os processos de deformação, quebra e coalescência de gotas que podem ocorrer no trecho entre TQ-1 e E1, pois o We_{global} foi obtido com os tamanhos de gotas das emulsões antes do escoamento. Consequentemente, as modificações na DTG a montante do extrator de emulsão E1 pode favorecer a estabilidade de gotas pequenas, e menor propensão à quebra, mesmo sob tensões inerciais mais elevadas.

A relação entre o número de Reynolds e a variação dos diâmetros característicos está ilustrada na Figura 62(c) com *Re* entre 80 e 220. O comportamento é semelhante ao observado para o número de Weber, ou seja, o aumento do número de Reynolds corrobora para a redução da quebra de gotas, conforme indicado no gráfico pela menor magnitude do ΔD. Para uma mesma concentração volumétrica de fase dispersa, *Re* pode ser associado diretamente com a variação da velocidade média do escoamento. Em testes com velocidades mais altas, pode haver maior deformação e quebra de gotas na região do circuito a montante do extrator de emulsões E1, resultando em gotas pequenas em E1 e, consequentemente, mais estáveis e mais resilientes às tensões do escoamento.

A Figura 62(d) apresenta a variação dos diâmetros característicos em relação ao diâmetro inicial de gotas em E1, no início do trecho vertical ascendente. Há uma tendência clara de aumento da magnitude de ΔD com o diâmetro de gota inicial, ou seja, gotas inicialmente maiores apresentam maior susceptibilidade a ruptura de gotas. Esse comportamento é mais acentuado para os diâmetros característicos D_{v50} e D_{v95}, em que ΔD atinge -36% e -32%, respectivamente. O $D_{[4,3]}$ reduz -28% e $D_{[3,2]}$ reduz -21%.

Os resultados indicam que a evolução da distribuição do tamanho de gotas no trecho vertical ascendente para emulsão com 5% H_2O é governada por quebra de gotas, e os parâmetros de maior influência são o número de Capilaridade e o diâmetro inicial das gotas. Isso demonstra que não só a tensão exercida sobre a gota afeta a quebra, mas também o tamanho inicial das gotas, ou seja, o histórico do cisalhamento.

4.5.2 Emulsão com 10% de água

A Tabela 18 apresenta os diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} medidos nos extratores E1 e E2 para concentração de 10% (v/v) H_2O em função do número de Capilaridade em E1. A variação dos diâmetros característicos ΔD [%] foi utilizada como indicador da evolução do tamanho de gotas ao longo do trecho vertical ascendente. Valores positivo do ΔD indica predominância da coalescência de gotas e valores negativos indicam predominância da quebra de gotas. Em comparação aos testes realizados com emulsões A/O com 5% H_2O, houve aumento nos diâmetros característicos, tal como observado nos testes analíticos do Capítulo 4.2 e na análise da emulsão produzida para os testes no circuito de escoamentos, conforme Capítulo 4.3.

Tabela 18 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E1 e E2 (trecho vertical ascendente) para concentração de 10% (v/v) H_2O

Teste Id	Ca_{E1}	$D_{[4,3]}$ [µm]			$D_{[3,2]}$ [µm]			D_{v50} [µm]			D_{v95} [µm]		
		E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]
T10_W10	0,53	15,6	13,3	-14,7	3,8	3,4	-11,7	9,4	7,1	-23,8	55,1	47,8	-13,3
T11_W10	0,42	14,8	13,8	-7,2	3,8	3,5	-7,5	9,7	8,5	-13,1	50,3	47,1	-6,3
T12_W10	0,43	14,8	14,7	-0,7	4,0	3,9	-3,1	10,0	9,8	-2,0	49,7	48,7	-1,9
T13_W10	0,50	11,7	12,8	9,3	3,4	3,3	-2,7	7,4	7,5	0,6	39,6	45,0	13,6
T14_W10	0,54	12,6	12,7	0,2	3,6	3,5	-1,2	8,1	7,9	-1,8	42,7	43,5	2,0
T16_W10	0,37	15,0	13,9	-7,0	4,0	3,8	-6,5	10,6	9,0	-15,1	47,9	47,5	-0,9
T17_W10	0,60	13,2	11,3	-14,3	3,6	3,3	-9,5	8,3	6,4	-22,6	46,5	39,3	-15,4
T18_W10	0,55	14,2	13,0	-8,0	4,0	3,4	-14,0	10,1	8,0	-20,9	45,7	45,4	-0,6

Todos os experimentos com emulsão com 10% H_2O apresentaram $D_{[4,3]}$ maior que 11 µm, D_{v50} acima de 7 µm e D_{v95} acima de 40 µm, o que reforça o aumento da presença de gotas moderadas ou grandes com aumento da fração volumétrica de fase dispersa. O teste T15_W10 foi descartado das análises subsequentes por apresentar diâmetros característicos incoerentes ao comparado com os demais testes, com D_{v95} na ordem de 65 µm.

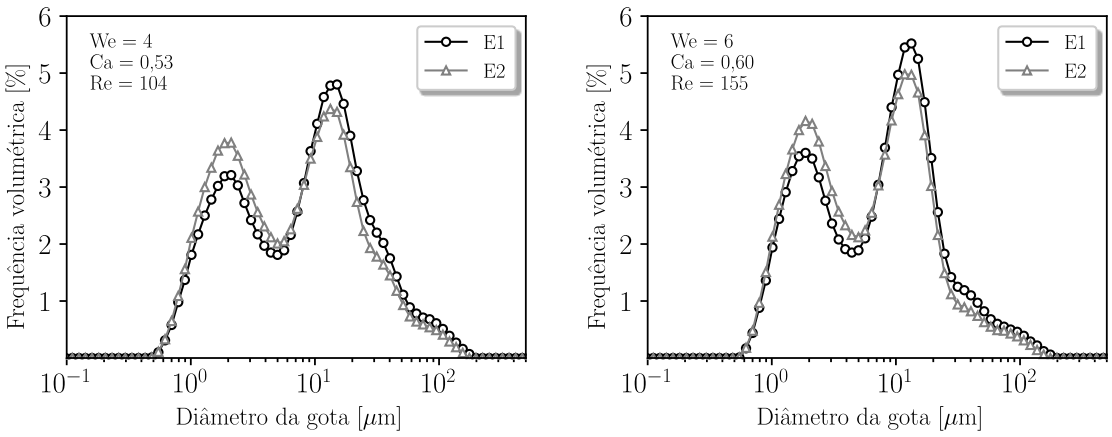
Diferente do observado nos testes com 5% H_2O, houve aumento no tamanho das gotas em 2 dos 8 testes no trecho vertical ascendente, indicado pelo parâmetro $\Delta D > 0$. Os critérios de análise com base no $D_{[4,3]}$ e D_{v95} identificaram redução no tamanho de gotas em 6 dos 8 testes. A variação dos diâmetros característicos com base no $D_{[3,2]}$ e D_{v50} identificaram redução no tamanho das gotas em todos os experimentos, indicando predominância dos mecanismos de quebra de gotas. A recorrência de $\Delta D < 0$ confirmam a hipótese de que as tensões viscosas atuantes no trecho vertical ascendente promovem deformação e ruptura de gotas dispersas, mesmo em regime laminar.

Os testes com maior redução no tamanho de gotas foram o T10_W10 ($We = 4$ e $Ca = 0{,}53$), com ΔD entre -11,7% no $D_{[3,2]}$ e -23,8% no D_{v50} e o T17_W10 ($We = 6$ e $Ca = 0{,}60$), que apresentou redução do tamanho de gotas entre -9,5% para $D_{[3,2]}$ e -22,6% no D_{v50}. Entre os testes com quebra de gotas, o com menor variação no ΔD foi o T12_W10 ($We = 6$ e $Ca = 0{,}43$), em que a variação nos diâmetros de gotas foi entre -0,7% no $D_{[4,3]}$ e -3,1% no $D_{[3,2]}$. Esse resultado reforça que o número de Weber isoladamente não é suficiente para explicar a quebra de gotas observada.

A Figura 63 apresenta gráficos da evolução do tamanho de gotas nos testes T10_W10 e T17_W10 entre os extratores de emulsão E1 e E2. As DTGs são bimodais, e em E2 há aumento da frequência volumétrica do primeiro pico, centrado em 2 µm, e redução da frequência volumétrica do segundo pico, em torno de 10 µm, reforçando a predominância dos mecanismos de quebra de gotas.

Em 2 dos 8 testes realizados com emulsões A/O com 10% H_2O houve aumento do tamanho das gotas, evidenciadas pelo $\Delta D > 0$. Esses testes foram os que apresentaram menores diâmetros de gotas no início do trecho vertical ascendente, ou seja, em E1, o que resulta em menor tendência a ruptura do filme interfacial e quebra de gotas. No teste T13_W10 ($We = 5$ e

Ca = 0,50), o $D_{[4,3]}$ aumentou 9,3%, o D_{v50} aumentou 0,6% e o D_{v95} aumentou 13,6%. Esse comportamento sugere predominância da coalescência neste teste. No teste T14_W10 (*We* = 4 e *Ca* = 0,54), o aumento no tamanho das gotas foi menos pronunciado, com aumento em 2 dos 4 diâmetros característicos em análise: 0,2% no $D_{[4,3]}$ e 2,0% no D_{v95}. Por isso, não se pode afirmar a predominância da coalescência de gotas nesse teste, mas uma competição entre os mecanismos de quebra e coalescência.

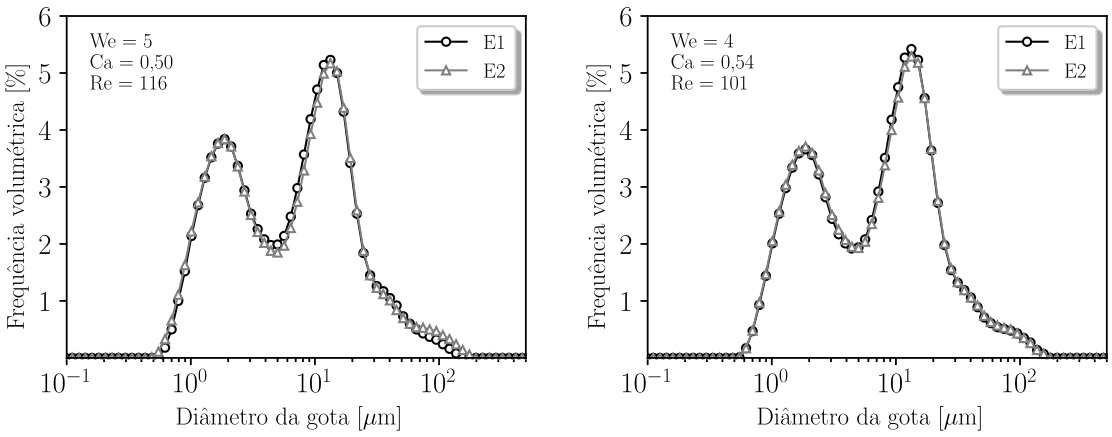


a) T10_W10 b) T17_W10

Figura 63 - DTG em emulsões A/O com 10% H_2O escoando em trecho vertical ascendente com maior redução dos diâmetros de gotas

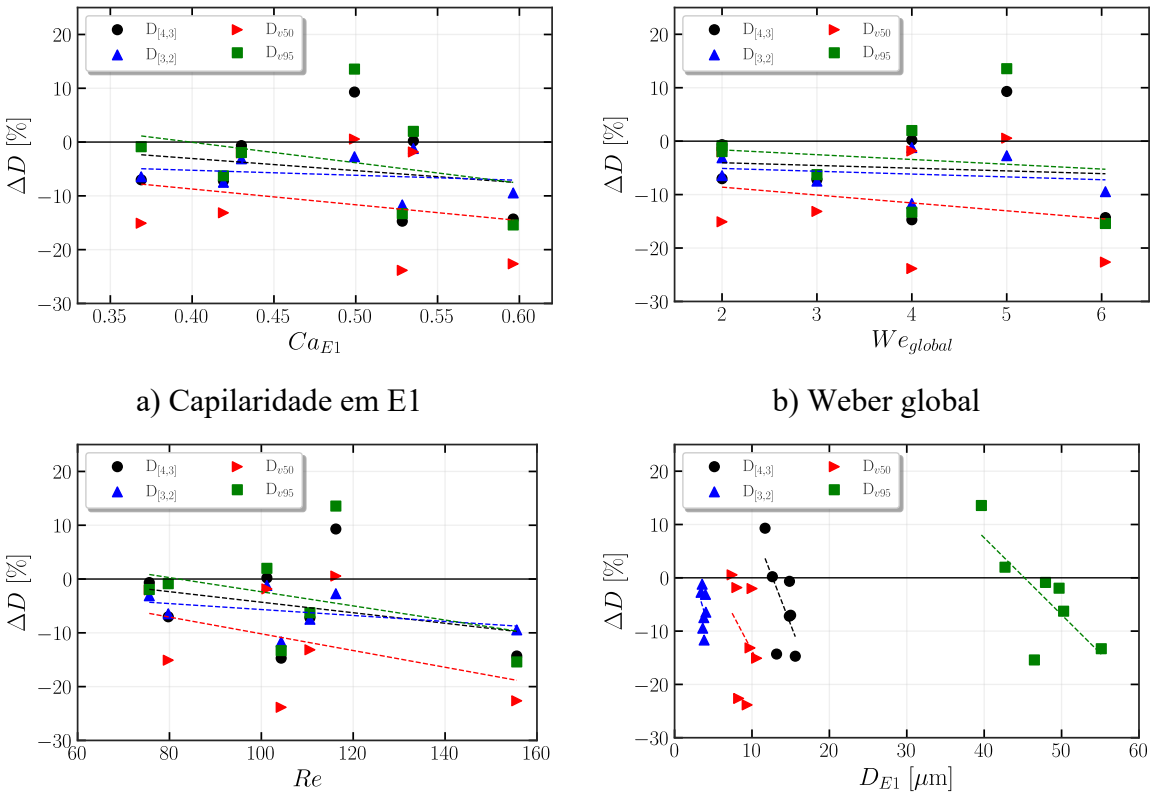
A Figura 64 apresenta a evolução da DTG nos extratores E1 e E2 nos experimentos com aumento nos diâmetros característicos. A análise visual dos gráficos impossibilita traçar conclusões significativas, pois as DTGs são praticamente sobrepostas em E1 e em E2. Isso reforça a relevância em analisar os diâmetros médios característicos na avaliação de quebra e coalescência de gotas em emulsões. Os resultados da Tabela 18 indicam predominância da quebra de gotas, evidenciada pelo ΔD negativo, no escoamento vertical ascendente para emulsões com 10% H_2O, porém de forma menos pronunciada do que observado nas emulsões com 5% H_2O. O aumento da fração volumétrica de fase dispersa intensifica as colisões e interações entre as gotas, o que pode favorecer a coalescência dependendo da intensidade das tensões viscosas e do diâmetro inicial das gotas. Como consequência, os resultados para emulsão com 10% de fase dispersa são mais dispersos e com ocorrências de aumento nos diâmetros característicos.

A Figura 65 apresenta a influência de parâmetros adimensionais e do tamanho inicial das gotas na evolução dos diâmetros característicos da emulsão A/O com 10% (v/v) H_2O escoando no trecho vertical ascendente. Os marcadores são pontos experimentais e as retas tracejadas são linearizações dos conjuntos de dados para cada diâmetro característico, visando destacar tendências. De forma geral, observa-se dominância de valores negativos do ΔD, indicando redução do tamanho das gotas no trecho entre E1 e E2. Entretanto, os resultados são dispersos e com existência de testes com aumento nos diâmetros característicos, indicando maior competição entre os mecanismos de quebra e coalescência.



a) T13_W10 b) T14_W10

Figura 64 - DTG em emulsões A/O com 10% H_2O escoando em trecho vertical ascendente em testes com aumento dos diâmetros característicos



a) Capilaridade em E1 b) Weber global

c) Reynolds d) Diâmetro no início do trecho

Figura 65 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 10% (v/v) H_2O escoando no trecho vertical ascendente em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho

A Figura 65(a) relaciona o ΔD com o número de Capilaridade entre 0,37 e 0,55. O gráfico indica uma tendência de aumento da variação relativa dos diâmetros característicos com o número de Capilaridade, de forma mais pronunciada no D_{v50}. As linearizações de todos os conjuntos de dados apresentam inclinação negativa, ou seja, o aumento das tensões viscosas favorece a redução do tamanho de gotas no trecho vertical ascendente. Entretanto, na faixa $0{,}50 < Ca < 0{,}55$ houve variabilidade nos dados e $\Delta D > 0$ do D_{v95} e $D_{[4,3]}$ no trecho vertical ascendente, ou seja, predominância da coalescência de gotas. Esse comportamento evidencia que o aumento do número de Capilaridade não resulta necessariamente no mecanismo de quebra de gotas como dominante, mas que pode haver coalescência dependendo de outros parâmetros do escoamento ou da emulsão. Novamente, o $D_{[3,2]}$ foi o diâmetro médio mais estável, com variações entre -1% e -14%.

A relação entre o número de Weber global do experimento e a variação dos diâmetros característicos é apresentada na Figura 65(b). O número de Weber variou entre 2 e 6. Os resultados são semelhantes ao observado com o número de Capilaridade, ou seja, há tendência de que o aumento do número de We_{global} favorece a redução do tamanho das gotas no trecho vertical ascendente. Entretanto, nota-se alta variabilidade experimental para $We_{global} = 4$ e $We_{global} = 5$.

A Figura 65(c) apresenta a variação dos diâmetros característicos em função do número de Reynolds, com *Re* entre 75 e 160. Diferente do observado para emulsão com 5% H_2O, observa-se tendência de aumento da variação dos diâmetros característicos com aumento do *Re*, especialmente no D_{v50}. Novamente, o $D_{[3,2]}$ apresenta menor dispersão do ΔD, e o D_{v95} apresenta a maior dispersão do ΔD.

A Figura 65(d) relaciona a variação dos diâmetros característicos em relação ao diâmetro de gota no início do trecho vertical ascendente, isso é, em E1. Tal como observado para 5% H_2O, há uma relação clara entre o diâmetro inicial das gotas com a variação dos diâmetros característicos, especialmente nos diâmetros volumétricos $D_{[4,3]}$ e D_{v95}, havendo quebra de gotas para $D_{v95} > 45$ µm e $D_{[4,3]} > 13$ µm. Os resultados indicam que emulsões em escoamento vertical ascendente contendo gotas iniciais maiores apresentam maior predisposição à quebra de gotas. O D_{v95} foi o diâmetro característico com maior amplitude de variação, apontando que a cauda da DTG apresenta maior sensibilidade às condições hidrodinâmicas do escoamento. Por outro lado, o $D_{[3,2]}$ apresenta menores variações do ΔD, ou seja, as gotas menores são mais estáveis.

Os resultados apresentados para a emulsão com 10% H_2O em escoamento vertical ascendente evidenciam que a dinâmica do escoamento das emulsões é mais complexa do que para as emulsões com 5% H_2O, havendo tanto a quebra quanto coalescência de gotas, dependendo de Ca_{E1}, We_{global}, *Re* e do diâmetro inicial das gotas no trecho e do número de Capilaridade. Esse comportamento sugere que o aumento da fração volumétrica de fase dispersa intensifica as interações entre gotas, podendo haver colisão, agregação e coalescência de gotas. Diferente do observado para 5% H_2O, houve uma tendência de aumento da magnitude do ΔD com aumento dos números de Weber e Reynolds, apesar da elevada variabilidade dos dados.

4.5.3 Emulsão com 15% de água

A Tabela 19 apresenta a evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} para emulsões A/O com 15% (v/v) H_2O em escoamento vertical ascendente, compreendendo a faixa de Ca_{E1} entre 0,29 e 0,77. O parâmetro ΔD [%] é um indicador da variação do tamanho de gotas entre E1 e E2 relativa a E1, em que $\Delta D < 0$ indica redução no tamanho das gotas e $\Delta D > 0$ aponta aumento no tamanho das gotas. Comparando com os testes com 10% de H_2O, nas emulsões com 15% H_2O todos os diâmetros característicos aumentaram em E1, com $D_{[4,3]} > 16$ µm, $D_{v50} > 13$ µm e $D_{v95} > 43$ µm, evidenciando o aumento no tamanho de gotas com incremento da fração volumétrica de fase dispersa na emulsão.

Tabela 19 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E1 e E2 (trecho vertical ascendente) para concentração de 15% (v/v) H_2O

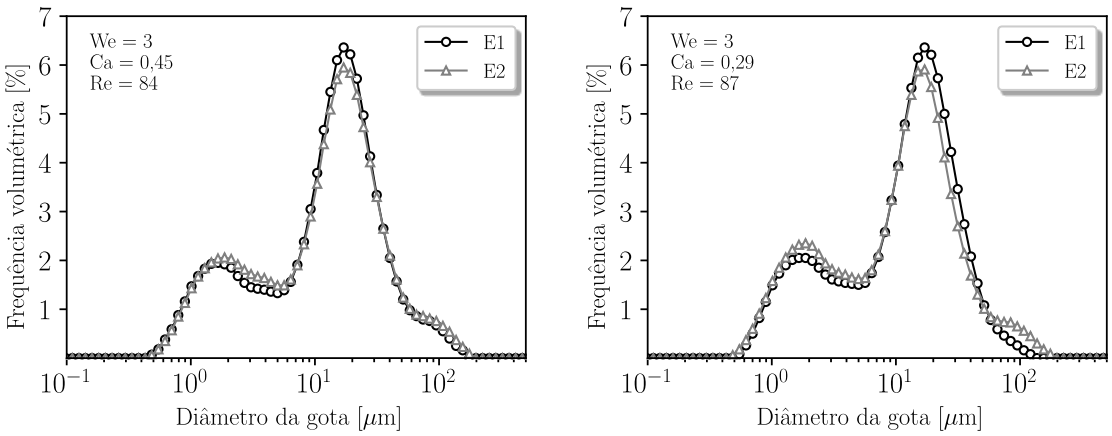
Teste Id	Ca_{E1}	$D_{[4,3]}$ [µm]			$D_{[3,2]}$ [µm]			D_{v50} [µm]			D_{v95} [µm]		
		E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]
T19_W15	0,76	26,7	24,0	-10,1	5,8	5,3	-8,8	17,2	15,7	-8,4	89,9	80,5	-10,5
T20_W15	0,64	19,4	18,5	-4,6	4,4	4,4	0,0	12,8	12,6	-1,6	69,9	63,6	-9,0
T21_W15	0,77	18,3	13,8	-24,5	4,2	3,6	-14,2	12,7	9,1	-28,0	62,6	47,3	-24,4
T22_W15	0,63	19,0	17,1	-10,1	4,7	4,3	-8,1	13,6	12,3	-9,0	63,1	55,1	-12,7
T23_W15	0,56	19,8	17,9	-9,6	5,0	4,6	-8,8	14,3	12,9	-10,3	64,7	58,9	-9,0
T24_W15	0,45	18,7	19,2	3,0	4,8	4,7	-1,7	14,1	13,7	-2,3	57,6	63,6	10,4
T25_W15	0,50	20,4	19,0	-6,6	5,2	4,7	-10,0	15,0	13,4	-10,4	64,5	63,3	-1,9
T26_W15	0,29	16,2	17,4	7,5	4,8	4,4	-8,6	13,3	12,3	-7,8	43,7	57,2	30,8

Semelhante ao observado para os testes com emulsões com 10% H_2O, em 6 dos 8 testes com emulsão com 15% H_2O houve redução em todos os diâmetros característicos, ou seja, predominância da quebra de gotas no trecho vertical ascendente, evidenciado por $\Delta D < 0$. A variação dos diâmetros característicos com os critérios do $D_{[3,2]}$ e D_{v50} identificaram redução no tamanho de gotas em todos os testes, evidenciando predominância da quebra de gotas para emulsões com 15% H_2O em escoamento vertical ascendente.

Em 2 dos 8 testes, foram identificados $\Delta D > 0$ nos diâmetros característicos $D_{[4,3]}$ e o D_{v95}. Como nesses casos não houve $\Delta D > 0$ para os demais diâmetros característicos – $D_{[3,2]}$ e D_{v50}, não é possível definir que houve coalescência nesses casos, mas que há uma concorrência entre os mecanismos de quebra e coalescência de gotas. O aumento do $D_{[4,3]}$ foi de 3% no T24_W15 e 7,5% no T26_W15. Nesses experimentos, o aumento no D_{v95} foi 10,4% e 30,8%, respectivamente.

A Figura 66 apresenta a DTG nos testes T24 e T26, que houve $\Delta D > 0$. No teste T25_W15, as DTGs apresentam são bimodais e sobrepostas, com diferenças próximas ao primeiro e ao segundo pico. Já no teste T26_W15, A DTG em E1 encontra-se mais deslocada para a direita, região com maiores diâmetros, e a DTG em E1 deslocada para esquerda, exceto na cauda da DTG que a E2 apresenta diâmetros maiores. Logo, não é possível concluir a

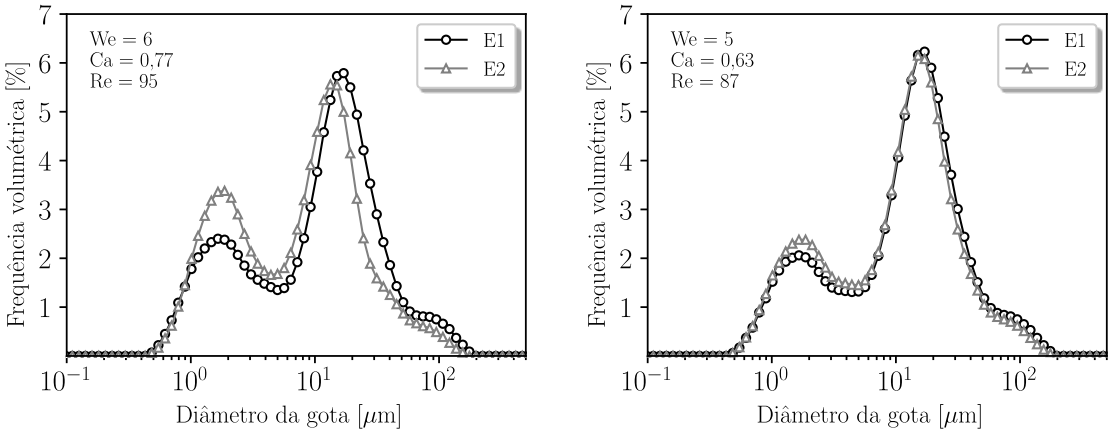
predominância da coalescência nesses experimentos, mas pode-se afirmar que há uma concorrência entre os mecanismos de quebra e coalescência.



a) T24_W15 b) T26_W15

Figura 66 - DTG em emulsões A/O com 15% H_2O em escoamento vertical ascendente em testes com aumento dos diâmetros característicos

O teste com maior redução no tamanho de gotas foi o T21_W15 (*We* = 6 e *Ca* = 0,77), com redução de -24,5% no $D_{[4,3]}$, -14,2% no $D_{[3,2]}$, -28,0% no D_{v50} e -24,4% no D_{v95}. O segundo teste com maior redução do tamanho de gotas foi o T22_W15 (*We* = 5 e *Ca* = 0,63), com redução de -10,1% no $D_{[4,3]}$, -8,1% no $D_{[3,2]}$, -9,0% no D_{v50} e -12,7% no D_{v95}. A Figura 67 apresenta a DTG desses testes. No T21_W15, a redução do tamanho de gotas é notável, com deslocamento da DTG para à esquerda em E2, região que compreende os menores diâmetros de gotas. Já no T22_W15, a redução no tamanho de gotas é mais sutil.

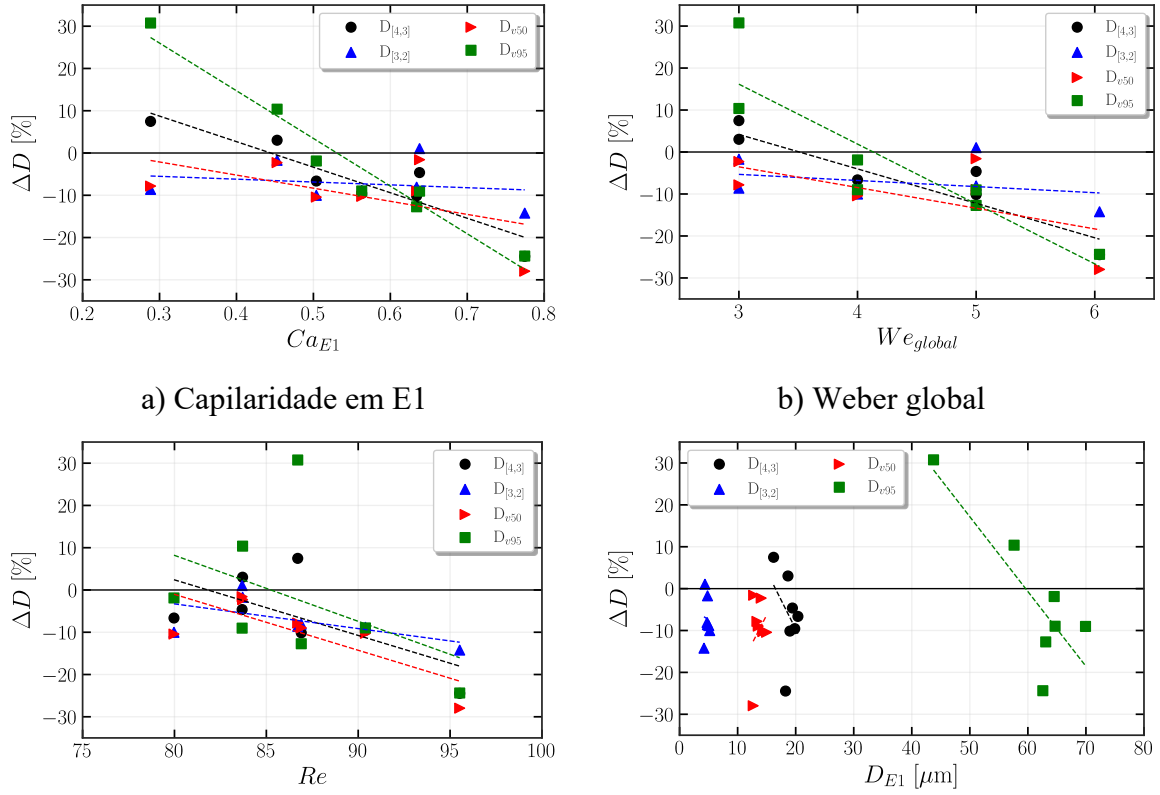


a) T21_W15 b) T22_W15

Figura 67 - DTG em emulsões A/O com 15% H_2O em escoamento vertical ascendente com redução dos diâmetros de gotas

Os resultados da Tabela 19 demonstram que o aumento da fração de fase dispersa na emulsão aumenta a complexidade da competição entre os mecanismos de quebra e coalescência de gotas em escoamento vertical ascendente, resultante do aumento das interações entre gotas. De forma geral, observa-se dominância da quebra de gotas, e equilíbrio entre quebra e coalescência.

A Figura 68 apresenta a influência de *Ca*, *Re*, We_{global} e do diâmetro de gotas no início do trecho vertical ascendente na variação dos diâmetros característicos da emulsão com 15% H_2O. Novamente, os marcadores são pontos experimentais e as retas tracejadas são indicadores da tendência do conjunto de dados.



a) Capilaridade em E1

b) Weber global

c) Reynolds

d) Diâmetro no início do trecho

Figura 68 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 15% (v/v) H_2O escoando no trecho vertical ascendente em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho

A Figura 68(a) apresenta a variação relativa dos diâmetros característicos em função do número de Capilaridade no início do trecho vertical ascendente, compreendendo Ca_{E1} entre 0,29 e 0,77. Observa-se $\Delta D > 0$ para $Ca_{E1} < 0{,}50$ para os diâmetros característicos D_{v95} e $D_{[4,3]}$, ou seja, o Ca_{crit} é próximo a 0,50. Os dados evidenciam o aumento do número de Capilaridade favorece e intensifica a quebra de gotas, de forma mais significativa no D_{v95} e $D_{[4,3]}$. Quanto maior o Ca_{E1}, maiores são as tensões viscosas atuando sobre as gotas, e maior possibilidade de ruptura, mesmo em escoamentos laminares.

A Figura 68(b) relaciona o número de Weber global dos experimentos com a variação dos diâmetros característicos, com We_{global} entre 3 e 6. Observa-se $\Delta D > 0$ para $We_{global} < 4$, e tendência de intensificação da quebra de gotas ($\Delta D < 0$) com aumento do número de Weber, evidenciado para o aumento da magnitude do ΔD, principalmente no D_{v50}, D_{v95} e $D_{[4,3]}$. O teste com $We_{global} = 6$ apresentou a maior redução nos diâmetros característicos no trecho compreendido entre os extratores E1 e E2.

A influência do número de Reynolds na variação dos diâmetros característicos é analisada na Figura 68(c), com Re entre 79 e 96. O ΔD para D_{v95} e $D_{[4,3]}$ apresenta alta dispersão em $80 < Re < 90$, o que limita a identificação de tendências de quebra ou coalescência com a variação de Re. Para o D_{v50} e $D_{[3,2]}$, há aumento da quebra de gotas com aumento de Re.

A Figura 68(d) relaciona o diâmetro de gotas no início do trecho com a variação dos diâmetros característicos. Há uma relação clara entre o D_{E1} e ΔD, principalmente para o D_{v95} e $D_{[4,3]}$. Há intensificação da quebra de gotas com o aumento do diâmetro inicial das gotas no trecho vertical ascendente, sendo que gotas iniciais maiores favorecem a quebra de gotas. Para $D_{v95} < 60$ μm e $D_{[4,3]} < 18$ μm, observa-se $\Delta D > 0$.

O diâmetro de Sauter $D_{[3,2]}$ é o mais estável entre os demais, ou seja, o que apresenta menor variação em escoamento vertical ascendente. Por definição, em DTG bimodais ou assimétricas o $D_{[3,2]}$ representa a contribuição das menores gotas da distribuição, reforçando que as gotas pequenas permanecem mais estáveis perante os mecanismos de quebra e coalescência de gotas, e que tais mecanismos são mais atuantes nas gotas moderadas e grandes.

Os resultados para emulsões com 15% H_2O escoando no trecho vertical ascendente indicam a influência da DTG no início do trecho, do número de Capilaridade e do número de Weber na evolução da distribuição do tamanho de gotas. O aumento da fração de fase dispersa intensifica as interações entre gotas, e favorecem a disputa entre quebra e coalescência, em função das tensões viscosas e tensões interfaciais sobre as gotas, e também do diâmetro de gotas no início do escoamento.

4.5.4 Emulsão com 20% de água

A Tabela 20 apresenta os diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} nos extratores E1 e E2 para emulsão A/O com 20% (v/v) H_2O em escoamento vertical ascendente. Os experimentos foram conduzidos com número de Capilaridade em E1 entre 0,53 e 1,01. A variação relativa dos diâmetros característicos foi utilizada como indicador da predominância dos mecanismos de quebra ou da coalescência de gotas, por meio do parâmetro ΔD [%].

Em comparação às demais frações volumétricas de água, na faixa entre 5% e 20% H_2O, houve aumento em todos os diâmetros característicos para a emulsão com 20% H_2O, evidenciado por $D_{[4,3]} > 19$ μm, $D_{v50} > 17$ μm e $D_{v95} > 49$ μm. Esses resultados confirmam que o incremento da fração volumétrica de fase dispersa resulta em emulsões com gotas intrinsicamente maiores.

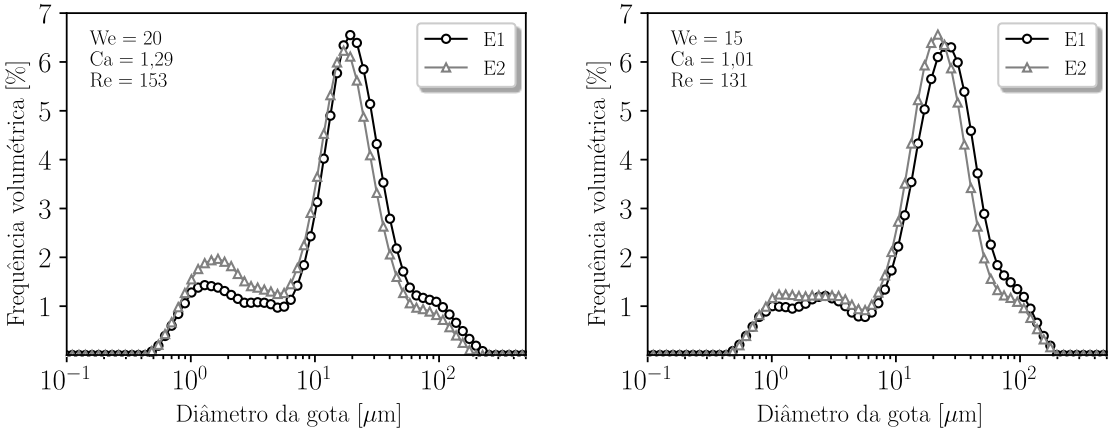
Em 3 dos 6 testes, todos os diâmetros característicos apresentaram redução no trecho vertical ascendente, evidenciando predominância da quebra de gotas. O experimento T30_W20 ($We = 20$ e $Ca_{E1} = 1{,}29$) apresentou a maior intensidade de quebra de gotas, com valores de ΔD em -18% para o $D_{[3,2]}$ e D_{v50}, -20% no $D_{[4,3]}$ e -22% no D_{v95}. O segundo teste com maior redução no tamanho das gotas foi o T33_W20 ($We = 15$ e $Ca_{E1} = 1{,}01$), com valores de ΔD na ordem

de -10% no D_{v95} e $D_{[3,2]}$, -12,9% no $D_{[4,3]}$ e -14,3% no D_{v50}. Vale ressaltar que tais testes foram os que apresentaram maiores gotas no início do trecho vertical ascendente, indicando que os mecanismos de quebra de gotas atuam preferencial nas maiores gotas.

Tabela 20 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E1 e E2 (trecho vertical ascendente) para concentração de 20% (v/v) H_2O

Teste Id	Ca_{E1}	$D_{[4,3]}$ [µm]			$D_{[3,2]}$ [µm]			D_{v50} [µm]			D_{v95} [µm]		
		E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]	E1	E2	ΔD [%]
T28_W20	0,85	22,7	21,2	-6,6	5,7	5,2	-9,0	17,4	15,5	-10,9	69,4	71,4	2,9
T29_W20	0,58	22,7	22,8	0,5	6,2	5,5	-10,0	19,8	17,0	-14,2	56,3	72,9	29,5
T30_W20	1,29	24,9	19,9	-20,1	5,7	4,7	-17,8	17,4	14,3	-17,9	86,0	67,2	-21,9
T31_W20	0,80	30,0	27,5	-8,1	6,6	6,3	-3,5	21,3	20,5	-3,5	102,9	88,4	-14,1
T32_W20	0,53	19,4	24,9	28,4	5,5	5,7	4,0	16,8	17,9	6,1	49,5	82,4	66,3
T33_W20	1,01	28,5	24,8	-12,9	6,6	6,0	-9,8	21,9	18,7	-14,3	87,3	78,8	-9,7

A Figura 69 apresenta a DTG correspondente aos testes T30_W20 e T33_W20. Em ambos os casos, a DTG em E2 é deslocada para esquerda em relação a DTG em E1, ou seja, deslocada para regiões com menores diâmetros de gotas, indicando aumento na frequência volumétrica de gotas pequenas ao longo do escoamento. Há aumento da frequência volumétrica do primeiro pico, situado em torno de 2 µm, além de um leve deslocamento do segundo pico, centrado próximo a 20 µm, para a esquerda, região com menores diâmetros de gotas. Esse comportamento evidencia a redistribuição da emulsão para gotas menores, consistente com predominância da quebra de gotas.

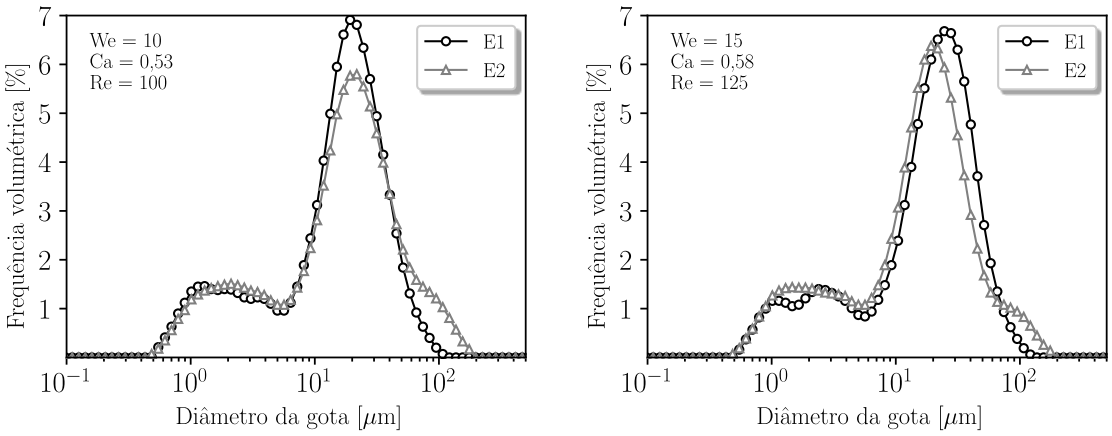


a) T30_W20 b) T33_W20

Figura 69 - DTG em emulsões A/O com 20% H_2O escoando em trecho vertical ascendente com redução dos diâmetros de gotas

Em relação aos experimentos com $\Delta D > 0$, apenas o teste T32_W20 apresentou aumento em todos os diâmetros característicos, indicando predominância da coalescência de gotas. Nesse experimento, houve aumento substancial no $D_{[3,2]}$ e no D_{v50}, na ordem de 4% e 6%, respectivamente, além de aumento expressivo nos demais diâmetros característicos, com aumento de 28% no $D_{[4,3]}$ e 66% no D_{v95}. No T29_W20, o único aumento significativo no ΔD foi de 29% no D_{v95}. Esse comportamento indica que o aumento no tamanho das gotas ocorreu principalmente na cauda da DTG, e não de maneira uniforme em toda a DTG.

A Figura 70 apresenta a DTG nos testes T32_W20 e T29_W20, nos quais foram observados valores positivos do ΔD. No T32_W20, as DTGs em E1 e E2 apresentam sobreposição na região de diâmetros de gota menores que 10 µm. Entretanto, na cauda da distribuição, para D_g > 50 µm, há aumento da frequência volumétrica de gotas em E2, evidenciando crescimento preferencial de gotas grandes ao longo do trecho vertical ascendente. Comportamento semelhante foi observado no T29_W20, em que na região de gotas pequenos (D_g < 6 µm) as DTGs em E1 e E2 são semelhantes, na região de D_g entre 6 µm e 60 µm a DTG em E2 apresenta gotas de diâmetros menores do que em E1, e na cauda da distribuição, para D_g > 60 µm, há aumento no tamanho das gotas em E2. Esse comportamento evidencia que os mecanismos de quebra e coalescência ocorrem de forma não homogênea para emulsão A/O com 20% H_2O em escoamento vertical ascendente, com existência simultânea de quebra de gotas moderadas e coalescência de gotas grande.

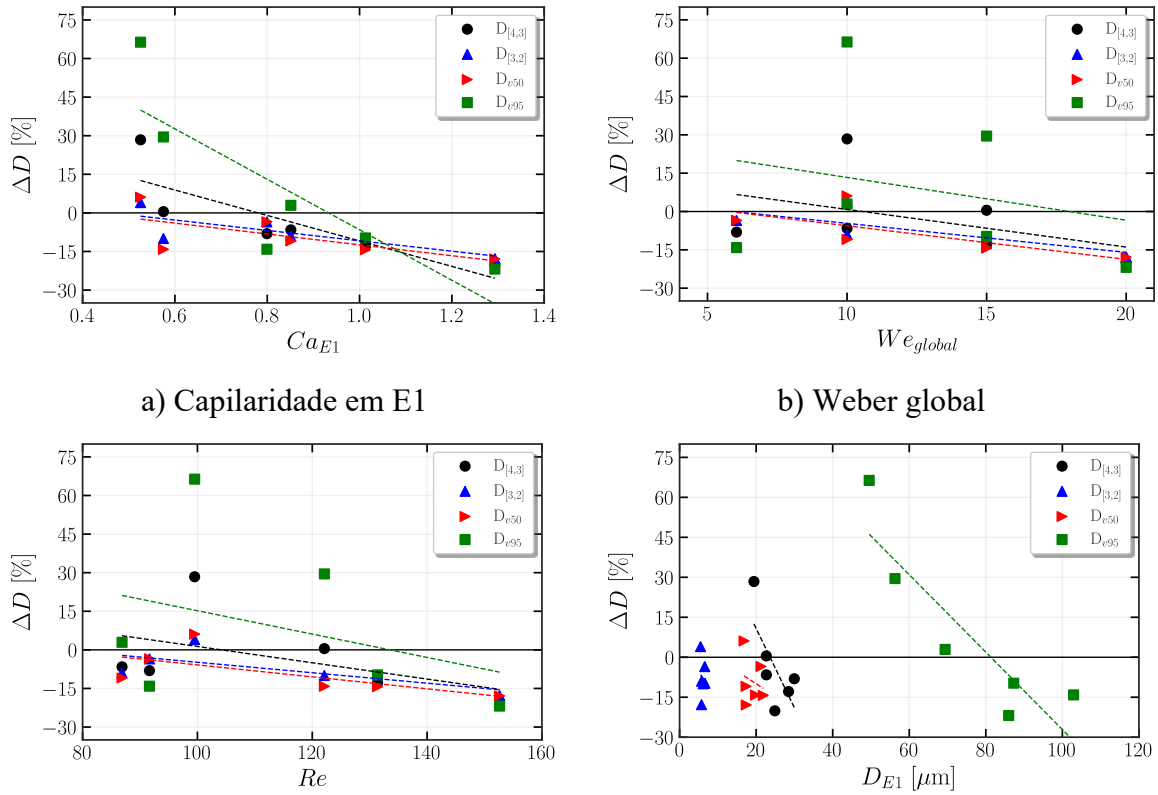


a) T32_W20 b) T29_W30

Figura 70 - DTG em emulsões A/O com 20% H_2O escoando em tubulação vertical ascendente em testes com coalescência de gotas

A Figura 71 apresenta a influência de Ca, Re¸ We_{global} e do diâmetro de gotas no início do trecho vertical ascendente na variação dos diâmetros característicos da emulsão A/O com 20% H_2O. Novamente, os marcadores são pontos experimentais e as retas tracejadas são indicadores da tendência do conjunto de dados. De forma geral, os resultados indicam comportamento mais complexo do que observado para emulsões com menores frações volumétricas de água, com competição entre os mecanismos de quebra e coalescência de gotas.

O efeito do número de Capilaridade na variação relativa dos diâmetros característicos é apresentado na Figura 71(a), para Ca_{E1} entre 0,53 e 1,29. De forma geral, as linearizações indicam tendência de redução dos diâmetros característicos com aumento do Ca_{E1}. Para Ca_{E1} < 0,60, observa-se $\Delta D > 0$, especialmente para o D_{v95} e $D_{[4,3]}$, indicando aumento nos diâmetros das maiores gotas. Em contrapartida, $\Delta D < 0$ para $Ca_{E1} > 0{,}80$, indicando predominância da quebra de gotas. Esses resultados apontam que o Ca_{crit} para a emulsão A/O com 20% H_2O em escoamento vertical ascendente pode estar na faixa entre 0,60 e 0,80. A variação nos diâmetros característicos baseado no $D_{[3,2]}$ e D_{v50} apresentam menor dispersão, com ΔD entre -3,5% e -18%.



a) Capilaridade em E1

b) Weber global

c) Reynolds

d) Diâmetro no início do trecho

Figura 71 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 20% (v/v) H_2O escoando no trecho vertical ascendente em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho

O aumento da concentração de fase dispersa reduz a distância entre gotas, resultando no aumento da interação entre gotas e aumento na frequência de colisão entre gotas, o que favorece a agregação e coalescência de gotas. Quanto maior o tamanho de gotas, menor a pressão de Laplace, que se opõe à tensão externa atuante sobre a gota para manter a estabilidade do filme interfacial.

A Figura 71(b) relaciona o número de Weber global em que o experimento foi parametrizado com o ΔD, com We_{global} entre 6 e 20. Para D_{v50} e $D_{[3,2]}$, o aumento de We_{global} favorece a quebra de gotas. No entanto, o ΔD para o D_{v95} e $D_{[4,3]}$ apresenta alta variabilidade

de dados em $10 \leq We_{global} \leq 15$, não sendo possível traçar conclusões sobre a tendência do ΔD com o número de Weber global do experimento.

A relação entre o número de Reynolds e o ΔD é apresentada na Figura 71(c), com Re entre 80 e 160. O comportamento é semelhante ao observado para o We_{global}, com elevada dispersão em $95 \leq Re \leq 125$ para o ΔD calculado para os diâmetros D_{v95} e $D_{[4,3]}$. Para o D_{v50} e $D_{[3,2]}$, a variabilidade dos dados é menor, e os resultados indicam aumento da tendência de quebra de gotas com aumento de Re.

A Figura 71(d) apresenta a influência do diâmetro de gotas no início do trecho vertical ascendente com a variação dos diâmetros característicos. Pode-se observar relação entre do D_{E1} com ΔD, principalmente no D_{v95} e $D_{[4,3]}$, em que diâmetros iniciais pequenos resultam em coalescência de gotas. Para $D_{v95} < 60$ μm e $D_{[4,3]} < 23$ μm observa-se $\Delta D > 0$, ou seja, há coalescência de gotas moderadas ou grandes da distribuição. Acima destes valores, foi observado quebra de gotas, com $\Delta D < 0$. De forma geral, pode-se concluir que a quebra de gotas é favorecida para diâmetros de gotas moderados ou grandes, evidenciado por D_{v95} e $D_{[4,3]}$.

Os resultados para emulsões A/O com 20% H_2O em escoamento vertical ascendente reforçam que em regime laminar, a evolução da DTG não é governada apenas por grupos adimensionais como número de Reynolds, Weber e Capilaridade isoladamente, mas dependente fortemente do diâmetro das gotas no início do trecho de tubulação analisado. Entre os grupos adimensionais citados, o número de Capilaridade Ca_{E1} é o de maior influência na variação dos diâmetros característicos.

4.5.5 Síntese dos mecanismos de evolução da DTG em escoamento vertical ascendente

Os resultados obtidos para emulsões A/O escoando no trecho vertical ascendente evidenciam forte influência da fração volumétrica de H_2O sobre a evolução da DTG. Para emulsões com 5% (v/v) H_2O, há predominância da quebra de gotas. Em 10% (v/v) H_2O, a quebra de gotas permaneceu como mecanismo dominante, embora identificados testes com coalescência na região de maiores diâmetros da DTG. Para as emulsões com 15% e 20% (v/v) H_2O, verificou-se a predominância da quebra de gotas, mas com intensificação da coalescência, em função principalmente do número de Capilaridade e do diâmetro de gotas no início do trecho vertical.

Entre os números adimensionais avaliados, o número de Capilaridade foi o que melhor descreveu a evolução da DTG, representada pela variação relativa dos diâmetros característicos entre o início e o final do escoamento vertical ascendente. De forma geral, observou-se a contribuição do número de Capilaridade para a quebra de gotas, sendo que quanto maior o Ca_{E1} maior a quebra de gotas. Isso comprova que, mesmo em regime laminar, as tensões viscosas atuantes sobre as gotas promovem deformação e ruptura. O número de Weber também apresenta relação com a variação dos diâmetros característicos. Por sua vez, o número de Reynolds apresentou grande dispersão com ΔD. Esse resultado reforça que, em escoamentos laminares, os mecanismos da evolução da DTG são governados pelas tensões externas atuando sobre as gotas, principalmente de origem viscosa.

Outro resultado em destaque foi a forte influência do diâmetro de gotas no início do trecho vertical ascendente sobre a evolução da DTG. Os resultados demonstram que gotas inicialmente maiores são mais suscetíveis à ruptura, enquanto gotas menores tendem a

apresentar maior estabilidade, sendo mais resiliente aos mecanismos de quebra de gotas. Para as emulsões com 15% e 20% (v/v) H_2O, emulsões com gotas inicialmente menores em E1 apresentaram coalescência de gotas, conforme evidenciado por $\Delta D > 0$. Dessa forma, pode-se concluir que a DTG inicial das emulsões apresenta forte influência nos mecanismos de quebra e coalescência de gotas em escoamento vertical ascendente.

A Figura 72 sintetiza a variação relativa dos diâmetros característicos no trecho vertical ascendente em função do produto entre o número de Reynolds e o número de Weber (*Re.We*), que incorpora efeitos interfaciais, viscosos e inerciais do escoamento e sobre a população de gotas. O parâmetro *Re.We* foi introduzido por Rodriguez et al. (2025) como métrica para comparação de modelos de previsão de tamanho de gotas em escoamentos internos. O eixo das abscissas contabiliza efeitos inerciais e viscosos do escoamento através do número de Reynolds - *Re*, e o número de Weber - *We* inclui tensão inercial sobre as gotas e tensões interfaciais entre as fases oleosa e aquosa.

De forma geral, a Figura 72 aponta que *Re.We* captura parcialmente tendências da evolução da DTG, especialmente em emulsões com frações de fase dispersa entre 5% e 15% (v/v) H_2O. Deve-se destacar que as faixas de *Re.We* para as quatro (4) frações de fase dispersa avaliadas são distintas, o que impede o estabelecimento de conclusões sobre o comportamento da variação dos diâmetros característicos com tais grupos adimensionais.

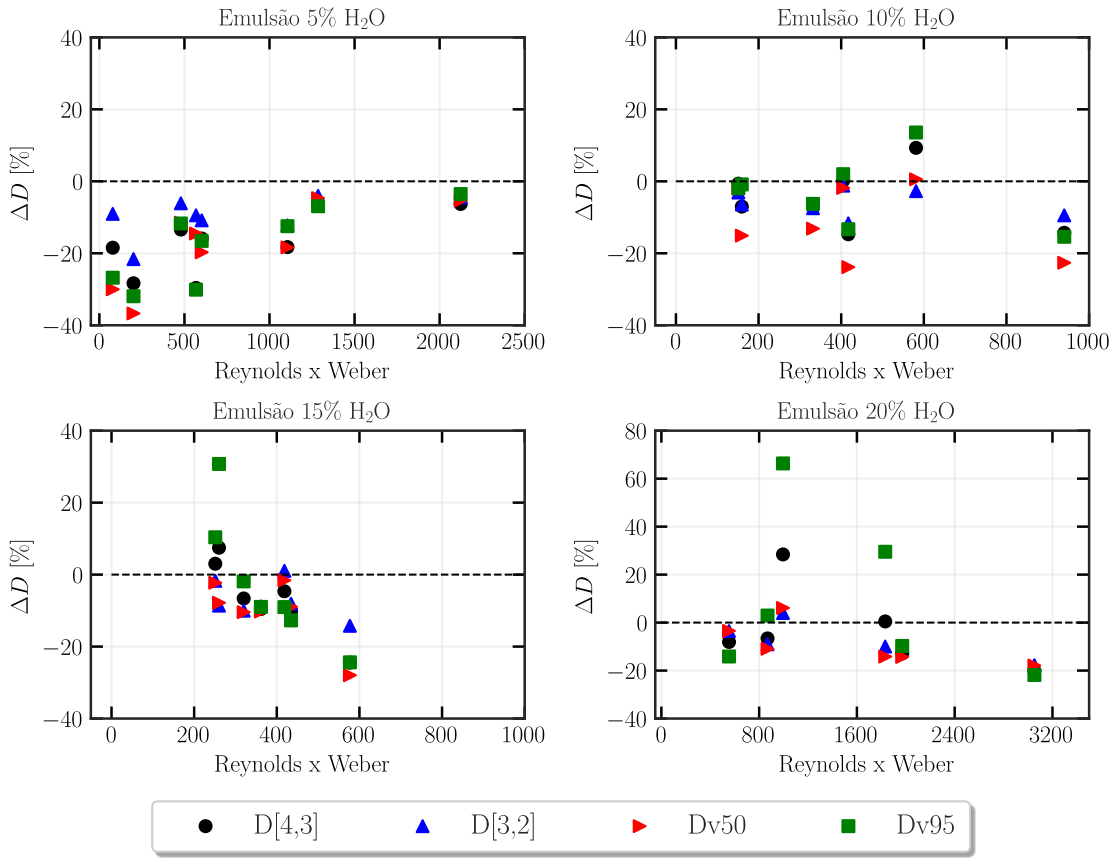


Figura 72 - Variação dos diâmetros característicos no trecho vertical ascendente com Weber e Reynolds

Para emulsões com 5% (v/v) H_2O, com produto *Re.We* de até 2200, observa-se redução da quebra de gotas, evidenciado pela redução da magnitude de ΔD, com o aumento do produto *Re.We*. Os maiores valores em módulo do ΔD ocorrem para *Re.We* < 700, com redução de até -36% nos diâmetros característicos em E2 quando comparado em E1. Em contrapartida, para *Re.We* > 1000, o ΔD tende a estabilizar entre -5% e -10%. Embora a quebra de gotas seja predominante para emulsão com 5% (v/v) H_2O, a intensidade da quebra diminui com aumento das tensões inerciais do escoamento e das gotas. Isso sugere que o escoamento a montante de E1 promove fragmentação prévia das gotas, produzindo gotas menores e mais estáveis, consequentemente com menos propensão à deformação e ruptura.

Para emulsões com 10% (v/v) H_2O, o comportamento do ΔD com *Re.We* torna-se mais disperso. Embora ocorra quebra de gotas na maior parte dos experimentos, observa-se coalescência localizada para *Re.We* ≈ *600*, evidenciado por $\Delta D > 0$ para $D_{[4,3]}$ e D_{v95}. Não há uma tendência clara de quebra o coalescência de gotas com o produto *Re.We*. O aumento da concentração de fase dispersa para 10% H_2O intensifica a complexidade da dinâmica das emulsões, devido ao aumento das interações entre gotas, permitindo que a coalescência atue como mecanismo concorrente à quebra de gotas, em função principalmente do tamanho das gotas no início do trecho vertical, conforme evidenciado na Figura 65.

Para as emulsões com 15% H_2O escoando no trecho vertical ascendente, torna-se mais evidente o efeito competitivo entre quebra e coalescência. Para *Re.We* < 250, a variação dos diâmetros característicos é positiva ($\Delta D > 0$) para de D_{v95} e $D_{[4,3]}$, indicando crescimento das maiores gotas da distribuição ao longo do trecho vertical ascendente. Entretanto, $\Delta D < 0$ para *Re.We* > 300, com aumento da magnitude do ΔD com aumento de *Re.We*, indicativo de quebra de gotas. Esse comportamento foi explicado na Figura 68 tendo relação com o número de Capilaridade e com o diâmetro de gotas no início do trecho vertical.

Para emulsões com 20% H_2O escoando no trecho vertical ascendente, o comportamento da variação dos diâmetros característicos é ainda mais complexo. Nessa concentração, a maior presença de gotas de fase dispersa aumenta a interação entre gotas, ou seja, há aumento da colisão entre gotas, o que pode resultar em adesão e subsequente coalescência. Tal como nas demais frações volumétricas, observa-se maior variabilidade do ΔD baseado no D_{v95} e $D_{[4,3]}$, especialmente entre 800 < *Re.We* < 2000. Tal como nas frações de fase dispersa inferiores, a variação relativa dos diâmetros característicos é relacionada ao número de Capilaridade e com o diâmetro de gotas no início do trecho vertical, conforme evidenciado na Figura 71.

Os resultados demonstram que o produto *Re.We* apresenta capacidade preditiva na variação dos diâmetros característicos apenas para a fração volumétrica mais baixa em teste, em 5% (v/v) H_2O. Para as demais frações de fase dispersa, em que os mecanismos de coalescência de gotas surgem como consequência à maior presença volumétrica de gotas e redução da distância entre gotas, o ΔD apresenta alta dispersão com o produto *Re.We*. Deve-se destacar que a faixa de *Re.We* é estreita, o que inviabiliza traçar conclusões generalistas sobre a evolução da DTG.

Os resultados apresentados demonstram que a evolução da distribuição do tamanho de gotas de emulsões A/O em escoamento vertical ascendente sob regime laminar é governada principalmente pelo número de Capilaridade, que relaciona tensões viscosas sobre as gotas e tensões interfaciais, e da estrutura inicial da emulsão, representada pelo diâmetro característico de gotas no início do trecho de tubulação em análise.

4.6 QUEBRA E COALESCÊNCIA DE EMULSÕES EM ESCOAMENTO HORIZONTAL

A evolução da distribuição do tamanho de gotas também foi analisada no trecho horizontal, que contempla os dispositivos amostradores de emulsão EXT-3 e EXT-4, identificados doravante como E3 e E4, respectivamente. O extrator E3 está posicionado no início do trecho horizontal, enquanto o E4 está instalado no final do trecho horizontal. O posicionamento dos dispositivos amostradores de emulsão é detalhada na Figura 27 e Figura 28. O trecho horizontal apresenta razão de aspecto L_H/D = 435. Esse comprimento garante o desenvolvimento do escoamento no trecho horizontal.

O escoamento horizontal impõe à emulsão efeitos viscosos, inerciais e gradientes de velocidade, que podem resultar na deformação, quebra ou coalescência de gotas. O levantamento do estado da arte da evolução da DTG de emulsões em escoamento horizontal aponta ocorrência da coalescência, mesmo em regimes de escoamento turbulento. Trallero, Sarica e Brill (1997) detectaram coalescência mesmo em altas velocidades de mistura. Walsh (2016) explicam que a coalescência é predominante em escoamentos horizontais em virtude da baixa dissipação de energia. Voulgaropoulos e Angeli (2017) detectaram coalescência de gotas em emulsões com L/D = 400, ou seja, com razão de aspecto semelhante à estudada neste trabalho. Schümann, Simonsen e Brekken (2023) também detectaram aumento do tamanho de gotas em emulsões sob escoamento horizontal.

O estudo da evolução da DTG é particularmente relevante para a indústria de produção de petróleo, pois na produção *offshore* as denominadas *flowlines* são tubulações posicionadas no leito marinho, que normalmente permanecem na horizontal ou com pequenas inclinações, na ordem de ± 5%, para acompanhar o relevo do leito marinho. Uma das funções das *flowlines* é conectar as tubulações de perfuração do poço até o *riser*.

A Figura 73 apresenta os resultados da DTG para emulsões A/O em escoamento horizontal no circuito de escoamento de emulsões, sob condição do número de Weber global do teste com We_{global} = 6. As curvas em preto são a DTG em E3, ou seja, no início do trecho horizontal e as curvas em cinza correspondem ao resultado em E4, no final do trecho horizontal. A frequência volumétrica é apresentada como a linha contínua com símbolos e a frequência acumulada como linha tracejada. A análise conjunta de gráficos da frequência volumétrica, frequência acumulada e diâmetros médios característicos possibilitam análise da evolução da DTG em escoamento horizontal.

Tal como nas emulsões no trecho vertical ascendente, os resultados contemplam emulsões com frações volumétricas de água de 5% (Re = 212, Ca_{E3} = 0,22), 10% (Re = 155, Ca_{E3} = 0,53), 15% (Re = 95, Ca_{E3} = 0,72) e 20% (Re = 92, Ca_{E3} = 0,73). A parametrização do We_{global} = 6 não implica em igualdade dos demais números adimensionais, Ca_{E3} e Re, uma vez que há alterações das propriedades termofísicas das emulsões para cada fração volumétrica, além dos diâmetro médios característicos de gotas.

Uma vez que as emulsões escoam em regime laminar, no trecho horizontal com comprimento suficiente para desenvolvimento do perfil de velocidades, a deformação das gotas deve ser governada por cisalhamento simples, com variação da velocidade na componente radial e uniformidade do campo de escoamento na direção axial. Entretanto, deve-se considerar que o processo de medição da DTG é *offline* e requer amostragem de emulsão da tubulação, o que inevitavelmente perturba as linhas de corrente do escoamento que, para escoamento laminar desenvolvido, devem ser paralelas. De acordo com as curvas de Ca_{crit} obtidas por Grace (1982),

para razão de viscosidade $p = 10^{-2}$, os valores de Ca_{crit} são 2,5 para cisalhamento simples e 0,4 para escoamento extensional.

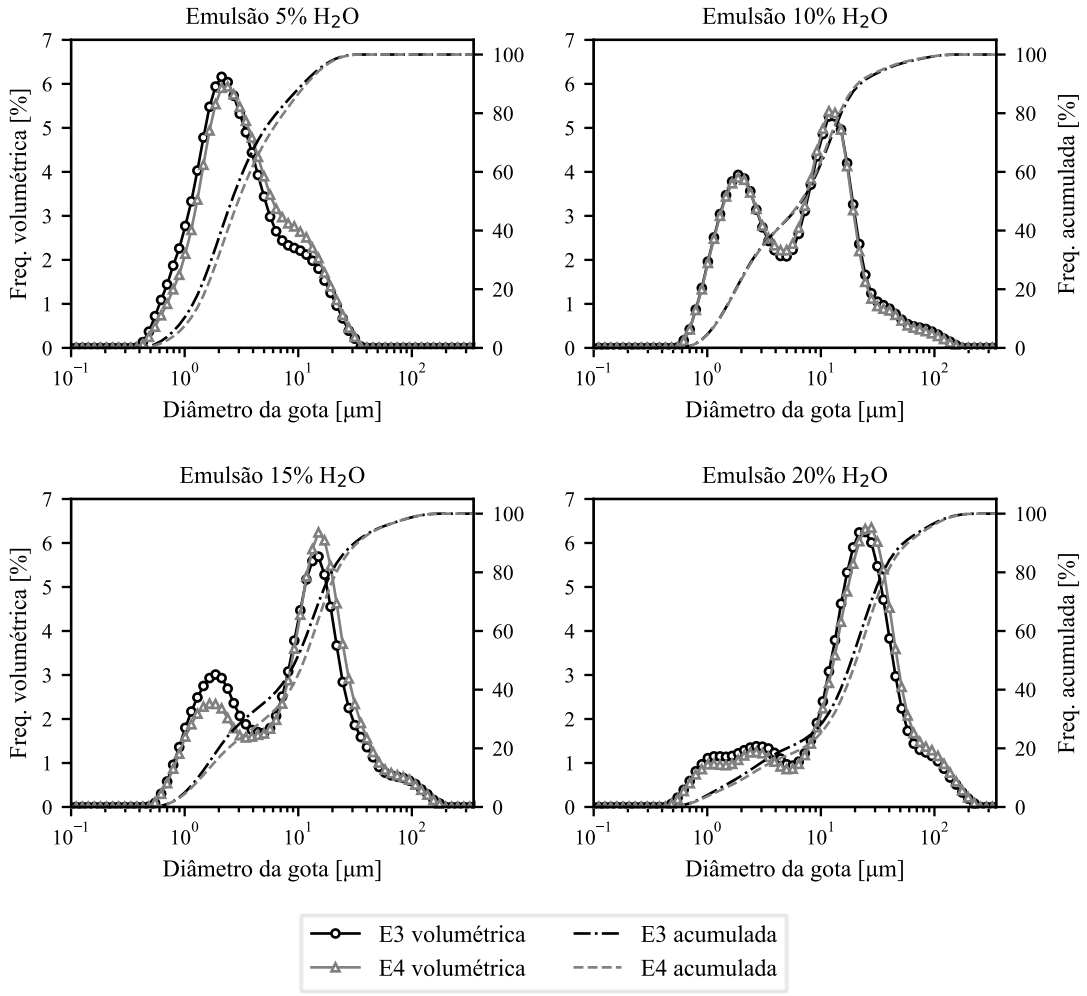


Figura 73 - DTG de emulsões em sistema de tubulação horizontal com variação da fração volumétrica de água ($We_{global} = 6$)

Para a emulsão com 5% de H_2O, as DTGs apresentam comportamento unimodal tanto em E3 quanto em E4. A DTG em E4 desloca-se para à direita em relação a E3, indicando aumento no tamanho das gotas no escoamento horizontal, ou seja, predominância da coalescência de gotas. Isso é confirmado na análise dos diâmetros característicos, que são superiores em E4. O D_{v50} aumenta de 2,7 µm para 3,1 µm. O D_{v95} aumenta de 16,0 µm em E3 para 16,8 µm em E4. Nota-se predominância de gotas pequenas.

Na emulsão com 10% H_2O, as DTGs apresentam comportamento bimodal, com um primeiro pico centrado em 2 µm e o segundo pico próximo a 10 µm. O segundo pico apresenta maior frequência volumétrica que o primeiro pico, evidenciando o aumento de gotas moderadas com o incremento da fração volumétrica de água na emulsão, característica típica de emulsões polidispersas e metaestáveis. Por análise visual das curvas de frequência volumétrica e frequência acumulada, as DTGs em E3 e E4 são praticamente sobrepostas, com pequenas

mudanças nos diâmetros característicos. O D_{v50} passa de 7,2 µm em E3 para 7,1 µm em E4, e o D_{v95} reduz de 39,4 µm em E3 para 37,6 µm em E4. Apesar do aumento dos diâmetros característico ser uma das características da quebra de gotas, não se pode afirmar a ocorrência da quebra de gotas para emulsão A/O com 10% H_2O em escoamento horizontal, pois os aumentos nos diâmetros característicos foram praticamente irrisórios, além da sobreposição dos gráficos de DTG no início e ao final do trecho horizontal.

As DTGs também são bimodais para a emulsão com 15% de H_2O, com o primeiro pico em 2 µm e o segundo pico em 16 µm. A DTG em E3 está notoriamente mais à esquerda que em E4, indicando coalescência de gotas, o que é evidenciado tanto pela análise da frequência volumétrica quanto pela frequência acumulada. A coalescência é salientada na análise dos diâmetros característicos: o D_{v50} aumenta de 10,1 µm em E3 para 12,0 µm em E4, enquanto o D_{v95} aumenta de 53,9 µm em E3 para 55,0 µm em E4.

Para a emulsão com 20% H_2O, a DTG também é bimodal, semelhante ao observado no trecho vertical ascendente para a mesma fração volumétrica de fase dispersa, com pico da distribuição centrado em 20 µm. A DTG em E4 está deslocada para à direita em relação a E3, ou seja, há maior presença de gotas moderadas ou grandes, indicativo de coalescência de gotas. O D_{v50} aumenta de 19,7 µm em E3 para 21,8 µm em E4, enquanto o D_{v95} aumenta de 87,9 µm em E3 para 93,5 µm em E4.

Os resultados apresentados indicam que as DTGs obtidas nos extratores E3 e E4 apresentam estrutura semelhante, o que reforça a validade e reprodutibilidade da metodologia de amostragem de emulsão adotada. Para todas as frações volumétricas de fase dispersa analisadas, as DTGs no extrator E4 estiveram à direita em relação a E3, ou seja, deslocada para região de maiores diâmetros, indicando predominância dos mecanismos de coalescência no trecho horizontal em experimentos com $We_{global} = 6$.

A análise dos diâmetros volumétricos D_{v50} e D_{v95} reforça a ocorrência da coalescência de gotas, evidenciado pelo aumento dos diâmetros volumétricos no trecho horizontal. Esse comportamento foi mais pronunciado para emulsões com fração volumétrica de água de 15% e 20%, pois a maior presença volumétrica de gotas favorece a interação entre gotas e reduz a distância entre elas, o que favorece a colisão, agregação e coalescência.

O escoamento horizontal em tubulações lisas apresenta baixa taxa de dissipação de energia, seja em regime laminar ou turbulento, o que favorece os mecanismos de coalescência de gotas. Quanto maior a fração volumétrica de fase dispersa, maiores são as interações e colisões entre gotas, e consequentemente maior a probabilidade de coalescência. Além disso, o maior tempo de residência das emulsões no trecho horizontal favorece a drenagem do filme interfacial entre gotas após colisões, aumentando a probabilidade de coalescência. Assim, os resultados obtidos para emulsões A/O com frações de água entre 5% e 20% em escoamento horizontal apresentam coerência com o reportado na literatura para emulsões e dispersões líquido-líquido.

As seções a seguir analisam a evolução da distribuição de tamanho de gotas em condições de escoamento distintas, a partir da variação do Re, We_{global} e Ca_{E3}. As diferenças relativas entre os diâmetros característicos serão calculadas conforme a Eq. (30).

4.6.1 Emulsão com 5% de água

A Tabela 21 apresenta os diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} nos extratores de emulsão E3 e E4 em função do número de Capilaridade no extrator E3 para concentração de 5% (v/v) H_2O, além das respectivas variações do ΔD [%] relativo ao extrator E3. Valores positivo do ΔD indica predominância da coalescência de gotas e valores negativos indicam predominância da quebra de gotas. Em escoamento horizontal, os resultados indicam aumento de todos os diâmetros característicos, o que é compatível com a coalescência de gotas.

Tabela 21 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E3 e E4 (trecho horizontal) para concentração de 5% (v/v) H_2O

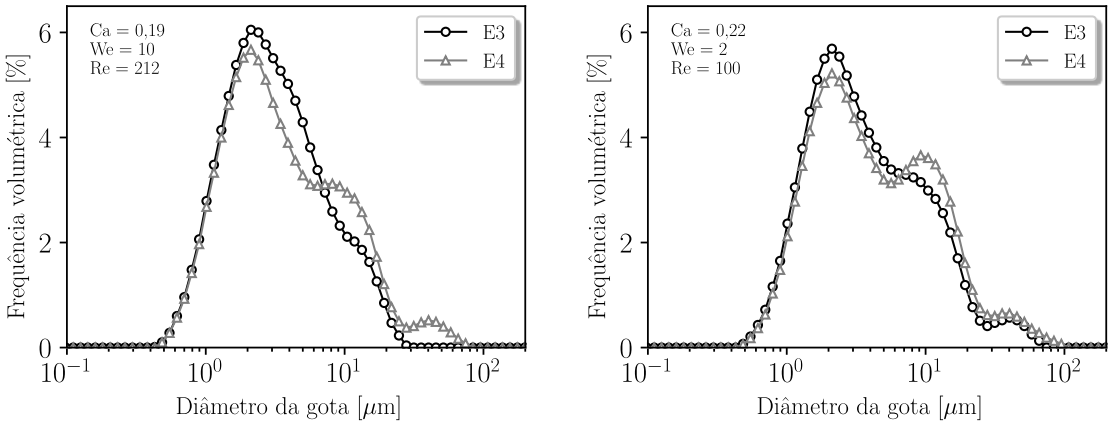
Teste Id	Ca_{E3}	$D_{[4,3]}$ [µm]			$D_{[3,2]}$ [µm]			D_{v50} [µm]			D_{v95} [µm]		
		E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]
T2_W05	0,22	4,7	5,2	10,3	2,2	2,5	13,0	2,7	3,1	14,5	16,0	16,8	4,9
T3_W05	0,18	3,7	3,9	5,5	2,1	2,3	7,5	2,6	2,8	6,6	10,7	11,1	3,4
T4_W05	0,19	4,4	6,2	41,6	2,3	2,5	6,5	2,9	3,1	8,2	13,7	19,4	42,1
T5_W05	0,22	6,3	7,5	20,1	2,6	2,8	8,1	3,3	3,7	14,6	19,6	24,6	25,9
T6_W05	0,19	8,2	8,5	4,6	3,0	3,1	4,3	4,2	4,6	7,9	26,1	27,5	5,2
T7_W05	0,25	6,2	6,7	7,7	2,5	2,7	5,3	3,1	3,4	7,5	18,9	20,2	7,0
T8_W05	0,32	5,9	6,3	6,1	2,6	2,6	-	3,2	3,2	-	18,0	18,9	4,9

O teste com maior aumento no tamanho de gotas foi o T4_W05 (We = 10 e Ca = 0,19), com variação dos diâmetros característicos entre 42,1% no D_{v95} e 6,5% no $D_{[3,2]}$. O segundo teste com mais coalescência de gotas foi o T5_W15 (We = 2 e Ca = 0,22), com aumento nos diâmetros característicos entre 8,1% no $D_{[3,2]}$ e 25,9% no D_{v95}. Por sua vez, o teste com menor variação no tamanho de gotas foi o T6_W05 (We = 1 e Ca = 0,19), apresentou aumento no tamanho de gotas entre 4,3% no e $D_{[3,2]}$ e 7,9% no D_{v50}.

A Figura 74 apresenta a DTG nos testes com maior aumento no tamanho de gotas. No T4_W05, nota-se que em E4 há redução da frequência volumétrica de gotas com diâmetros entre 2 µm e 7 µm e aumento na frequência volumétrica de gotas com diâmetro acima de 7 µm. Há um aumento significativo de gotas na cauda da distribuição, em D_g > 30 µm, associada aos maiores diâmetros na distribuição como o D_{v95}. Esse comportamento é consistente com coalescência de gotas em escoamento horizontal. Comportamento é semelhante ocorreu no teste T5_W05, em que gotas com D_g < 2 µm permanecem estáveis, para diâmetros de gota entre 2 µm e 7 µm há redução da frequência volumétrica das gotas em E4, e aumento de gotas com D_g > 7 µm em E4. Os gráficos evidenciam que a coalescência não ocorre de maneira uniforme em toda a população de gotas, mas preferencialmente em diâmetros de gota moderados, acima de 7 µm, em que a pressão de Laplace ΔP_L das gotas não é suficiente para isentá-las da quebra e da coalescência.

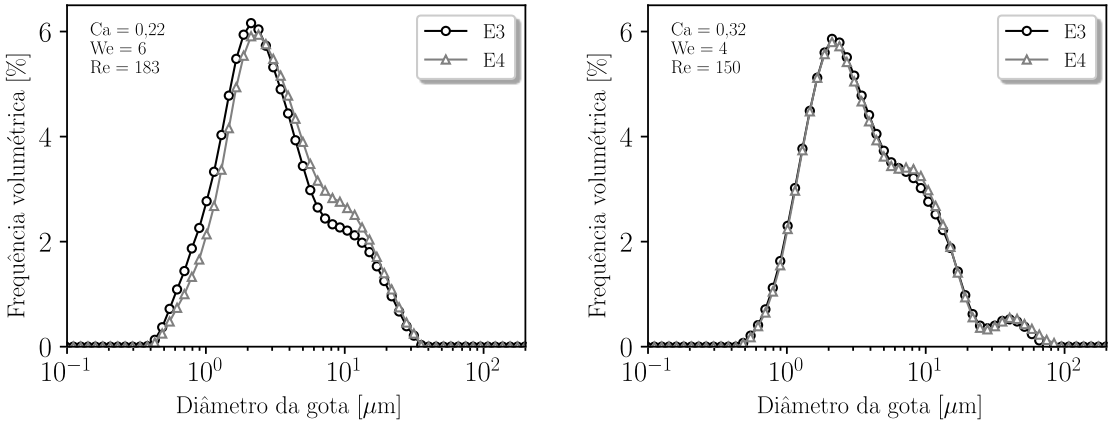
Nos demais experimentos, que apresentaram coalescência moderada, há menor aumento de gotas nas regiões dos maiores diâmetros de gotas, especialmente na cauda da DTG. Nesses casos, a coalescência de gotas pode ser associada diretamente com a DTG em E4 ser deslocada

para à direita em relação a E3, com defasagem entre as distribuições mais perceptível na região dos maiores diâmetros de gotas, conforme mostrado na Figura 75.



a) T4_W05 b) T5_W05

Figura 74 - DTG em emulsões A/O com 5% H_2O escoando em trecho horizontal com maior aumento no tamanho de gotas



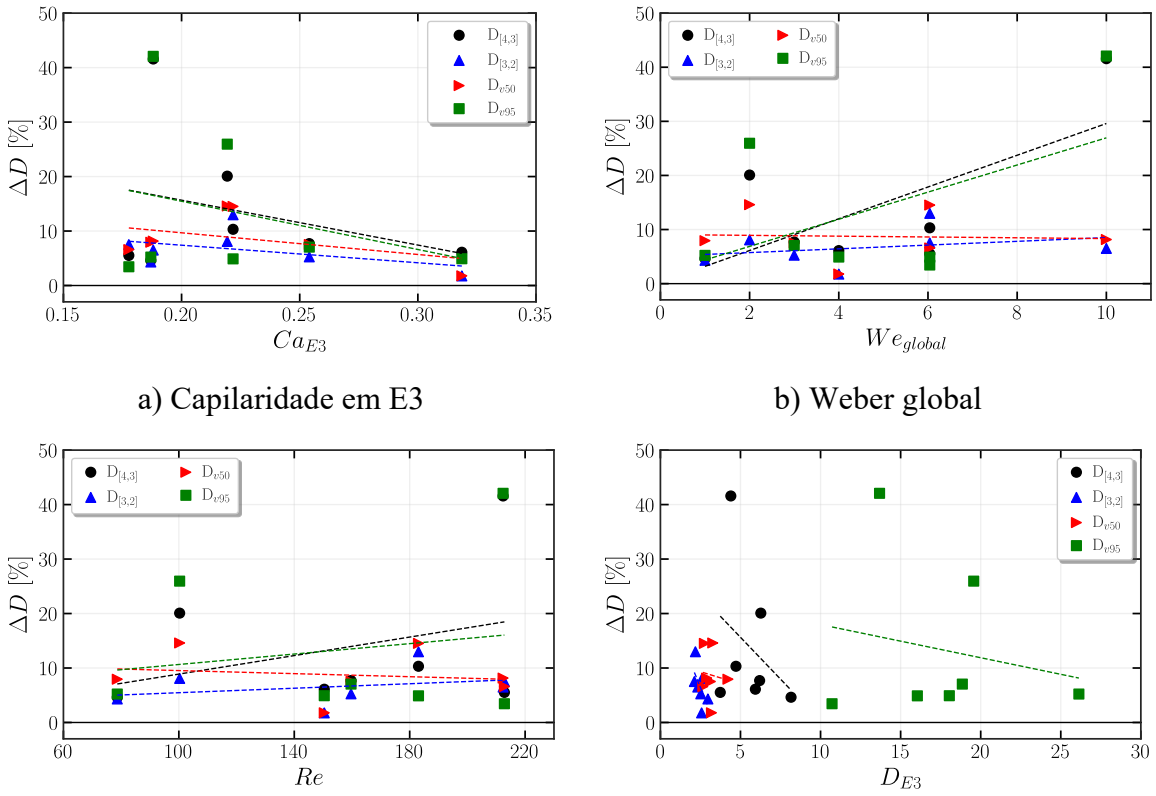
a) T2_W05 b) T8_W05

Figura 75 - DTG em emulsões A/O com 5% H_2O escoando em trecho horizontal com aumento moderado do tamanho de gotas

A Figura 76 sintetiza a influência de números adimensionais e do tamanho inicial das gotas no início do trecho horizontal na evolução dos diâmetros característicos da emulsão A/O com 5% (v/v) H_2O em escoamento horizontal, entre os extratores de emulsão E3 e E4. Os marcadores são medições experimentais, e as retas tracejadas são linearizações dos conjuntos de dados para cada diâmetro característico.

Diferente do observado para escoamento vertical ascendente, as emulsões com 5% (v/v) H_2O apresentaram variação positiva dos tamanhos de gotas no trecho horizontal, ou seja, $\Delta D > 0$, indicando aumento no tamanho das gotas. Esse comportamento foi consistente para todos os

diâmetros característicos, principalmente no $D_{[4,3]}$ e D_{v95}, o que indica que os mecanismos de coalescência atuam predominantemente nas gotas moderadas e grandes.



a) Capilaridade em E3 b) Weber global

c) Reynolds d) Diâmetro no início do trecho

Figura 76 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 5 % (v/v) H_2O escoando em trecho horizontal em função dos números de Capilaridade, Weber, Reynolds e diâmetro no início do trecho

A Figura 76(a) relaciona o número de Capilaridade com a variação dos diâmetros característicos entre os extratores E3 e E4, compreendendo a faixa de Ca_{E3} entre 0,18 e 0,32. Apresar da tendência geral dos dados apontar para a redução da coalescência de gotas com aumento de Ca_{E3}, ou seja, os dados apresentam grande variabilidade dos diâmetros característicos, especialmente no D_{v95} e $D_{[4,3]}$, que representam as gotas moderadas ou grandes na DTG. Esse resultado possui coerência física com os mecanismos de quebra e coalescência de gotas em escoamentos em tubulações, pois o aumento do número de Capilaridade implica no aumento das tensões viscosas atuando sobre as gotas, o que dificulta a predominância da coalescência. Além disso, há desenvolvimento do escoamento no trecho horizontal, logo o cisalhamento simples é predominante. Logo, considerando $Ca_{crit} = 2{,}5$, o $Ca_{E3} < Ca_{crit}$, ou seja, os mecanismos de quebra de gotas não são efetivos no escoamento horizontal, especialmente para a emulsão com 5% A/O que apresenta gotas majoritariamente pequenas. O $D_{[3,2]}$ e D_{v50} apresentam a menor dispersão e menor sensibilidade ao número de Capilaridade, o que reforça que as menores gotas permanecem mais estáveis e com maior resiliência quanto a quebra e coalescência de gotas.

A Figura 76(b) apresenta a influência do número de Weber global com a variação dos diâmetros característicos, com We_{global} entre 1 e 10. Não há uma relação clara entre ΔD e We_{global}. Para o $D_{[3,2]}$ e D_{v50}, as variações dos diâmetros característicos são entre 4% e 15%. Por outro lado, há grande variações do ΔD para $We_{global} = 2$ e $We_{global} = 10$. Os resultados indicam que o número de Weber global não representa tão bem a evolução da DTG no trecho horizontal como o número de Capilaridade.

Os resultados da relação entre o número de Reynolds e a variação dos diâmetros característicos são apresentadas na Figura 76(c), com *Re* entre 80 e 220. Os resultados são semelhantes ao observado para o We_{global}, em que a dispersão dos dados não permite estabelecer uma relação entre a evolução da DTG no trecho horizontal com o número de Reynolds.

O efeito dos diâmetros de gota no início do trecho horizontal na variação dos diâmetros característico é apresentado na Figura 76(d). Os dados também apresentam grande variabilidade, não sendo possível associar o aumento no tamanho de gotas com o diâmetro inicial de gotas no início do trecho horizontal.

Os resultados mostram que a evolução da distribuição do tamanho de gotas no trecho horizontal para a emulsão com 5% A/O resulta no aumento do tamanho de gotas, o que é compatível com o mecanismo de coalescência. Entretanto, os resultados de ΔD são bastante dispersos com os números adimensionais *We*, Ca_{E3} e *Re*, além do diâmetro de gotas no início do trecho horizontal.

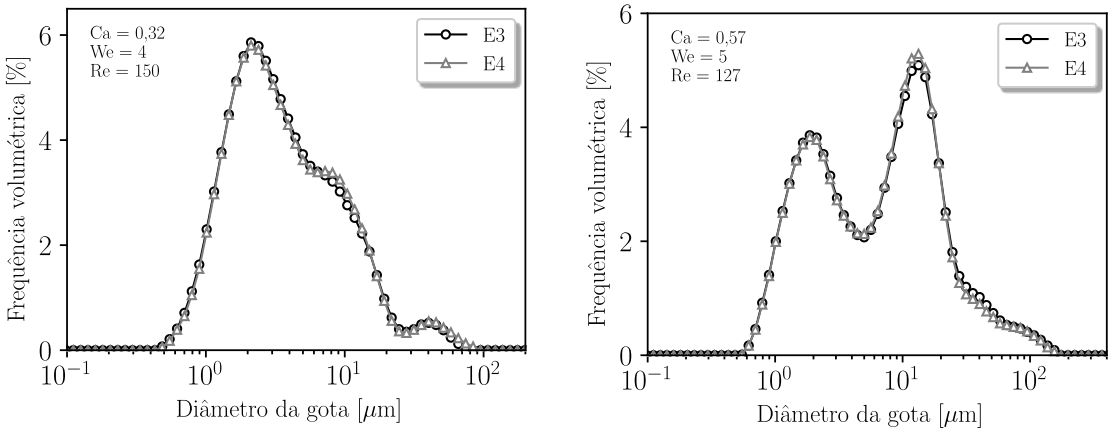
4.6.2 Emulsão com 10% de água

A Tabela 22 apresenta os diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} medidos nos extratores E3 e E4 para emulsões A/O com 10% (v/v) H_2O escoando no trecho horizontal em função do número de Capilaridade em E3. A variação dos diâmetros característicos ΔD [%] entre E3 e E4, relativo à E3, foi utilizada como indicador da evolução da DTG no trecho horizontal, em que $\Delta D > 0$ indica aumento no tamanho das gotas e $\Delta D < 0$ indica redução do tamanho das gotas. Em 6 dos 8 testes houve aumento no tamanho das gotas, consistente com a predominância dos mecanismos de coalescência no trecho horizontal.

Diferente do observado para emulsões A/O com 5% H_2O em escoamento horizontal, houve redução do tamanho das gotas em 2 dos 8 testes, indicados por $\Delta D < 0$. Nesses testes, houve diminuição no $D_{[4,3]}$ de até -3,1% e redução no D_{v95} de até -4,6%, enquanto os diâmetros $D_{[3,2]}$ e D_{v50} não apresentaram variação, ou seja, $\Delta D = 0$. Analisando os gráficos das DTGs em tais testes na Figura 77, as curvas em E3 e E4 apresentam forte semelhança, principalmente para $D_g < 10$ µm, o que explica $\Delta D = 0$ para $D_{[3,2]}$ e D_{v50}. Na faixa de 10 a 20 µm, nota-se um crescimento discreto da frequência volumétrica de gotas em E4, especialmente próximo ao segundo pico. Na cauda da distribuição, a DTG em E3 e E4 são praticamente coincidentes, e as variações do D_{v95} são pouco significativas. Assim, pode-se dizer que houve equilíbrio dos mecanismos de quebra e coalescência nos testes T17_W10 e T18_W10.

Tabela 22 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E3 e E4 (trecho horizontal) para concentração de 10% (v/v) H_2O

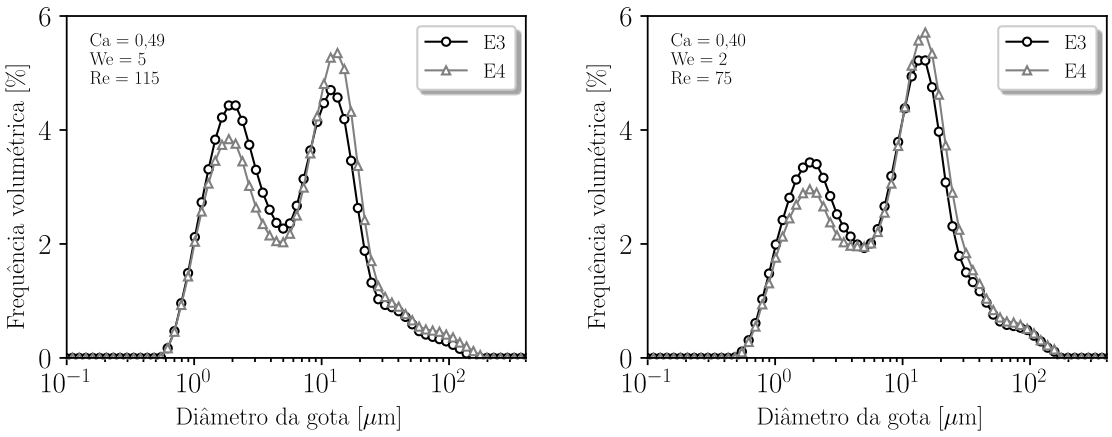
Teste Id	Ca_{E3}	$D_{[4,3]}$ [µm]			$D_{[3,2]}$ [µm]			D_{v50} [µm]			D_{v95} [µm]		
		E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]
T10_W10	0,47	13,6	15,2	12,0	3,5	3,9	12,1	7,5	9,7	28,9	48,2	52,3	8,5
T11_W10	0,41	13,1	13,7	4,3	3,5	3,6	4,7	7,6	8,5	12,1	46,3	47,0	1,4
T12_W10	0,40	13,3	14,7	10,0	3,6	3,9	10,6	8,3	9,9	18,8	45,6	48,3	6,1
T13_W10	0,49	10,2	12,2	19,5	3,2	3,5	9,0	5,4	7,4	36,2	35,2	41,8	18,8
T14_W10	0,55	12,1	12,7	4,5	3,4	3,6	5,2	7,0	8,1	15,9	43,1	42,9	-0,5
T16_W10	0,39	15,0	16,4	9,4	3,9	4,3	7,9	9,9	11,4	14,1	50,0	53,8	7,5
T17_W10	0,53	11,7	11,3	-3,1	3,5	3,5	-	7,2	7,1	-1,9	39,4	37,6	-4,6
T18_W10	0,57	12,3	12,0	-2,1	3,5	3,5	-	7,3	7,3	-	42,8	41,3	-3,6



a) T17_W10 b) T18_W10

Figura 77 - DTG em emulsões A/O com 10% H_2O escoando em trecho horizontal com redução pequena ou nula do tamanho de gotas

O teste com maior aumento no tamanho das gotas foi o T13_W10 (*We = 5* e *Ca* = 0,49), com aumento no Δ*D* entre 9% no $D_{[3,2]}$ e 36,2% no D_{v50}. O segundo teste com mais aumento no tamanho de gotas foi o T12_W10 (*We =2* e *Ca* = 0,40), com aumento no tamanho de gotas entre 6,1% no D_{v95} e 18,8% no D_{v50}. A Figura 78 apresenta a evolução da DTG entre os extratores E3 e E4 nos experimentos com aumento nos diâmetros característicos. Nota-se redução da frequência volumétrica do primeiro pico da DTG em 2 µm, aumento da frequência volumétrica do segundo pico em 20 µm e um pequeno deslocamento da cauda da DTG para à direita, região de maiores diâmetros.



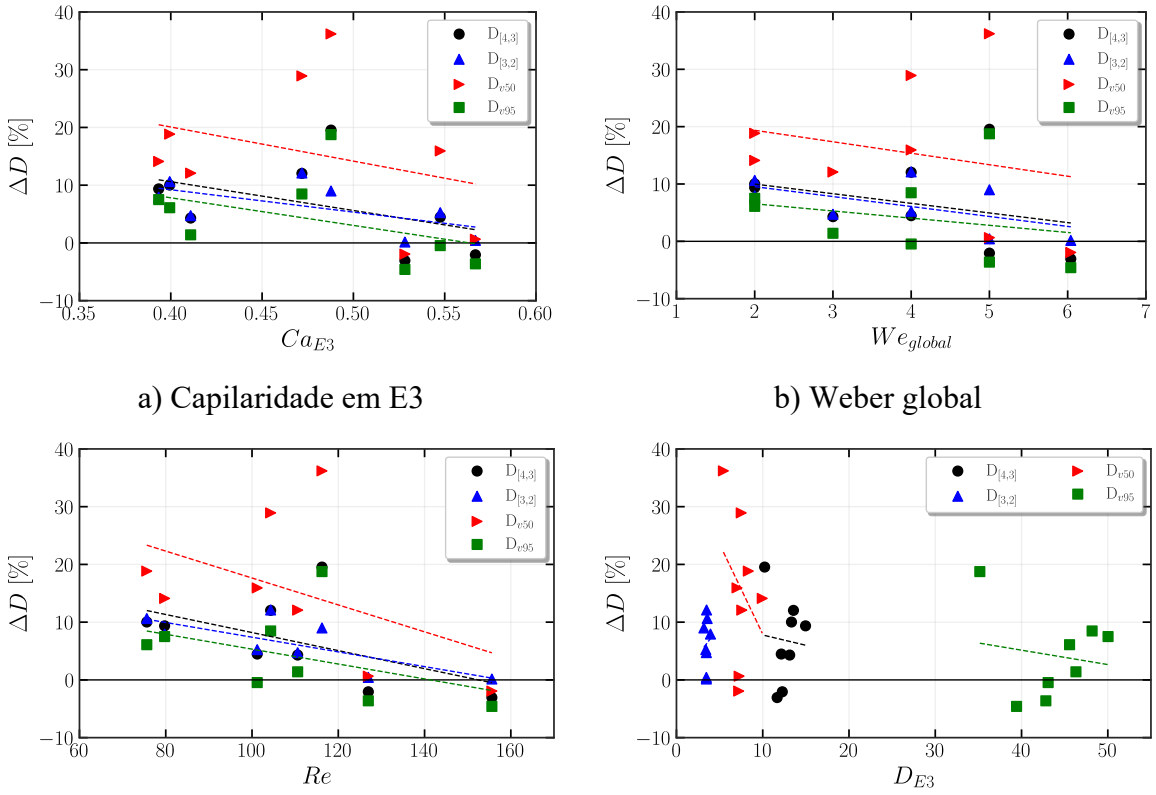
a) T13_W10 b) T12_W10

Figura 78 - DTG em emulsões A/O com 10% H_2O escoando em trecho horizontal com aumento do tamanho de gotas

A Figura 79 apresenta a influência de parâmetros adimensionais e do tamanho inicial das gotas na evolução dos diâmetros característicos da emulsão A/O com 10% (v/v) H_2O em escoamento horizontal. De forma geral, observa-se predominância de valores positivos do ΔD, indicando aumento do tamanho das gotas no trecho entre E3 e E4.

A Figura 79(a) relaciona a variação dos diâmetros característicos com número de Capilaridade em E3, na faixa de Ca_{E3} entre 0,39 e 0,57. Os resultados indicam tendência de redução do ΔD com aumento do número de Capilaridade, evidenciando que o crescimento das gotas se torna menos pronunciado à medida que as tensões viscosas atuando sobre as gotas aumentam. Observa-se $\Delta D < 0$ para $Ca_{E3} > 0{,}50$, especialmente no D_{v95} e $D_{[4,3]}$, apontando que os mecanismos de quebram de gotas passam a competir com a coalescência de gotas. O diâmetro característico com maior dispersão no ΔD com Ca_{E3} foi o D_{v50}. Em contrapartida, o $D_{[3,2]}$ apresentou as menores variações, reforçando a estabilidade das gotas pequenas perante os processos de quebra e coalescência.

A relação entre o número de Weber global e a variação dos diâmetros característico é apresentada na Figura 79(b), com We_{global} entre 2 e 6. Semelhante ao observado para as emulsões com 5% (v/v) H_2O escoando no trecho horizontal, há tendência de redução do ΔD com aumento do número de Weber, em que houve coalescência de gotas para $Ca_{E3} < 5$. A variação dos diâmetros característicos mensurada peara D_{v50}, D_{v95} e $D_{[4,3]}$ apresentam alta variabilidade na faixa de $We_{global} = 4$ e $We_{global} = 5$.



a) Capilaridade em E3

b) Weber global

c) Reynolds

d) Diâmetro no início do trecho

Figura 79 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 10% (v/v) H_2O escoando em trecho horizontal em função dos números de Capilaridade, Weber, Reynolds e diâmetro no início do trecho

A Figura 79(c) ilustra o efeito do número de Reynolds sobre a variação dos diâmetros característicos, compreendendo valores de *Re* entre 75 e 155. Os resultados mostram que há correlação negativa entre ΔD e *Re*, ou seja, a magnitude da variação dos diâmetros característicos tende a reduzir com aumento do número de Reynolds. Destaca-se que $\Delta D < 0$ para $Re > 120$, tipicamente associado aos mecanismos de quebra de gotas, especialmente no D_{v95} e $D_{[4,3]}$. Semelhante às observações anteriores, a variação dos diâmetros característicos baseada no D_{v50} é a que apresenta maior dispersão de dados.

A Figura 79(d) relaciona o diâmetro no início do trecho horizontal com a variação relativa dos diâmetros característicos. Para os diâmetros $D_{[3,2]}$, $D_{[4,3]}$ e D_{v50}, não é possível associar a variação do tamanho das gotas com o diâmetro de gotas inicial no trecho horizontal. Em contrapartida, em 7 dos 8 experimentos observa-se aumento no ΔD baseado no D_{v95} com aumento do diâmetro inicial das gotas. Esse resultado demonstra que o aumento as gotas tendem a apresentar maior crescimento na cauda da distribuição e confirma a validade da pressão de Laplace no escoamento interno de emulsões: como a pressão interna da gota é inversamente proporcional ao seu raio, gotas maiores apresentam menor resistência à deformação, coalescência e quebra.

Os resultados para emulsão A/O com 10% (v/v) H_2O escoando no trecho horizontal reforça que a evolução da DTG é predominantemente caracterizada pelo aumento nos diâmetros das gotas, compatível com os mecanismos de coalescência. Apesar da dispersão do ΔD, a

variação dos diâmetros característicos apresenta relação com o número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e com o diâmetro inicial das maiores gotas da distribuição, representadas como D_{v95}.

4.6.3 Emulsão com 15% de água

A Tabela 23 apresenta a evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} no trecho horizontal para emulsões com 15% (v/v) H_2O em função do número de Capilaridade. O parâmetro ΔD [%] é um indicador da variação do tamanho de gotas entre E3 e E4 relativa a E3, em que $\Delta D < 0$ indica redução no tamanho das gotas e $\Delta D > 0$ sinaliza o aumento no tamanho das gotas. Em 3 dos 8 testes, a variação de todos os diâmetros característicos foi positiva, ou seja, a coalescência de gotas foi evidenciada por $\Delta D > 0$. Em 3 testes, houve aumento de 3 diâmetros característicos, exceto o D_{v95}. Em 2 testes, a variação de todos os diâmetros característicos foi negativa, ou seja, $\Delta D < 0$, compatível com quebra de gotas. Esse comportamento evidencia que os mecanismos de quebra e coalescência que regem a evolução da distribuição do tamanho de gotas tornam-se mais complexos com aumento da fração volumétrica de fase dispersa.

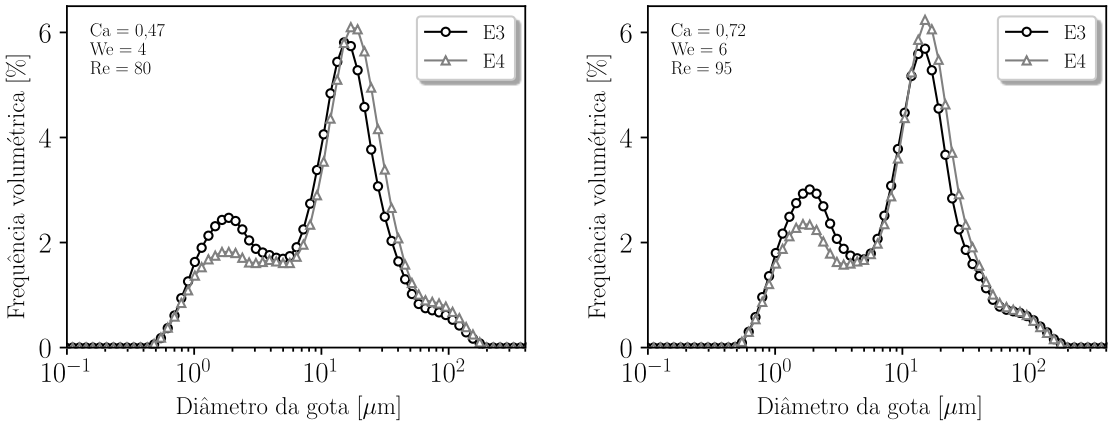
Tabela 23 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E3 e E4 (trecho horizontal) para concentração de 15% (v/v) H_2O

Teste Id	Ca_{E3}	$D_{[4,3]}$ [µm]			$D_{[3,2]}$ [µm]			D_{v50} [µm]			D_{v95} [µm]		
		E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]
T19_W15	0,65	22,8	22,6	-0,7	5,1	5,3	4,2	14,9	15,2	2,6	77,1	74,6	-3,3
T20_W15	0,61	18,6	19,0	2,3	4,4	4,7	5,3	12,6	13,4	6,9	62,3	62,0	-0,5
T21_W15	0,72	15,5	16,9	9,0	3,9	4,4	13,2	10,1	12,0	17,9	53,9	55,0	2,1
T22_W15	0,59	16,7	17,5	4,7	4,1	4,4	6,8	11,5	12,4	7,3	55,8	58,8	5,5
T23_W15	0,52	17,6	18,0	2,0	4,4	4,8	8,2	12,4	13,4	7,9	58,7	55,6	-5,2
T24_W15	0,50	21,1	19,4	-8,0	5,1	4,7	-7,4	15,6	14,0	-10,4	67,1	64,8	-3,4
T25_W15	0,47	16,8	19,6	16,8	4,2	4,9	15,7	11,7	14,1	21,1	55,2	65,0	17,8
T26_W15	0,45	19,2	18,2	-5,2	4,7	4,6	-2,6	13,8	13,0	-5,7	61,6	59,7	-2,9

O experimento que apresentou maior aumento no tamanho das gotas foi o T25_W15 ($We = 4$ e $Ca = 0{,}47$), com variações relativas ΔD entre 15,7% para $D_{[3,2]}$ e 21,1% para D_{v50}. O segundo teste com maior aumento nos diâmetros característicos foi o T21_W15 ($We = 6$ e $Ca = 0{,}72$), com ΔD entre 2,1% no D_{v95} e 17,9% no D_{v50}.

A Figura 80 apresenta as DTG correspondentes a tais experimentos. A coalescência de gotas é confirmada pela redução da frequência volumétrica do primeiro pico, centrado em 2 µm, e aumento da frequência do segundo pico em 20 µm. Observa-se que as DTGs em E4 são deslocadas para direita em relação a E3, regiões de maiores diâmetros de gota. Nota-se ainda que, na região da cauda da distribuição, para diâmetros superiores a 50 µm há sobreposição entre as DTGs em E3 e E4. Esse comportamento explica a menor variação dos diâmetros

característicos calculadas com o D_{v95} quando comparada às emulsões com menores frações volumétricas de água.



a) T25_W15 b) T21_W15

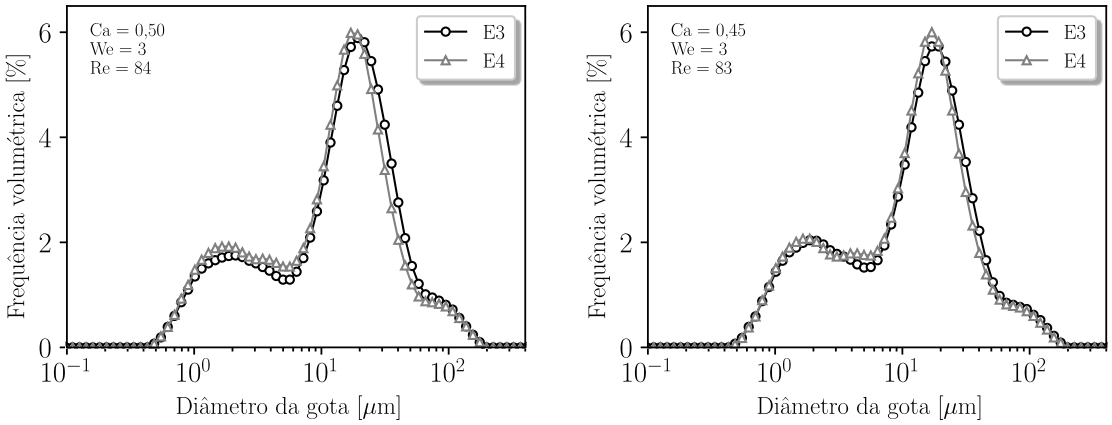
Figura 80 - DTG em emulsões A/O com 15% H_2O escoando em trecho horizontal com aumento dos diâmetros característicos

Em três experimentos foi observada a redução de pelo menos dois diâmetros característicos. No teste T19_W15 (We = 6 e Ca = 0,64), o ΔD situou-se entre -0,7% para $D_{[4,3]}$ e -3,3% para D_{v95}. Já os testes T24_W15 (We = 3 e Ca = 0,50) e T26_W15 (We = 3 e Ca = 0,45) apresentaram redução em todos os diâmetros característicos, com ΔD entre -2,9% e -10,4%. Nesses testes, a redução do ΔD foi mais pronunciada no $D_{[4,3]}$ e D_{v50}.

A Figura 81 apresenta a evolução da DTG no trecho horizontal nos experimentos em que ocorreu redução do tamanho das gotas. Observa-se que a DTG em E4 encontra-se deslocada para regiões de menores diâmetros em comparação a E3, comportamento consistente com os mecanismos de quebra de gotas. De forma geral, as DTGs em E3 e E4 apresentam formato semelhante, porém com distribuição em E4 deslocada para a esquerda em relação a E3, indicando redução dos diâmetros de gotas no ao longo do trecho horizontal.

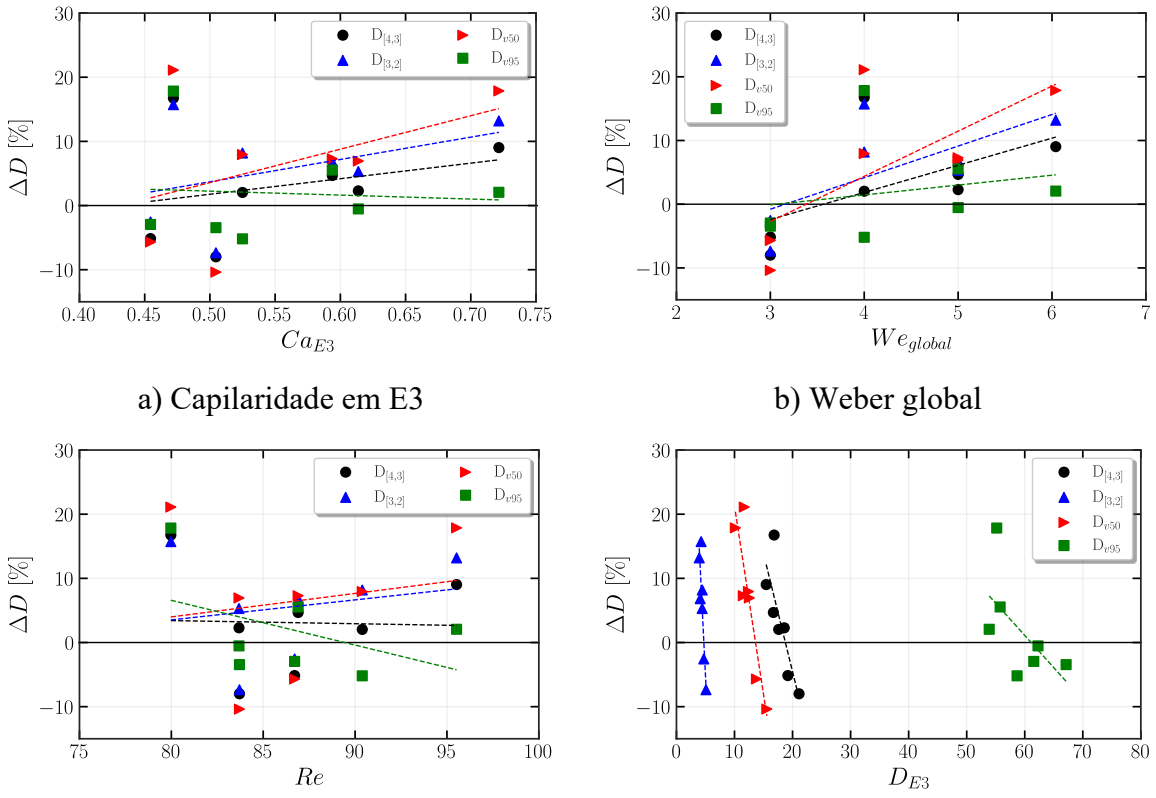
A Figura 82 apresenta a influência de Ca_{E3}, $We_{global,}$ Re e do diâmetro de gotas no início do trecho horizontal na variação relativa dos diâmetros característicos em emulsões com 15% (v/v) H_2O escoando em trecho horizontal. Os símbolos são medições experimentais e as retas tracejadas são indicadores da tendência do conjunto de dados.

Diferente do observado para emulsões com 5% e 10% (v/v) H_2O escoando no mesmo trecho horizontal, os resultados evidenciam ocorrência dos mecanismos de tanto coalescência quanto quebra de gotas. A maior dispersão da variação dos diâmetros característicos, tanto positiva quanto negativa, evidenciam que nessa concentração de fase dispersa os mecanismos de evolução da DTG tornam-se mais complexos, o que pode ser atribuído a menor distância entre gotas e aumento das interações entre gotas.



a) T24_W15 b) T26_W15

Figura 81 - DTG em emulsões A/O com 15% H_2O escoando em trecho horizontal com redução dos diâmetros característicos



a) Capilaridade em E3 b) Weber global

c) Reynolds d) Diâmetro no início do trecho

Figura 82 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 15% (v/v) H_2O escoando no trecho horizontal em função dos números de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho

A Figura 82(a) relaciona o número de Capilaridade em E3 com a variação relativa dos diâmetros característicos no trecho horizontal, compreendendo a faixa de Ca_{E3} entre 0,45 e

0,72. Os diâmetros característicos apresentam alta dispersão com Ca_{E3}. Entretanto, pode-se observar tendência geral de aumento do ΔD com o número de Capilaridade para os diâmetros D_{v50}, $D_{[4,3]}$ e $D_{[3,2]}$. Tais diâmetros evidenciaram coalescência de gotas para $Ca_{E3} > 0{,}52$. Os resultados indicam que o aumento de Ca_{E3} favorecem o crescimento das gotas moderadas, entretanto sem efeito significativo na região dos maiores diâmetros, compreendida na cauda da distribuição, conforme evidenciada pela maior estabilidade do D_{v95} para $Ca_{E3} > 0{,}55$.

O comportamento do ΔD com Ca_{E3} para emulsões com 15% (v/v) H_2O diverge do observado para emulsões com 5% e 10% (v/v) H_2O escoando no mesmo trecho horizontal, nas quais o aumento de Ca_{E3} esteve associado à redução do ΔD, ou seja, redução da coalescência de gotas.

A Figura 82(b) analisa a variação relativa dos diâmetros característicos com o número de Weber entre 3 e 6. Os resultados evidenciam coalescência de gotas para $We_{global} \geq 4$, com ΔD positivo para os diâmetros D_{v50}, $D_{[4,3]}$ e $D_{[3,2]}$. Em comparação as mesma emulsões com 15% (v/v) H_2O em escoamento vertical ascendente, em que ocorreu redução do ΔD com aumento do We_{global}, o comportamento do ΔD no trecho horizontal foi exatamente o oposto.

O número de Weber relaciona as tensões inerciais sobre as gotas com a tensão interfacial. Uma vez que a tensão interfacial é constante entre as fases oleosa e aquosa, o aumento de We_{global} pode ser associado com aumento das tensões inerciais, o que aparenta favorecer as interações e colisões entre as gotas para a emulsão com 15% H_2O escoando no trecho horizontal, principalmente para as gotas moderadas, o que é refletido principalmente no D_{v50} e $D_{[4,3]}$. Esse comportamento se opõe a teoria de Hinze (1955), que relacionam o aumento do número de Weber com a intensificação quebra de gotas. Entretanto, os mecanismos de evolução da DTG em emulsões concentradas são mais complexos, com a coexistência de quebra e coalescência de gotas. A teoria de Taylor (1934), Hinze (1955) e Grace (1982) não consideram a coalescência de gotas.

A influência do número de Reynolds na variação dos diâmetros característicos é apresentada na Figura 82(c), com *Re* entre 79 e 96. Os dados de ΔD apresentam alta dispersão com *Re*, não sendo possível estabelecer correlações de quebra ou coalescência com a variação do número de Reynolds.

Por fim, a Figura 82(d) relaciona o diâmetro de gotas no início do trecho horizontal, ou seja, em E3, com a variação relativa dos diâmetros característicos. Para os diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, D_{v50} e D_{v95}, os resultados evidenciam que existe um diâmetro máximo em que a coalescência é possível, e acima deste valor ocorre quebra de gotas. O $D_{[3,2]}$ apresenta a maior estabilidade entre os demais, o que pode ser atribuído a baixa amplitude de variação deste diâmetro característico, na ordem de 1 μm. Esse comportamento é semelhante ao observado para as mesmas emulsões escoando no trecho vertical ascendente, em que a quebra de gotas atua como mecanismos dominante preferencialmente nas maiores gotas.

Os resultados demonstram que os mecanismos de evolução da DTG nas emulsões com 15% (v/v) H_2O em escoamento horizontal no regime laminar apresentam transição entre dominância da coalescência de gotas para a competição entre quebra e coalescência, principalmente em função do diâmetro inicial de gotas e do número de Capilaridade. A evolução da DTG não ocorre de maneira uniforme em toda a distribuição, mas depende fortemente da faixa de diâmetro considerada. Os diâmetros moderados, representados pelo D_{v50} e $D_{[4,3]}$, apresentaram comportamento mais sensível às tensões viscosas atuantes sobre a

emulsão. Os resultados evidenciam que o número de Reynolds não descreve bem a evolução da DTG nas condições experimentais avaliadas, devido à alta variabilidade experimental.

O aumento da concentração de fase dispersa intensifica as interações entre gotas, favorecendo os mecanismos de colisão, agregação e coalescência. Entretanto, emulsões mais concentradas inerentemente apresentam maiores tamanhos de gotas quanto comparadas às emulsões com frações de fase dispersas menores, o que reduz a estabilidade das gotas e as torna mais sujeitas à quebra de gotas. Gotas maiores possuem menores pressão de Laplace, responsáveis por manter as gotas coesas no formato esférico e resistir às tensões externas do escoamento. Como consequência, as gotas maiores são mais susceptíveis à deformação e eventual quebra, favorecendo a coexistência entre mecanismos de quebra e coalescência ao longo do trecho horizontal.

4.6.4 Emulsão com 20% de água

A Tabela 24 apresenta os diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} medidos nos extratores de emulsão E3 e E4 para emulsões com 20% (v/v) H_2O em escoamento horizontal, em função no número de Capilaridade no início do trecho analisado. A variação relativa dos diâmetros característicos, representada por ΔD [%], foi utilizada como indicador da evolução dos tamanhos de gota ao longo do trecho horizontal.

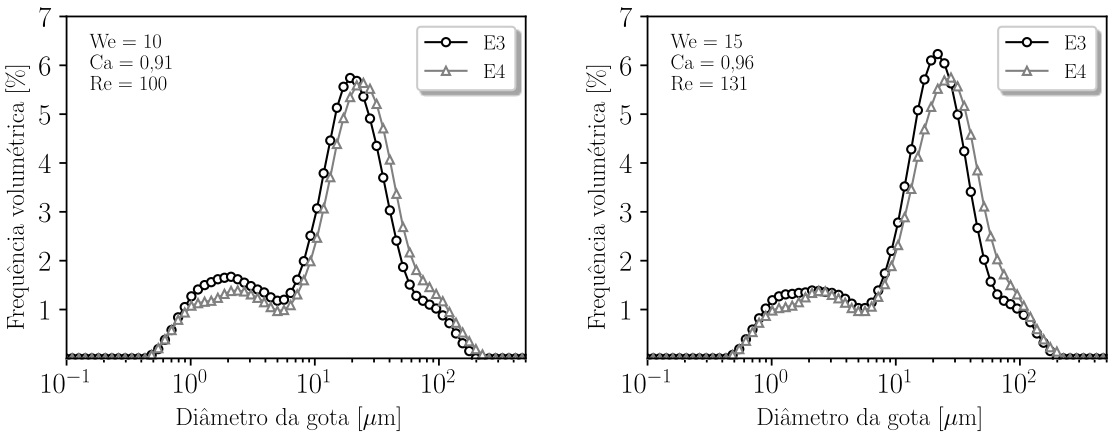
Tabela 24 - Evolução dos diâmetros $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre os extratores E3 e E4 (trecho horizontal) para concentração de 20% (v/v) H_2O

Teste Id	Ca_{E3}	$D_{[4,3]}$ [µm]			$D_{[3,2]}$ [µm]			D_{v50} [µm]			D_{v95} [µm]		
		E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]	E3	E4	ΔD [%]
T28_W20	0,98	26,0	25,8	-0,7	6,0	6,3	5,2	19,0	19,4	2,4	82,9	81,7	-1,4
T29_W20	0,99	27,3	29,6	8,2	6,3	6,7	6,1	20,4	21,3	4,2	84,8	97,5	14,9
T30_W20	1,10	21,8	21,9	0,3	5,1	5,4	6,0	15,8	16,0	1,5	73,1	71,3	-2,5
T31_W20	0,73	26,9	29,2	8,7	6,1	6,7	10,6	19,7	21,8	10,4	87,9	93,5	6,3
T32_W20	0,91	23,0	28,2	22,3	5,3	6,1	14,3	16,5	20,1	21,9	76,5	92,0	20,3
T33_W20	0,96	24,2	28,3	16,7	5,8	6,4	11,3	18,1	21,2	17,0	76,9	86,4	12,4

Em 5 dos 6 experimentos, os mecanismos de coalescência de gotas foram predominantes na evolução da DTG, evidenciado por $\Delta D > 0$ em pelo menos três dos diâmetros característicos avaliados. Em apenas um experimento, foram observados valores $\Delta D < 0$ para $D_{[4,3]}$ e D_{v95}, porém com magnitude menor que 2%.

Destaca-se que em todos os experimentos, os diâmetros característicos $D_{[3,2]}$ e D_{v50} apresentaram $\Delta D > 0$, indicativo de predominância da coalescência de gotas. Esse comportamento sugere que, em emulsões mais concentradas em regime laminar sob escoamento horizontal, o aumento da fração volumétrica favorece o crescimento das gotas moderadas da DTG.

Os experimentos T32_W20 e T33_W20 apresentaram os maiores aumentos na variação dos diâmetros característicos, ou seja, apresentaram maior coalescência de gotas no trecho horizontal. No T32_W20 (We = 10 e Ca = 0,91) a variações dos diâmetros característicos foi entre 14,3% no $D_{[3,2]}$ e 22,3% no $D_{[4,3]}$. No T33_W20 (We = 15 e Ca = 0,96), o ΔD foi entre 11,3% no $D_{[3,2]}$ e 17,0% no D_{v50}. O crescimento simultâneo de todos os diâmetros característicos nesses experimentos sugere aumento generalizado do tamanho das gotas, compatível com predominância da coalescência ao longo do trecho horizontal. A Figura 83 apresenta as DTG correspondentes a tais experimentos. As DTGs são bimodais, com predominância de gotas moderadas e grandes. Nota-se que a DTG em E4 é deslocada para a direita em relação a E3, ou seja, para a região de maiores diâmetros. Esse comportamento é consistente em toda a DTG, e de forma expressiva no pico, que se desloca de 20 µm para 30 µm.

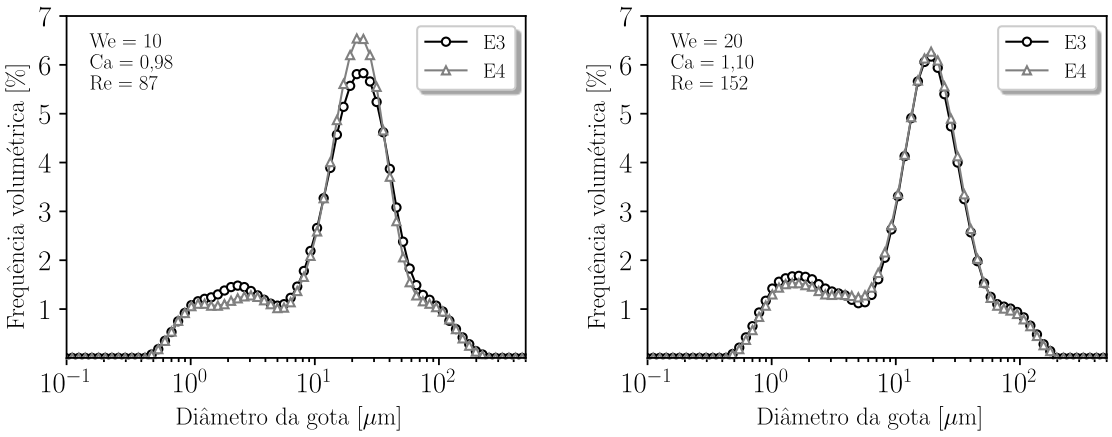


a) T32_W20 b) T33_W20

Figura 83 - DTG em emulsões A/O com 20% H_2O escoando em trecho horizontal com maior aumento do tamanho de gotas

Em dois experimentos foi observado redução de pelo menos um diâmetro característico. No teste T28_W20 (We = 10 e Ca = 0,98), houve redução de -0,7% no $D_{[4,3]}$ e -1,4% no D_{v95}, enquanto o $D_{[3,2]}$ aumentou 5,2% e o D_{v50} aumentou 2,4%. Analisando a Figura 84(a), observa-se que a DTG em E4, quando comparada à E3, apresenta redução da frequência volumétrica do primeiro pico em torno de 2 µm e aumento da frequência volumétrica do segundo pico, centrado em 20 µm. Assim, observa-se que houve aumento do tamanho das gotas intermediárias da DTG e redução das menores gotas da DTG. Nas regiões de maiores diâmetros, na cauda da distribuição, as DTGs em E3 e E4 apresentam alto grau de sobreposição.

No teste T30_W20 (We = 20 e Ca = 1,10), a variação do ΔD foi positiva para $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$ e D_{v50}, com ΔD entre 0,3% e 6,0%. Entretanto, houve redução do D_{v95} de -2,5%. Analisando a Figura 84(b), as DTGs em E3 e E4 apresentam formato semelhante, estando praticamente sobrepostas, não sendo possível definir qual mecanismo é dominante na evolução da DTG.

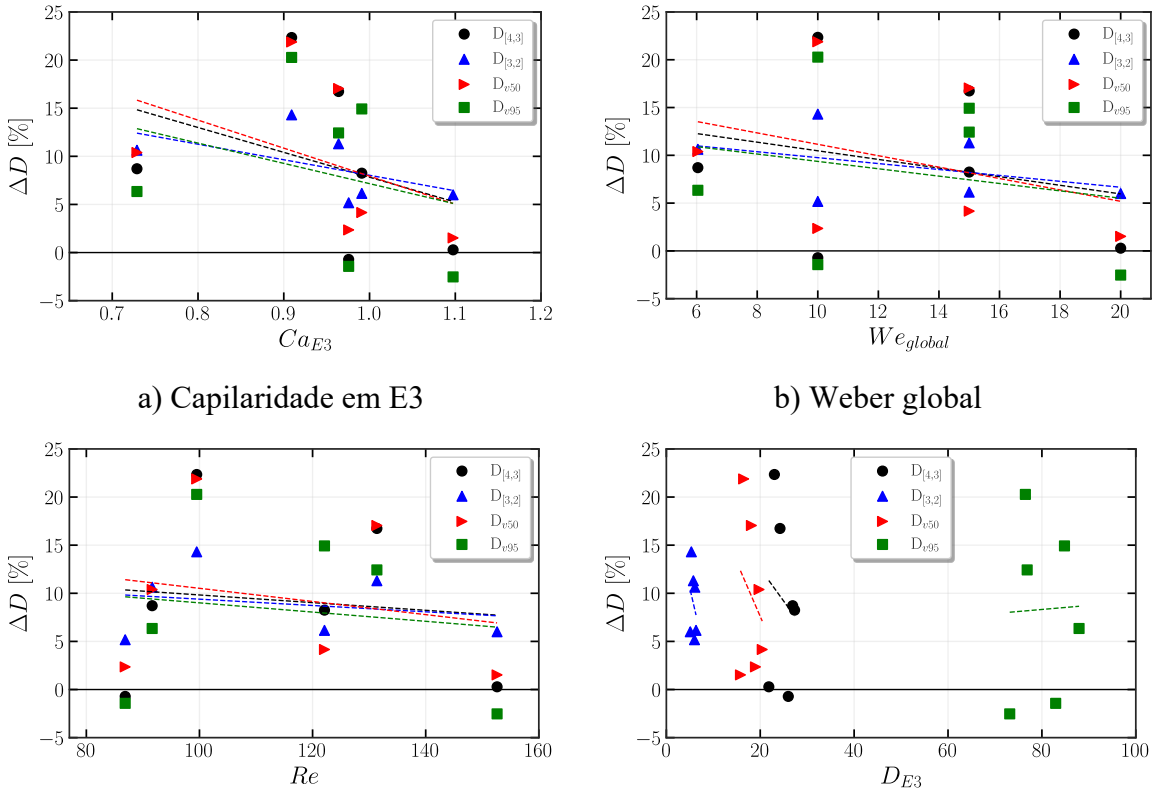


a) T28_W20 b) T30_W20

Figura 84 - DTG em emulsões A/O com 20% H_2O escoando em trecho horizontal com redução pequena ou nula dos diâmetros de gotas

A Figura 85 relaciona a variação relativa dos diâmetros característicos no trecho horizontal entre os extratores E3 e E4 com os números de Capilaridade, Weber e Reynolds, além da influência do diâmetro inicial das gotas em E3 no ΔD, para emulsão A/O com 20% (v/v) H_2O. Os resultados evidenciam que evolução da DTG é predominantemente caracterizada por crescimento das gotas no trecho horizontal, comportamento consistente com coalescência de gotas. A coalescência atua principalmente nas gotas moderadas, representadas por $D_{[4,3]}$ e D_{v50}. Essas emulsões apresentam comportamento mais complexo do que emulsões com fração de fase dispersa entre 5% e 15% (v/v) H_2O, destacado pela maior variabilidade dos dados com os parâmetros em análise.

A Figura 85(a) relaciona o número de Capilaridade com a variação dos diâmetros característicos no trecho horizontal, compreendendo valores de Ca_{E3} entre 0,73 e 1,10. Observa-se tendência geral coalescência de gotas, evidenciado por $\Delta D > 0$. Os resultados demonstram redução da magnitude do ΔD com aumento do número de Capilaridade. A coalescência atua nos diâmetros de gota moderados e grandes, principalmente. Esse comportamento sugere que o aumento das tensões viscosas atuando sobre as gotas reduz a intensidade e eficiência da coalescência no trecho horizontal, enquanto os mecanismos de deformação e quebra de gotas passam a atuar nas maiores gotas da distribuição. Para $Ca_{E3} > 0{,}98$, pode-se identificar que os mecanismos de quebra e coalescência atuam simultaneamente, com $\Delta D > 0$ para as gotas moderadas, representadas por D_{v50} e $D_{[4,3]}$, e $\Delta D \approx 0$ para D_{v95}. Esse comportamento reforça que as gotas maiores apresentam menor estabilidade, tornando-se mais susceptível à deformação por tensões viscosas.



a) Capilaridade em E3

b) Weber global

c) Reynolds

d) Diâmetro no início do trecho

Figura 85 - Variação dos diâmetros característicos na emulsão A/O com 20% (v/v) H_2O escoando em trecho horizontal em função do número de Capilaridade, número de Weber, número de Reynolds e diâmetro no início do trecho

A influência do número de Weber e número de Reynolds na variação dos diâmetros característicos em emulsões escoando em tubulações horizontais são apresentadas na Figura 85(b) e Figura 85(c), respectivamente, para $6 \leq We_{global} \leq 20$ e $80 \leq Re \leq 160$. Os dados de ΔD apresentam elevada dispersão com We_{global} e Re, o que impossibilita estabelecer correlações com os mecanismos de coalescência e quebra de gotas.

A Figura 85(d) relaciona o diâmetro de gotas no início do trecho horizontal na variação relativa dos diâmetros característicos. Semelhante ao observado para emulsões A/O com 15% (v/v) H_2O, o $D_{[3,2]}$ apresenta baixa sensibilidade com o diâmetro inicial, mantendo valores positivos de ΔD e semelhantes em toda faixa analisada, com variações absolutas do $D_{[3,2]}$ na ordem de 1 µm. Os diâmetros D_{v50} e $D_{[4,3]}$ apresentam tendência de redução do ΔD com aumento do diâmetro inicial das gotas, apesar da variabilidade experimental. O D_{v95} apresenta alta dispersão com D_{E3}, não sendo possível estabelecer relação com a predominância da quebra ou coalescência.

Os resultados para emulsões A/O com 20% (v/v) H_2O escoando no trecho horizontal demonstra a predominância dos mecanismos de coalescência de gotas ao longo do trecho horizontal entre os extratores E3 e E4, principalmente para as gotas moderadas da distribuição, conforme indicado pela variação relativa dos diâmetros característicos e pelos gráficos de DTG. Entretanto, nas maiores gotas da DTG, localizadas na cauda da distribuição e representadas por D_{v95}, há coexistência dos mecanismos da quebra de gotas com a coalescência. Os resultados

evidenciam que, nas condições experimentais avaliadas, os mecanismos de evolução da DTG em escoamentos horizontais em regime laminar são relacionados principalmente com o número de Capilaridade.

Os resultados obtidos para emulsões com 20% (v/v) H_2O apresentam comportamento consistente e semelhante com as conclusões observadas para emulsões contendo 15% (v/v) H_2O escoando no mesmo trecho horizontal, especialmente no que se refere à predominância da coalescência de gotas e fragmentação localizada na região de maiores diâmetros.

4.6.5 Síntese dos mecanismos de evolução da DTG em escoamento horizontal

Os resultados experimentais obtidos para as emulsões A/O com frações volumétricas de fase dispersa entre 5% e 20% (v/v) H_2O em escoamento laminar horizontal com L_H/D = 435 evidencia a dominância dos mecanismos de coalescência de gotas. A evolução da DTG neste trecho demonstrou dependência em múltiplos parâmetros, como: tensões viscosas atuando sobre as gotas representadas pelo número de Capilaridade, da estrutura da emulsão no início do trecho horizontal e da fração volumétrica de fase dispersa. A evolução da DTG no trecho horizontal exibiu maior dispersão de resultados quando comparada ao escoamento vertical ascendente.

Os resultados evidenciam que os mecanismos da evolução do tamanho de gotas de emulsões em tubulações horizontais tornam-se mais complexos com o aumento da fração volumétrica de fase dispersa. Para emulsões com 5% (v/v) H_2O, ocorreu apenas coalescência de gotas. Em 10% (v/v) H_2O, a coalescência de gotas permaneceu como mecanismo dominante, embora identificados testes com redução do tamanho de gotas dependendo do número de Capilaridade. Para as emulsões com 15% e 20% (v/v) H_2O, verificou-se coalescência majoritariamente, entretanto com fragmentação pontual das maiores gotas presentes na cauda da distribuição.

Para a emulsão com 5% (v/v) H_2O, identificou-se coalescência de gotas em todas as condições experimentais. Por ser constituído por gotas majoritariamente pequenas e, consequentemente, com maior resiliência perante a quebra de gotas. No geral, as variações dos diâmetros característicos foram inferiores a 15%. A análise visual da DTG indica que a coalescência de gotas ocorre tipicamente nas gotas moderadas ou grandes, situadas acima do diâmetro mediano volumétrico D_{v50}.

Para a emulsão com 10% (v/v) H_2O, a coalescência permaneceu como mecanismo dominante para números de Capilaridade $Ca_{E3} < 0{,}50$. Os resultados evidenciam que a coalescência de gotas é favorecida para números de Capilaridade mais baixos, ou seja, por menores tensões viscosas atuando sobre as gotas.

Para a emulsão com 15% (v/v) H_2O, verificou-se aumento na variação relativa dos diâmetros característicos com o aumento do número de Capilaridade. Esse comportamento é contraditório e diverge das demais frações volumétricas. Uma vez que o número de Capilaridade é relacionado com às tensões viscosas atuando sobre as gotas, o aumento de tais tensões tende a favorecer a deformação e fragmentação de gotas, e não os mecanismos de agregação e coalescência. Destaca-se, ainda, a variabilidade das variações dos diâmetros característicos.

Para as emulsões com 20% H_2O, a coalescência de gotas mostrou-se novamente dominante, e atuando principalmente nas gotas moderadas, representadas por D_{v50} e $D_{[4,3]}$. Foram identificados eventos pontuais de fragmentação local de gotas grandes, localizadas na cauda da distribuição e representadas pelo D_{v95}. Nessa concentração de fase dispersa, a magnitude da variação dos diâmetros característicos apresenta correlação negativa com o número de Capilaridade, ou seja, quanto menor Ca_{E3} maior a coalescência de gotas, evidenciada pelo parâmetro ΔD.

Entre os parâmetros analisados, o número de Capilaridade foi o que melhor descreveu a evolução da DTG no trecho horizontal, representada pela variação relativa dos diâmetros característicos. Exceto pela emulsão com 15% H_2O, o número de Capilaridade apresenta correlação negativa com ΔD, ou seja, quanto maior o Ca_{E3} menor a variação do tamanho das gotas, reduzindo a incidência de coalescência. Essa conclusão converge com os fundamentos teóricos de quebra de gotas, pois as tensões viscosas externas atuando sobre a gota tendem a deformar a gota do seu formato esférico e que, em casos críticos, leva a ruptura das gotas.

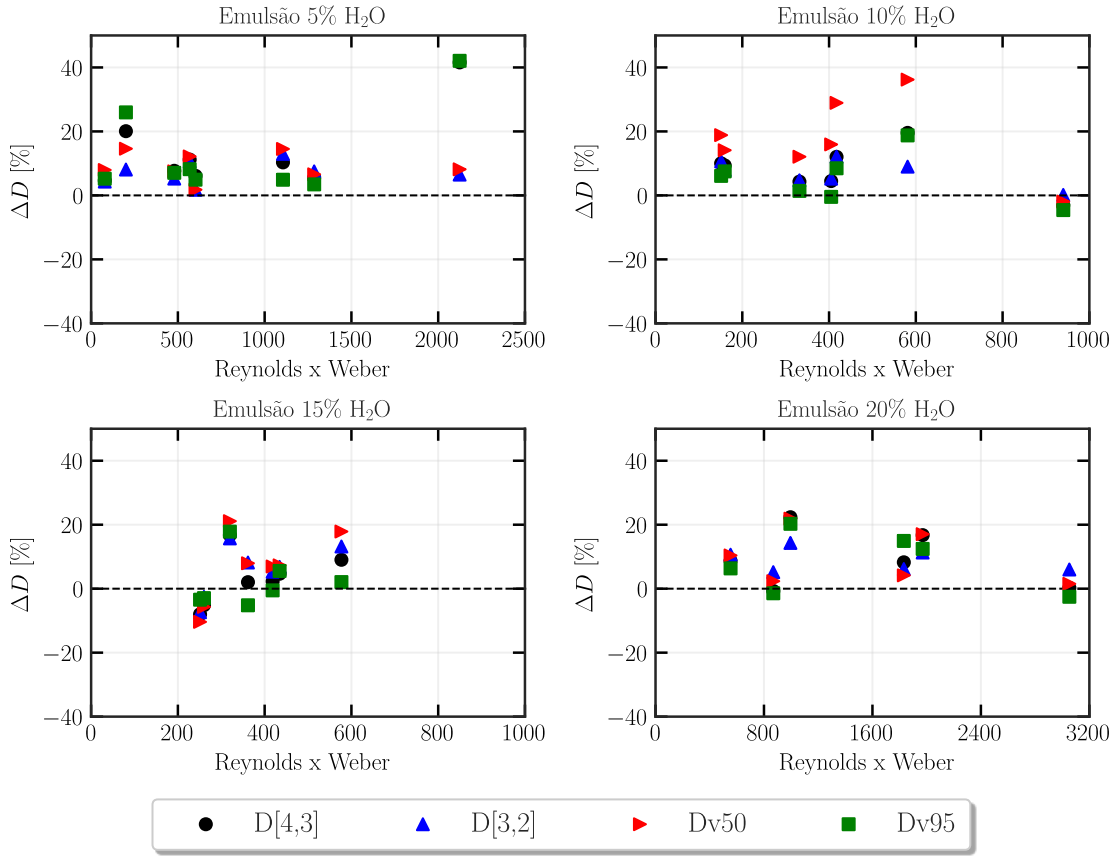


Figura 86 - Variação dos diâmetros característicos no trecho horizontal com Weber e Reynolds

Os números de Reynolds e Weber não apresentaram comportamento consistente com o ΔD nas condições experimentais deste trabalho. Isso reforça que, em escoamentos laminares, os mecanismos da evolução da DTG são governados pelas tensões viscosas exercidas sobre as gotas.

A Figura 86 sintetiza a variação relativa dos diâmetros característicos no trecho horizontal em função do produto entre o número de Reynolds e o número de Weber (*Re.We*), que incorpora efeitos interfaciais, viscosos e inerciais do escoamento e sobre a população de gotas. O eixo das abscissas contabiliza efeitos inerciais e viscosos do escamento através do número de Reynolds - *Re*, e o número de Weber inclui a inércia das gotas e efeitos interfaciais.

4.7 CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS

Cada técnica de análise de tamanhos de gotas apresenta uma faixa de operação, ou seja, limites mínimos e máximos de diâmetros de gotas que podem ser medidos. Após a medição da DTG, os resultados devem ser processados para obtenção dos diâmetros característico e volumétricos, como $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99}. Por exemplo, a difração a laser fornece histogramas de frequência volumétrica de gotas em classes de diâmetros. Em técnicas baseadas em fotomicrografia, as imagens devem ser processadas para obtenção dos diâmetros de gotas. Nesse contexto, a precisão e exatidão da DTG e dos diâmetros característicos e volumétricos dependem diretamente da capacidade da técnica de medição utilizada em representar adequadamente toda faixa de diâmetros de gota presentes no histograma da DTG.

A técnica de difração a laser utilizada neste trabalho apresenta ampla faixa de medição de tamanho de partículas, entre 0,1 μm e 1000 μm. Em contrapartida, técnicas baseada em fotomicrografia possuem limitações significativas na detecção de gotas pequenas, particularmente para diâmetros de gotas inferiores a 10 μm (Pimentel, 2024). Além disso, as características intrínsecas da DTG, como a polidispersão, modificam a relação cruzada entre os diâmetros característicos e volumétricos.

Nesse contexto, a existência de correlações estatísticas entre os diâmetros característicos é de relevância. Em situações nas quais determinada técnica possui maior sensibilidade para uma faixa específica de diâmetros, torna-se possível estimar outros parâmetros da DTG a partir de relações empíricas previamente estabelecidas. Por exemplo, se apenas a técnica de fotomicrografia estiver disponível, sabendo que essa técnica apresenta bom desempenho para gotas moderadas e grandes, o diâmetro volumétrico D_{v95} pode ser utilizado para obtenção do $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$ ou D_{v50}, desde que exista uma relação de dependência conhecida entre tais parâmetros.

Diversos autores relacionam os diâmetros médios característicos com o diâmetro máximo estável de gotas. Nesse sentido, Lemenand et al. (2003) destacam a importância da relação linear entre diâmetros médios, como $D_{[3,2]}$, e o diâmetro máximo estável de gotas, representado por D_{v95}, uma vez que os modelos clássicos de previsão de tamanho de gotas em escoamentos frequentemente utilizam o diâmetro máximo estável de gotas.

Entre as diferentes abordagens matemáticas utilizadas para relacionar dados, a regressão linear de primeiro grau é uma das relações matemáticas mais simples entre duas variáveis, indicando uma dependência linear. Antes da obtenção da regressão linear, é necessário avaliar a existência de correlação linear entre as variáveis analisadas. Neste trabalho, tal análise foi realizada através do coeficiente de correlação de *Pearson.*

A Figura 87 apresenta gráficos de dispersão entre os diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99}, utilizando dados de todos os testes no circuito de escoamento de emulsões, ou seja, contemplando amostras de emulsão dos tanques de armazenamento superior

e inferior, além dos extratores de emulsão E1, E2, E3 e E4. A diagonal localiza os histogramas de cada diâmetro característico, representando a distribuição estatística de cada parâmetro. Os marcadores azuis representam os dados experimentais, enquanto a reta vermelha corresponde à linearização dos conjuntos de dados.

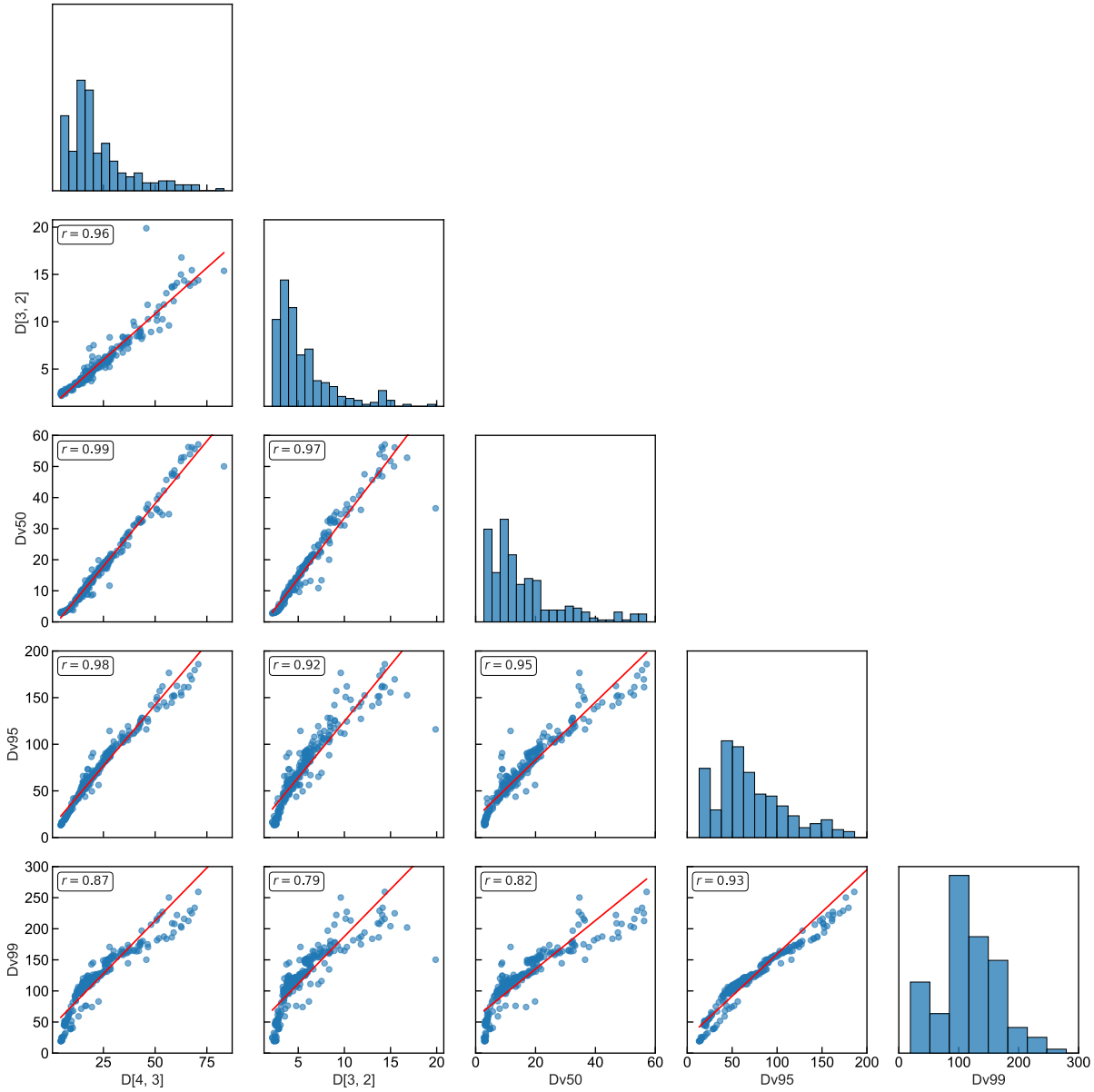


Figura 87 - Gráficos de dispersão entre pares de diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99} envolvendo todos os experimentos no circuito de escoamento de emulsões, em que *r* é o coeficiente de correlação de Pearson

As correlações lineares foram mensuradas a partir do coeficiente de correlação de Pearson, que calcula o grau de linearidade entre duas variáveis, utilizando a Eq. (32). Os resultados evidenciam que diâmetros característicos apresentam correlações lineares muito fortes, com coeficientes de correlação de *Pearson* envolvendo $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50} e D_{v95} entre 0,90 e 0,99, conforme detalhado na Tabela 25. Tais resultados demonstram elevada

dependência estatística entre os diferentes parâmetros representativos da DTG, indicando que alterações na distribuição de tamanhos de gotas tendem a impactar simultaneamente diferentes métricas características da emulsão.

Tabela 25 – Correlação entre diâmetros característicos mensuradas pelo coeficiente de correlação de Pearson envolvendo todos os experimentos no circuito de escoamento de emulsões

Diâmetros relacionados	Coeficiente de correlação de Pearson
$D_{[4,3]}$ e $D_{[3,2]}$	0,96
$D_{[4,3]}$ e D_{v50}	0,99
$D_{[4,3]}$ e D_{v95}	0,98
$D_{[4,3]}$ e D_{v99}	0,87
$D_{[3,2]}$ e D_{v50}	0,97
$D_{[3,2]}$ e D_{v95}	0,92
$D_{[3,2]}$ e D_{v99}	0,79
D_{v50} e D_{v95}	0,90
D_{v50} e D_{v99}	0,82
D_{v95} e D_{v99}	0,93

Os coeficientes de correlação de Pearson relacionando o D_{v99} com os demais diâmetros característicos apresenta valores entre 0,79 com $D_{[3,2]}$ e 0,93 com D_{v95}. Os gráficos de dispersão comprovam a existência de correlações também para este diâmetro máximo de gotas, com correlações muito fortes entre D_{v99} e D_{v95}, e correlações fortes para os demais diâmetros característicos.

Vale destacar que, apesar da forte correlação estatística, cada diâmetro característico preserva sensibilidade distinta em relação às particularidades e diferentes regiões da DTG. Como por exemplo, o D_{v50} e $D_{[4,3]}$ representam a mediana e média volumétrica, o D_{v95} e D_{v99} representam a cauda da DTG.

Além da relevância estatística, a existência de correlação forte entre os diâmetros característicos apresenta uma importante aplicação experimental, visando garantir confiabilidade dos dados. Em pesquisas envolvendo grande volume de dados experimentais, DTGs que apresentem desvios significativos de algum diâmetro característico da tendência linear esperada podem indicar possíveis inconsistências associadas ao experimento, como no método de medição da DTG ou na amostragem da emulsão, além de outras fontes de incertezas experimentais. Assim, a análise cruzada entre diâmetros característicos pode auxiliar na identificação de *outliers* e na avaliação da consistência experimental dos dados.

A correlação entre os diâmetros característicos contribui com a comparação e validação cruzada entre diferentes técnicas de medição de DTG, particularmente relevante em

desenvolvimento de novas metodologias experimentais e métodos de medição em linha (*inline*), tal como desenvolvido por Pimentel (2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese de doutorado apresentou avaliações experimentais da evolução da distribuição do tamanho de gotas em emulsões óleo-em-água com fração de fase dispersa entre 5% e 20% em escoamento vertical ascendente e horizontal com objetivo principal de avaliar os mecanismos de quebra e coalescência. Para isso, uma bancada experimental foi projetada, montada e utilizada. Além disso, um laboratório de preparo e caracterização de emulsões foi construído como infraestrutura auxiliar aos experimentos. Deve-se considerar que são avaliadas emulsões em concentrações de fase dispersa mais elevadas que aquelas normalmente estudadas na literatura disponível que, geralmente, abordam emulsões ou dispersões com concentração volumétrica de fase dispersa menor que 5%.

Amostras de emulsões com volume de 400 litros foram preparadas a partir de óleo mineral AW68 com 0,1% do surfactante Triton X-114 e água deionizada com 35 g/L de NaCl. Como métodos de formulação de emulsão, inicialmente foi utilizada agitação em bateladas de 50 litros com dispersor Ultra-Turrax T65. Entretanto, ao longo do desenvolvimento desta tese, foi observado que a reciclagem de emulsão a partir de homogeneização manual em emulsões já existentes foi capaz de produzir emulsões metaestáveis com tamanho de gota adequado para poder ser alterado nos experimentos na bancada de testes, também atendendo o requisito de período de estabilidade para separação gravitacional das fases suficiente para os testes em escoamento.

Para modificação da fração volumétrica da fase dispersa, um procedimento semelhante foi adotado, com a adição de um volume determinado da fase aquosa em uma emulsão já existente, seguido por homogeneização. Esses procedimentos resultaram em economia de recursos materiais, como óleo e tensoativos, e humanos para o preparo de emulsões em grandes volumes para os testes no circuito de escoamento, com vantagens da rapidez de homogeneização e disponibilidade de emulsões para testes no circuito de escoamento. Deve-se considerar também que a reciclagem da emulsões proporcionou drástica redução de descarte de resíduos líquidos oleosos.

A evolução da DTG foi avaliada por meio de medições do tamanho de gotas por difração a laser em amostras de emulsão retiradas da bancada de testes. As DTGs foram processadas para obtenção dos diâmetros médios característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99}, além dos parâmetros de dispersão *span* e D_{dev}. O uso de diâmetros característicos possibilita a quantificação da evolução do tamanho das gotas nos trechos de análise por diversas métricas representativas e adotadas pela comunidade especializada.

Foram realizadas avaliações sobre o impacto da reciclagem das emulsões na DTG, envolvendo formulação e análise de: (i) emulsões novas (EN), (ii) emulsões reutilizadas (ER) e (iii) emulsões com período de agitação variável (EPV). Os resultados demonstram que, independentemente do método de formulação da emulsão, a adição de fase dispersa promove aumento no tamanho das gotas, evidenciada através dos diâmetros característicos, volumétricos e pelo próprio gráfico da frequência volumétrica de gotas. Os resultados evidenciam que tanto a reutilização da emulsão com cisalhamento sucessivo como o período de agitação têm impacto na DTG, sendo que quanto maior o período de cisalhamento, menores são os tamanhos das gotas na emulsão formulada. Além disso, os resultados demonstram que a reciclagem da emulsão reduz os diâmetros das gotas. Entretanto, em todos os métodos de formulação de

emulsão, a fração volumétrica de fase dispersa foi o principal fator influente nos diâmetros característicos.

O envelhecimento das emulsões foi monitorado a partir da DTG prévia ao experimento na bancada de testes, em amostras de emulsão coletadas na superfície, meio e fundo do tanque de armazenamento de emulsões. Os critérios para análise foram: as curvas de DTG, de forma qualitativa, e os diâmetros característicos, de forma quantitativa. Os resultados demonstram que não houve perda de integridade da DTG causada pela reagitação e reutilização das emulsões, considerando cada fração volumétrica de fase dispersa.

A metodologia de reaproveitamento da emulsão foi validada a partir de critério estatístico de detecção de dados espúrios de diâmetros característicos, o que permitiu a reciclagem de emulsões. Além disso, essa metodologia permitiu a comparação de resultados em bateladas de testes distintas, mas com emulsões estatisticamente semelhantes.

Embora os testes tenham sido parametrizados pelo número de Weber, obtido utilizando o diâmetro médio $D_{[4,3]}$ das emulsões antes do teste em escoamento, o fato da viscosidade da fase contínua ser na ordem de 0,130 Pa.s, juntamente com os requisitos operacionais de pressão máxima de 10 bar, e gradientes de pressão elevados em tubulação de 21 milímetros implicam em número de Reynolds dos testes entre 70 e 230, ou seja, no regime de escoamento laminar. Como consequência, as tensões viscosas, representadas pelo número de Capilaridade, dominam os mecanismos evolução da DTG, especialmente em trechos cuja de deformação e quebra de gotas são dominantes.

Considerando as curvas clássicas de capilaridade crítica de Grace (1982) e razão de viscosidade entre fase dispersa e contínua na ordem de 10^{-2}, o conjunto de números de Capilaridade compreende faixas entre as curvas de cisalhamento simples (Ca_{crit} = 0,4) e escoamento extensional (Ca_{crit} = 2,5), o que possibilita tanto a ocorrência da deformação quanto a ruptura de gotas. É relevante destacar que as curvas de Ca_{crit} não representam integralmente o campo de escoamento em sistema de tubulações reais e com possibilidade de ocorrência de tanto quebra como coalescência de gotas, especialmente em sistemas com amostragem de fluido e análise da DTG *offline*, tal como utilizado neste trabalho.

Em relação aos mecanismos de agregação e coalescência de gotas, as emulsões são concentradas, com fração de fase dispersa entre 5% e 20%, em que a presença de fase dispersa modifica as propriedades termofísicas da emulsão, como massa específica e viscosidade. Além disso, escoamento em tubulações lisas tipicamente apresentam baixas taxas de cisalhamento, favorece a coalescência de gotas em trechos de tubulação longo. Isso foi observado em escoamento horizontal, que apresenta razão de aspecto L_H/D = 435. A coalescência de gotas em tubulações horizontais é reportada na literatura mesmo em regimes de escoamento turbulento por diversos autores, como Trallero, Sarica e Brill (1997), Walsh (2016), Voulgaropoulos e Angeli (2017) e Schümann, Simonsen e Brekken (2023).

A evolução da DTG em escoamento vertical ascendente evidência forte influência da fração de fase dispersa nos mecanismos de evolução da DTG. Para emulsões com 5% e 10% (v/v) H_2O, a quebra de gotas foi o mecanismo dominante, evidenciada pela redução dos diâmetros característicos. Já nas emulsões com 15% e 20% H_2O, verificou-se a coalescência dependendo do número de Capilaridade no início do trecho em análise, havendo um número de Capilaridade mínimo para ocorrência de quebra de gotas, que foi por volta de Ca_{crit} = 0,50 para emulsões com 15% (v/v) H_2O e Ca_{crit} = 0,80 para emulsões com 20% (v/v) H_2O. Os resultados

demonstraram a contribuição do número de Capilaridade para a quebra de gotas, o que comprova que, mesmo em regime laminar, as tensões viscosas atuantes sobre as gotas promovem deformação e ruptura. Destaca-se também a influência do diâmetro de gotas no início do trecho vertical sobre a variação dos diâmetros característicos, em que gotas inicialmente maiores são mais suscetíveis à ruptura, e gotas menores tendem a apresentar maior estabilidade, sendo mais resilientes aos mecanismos de quebra e coalescência de gotas.

Em escoamento horizontal, a evolução da DTG foi caracterizada por aumento nos diâmetros característicos, consistente com a predominância dos mecanismos de coalescência de gotas. Para as frações volumétricas de 15% e 20% (v/v) H_2O, foram identificadas redução do tamanho de gotas na cauda da DTG, ou seja, na região de maiores diâmetros de gotas. Entretanto, foi observada elevada dispersão dos diâmetros característicos em relação aos números de Capilaridade, Weber e Reynolds. Essa variabilidade evidencia a complexidade dos mecanismos de coalescência de gotas. Exceto para emulsão com 15% (v/v) H_2O, o número de Capilaridade apresentou correlação negativa com a variação dos diâmetros característicos. Este resultado está em concordância com os fundamentos de quebra de gotas, pois as tensões viscosas externas atuando sobre a gota tendem a deformar a gota do seu formato esférico e que, em casos críticos, leva a ruptura das gotas, e atuam de forma concorrente aos mecanismos de coalescência.

Os objetivos da tese de doutorado foram atingidos, com as seguintes contribuições inéditas na literatura e que constam nos trabalhos e artigos publicados:

(i) Estudo analítico do impacto do período de agitação e reutilização de emulsões na DTG;
(ii) Desenvolvimento e validação de um procedimento experimental inédito sobre a evolução da DTG em escoamento em tubulações com diferentes orientações;
(iii) Identificação de quebra de gotas em escoamento vertical ascendente (L_V/D=90), com relação direta entre a variação no tamanho das gotas e o número de Capilaridade e o diâmetro de gotas inicial;
(iv) Identificação de coalescência de gotas em escoamento horizontal (L_H/D=435), relacionada ao número de Capilaridade;
(v) Disponibilização de dados experimentais inéditos sobre a evolução da DTG em tubulações verticais ascendentes e horizontais.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nesta tese evidenciam a complexidade dos mecanismos de evolução da DTG, mesmo em escoamento laminar em escoamento vertical ascendente e horizontal. Embora o trabalho tenha permitido avanços importantes, há lacunas em aberto. Nesse contexto, são apresentadas as seguintes recomendações para trabalhos futuros.

Recomenda-se a realização de experimentos com emulsões A/O diluídas, ou seja, com frações volumétricas de fase dispersa baixas, tipicamente entre 0,5% e 5%, visando isolar os efeitos de agregação e coalescência de gotas, especialmente em escoamento horizontal.

Para ampliação dos dados experimentais existentes, sugere-se a realização de experimentos semelhantes utilizando emulsões menos viscosas, como emulsões óleo-em-água

(O/A) ou mesmo água-em-óleo (A/O) composta por óleo de baixa viscosidade, como querosene, abrangendo números de Reynolds em regime turbulento. Esses testes são relevantes no contexto do pré-sal brasileiro, em que o petróleo tipicamente apresenta viscosidade muito baixa na linha de produção. É de grande relevância os testes abrangerem ampla faixa dos números de Capilaridade, Weber e Reynolds.

Outra sugestão refere-se à utilização de métodos de medição da DTG em linha, sem necessidade de retirada de amostras, visando minimizar perturbações na emulsão e no escoamento inerentes do método de amostragem. Vale destacar que tal método deve apresentar como requisito principal a utilização em fluidos opacos. Os resultados desta tese demonstraram existência de correlação linear forte entre diâmetros característicos e volumétricos, o que pode viabilizar métodos de inferência indireta da DTG completa a partir de sensores capazes de medir faixas específicas de diâmetros de gotas.

Por fim, para ampliação da compreensão do impacto da reciclagem e reutilização de emulsões em diversos experimentos, recomenda-se avaliação da interface das gotas após ciclos de utilização.

6 PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA AO DOUTORADO

Premiações

Prêmio Inventor Petrobras 2026 – Processo para Avaliar a Evolução da Distribuição do Tamanho de Gotas no Escoamento de Emulsões.

Pedido de patente em depósito

Ramos, R., **Franco, L. G.**, Corona, R. R. B., Elias, M. Z., Sad, C. M. S. Processo para avaliar a evolução da distribuição do tamanho de gotas no escoamento de emulsões. Pedido de patente depositado. 2025.

Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR 10 2025 005731 0

Artigos publicados em periódicos

CORONA, R. R. B.; SAD, C. M. S.; RAMOS, R.; **FRANCO, L. G.**; SILVA, M.; CASTRO, E. V. R. Study of the stability of model emulsions mimicking petroleum with different types of non-ionic surfactants. CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN, v. 210, p. 47-58, 2024. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.08.022

PETRONI, M. H. O.; CORONA, R. R. B.; SAD, C. M. S.; RAMOS, R.; CASTRO, J. M.; **FRANCO, L. G.**; SILVA, M.; ELIAS, M. Z.; CASTRO, E. V. R. Role of asphaltenes and resins at the interface of petroleum emulsions (W/O): A literature review. Geoenergy Science and Engineering, v. 239, p. 212932, 2024. https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212932

Capítulo de livros publicado

KEMPIN, E., ROBERTI, J. T. A.; **FRANCO, L. G.**; RAMOS, R.. Engineering Aspects on Flow Similarity for Design Water-in-oil Emulsion Circuit. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 1ª Edição, Springer International Publishing, 2022, p. 255 - 265.

Trabalhos completos em congressos

ELIAS, M. Z.; **FRANCO, L. G.**; CORONA, R. R. B.; RAMOS, R.. Prediction of droplet size distribution subject to double consecutive constraint under viscous shear field using population balance equation. 2024. 8th Multiphase Flow Journey – JEM 2025/ABCM, São Carlos – SP.

ELIAS, M. Z.; **FRANCO, L. G.**; CORONA, R. R. B.; KEMPIN JUNIOR, E.; ROBERTI, J. T. A.; RAMOS, R. A comparison of droplet breakage in W/O emulsion flow induced by pumping and gas pressurization. 2023. 27th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2023/ABCM, Florianópolis/SC.

FRANCO, L. G.; ELIAS, M. Z.; CORONA, R. R. B.; KEMPIN JUNIOR, E.; ROBERTI, J. T. A.; RAMOS, R.; SIQUEIRA, R. Pressure drop analysis in emulsions flow.

2023. 27th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2023/ABCM, Florianópolis/SC.

CASTRO, J. M.; CORONA, R. R. B.; SAD, C. M. S.; PETRONI, M. H. O.; **FRANCO, L. G.;** ELIAS, M. Z.; KEMPIN JUNIOR, E.; ROBERTI, J. T. A.; RAMOS, R.; MARTINS JUNIOR, E. C. Homogeneidade e estabilidade de emulsões modelo (A/O) com diferentes tensoativos para simular emulsões de petróleo em ensaios laboratoriais. 62° Congresso Brasileiro de Química/ABQ, 2023, Natal/RN.

PETRONI, M. H. O.; CORONA, R. R. B.; SAD, C. M. S.; CASTRO, J. M.; **FRANCO, L. G.;** ELIAS, M. Z.; RAMOS, R.; KEMPIN JUNIOR, E.; ROBERTI, J. T. A.; MARTINS JUNIOR, E. C. Avaliação da tensão superficial e interfacial de um óleo com tensoativos para a formulação de emulsão (A/O) modelo similar ao petróleo médio. 62° Congresso Brasileiro de Química/ABQ, 2023, Natal/RN.

CORONA, R. R. B.; SAD, C. M. S.; PETRONI, M. H. O.; CASTRO, J. M.; **FRANCO, L. G.;** KEMPIN JUNIOR, E.; ROBERTI, J. T. A.; ELIAS, M. Z.; RAMOS, R.; MARTINS JUNIOR, E. C. Estudo do envelhecimento e reutilização de emulsão modelo A/O em testes de escoamento por batelada. 62° Congresso Brasileiro de Química/ABQ, 2023, Natal/RN.

Resumos em congressos

FRANCO, L. G., ELIAS, M. Z., CORONA, R. R. B., SIQUEIRA, R. N., RAMOS, R. Rheological characterisation of water-in-oil emulsions. XI Brazilian Conference on Rheology – BCR, 2026. Vitória/ES.

SOARES, R. O., CORONA, R. R. B., RAMOS, R., ELIAS, M. Z, **FRANCO, L. G**. Rheological Behavior Study of Model Oil and Crude Oil. XI Brazilian Conference on Rheology – BCR, 2026. Vitória/ES.

BORGES, L. R.; CORONA, R. R. B.; SAD, C. M. S.; SILVA, M.; ROSSI, J. M.; LOPES, D. L.; PAQUELI, B. F.; **FRANCO, L. G.**; CASTRO, E. V. R.; RAMOS, R. Estudo e seleção de um óleo modelo que imite o comportamento reológico de um petróleo. VIII ENCAQUI – ENCONTRO CAPIXABA DE QUÍMICA - SBQ/ES, 2021, Vitória/ES.

CASTRO, J. M.; CORONA, R. R. B.; SAD, C. M. S.; RAMOS, R.; PETRONI, M. H. O.; **FRANCO, L. G.**; SILVA, M.; CASTRO, E. V. R. Estudo da similaridade hidrodinâmica de óleo modelo com petróleo para a formação de emulsões A/O. IX ENCAQUI – Encontro Capixaba de Química - SBQ/ES, 2023, Vitória/ES.

PETRONI, M. H. O.; CORONA, R. R. B.; CASTRO, J. M.; RAMOS, R.; **FRANCO, L. G.**; SAD, C. M. S.; SILVA, M.; CASTRO, E. V. R. Estudo da homogeneidade e estabilidade de emulsões (A/O) modelo sob efeito da temperatura. IX ENCAQUI – Encontro Capixaba de Química - SBQ/ES, 2023, Vitória/ES.

Painel premiado

CASTRO, J. M.; CORONA, R. R. B.; SAD, C. M. S.; RAMOS, R.; PETRONI, M. H. O.; **FRANCO, L. G.**; SILVA, M.; CASTRO, E. V. R. Estudo da similaridade hidrodinâmica

de óleo modelo com petróleo para a formação de emulsões A/O. IX ENCAQUI – Encontro Capixaba de Química - SBQ/ES, 2023, Vitória/ES.

Orientações de trabalhos de conclusão de curso

Edimilson Kempin Júnior, Juliana Thomes Alves Roberti. Projeto de circuito de escoamento de emulsão em escala laboratorial para análise da quebra de gotas localizada. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo. Orientador: Rogério Ramos, Coorientadora: Ligia Gaigher Franco, 2021.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU-KASSEM, J. H.; ALI, S. M. Farouq. Modeling of Emulsion Flow In Porous Media. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, v. 34, n. 06, 1995.

ACRIVOS, Andreas; LO, T. S. Deformation and breakup of a single slender drop in an extensional flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 86, n. 4, p. 641–672, 1978.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural - 2025**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/arquivos-bmppgn/2025/dezembro.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2026a.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em: 5 abr. 2026b.

ALLEN, Terence. **Particle Size Measurement**. 4th Edition, Chapman & Hall, 1990.

ANGELI, Panagiota; HEWITT, Geoffrey F. Drop size distributions in horizontal oil-water dispersed flows. **Chemical Engineering Science**, v. 55, n. 16, p. 3133–3143, 2000.

ANTON PAAR. **DSA 5000M Reference Guide**, 2018.

ARIFFIN, Tajnor Suriya Taju; YAHYA, Effah; HUSIN, Hazlina. The Rheology of Light Crude Oil and Water-In-Oil-Emulsion. **Procedia Engineering**, v. 148, p. 1149–1155, 2016.

ARYAFARD, E.; FARSI, M.; RAHIMPOUR, M. R. Modeling and simulation of crude oil desalting in an industrial plant considering mixing valve and electrostatic drum. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 95, p. 383–389, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **Sandard Test Method for Water in Crude Oils by Potentiometric Karl Fischer Titration (D4377-00)**. ASTM International, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Practice for Determining Data Criteria and Processing for Liquid Drop Size Analysis (ASTM E799-03)**. ASTM International, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5002 – Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Crude Oils by Digital Density Analyzer.** ASTM International, 2019.

BENTLEY, B. J.; LEAL, L. G. An experimental investigation of drop deformation and breakup in steady, two-dimensional linear flows. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 167, p. 241–283, 1986.

BIGIO, David I.; SANGLI, Aditya N. A new measure for drop deformation in extensional flows at low Reynolds number. **Physics of Fluids**, v. 36, n. 2, p. 1–8, 2024.

BOXALL, John A. *et al.* Droplet Size Scaling of Water-in-Oil Emulsions under Turbulent Flow. **Langmuir**, v. 28, n. 1, p. 104–110, 2012.

BRASIL, Thiago A. *et al.* Microscope analysis and evaluation of the destabilization process of water-in-oil emulsions under application of electric field. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 27, n. 3, p. 873–881, 2020.

BRINKMAN, H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. **The Journal of Chemical Physics**, v. 20, n. 4, p. 571–571, 1952.

CHESTERS, A. K. Modelling of coalescence processes in fluid-liquid dispersions. A review of current understanding. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 69, n. 4, p. 259–227, 1991.

CHOUDHARY, Rajiv *et al.* Performance evaluation of a zwitterionic surfactant for the emulsification of an Indian heavy crude oil for pipeline transportation. **Fuel**, v. 405, p. 136547, 2026.

CLARIVATE. **Keyword Plus generation, creation, and changes**. Disponível em: <https://support.clarivate.com/ScientificandAcademicResearch/s/article/KeyWords-Plus-generation-creation-and-changes?language=en_US>. Acesso em: 9 abr. 2026.

CORONA, Rayane R. B. *et al.* Selecting a model fluid with properties similar to crude oil to test the formation of W/O emulsions. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 221, p. 111265, 2023.

CORONA, Rayane R. B. *et al.* Study of the stability of model emulsions mimicking petroleum with different types of non-ionic surfactants. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 210, p. 47–58, 2024.

COULALOGLOU, C. A.; TAVLARIDES, L. L. Description of interaction processes in agitated liquid-liquid dispersions. **Chemical Engineering Science**, v. 32, n. 11, p. 1289–1297, 1977.

DANDONG BETTERSIZE INSTRUMENTS LTD. **Laser Particle Size Analyzer - User's Manual**, 2020.

DAVIES, J. T. Drop sizes of emulsions related to turbulent energy dissipation rates. **Chemical Engineering Science**, v. 40, n. 5, p. 839–842, 1985.

EINSTEIN, A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. **Annalen der Physik**, v. 324, n. 2, p. 289–306, 1906.

EL-ASKARY, W. A. *et al.* Emulsion (Oil-in-Water) fluid flow in curved diffuser. **International Journal of Fluid Mechanics Research**, v. 40, n. 3, p. 204–226, 2013.

EL-HAMOUZ, A. M.; STEWART, A. C. On-Line Drop Size Distribution Measurement of Oil-Water Dispersion Using a Par-Tec M300 laser Backscatter Instrument. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, 1996.

EXXONMOBIL. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ): Mobil Hidráulico AW 68 HLP**. Disponível em: <https://www.mobilindustrial.com.br/media/2285/mobil-hidraulico-aw-68-hlp-msds_2018.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2026.

FOSSEN, Martin; SCHÜMANN, Heiner. Experimental study of the relative effect of pressure drop and flow rate on the droplet size downstream of a pipe restriction. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 38, n. 6, p. 826–831, 2017.

FOURNANTY, S. *et al.* Laminar Flow Emulsification Process to Control the Viscosity Reduction of Heavy Crude Oils. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 29, n. 10, p. 1355–1366, 2008.

GALINAT, S. *et al.* Drop break-up in turbulent pipe flow downstream of a restriction. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 23, p. 6511–6528, 2005.

GARCÍA-MASABET, Violeta *et al.* PLA/PA Bio-Blends: Induced morphology by extrusion. **Polymers**, v. 12, n. 1, 2020.

GRACE, Harold P. Dispersion phenomena in high viscosity immiscible fluid systems and application of static mixers as dispersion devices in such systems. **Chemical Engineering Communications**, v. 14, p. 225–288, 1982.

GRAHAM B. WALLIS. **One-dimensional Two-phase Flow**. Courier Dover Publications, 2020.

HESKETH, Robert P.; ETCHELLS, Arthur W.; RUSSELL, T. W. Fraser. Experimental Observations of Bubble Breakage in Turbulent Flow. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 30, n. 5, p. 835–841, 1991.

HINZE, J. O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. **AIChE Journal**, v. 1, n. 3, p. 289–295, 1955.

HO, Thao Minh *et al.* Emulsion characterization via microfluidic devices: A review on interfacial tension and stability to coalescence. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 299, p. 21, 2022.

JANSSEN, J. J. M. ;.; BOON, A;; AGTEROF, W. G. M. Droplet break-up in simple shear flow in the presence of emulsifiers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 91, p. 141–148, 1994.

JANSSEN, P. H.; HARRIS, C. K. Emulsion Characteristics of High Water-cut Oil Wells. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition** , 1998.

JANSSEN, P. H.; NOIK, C.; DALMAZZONE, C. Emulsion Formation in a Model Choke-valve. **Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, p. 1279–1290, 2001.

JOHN, Thomas P. *et al.* Predicting Droplet Size Distributions of Emulsions Produced in a Sonolator. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 59, n. 14, p. 6681–6695, 2020.

KAMP, Johannes; VILLWOCK, Jörn; KRAUME, Matthias. Drop coalescence in technical liquid/liquid applications: a review on experimental techniques and modeling approaches. **Reviews in Chemical Engineering**, v. 33, n. 1, p. 1–47, 2017.

KARABELAS, A. J. Droplet size spectra generated in turbulent pipe flow of dilute liquid-liquid dispersions. **AIChE Journal**, v. 24, n. 2, p. 170–180, 1978.

KARAM, H. J.; BELLINGER, J. C. Deformation and breakup of liquid droplets in a simple shear field. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 7, n. 4, p. 576–581, 1968.

KELEMEN, Katharina; SCHUCH, Anna C.; SCHUCHMANN, Heike P. Influence of Flow Conditions in High-Pressure Orifices on Droplet Disruption of Oil-in-Water Emulsions. **Chemical Engineering & Technology**, v. 37, n. 7, p. 1227–1234, 2014.

KELEŞOĞLU, Serkan; PETTERSEN, Bjørnar H.; SJÖBLOM, Johan. Characterization of Water-in-North Sea Acidic Crude Oil Emulsions by Means of Rheology, Droplet Size, and Laminar Flow in Pipeline. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 33, n. 4, p. 536–548, 2012.

KEMPIN, Edimilson *et al.* Engineering Aspects on Flow Similarity for Design Water-in-oil Emulsion Circuit. **Multiphase Flow Dynamics. Lecture Notes in Mechanical Engineering**. Springer, 2022. p. 255–265.

KHALIL, Mohamed F. *et al.* Energy losses of oil-in-water emulsions flow through pipe fittings using image processing. **International Review of Mechanical Engineering**, v. 5, n. 1, p. 143–163, 2011.

KOKAL, Sunil. Crude-oil emulsions: A state-of-the-art review. **SPE Production and Facilities**, v. 20, n. 1, p. 5–12, 2005.

LEAL, L. G. Flow induced coalescence of drops in a viscous fluid. **Physics of Fluids**, v. 16, n. 6, p. 1833–1851, 1 jun. 2004.

LEE, J. C.; HODGSON, T. D. Film flow and coalescence-I Basic relations, film shape and criteria for interface mobility. **Chemical Engineering Science**, v. 23, n. 11, p. 1375–1397, 1968.

LEMENAND, T. *et al.* Droplets formation in turbulent mixing of two immiscible fluids in a new type of static mixer. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 29, n. 5, p. 813–840, 2003.

LEMENAND, T. *et al.* Comparative efficiency of shear, elongation and turbulent droplet breakup mechanisms: Review and application. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 91, n. 12, p. 2587–2600, 2013.

LIAO, Yixiang; LUCAS, Dirk. A literature review on mechanisms and models for the coalescence process of fluid particles. **Chemical Engineering Science**, v. 65, n. 10, p. 2851–2864, 2010.

LIU, Shiping; LI, Dongming. Drop coalescence in turbulent dispersions. **Chemical Engineering Science**, v. 54, n. 23, p. 5667–5675, 1999.

LOVICK, J.; ANGELI, P. Droplet size and velocity profiles in liquid–liquid horizontal flows. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 15, p. 3105–3115, 2004.

LV, Yuling *et al.* Oil-Water Two-Phase Flow with Three Different Crude Oils: Flow Structure, Droplet Size and Viscosity. **Energies**, v. 17, n. 7, p. 1573, 2024.

MEGIAS-ALGUACIL, David *et al.* Droplet deformation under simple shear investigated by experiment, numerical simulation and modeling. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 126, n. 2- 3 SPEC. ISS., p. 153–161, 2005.

METROHM. **870 KF Titrino Plus**. Herisau, Switzerland, 5 dez. 2019. Disponível em: <https://www.metrohm.com/pt_br/products/2/8700/28700010.html>. Acesso em: 29 jun. 2026

MITRE, João 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**, v. 92, n. 11, p. 2493–2508, 2014.

NACCACHE, João Pedro Aiex *et al.* Production method of reference fluids intended for gravitational settlers' efficiency verification tests. **Physics of Fluids**, v. 33, n. 11, 2021.

OLIVEIRA, Marcia Cristina Khalil; GONÇALVES, Marcelo de Albuquerque Lima;; MARQUES, Luiz Carlos do Carmo. **Fundamentos de Garantia de Escoamento**. Editora Interciência, 2018.

OLIVEIRA, R. C. G.; GONÇALVES, M. A. L. Emulsion Rheology - Theory vs. Field Observation. **Offshore Technology Conference**, 2005.

PAOLINELLI, L. D.; RASHEDI, A.; YAO, J. Characterization of droplet sizes in large scale oil–water flow downstream from a globe valve. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 99, p. 132–150, 2018.

PAUL, Edward L.; ATIEMO-OBENG, Victor A.; KRESTA, Suzanne M. **Handbook of Industrial Mixing Science and Practice**. John Wiley & Sons, 2004.

PERCY, J. S.; SLEICHER, C. A. Drop breakup in the flow of immiscible liquids through an orifice in a pipe. **AIChE Journal**, v. 29, n. 1, p. 161–164, 1983.

PETRONI, Marcos Henrique O. *et al.* Role of asphaltenes and resins at the interface of petroleum emulsions (W/O): A literature review. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 239, n. October 2023, p. 212932, 2024.

PIMENTEL, Cláudio Benincá. **Uma Proposta para Medição In-line da Distribuição do Tamanho de Gotas em Escoamentos de Emulsões e seu Desempenho**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, 2024.

RAWLE, A. The importance of particle sizing to the coatings industry Part 1: Particle size measurement. **Advances in colour science and technology**, v. 5, p. 1–12, 2002.

RAYNER, Marilyn; DEJMEK, Petr. Scales and Forces in Emulsification. **Engineering Aspects of Food Emulsification and Homogenization**. CRC Press, 2015.

RODIONOVA, Galina *et al.* Preparation and characterization of reference fluid mimicking behavior of North Sea heavy crude oil. **Fuel**, v. 135, p. 308–314, 2014.

RODRIGUEZ, O. M. H. *et al.* Drop laden flows. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 191, p. 1–17, 1 out. 2025.

RØNNINGSEN, Hans Petter. Correlations for predicting Viscosity of W/O-Emulsions based on North Sea Crude Oils. **SPE International Symposium on Oilfield Chemistry**, 1995.

RUEGER, Paul E.; CALABRESE, Richard V. Dispersion of water into oil in a rotor-stator mixer. Part 1: Drop breakup in dilute systems. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 91, n. 11, p. 2122–2133, 2013.

SARBAR, M. A.; WINGROVE, M. D. Physical And Chemical Characterization Of Saudi Arabian Crude Oil Emulsions. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, 1997.

SCHÜMANN, Heiner; SIMONSEN, Galina; BREKKEN, Christian. Experimental investigation of the development of surfactant stabilized oil-water pipe flow downstream of a choke valve. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 224, p. 211599, 2023.

SHINNAR, Reuel. On the behaviour of liquid dispersions in mixing vessels. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 10, n. 02, p. 259, 1961.

SHINNAR, Reuel; CHURCH, James M. Statistical Theories of Turbulence in Predicting Particle Size in Agitated Dispersions. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 52, n. 3, p. 253–256, 1960.

SILVA, Fabricio S.; MEDRONHO, Ricardo A.; BARCA, Luiz Fernando. Experimental study of water droplet break up in water in oil dispersions using an apparatus that produces localized pressure drops. **Oil and Gas Science and Technology**, v. 74, 2019.

SILVA, Mayara *et al.* Study of the stability and homogeneity of water in oil emulsions of heavy oil. **Fuel**, v. 226, n. April, p. 278–285, 2018.

SIMMONS, M. J. H.; AZZOPARDI, B. J. Drop size distributions in dispersed liquid–liquid pipe flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 27, n. 5, p. 843–859, 2001.

SJÖBLOM, Johan *et al.* Our current understanding of water-in-crude oil emulsions. Recent characterization techniques and high pressure performance. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 100–102, n. SUPPL., p. 399–473, 2003.

SLEICHER, C. A. Maximum stable drop size in turbulent flow. **AIChE Journal**, v. 8, n. 4, p. 471–477, 1962.

SOUZA, Marcos Aurélio. **Estudo experimental da evolução da fase dispersa em emulsões de petróleo visando controle de escoamento com menor potencial de emulsificação**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), 2024.

STONE, H. A.; LEAL, L. G. The influence of initial deformation on drop breakup in subcritical time-dependent flows at low Reynolds numbers. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 206, p. 223–263, 1989.

SURFACE ELECTRO OPTICS. **SEO Phoenix-MT(M)**. Disponível em: <https://www.s-eo.com/product/pro_view?page=1&cate1=1&itserial=51>. Acesso em: 29 jun. 2026.

TAYLOR, G. I. The viscosity of a fluid containing small drops of another fluid. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A**, v. 138, n. 834, p. 41–48,. 1932.

TAYLOR, G. I. The Formation of Emulsions in Definable Fields of Flow. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A**, v. 146, n. 858, p. 501–523, 1934.

TAYLOR, John Robert. **Introduction to Error Analysis**. 2nd. ed. California: University Science Books, 1997.

TCHOLAKOVA, Slavka *et al.* Efficient Emulsification of Viscous Oils at High Drop Volume Fraction. **Langmuir**, v. 27, n. 24, p. 14783–14796, 2011.

TCHOLAKOVA, Slavka; POLITOVA, Nadya; DENKOV, Nikolai. Kinetics of Drop Breakage and Drop-Drop Coalescence in Turbulent Flow. **Biomath Communications**, v. 3, n. 1, p. 1–11, 2016.

THERMO SCIENTIFIC. **HAAKE MARS Rheometer Instruction Manual**. 2014.

THOMAS, David G. Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles. **Journal of Colloid Science**, v. 20, n. 3, p. 267–277, 1965.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2º ed., Rio de Janeiro, 2004.

TRALLERO, J. L.; SARICA, Cem; BRILL, J. P. A Study of Oil/Water Flow Patterns in Horizontal Pipes. **SPE Production & Facilities**, v. 12, n. 03, p. 165–172, 1997.

TSOURIS, C.; TAVLARIDES, L. L. Breakage and coalescence models for drops in turbulent dispersions. **AIChE Journal**, v. 40, n. 3, p. 395–406, 1994.

VAN DER ZANDE, M. J. *et al.* Effect of flow through a choke valve on emulsion stability. **Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, v. 2, 1999.

VAN DER ZANDE, Marc; VAN DEN BROEK, W. M. G. T. Break-up of oil droplets in the production system. **Proceedings of ASME Energy Sources Technology Conference and Exhibition**, 1998.

VANKOVA, Nina *et al.* Emulsification in turbulent flow. 1. Mean and maximum drop diameters in inertial and viscous regimes. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 312, n. 2, p. 363–380, 2007.

VOULGAROPOULOS, Victor; ANGELI, Panagiota. Optical measurements in evolving dispersed pipe flows. **Experiments in Fluids**, v. 58, n. 12, p. 170, 2017.

WALSH, John M. The Savvy Separator Series: Part 5. The Effect of Shear on Produced Water Treatment. **Oil and Gas Facilities**, v. 5, n. 01, p. 16–23, 2016.

WALSTRA, Pieter. Principles of emulsion formation. **Chemical Engineering Science**, v. 48, n. 2, p. 333–349, 1993.

WINDHAB, E. J. *et al.* Emulsion processing—from single-drop deformation to design of complex processes and products. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 8–9, p. 2101–2113, 2005.

YAO, Junyi *et al.* The Effect of Oil Viscosity on Droplet Generation Rate and Droplet Size in a T-Junction Microfluidic Droplet Generator. **Micromachines**, v. 10, n. 12, p. 808, 2019.

APÊNDICE 1 – DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS EMULSÕES NOVAS, REUTILIZADAS E COM PERÍODO DE AGITAÇÃO VARIÁVEL

Tabela 26 - Diâmetros característicos das emulsões novas (EN), produzidas sem a diluição do surfactante

Fluido	%H2O	Amostra	$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	D_{v10}	D_{v50}	D_{v90}	D_{v95}	D_{v99}	D_{dev}	*span*
A-EN	6,7 ± 0,2	R1	7,5	3,5	1,7	4,1	18,5	22,6	29,1	0,6	4,1
		R2	7,0	2,7	1,2	3,4	17,7	22,5	31,9	0,7	4,9
		R3	6,6	2,5	1,1	3,1	17,0	21,8	31,2	0,7	5,1
		Média	**7,0**	**2,9**	**1,3**	**3,5**	**17,8**	**22,3**	**30,8**	**0,7**	**4,7**
		Desvio Padrão	0,48	0,53	0,28	0,49	0,75	0,42	1,44	0,07	0,50
		Desvio Padrão Relativo	6,9%	18,4%	21,2%	13,8%	4,2%	1,9%	4,7%	10,0%	10,5%
B-EN	12,5 ± 0,3	R1	9,8	2,7	1,1	4,4	25,3	30,5	40,2	0,8	5,6
		R2	10,0	2,8	1,1	4,4	25,5	30,6	40,2	0,8	5,5
		R3	10,2	2,9	1,1	5,0	25,7	31,0	40,6	0,8	4,9
		Média	**10,0**	**2,8**	**1,1**	**4,6**	**25,5**	**30,7**	**40,3**	**0,8**	**5,3**
		Desvio Padrão	0,20	0,07	0,02	0,35	0,25	0,25	0,21	0,00	0,35
		Desvio Padrão Relativo	2,0%	2,5%	2,0%	7,5%	0,9%	0,8%	0,5%	-	6,5%
C-EN	18,5 ± 0,3	R1	11,9	3,2	1,2	7,9	28,7	33,7	42,4	0,9	3,5
		R2	13,1	3,1	1,1	8,7	30,9	37,3	52,8	0,9	3,4
		R3	12,7	3,2	1,2	8,3	30,8	37,0	48,6	0,9	3,6
		Média	**12,6**	**3,2**	**1,2**	**8,3**	**30,1**	**36,0**	**47,9**	**0,9**	**3,5**
		Desvio Padrão	0,63	0,04	0,02	0,36	1,26	2,01	5,22	0,00	0,08
		Desvio Padrão Relativo	5,0%	1,2%	2,0%	4,3%	4,2%	5,6%	10,9%	-	2,2%
D-EN	22,5 ± 0,3	R1	17,5	3,7	1,4	13,2	41,2	49,4	66,3	0,9	3,0
		R2	17,1	3,5	1,3	12,1	41,1	49,0	64,3	0,9	3,3
		R3	18,2	3,4	1,2	13,3	43,3	51,9	68,4	0,9	3,2
		Média	**17,6**	**3,6**	**1,3**	**12,8**	**41,9**	**50,1**	**66,3**	**0,9**	**3,2**
		Desvio Padrão	0,55	0,16	0,08	0,64	1,26	1,58	2,04	0,00	0,13
		Desvio Padrão Relativo	3,1%	4,6%	6,3%	4,9%	3,0%	3,2%	3,1%	-	4,1%

Tabela 27 – Diâmetros característicos das emulsões reutilizadas (ER), produzidas a partir da diluição do surfactante

Fluido	%H2O	Amostra	$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	D_{v10}	D_{v50}	D_{v90}	D_{v95}	D_{v99}	D_{dev}	*span*
A-ER	7,0 ± 0,1	R1	3,1	2,1	1,2	2,6	5,8	7,0	9,3	0,6	1,8
		R2	3,1	2,2	1,2	2,6	5,7	6,8	9,1	0,6	1,7
		R3	3,1	2,2	1,2	2,5	5,7	7,0	9,3	0,6	1,8
		Média	**3,1**	**2,2**	**1,2**	**2,6**	**5,7**	**7,0**	**9,2**	**0,6**	**1,8**
		Desvio Padrão	0,02	0,01	0,02	0,02	0,07	0,11	0,11	0,01	0,02
		Desvio Padrão Relativo	0,7%	0,3%	1,4%	0,8%	1,2%	1,6%	1,2%	2,1%	1,4%
B-ER	12,7 ± 0,2	R1	4,3	2,3	1,2	2,7	10,0	12,4	17,1	0,6	3,3
		R2	4,2	2,3	1,2	2,7	10,0	12,4	17,3	0,6	3,3
		R3	4,3	2,2	1,1	2,6	10,2	12,7	17,7	0,6	3,4
		Média	**4,3**	**2,3**	**1,1**	**2,7**	**10,1**	**12,5**	**17,4**	**0,6**	**3,3**
		Desvio Padrão	0,03	0,02	0,01	0,03	0,14	0,19	0,26	0,01	0,06
		Desvio Padrão Relativo	0,7%	0,8%	1,2%	1,0%	1,4%	1,5%	1,5%	0,9%	2,6%
C-ER	18,8 ± 0,4	R1	7,7	2,7	1,2	3,9	18,9	22,9	31,3	0,8	4,5
		R2	7,9	2,7	1,2	4,1	19,5	23,8	32,3	0,8	4,5
		R3	8,4	2,8	1,2	4,5	20,7	25,1	33,3	0,8	4,3
		Média	**8,0**	**2,7**	**1,2**	**4,2**	**19,7**	**24,0**	**32,3**	**0,8**	**4,4**
		Desvio Padrão	0,39	0,05	0,00	0,33	0,91	1,13	1,04	0,02	0,13
		Desvio Padrão Relativo	4,9%	1,8%	0,4%	7,8%	4,6%	4,7%	3,2%	2,6%	2,9%
D-ER	22,9 ± 0,5	R1	15,5	3,6	1,2	13,3	34,9	41,0	52,4	0,9	2,5
		R2	14,5	3,3	1,2	10,1	34,6	41,3	54,1	0,9	3,3
		R3	12,8	3,1	1,2	8,5	30,6	36,6	48,0	0,9	3,5
		Média	**14,3**	**3,3**	**1,2**	**10,6**	**33,4**	**39,6**	**51,5**	**0,9**	**3,1**
		Desvio Padrão	1,40	0,24	0,04	2,44	2,42	2,65	3,13	0,02	0,50
		Desvio Padrão Relativo	9,8%	7,1%	3,4%	23,0%	7,2%	6,7%	6,1%	2,2%	16,1%

Tabela 28 - Diâmetros característicos das emulsões produzidas com período de agitação variável (EPV)

Fluido	%H2O	Amostra	$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	D_{v10}	D_{v50}	D_{v90}	D_{v95}	D_{v99}	D_{dev}	*span*
A-EPV (4 min)	8,0 ± 0,1	P1 = 0 min	5,7	2,4	1,1	3,0	14,4	18,0	25,1	0,7	4,5
		P2 = 20 min	5,6	2,4	1,2	2,9	14,1	17,8	25,1	0,6	4,5
		P3 = 40 min	5,8	2,5	1,2	3,0	14,6	18,3	25,6	0,7	4,5
		P4 = 60 min	6,1	2,6	1,2	3,2	15,3	19,1	26,1	0,7	4,4
		Média	**5,8**	**2,5**	**1,2**	**3,0**	**14,6**	**18,3**	**25,5**	**0,7**	**4,5**
		Desvio Padrão	0,22	0,07	0,03	0,12	0,50	0,59	0,49	0,01	0,04
		Desvio Padrão Relativo	3,9%	2,8%	2,3%	4,1%	3,5%	3,2%	1,9%	2,1%	0,9%
B-EPV (8 min)	14,3 ± 0,3	P1 = 0 min	7,3	2,6	1,1	3,3	19,0	23,2	31,9	0,7	5,4
		P2 = 20 min	8,5	2,7	1,1	4,1	21,3	25,7	34,2	0,8	4,9
		P3 = 40 min	8,2	2,6	1,1	3,7	21,1	25,6	34,2	0,8	5,4
		P4 = 60 min	9,2	2,9	1,2	4,8	22,6	27,2	35,7	0,8	4,4
		Média	**8,3**	**2,7**	**1,1**	**4,0**	**21,0**	**25,5**	**34,0**	**0,8**	**5,0**
		Desvio Padrão	0,77	0,16	0,04	0,64	1,51	1,65	1,55	0,04	0,44
		Desvio Padrão Relativo	9,3%	5,9%	3,7%	16,0%	7,2%	6,5%	4,6%	4,9%	8,8%
C-EPV (12 min)	20,8 ± 0,2	P1 = 0 min	14,3	3,3	1,2	11,4	32,9	38,7	50,3	0,9	2,8
		P2 = 20 min	18,1	3,4	1,2	11,9	44,6	54,1	74,4	0,9	3,6
		P3 = 40 min	14,3	3,2	1,2	8,5	35,5	42,3	55,2	0,9	4,0
		P4 = 60 min	15,1	3,2	1,2	8,9	37,6	45,6	60,7	0,9	4,1
		Média	**15,5**	**3,3**	**1,2**	**10,2**	**37,6**	**45,2**	**60,1**	**0,9**	**3,6**
		Desvio Padrão	1,83	0,10	0,03	1,76	5,04	6,56	10,41	0,02	0,62
		Desvio Padrão Relativo	11,8%	3,0%	2,2%	17,3%	13,4%	14,5%	17,3%	1,7%	16,9%

Tabela 28 - Diâmetros característicos das emulsões produzidas com período de agitação variável (EPV) (Continuação)

Fluido	%H2O	Amostra	$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	D_{v10}	D_{v50}	D_{v90}	D_{v95}	D_{v99}	D_{dev}	*span*
D-EPV (16 min)	26,0 ± 0,7	P1 = 0 min	18,9	4,0	1,4	16,4	41,8	49,8	66,4	0,9	2,5
		P2 = 20 min	17,3	3,5	1,2	12,2	41,8	50,8	68,2	0,9	3,3
		P3 = 40 min	19,2	3,7	1,3	13,4	46,8	57,7	79,5	0,9	3,4
		P4 = 60 min	18,4	3,6	1,3	12,6	45,3	54,6	72,4	0,9	3,5
		Média	**18,5**	**3,7**	**1,3**	**13,6**	**43,9**	**53,2**	**71,6**	**0,9**	**3,2**
		Desvio Padrão	0,84	0,22	0,06	1,89	2,54	3,61	5,85	0,01	0,47
		Desvio Padrão Relativo	4,5%	5,9%	4,5%	13,9%	5,8%	6,8%	8,2%	0,9%	14,9%

APÊNDICE 2 - DADOS EXPERIMENTAIS DO BANCO DE TESTES

Tabela 29 - Diâmetros característicos emulsões no tanque de armazenamento inferior

Teste ID	Local	$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	D_{v50}	D_{v95}	D_{v99}	*Span*	D_{dev}
T1_W05	Fundo	9,6	3,1	4,5	32,9	45,1	5,5	0,80
	Meio	10,4	2,8	3,8	41,9	67,9	8,0	0,76
	Superfície	9,6	2,7	4,0	36,5	51,8	6,9	0,79
T2_W05	Fundo	14,3	3,6	8,0	46,4	71,3	4,3	0,89
	Meio	16,8	3,9	10,0	52,3	76,2	4,0	0,91
	Superfície	13,0	3,6	7,4	41,6	59,0	4,3	0,87
T3_W05	Fundo	9,8	3,0	6,1	29,1	39,0	3,7	0,85
	Meio	11,7	3,7	9,4	31,3	40,6	2,6	0,90
	Superfície	11,3	4,5	8,8	29,6	39,2	2,6	0,86
T4_W05	Fundo	19,3	3,7	8,6	86,5	142,7	6,2	0,87
	Meio	20,1	4,0	8,8	90,5	145,4	6,4	0,86
	Superfície	17,5	3,6	7,6	79,1	134,9	6,1	0,85
T5_W05	Fundo	17,5	4,0	8,9	73,3	124,1	5,1	0,86
	Meio	17,5	4,0	8,9	73,2	124,6	5,1	0,86
	Superfície	15,8	5,1	9,6	56,1	105,1	3,6	0,84
T6_W05	Fundo	14,3	4,0	9,3	50,0	103,5	3,2	0,87
	Meio	16,4	4,7	10,8	58,6	115,5	3,1	0,88
	Superfície	18,3	7,2	10,9	65,2	110,9	3,7	0,79
T7_W05	Fundo	14,7	3,9	9,7	49,4	106,8	3,0	0,89
	Meio	14,7	3,9	9,4	51,4	110,1	3,1	0,88
	Superfície	14,0	4,0	9,4	47,0	97,9	3,0	0,87
T8_W05	Fundo	14,6	3,9	9,6	51,3	107,4	3,1	0,88
	Meio	14,0	3,9	9,6	46,9	95,9	3,0	0,89
	Superfície	17,3	5,2	12,2	56,6	110,8	2,8	0,90

Tabela 29 - Diâmetros característicos emulsões no tanque de armazenamento inferior (Continuação)

Teste ID	Local	$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	D_{v50}	D_{v95}	D_{v99}	*Span*	D_{dev}
T9_W10	Fundo	50,3	6,7	25,4	165,8	230,7	5,1	0,96
	Meio	58,5	8,1	36,6	177,4	248,6	3,8	0,97
	Superfície	37,6	6,5	18,7	131,8	194,4	5,3	0,94
T10_W10	Fundo	31,4	6,5	21,5	99,8	155,5	3,3	0,96
	Meio	34,5	6,8	24,1	107,9	163,2	3,3	0,96
	Superfície	33,4	7,5	22,4	107,9	163,5	3,4	0,95
T11_W10	Fundo	26,1	5,2	17,1	90,3	149,6	3,5	0,95
	Meio	26,0	5,5	17,8	85,3	132,2	3,3	0,95
	Superfície	27,2	5,7	18,1	91,8	149,6	3,4	0,95
T12_W10	Fundo	26,6	5,8	17,9	89,3	146,0	3,3	0,95
	Meio	25,7	5,8	17,4	87,3	144,8	3,3	0,94
	Superfície	28,1	8,4	20,0	88,3	134,7	3,0	0,94
T13_W10	Fundo	28,8	6,2	20,5	95,7	155,3	3,0	0,96
	Meio	29,5	6,6	21,4	94,4	152,2	2,9	0,96
	Superfície	29,2	7,2	21,0	94,6	154,0	2,9	0,95
T14_W10	Fundo	23,9	5,8	17,0	76,5	124,7	3,0	0,94
	Meio	27,8	5,9	19,2	93,2	151,9	3,2	0,95
	Superfície	34,4	8,4	25,3	105,2	161,9	2,9	0,96
T15_W10	Fundo	26,9	6,0	20,1	83,4	131,1	2,8	0,95
	Meio	25,9	6,0	19,3	81,8	131,2	2,8	0,95
	Superfície	26,0	6,3	19,3	81,4	139,1	2,7	0,95
T16_W10	Fundo	27,5	5,8	18,7	91,7	150,7	3,3	0,95
	Meio	28,6	6,0	19,7	94,2	152,0	3,2	0,95
	Superfície	27,1	5,9	18,5	90,9	150,7	3,2	0,95

Tabela 29 - Diâmetros característicos emulsões no tanque de armazenamento inferior (Continuação)

Teste ID	Local	$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	D_{v50}	D_{v95}	D_{v99}	*Span*	D_{dev}
T17_W10	Fundo	24,7	5,6	18,0	79,2	128,4	2,9	0,95
	Meio	25,5	5,8	18,5	82,0	130,9	2,9	0,95
	Superfície	31,7	7,4	22,9	97,6	154,5	3,0	0,96
T18_W10	Fundo	23,6	5,5	17,2	76,8	127,3	2,9	0,94
	Meio	28,5	6,4	20,4	92,1	149,3	3,0	0,95
	Superfície	30,1	7,1	21,6	96,1	155,6	3,0	0,96
T19_W15	Fundo	56,9	9,6	34,7	176,5	250,2	3,9	0,97
	Meio	52,4	9,1	35,3	157,1	222,2	3,4	0,97
	Superfície	53,8	10,3	34,4	162,0	227,2	3,6	0,97
T20_W15	Fundo	48,2	8,9	34,4	142,0	206,6	3,1	0,97
	Meio	43,1	9,0	32,1	125,7	178,4	3,0	0,97
	Superfície	45,9	19,9	36,5	115,9	150,2	2,3	0,92
T21_W15	Fundo	37,0	7,9	28,7	104,3	144,5	2,8	0,97
	Meio	40,4	7,8	28,6	123,9	190,9	3,2	0,97
	Superfície	37,6	7,8	27,3	114,3	169,8	3,1	0,97
T22_W15	Fundo	43,1	9,0	31,9	124,9	177,4	3,0	0,97
	Meio	42,3	8,9	32,7	117,2	164,5	2,8	0,97
	Superfície	46,5	11,8	36,0	127,2	174,9	2,7	0,97
T23_W15	Fundo	43,5	11,1	35,3	113,0	147,6	2,5	0,97
	Meio	45,6	9,3	34,0	130,9	198,0	2,9	0,97
	Superfície	47,0	11,5	35,7	130,6	197,8	2,7	0,97
T24_W15	Fundo	34,9	7,7	26,1	106,0	163,0	2,8	0,96
	Meio	35,8	8,3	27,4	105,7	161,4	2,7	0,97
	Superfície	34,6	8,4	26,2	102,4	160,1	2,7	0,96

Tabela 29 - Diâmetros característicos emulsões no tanque de armazenamento inferior (Continuação)

Teste ID	Local	$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	D_{v50}	D_{v95}	D_{v99}	*Span*	D_{dev}
T25_W15	Fundo	51,1	10,2	36,1	150,6	216,2	3,2	0,97
	Meio	42,8	9,3	32,4	121,3	172,6	2,8	0,97
	Superfície	50,8	10,7	36,4	147,7	213,3	3,0	0,97
T26_W15	Fundo	37,8	8,3	29,0	110,0	164,0	2,8	0,97
	Meio	33,4	7,2	24,9	101,3	159,1	2,9	0,96
	Superfície	39,7	10,0	31,0	111,3	164,5	2,6	0,97
T27_W20	Fundo	53,8	12,5	46,3	132,2	175,7	2,3	0,97
	Meio	56,1	13,6	49,3	135,9	175,7	2,2	0,96
	Superfície	69,9	28,7	65,1	143,3	180,9	1,6	0,96
T28_W20	Fundo	69,4	14,2	55,6	179,5	233,8	2,6	0,98
	Meio	68,0	15,5	56,1	169,6	224,9	2,4	0,98
	Superfície	67,1	13,8	54,0	173,5	228,9	2,5	0,98
T29_W20	Fundo	71,1	14,4	57,1	185,9	259,4	2,5	0,98
	Meio	83,6	15,4	50,0	260,5	670,2	3,0	0,97
	Superfície	60,8	14,1	46,8	162,5	222,0	2,7	0,97
T30_W20	Fundo	58,2	13,8	47,8	144,6	186,2	2,4	0,98
	Meio	62,7	15,0	51,7	155,6	204,2	2,3	0,98
	Superfície	62,9	16,8	52,8	152,6	202,1	2,2	0,98
T31_W20	Fundo	59,2	12,2	47,5	152,4	194,0	2,6	0,97
	Meio	51,1	11,0	39,5	137,6	181,4	2,8	0,97
	Superfície	54,5	11,9	42,3	144,8	187,5	2,8	0,97
T32_W20	Fundo	52,0	11,6	40,7	140,6	184,7	2,7	0,97
	Meio	55,6	13,1	45,7	140,9	183,8	2,4	0,97
	Superfície	64,2	14,4	53,0	161,3	215,9	2,4	0,98
T33_W20	Fundo	59,6	13,8	48,7	151,5	207,8	2,4	0,98
	Meio	66,3	14,1	56,2	161,2	212,6	2,2	0,98
	Superfície	58,4	13,7	47,1	151,2	208,8	2,4	0,98

Tabela 30 - Dados médios do banco de testes

Teste ID	TIT-1 [°C]	TIT-2 [°C]	PIT-1 [bar]	PIT-2 [bar]	PIT-3 [bar]	PIT-4 [bar]	PT-01 [bar]	PT-2 [bar]	FT-1 [kg/min]	Densidade [kg/m³]
1	24,4	26,1	3,95	3,25	1,82	1,00	0	6,06	29,17	882,78
2	22,0	22,8	4,03	3,31	1,83	1,00	0	6,14	26,37	878,89
3	22,3	22,9	4,79	3,98	2,22	1,27	0	7,28	30,61	878,80
4	23,5	24,3	4,06	3,34	1,87	1,03	0	6,27	29,11	877,76
5	22,9	23,4	2,19	1,75	1,00	0,45	0	3,20	14,15	878,68
5	22,9	23,5	2,98	2,42	1,36	0,68	0	4,45	20,00	878,05
6	25,0	26,2	1,54	1,20	0,72	0,27	0	2,17	10,19	878,61
7	26,6	28,6	2,38	1,91	1,11	0,53	0	3,53	18,77	877,48
8	25,1	24,1	3,04	2,48	1,40	0,72	0	4,48	21,04	877,03
9	24,2	25,4	2,32	1,86	1,07	0,50	0	3,34	14,50	885,14
10	25,2	26,7	2,24	1,80	1,03	0,48	0	3,22	14,47	884,93
11	27,5	29,0	1,88	1,49	0,87	0,38	0	2,70	13,91	882,89
12	24,3	25,3	1,85	1,46	0,86	0,36	0	2,62	11,28	884,62
13	25,1	25,8	2,58	2,09	1,19	0,58	0	3,75	17,10	883,88
14	24,9	24,9	2,43	1,96	1,12	0,53	0	3,49	15,42	885,81
15	25,7	26,9	2,07	1,65	0,96	0,42	0	2,97	13,95	883,73
16	26,7	27,3	1,66	1,30	0,77	0,31	0	2,33	11,09	884,09
17	28,3	29,7	2,45	1,98	1,15	0,56	0	3,61	19,42	882,49
18	26,2	27,3	2,50	2,02	1,16	0,57	0	3,65	17,64	883,48

Tabela 30 - Dados médios do banco de testes (Continuação)

Teste ID	TIT-1 [°C]	TIT-2 [°C]	PIT-1 [bar]	PIT-2 [bar]	PIT-3 [bar]	PIT-4 [bar]	PT-01 [bar]	PT-2 [bar]	FT-1 [kg/min]	Densidade [kg/m³]
19	27,4	26,2	2,17	1,74	1,00	0,47	0	3,07	13,81	889,94
20	26,3	25,4	2,21	1,77	1,02	0,47	0	3,17	13,69	888,85
21	23,5	25,3	2,82	2,29	1,29	0,65	0	4,08	16,17	892,30
22	25,1	26,6	2,29	1,84	1,05	0,49	0	3,28	13,97	892,14
23	26,7	27,5	2,04	1,62	0,94	0,42	0	2,90	13,32	889,75
24	27,5	28,0	1,83	1,45	0,85	0,36	0	2,58	12,11	887,76
25	26,7	27,4	1,87	1,48	0,87	0,37	0	2,64	11,92	891,57
26	27,7	29,4	1,71	1,34	0,80	0,33	0	2,42	11,80	886,89
27	24,8	24,4	2,55	2,06	1,17	0,56	0	3,62	13,22	898,42
28	22,9	24,2	3,25	2,65	1,47	0,75	0	4,66	15,96	901,74
29	26,6	28,3	3,10	2,52	1,42	0,72	0	4,53	19,04	898,96
30	27,0	28,4	3,76	3,09	1,73	0,94	0	5,67	23,80	897,73
31	28,1	29,1	2,20	1,76	1,01	0,46	0	3,13	13,82	898,15
32	23,7	25,5	3,30	2,69	1,50	0,77	0	4,80	17,40	899,83
33	27,1	28,2	3,27	2,67	1,50	0,78	0	4,78	20,58	900,92

Tabela 31 - Diâmetros característicos de emulsões em escoamento vertical ascendente

Teste ID	$D_{[3,2]}$ E1	$D_{[3,2]}$ E2	$D_{[4,3]}$ E1	$D_{[4,3]}$ E2	D_{v50} E1	D_{v50} E2	D_{v95} E1	D_{v95} E2	D_{v99} E1	D_{v99} E2
1	2,9	2,4	10,2	6,7	5,7	3,3	30,9	22,7	40,5	32,3
2	2,5	2,2	6,0	4,9	3,4	2,8	19,1	16,7	26,5	25,1
3	2,2	2,1	4,1	3,8	2,8	2,7	11,8	11,0	17,2	16,7
4	2,6	2,4	5,1	4,7	3,3	3,1	15,0	14,5	20,4	20,2
5	3,5	2,8	11,2	8,0	6,1	3,9	40,4	27,5	91,2	61,0
5	2,6	2,4	6,5	4,6	3,5	3,0	19,9	13,9	47,8	19,9
6	3,2	2,9	9,5	7,8	5,7	4,0	33,2	24,3	67,0	56,2
7	2,7	2,5	7,0	6,0	3,5	3,1	21,3	18,8	52,4	45,2
8	2,9	2,5	7,4	6,2	4,0	3,2	22,9	19,1	54,0	51,7
9	4,2	3,8	21,5	19,5	11,7	10,2	77,5	72,5	124,7	120,8
10	3,8	3,4	15,6	13,3	9,4	7,1	55,1	47,8	111,1	100,3
11	3,8	3,5	14,8	13,8	9,7	8,5	50,3	47,1	100,8	99,1
12	4,0	3,9	14,8	14,7	10,0	9,8	49,7	48,7	107,8	106,6
13	3,4	3,3	11,7	12,8	7,4	7,5	39,6	45,0	83,6	106,4
14	3,6	3,5	12,6	12,7	8,1	7,9	42,7	43,5	96,2	95,9
15	3,4	3,5	13,1	15,1	8,3	8,1	45,6	65,8	96,8	120,1
16	4,0	3,8	15,0	13,9	10,6	9,0	47,9	47,5	100,8	105,8
17	3,6	3,3	13,2	11,3	8,3	6,4	46,5	39,3	103,5	92,8
18	4,0	3,4	14,2	13,0	10,1	8,0	45,7	45,4	95,5	102,8

Tabela 31 - Diâmetros característicos de emulsões em escoamento vertical ascendente (Continuação)

Teste ID	$D_{[3,2]}$ E1	$D_{[3,2]}$ E2	$D_{[4,3]}$ E1	$D_{[4,3]}$ E2	D_{v50} E1	D_{v50} E2	D_{v95} E1	D_{v95} E2	D_{v99} E1	D_{v99} E2
19	5,8	5,3	26,7	24,0	17,2	15,7	89,9	80,5	145,6	127,1
20	4,4	4,4	19,4	18,5	12,8	12,6	69,9	63,6	120,7	115,5
21	4,2	3,6	18,3	13,8	12,7	9,1	62,6	47,3	120,4	97,9
22	4,7	4,3	19,0	17,1	13,6	12,3	63,1	55,1	120,1	108,5
23	5,0	4,6	19,8	17,9	14,3	12,9	64,7	58,9	121,6	115,5
24	4,8	4,7	18,7	19,2	14,1	13,7	57,6	63,6	109,4	120,2
25	5,2	4,7	20,4	19,0	15,0	13,4	64,5	63,3	120,5	122,0
26	4,8	4,4	16,2	17,4	13,3	12,3	43,7	57,2	75,9	114,6
27	5,7	5,6	25,5	25,0	19,4	18,2	79,7	83,2	135,0	145,0
28	5,7	5,2	22,7	21,2	17,4	15,5	69,4	71,4	124,8	126,8
29	6,2	5,5	22,7	22,8	19,8	17,0	56,3	72,9	83,0	125,4
30	5,7	4,7	24,9	19,9	17,4	14,3	86,0	67,2	149,1	122,3
31	6,6	6,3	30,0	27,5	21,3	20,5	102,9	88,4	164,2	150,7
32	5,5	5,7	19,4	24,9	16,8	17,9	49,5	82,4	74,1	130,9
33	6,6	6,0	28,5	24,8	21,9	18,7	87,3	78,8	134,9	129,1

Tabela 32 - Diâmetros característicos de emulsões em escoamento horizontal

Teste ID	$D_{[3,2]}$ E3	$D_{[3,2]}$ E4	$D_{[4,3]}$ E3	$D_{[4,3]}$ E4	D_{v50} E3	D_{v50} E4	D_{v95} E3	D_{v95} E4	D_{v99} E3	D_{v99} E4
1	2,8	2,9	9,2	9,0	4,9	4,6	28,9	28,8	38,8	38,8
2	2,2	2,5	4,7	5,2	2,7	3,1	16,0	16,8	24,5	25,1
3	2,1	2,3	3,7	3,9	2,6	2,8	10,7	11,1	16,9	16,7
4	2,3	2,5	4,4	6,2	2,9	3,1	13,7	19,4	19,7	47,6
5	2,6	2,8	6,3	7,5	3,3	3,7	19,6	24,6	46,0	55,2
5	2,4	2,6	4,3	4,8	2,9	3,3	13,3	14,3	19,3	20,2
6	3,0	3,1	8,2	8,5	4,2	4,6	26,1	27,5	59,3	63,1
7	2,5	2,7	6,2	6,7	3,1	3,4	18,9	20,2	48,2	51,6
8	2,6	2,6	5,9	6,3	3,2	3,2	18,0	18,9	45,2	51,2
9	3,6	3,9	17,4	18,9	7,9	10,0	68,4	70,4	121,2	122,3
10	3,5	3,9	13,6	15,2	7,5	9,7	48,2	52,3	99,2	106,0
11	3,5	3,6	13,1	13,7	7,6	8,5	46,3	47,0	98,8	98,9
12	3,6	3,9	13,3	14,7	8,3	9,9	45,6	48,3	100,1	104,2
13	3,2	3,5	10,2	12,2	5,4	7,4	35,2	41,8	81,7	100,8
14	3,4	3,6	12,1	12,7	7,0	8,1	43,1	42,9	98,4	96,8
15	3,8	3,7	15,0	12,4	8,7	8,1	59,7	41,5	114,5	95,5
16	3,9	4,3	15,0	16,4	9,9	11,4	50,0	53,8	107,5	112,1
17	3,5	3,5	11,7	11,3	7,2	7,1	39,4	37,6	91,7	88,6
18	3,5	3,5	12,3	12,0	7,3	7,3	42,8	41,3	97,4	95,5

Tabela 32 - Diâmetros característicos de emulsões em escoamento horizontal (Continuação)

Teste ID	$D_{[3,2]}$ E3	$D_{[3,2]}$ E4	$D_{[4,3]}$ E3	$D_{[4,3]}$ E4	D_{v50} E3	D_{v50} E4	D_{v95} E3	D_{v95} E4	D_{v99} E3	D_{v99} E4
19	5,1	5,3	22,8	22,6	14,9	15,2	77,1	74,6	124,8	122,1
20	4,4	4,7	18,6	19,0	12,6	13,4	62,3	62,0	116,1	115,8
21	3,9	4,4	15,5	16,9	10,1	12,0	53,9	55,0	112,1	111,3
22	4,1	4,4	16,7	17,5	11,5	12,4	55,8	58,8	112,4	116,5
23	4,4	4,8	17,6	18,0	12,4	13,4	58,7	55,6	113,4	106,7
24	5,1	4,7	21,1	19,4	15,6	14,0	67,1	64,8	121,9	121,9
25	4,2	4,9	16,8	19,6	11,7	14,1	55,2	65,0	112,9	121,9
26	4,7	4,6	19,2	18,2	13,8	13,0	61,6	59,7	119,6	116,8
27	5,7	6,3	25,9	26,3	18,5	20,5	86,3	79,8	148,7	133,4
28	6,0	6,3	26,0	25,8	19,0	19,4	82,9	81,7	143,0	140,8
29	6,3	6,7	27,3	29,6	20,4	21,3	84,8	97,5	143,0	157,4
30	5,1	5,4	21,8	21,9	15,8	16,0	73,1	71,3	126,5	125,4
31	6,1	6,7	26,9	29,2	19,7	21,8	87,9	93,5	149,7	154,5
32	5,3	6,1	23,0	28,2	16,5	20,1	76,5	92,0	128,2	151,0
33	5,8	6,4	24,2	28,3	18,1	21,2	76,9	86,4	128,4	138,9

Tabela 33 – Dados de medição da concentração volumétrica de fase dispersa

Teste ID	% H_2O Karl Fischer
1	4,8
2	4,8
3	4,8
4	4,8
5	4,8
5	4,8
6	5,5
7	5,5
8	5,4
9	10,0
10	8,9
11	8,9
12	9,6
13	9,8
14	9,8
15	10,0
16	10,0
17	10,0
18	9,9
19	14,3
20	13,6
21	14,9
22	15,2
23	13,0
24	13,0
25	13,2
26	13,2
27	19,7
28	20,8
29	20,7
30	21,2
31	21,2
32	20,5
33	21,0

Tabela 34 - Parâmetros de dispersão da DTG nos dispositivos amostradores de emulsão, conforme ASTM E799-3 (2015)

Teste ID	*Span* E1	*Span* E2	*Span* E3	*Span* E4	D_{dev} E1	D_{dev} E2	D_{dev} E3	D_{dev} E4
T1_W05	4,3	5,0	4,6	4,8	0,69	0,57	0,66	0,64
T2_W05	4,0	4,0	3,9	3,6	0,57	0,51	0,50	0,52
T3_W05	2,8	2,7	2,6	2,5	0,51	0,49	0,48	0,48
T4_W05	3,2	3,1	3,1	4,1	0,50	0,49	0,46	0,49
T5_W05	3,6	4,2	3,9	4,0	0,63	0,55	0,49	0,53
T5_W05	3,7	3,1	2,9	2,9	0,52	0,47	0,44	0,45
T6_W05	3,1	3,7	3,7	3,5	0,64	0,55	0,56	0,57
T7_W05	3,9	4,0	4,0	3,9	0,52	0,48	0,48	0,50
T8_W05	3,5	3,7	3,7	3,7	0,55	0,49	0,48	0,48
T9_W10	4,6	4,9	5,6	4,7	0,75	0,74	0,71	0,73
T10_W10	3,7	4,2	4,1	3,4	0,72	0,68	0,69	0,72
T11_W10	3,3	3,5	3,7	3,4	0,73	0,71	0,69	0,71
T12_W10	3,0	3,1	3,3	3,0	0,72	0,73	0,71	0,73
T13_W10	3,2	3,4	3,6	3,1	0,68	0,69	0,61	0,68
T14_W10	3,1	3,2	3,4	3,1	0,69	0,69	0,67	0,69
T15_W10	3,3	4,1	3,7	2,9	0,71	0,70	0,70	0,69
T16_W10	2,9	3,1	3,1	2,9	0,74	0,71	0,73	0,74
T17_W10	3,2	3,3	3,1	3,0	0,70	0,65	0,67	0,67
T18_W10	2,8	3,3	3,3	3,1	0,72	0,70	0,67	0,67
T19_W15	3,6	3,6	3,5	3,3	0,78	0,77	0,77	0,77
T20_W15	3,4	3,2	3,2	2,9	0,76	0,76	0,76	0,76
T21_W15	2,9	3,1	3,1	2,8	0,76	0,72	0,73	0,75
T22_W15	2,8	2,8	3,0	2,8	0,77	0,76	0,75	0,76
T23_W15	2,7	2,8	2,9	2,7	0,77	0,76	0,76	0,76
T24_W15	2,6	2,8	2,7	2,8	0,77	0,77	0,78	0,77
T25_W15	2,7	2,9	2,9	2,8	0,77	0,76	0,75	0,77
T26_W15	2,4	2,8	2,8	2,8	0,76	0,76	0,77	0,76
T27_W20	2,6	2,8	2,9	2,5	0,79	0,79	0,79	0,79
T28_W20	2,5	2,7	2,8	2,6	0,78	0,78	0,79	0,79
T29_W20	2,2	2,7	2,7	3,0	0,79	0,78	0,79	0,80
T30_W20	2,9	2,8	2,8	2,7	0,79	0,77	0,78	0,78
T31_W20	3,0	2,7	2,8	2,7	0,80	0,79	0,79	0,80
T32_W20	2,2	3,0	2,9	3,0	0,78	0,79	0,78	0,79
T33_W20	2,7	2,7	2,7	2,8	0,80	0,79	0,79	0,80

APÊNDICE 3 – CORRELAÇÕES ENTRE DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS

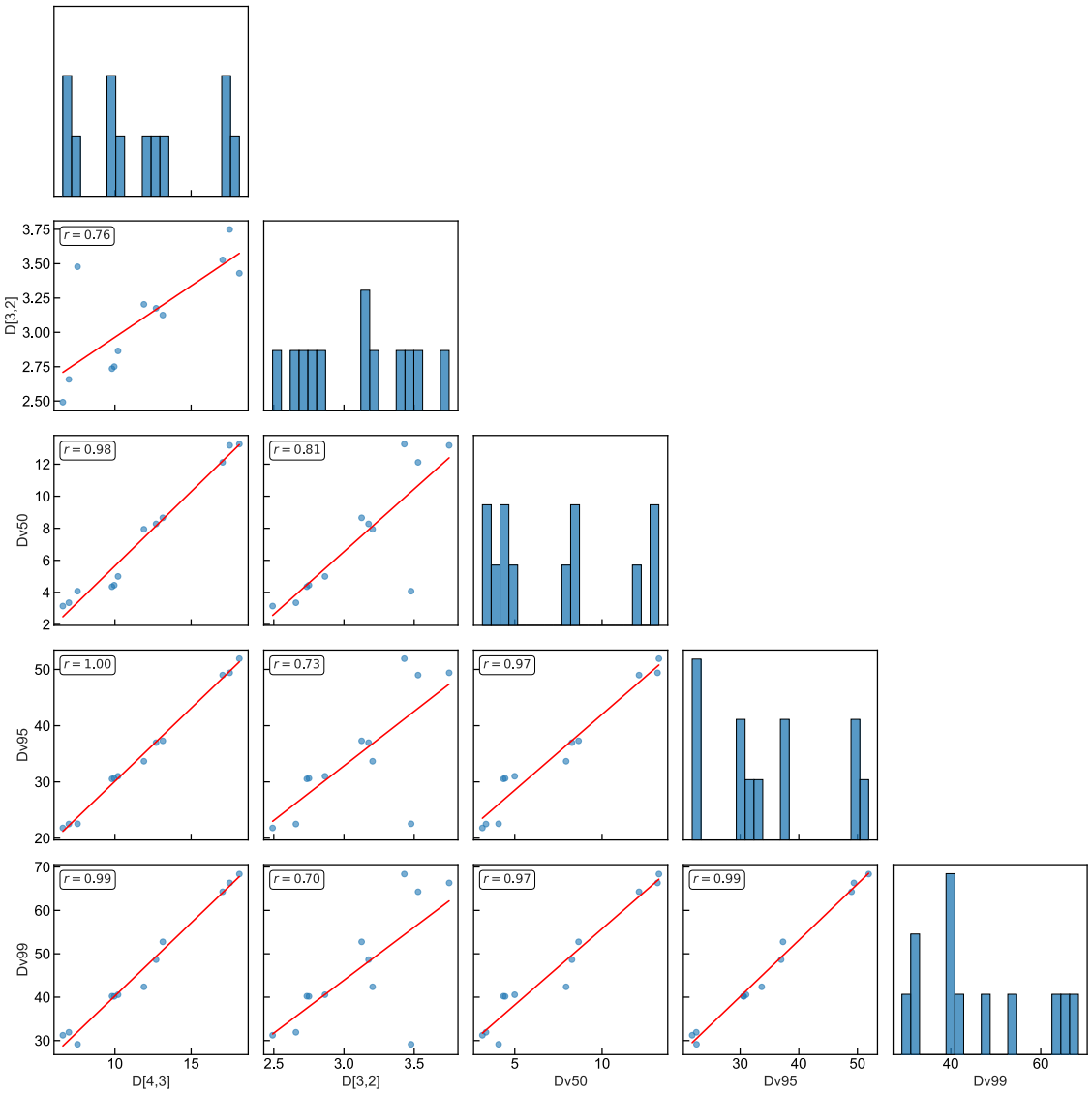


Figura 88 - Gráficos de dispersão entre pares de diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v95} para as emulsões novas - EN, em que *r* é o coeficiente de correlação de Pearson

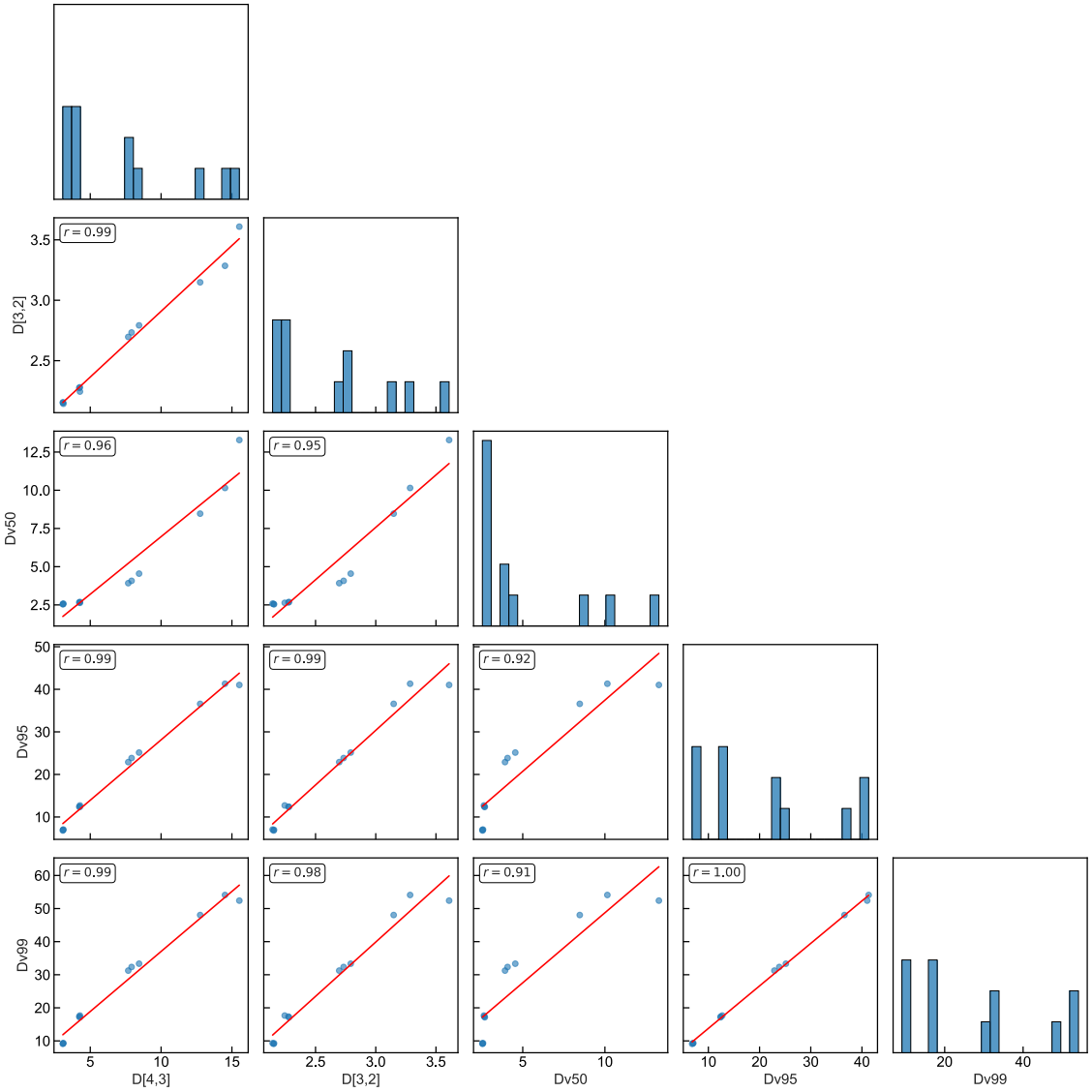


Figura 89 - Gráficos de dispersão entre pares de diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99} para as emulsões reutilizadas - ER, em que *r* é o coeficiente de correlação de Pearson

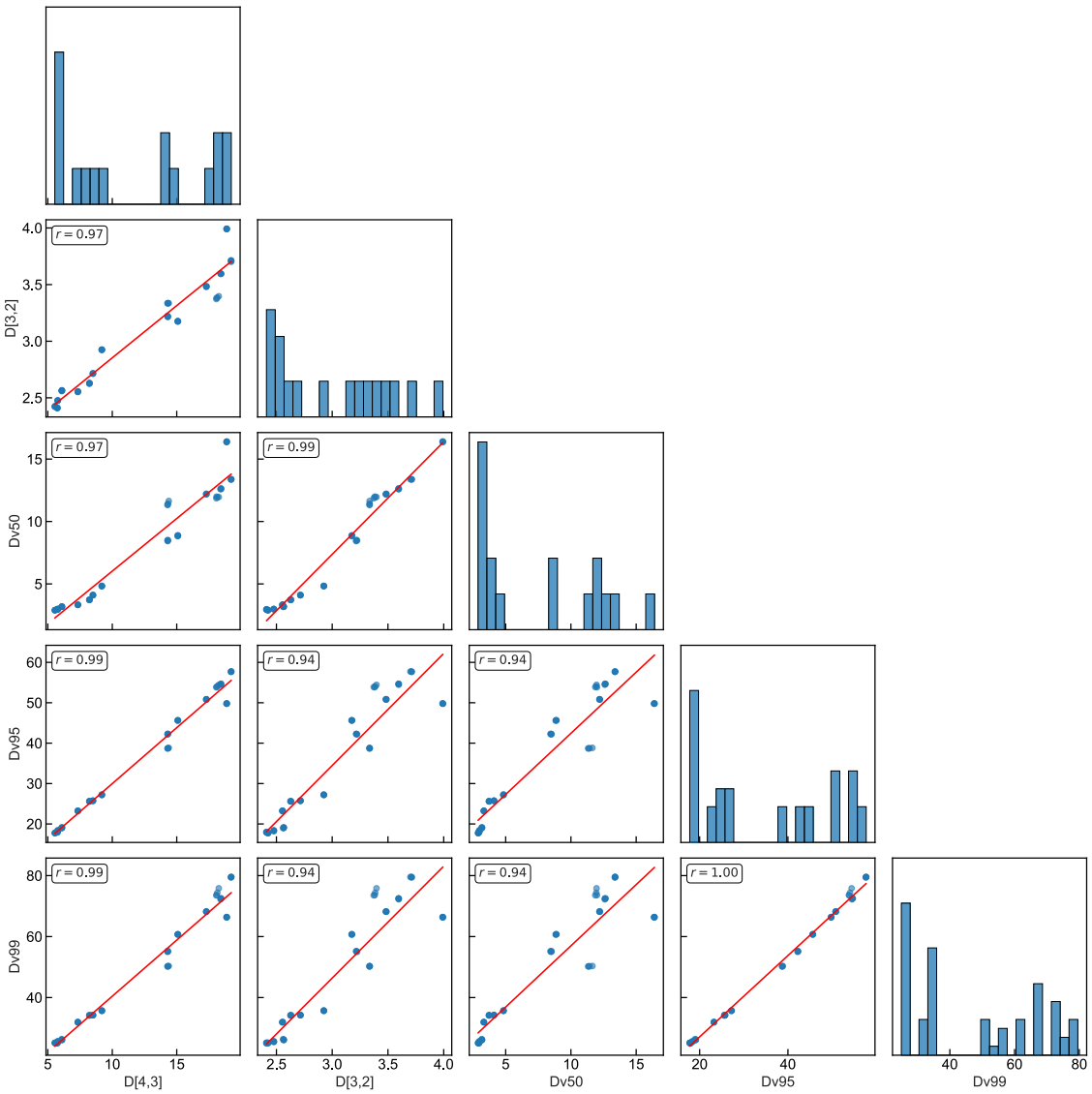


Figura 90 - Gráficos de dispersão entre pares de diâmetros característicos $D_{[4,3]}$, $D_{[3,2]}$, D_{v50}, D_{v95} e D_{v99} para as emulsões com período de agitação variável - EPV, em que r é o coeficiente de correlação de Pearson