UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

TESE DE DOUTORADO

CONCEPÇÃO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO VIBRÁTIL LABORATORIAL PARA TRATAMENTO DE ÁGUA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E EMULSÃO CONGÊNERE, MEDIANTE OPERAÇÃO HÍBRIDA DE ADSORÇÃO E *AUTOFLOTAÇÃO*.

JÔNATAS ARAÚJO DE LACERDA JÚNIOR

NATAL-RN, ABRIL DE 2014.

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede.
Catalogação da Publicação na Fonte.

Lacerda Junior, Jônatas Araújo de.

Concepção, construção e análise de um protótipo vibrátil laboratorial para tratamento de água de produção de petróleo e emulsão congênere, mediante operação híbrida de absorção e autoflotação. / Jônatas Araújo de Lacerda Junior. – Natal, RN, 2014.

232 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Djalma Ribeiro da Silva.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo.

1. Tratamento de água de produção de petróleo - Tese. 2. Adsorção - Tese. 3. Flotação natural - Tese. 4. Vibração mecânica - Tese. 5. Sistema de fluxo contínuo - Tese. 6. Análise de desempenho - Tese. I. Silva, Djalma Ribeiro da. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 628.16(043.2)

JÔNATAS ARAÚJO DE LACERDA JÚNIOR

CONCEPÇÃO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO VIBRÁTIL LABORATORIAL PARA TRATAMENTO DE ÁGUA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E EMULSÃO CONGÊNERE, MEDIANTE OPERAÇÃO HÍBRIDA DE ADSORÇÃO E *AUTOFLOTAÇÃO*.

Tese de doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo – PPGCEP da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como pré-requisito para obtenção do título de doutor em Ciência e Engenharia de Petróleo.

Área de Concentração: Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo.

Prof. Dr. Djalma Ribeiro da Silva
Orientador - UFRN/PPGCEP/NUPPRAR

Prof. Dr. João Bosco da Silva
Examinador Interno - UFRN/DEM

Prof. Dr. Francisco de Assis O. Fontes
Examinador Interno - UFRN/DEM

Prof. Dr. Antonio Gilson B. de Lima
Examinador Externo - UFCG/UAEM

Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto
Examinador Externo - UFPB/DEE

Aprovada em 28 de Abril de 2014.

DE LACERDA JÚNIOR, Jônatas Araújo. *Concepção, construção e análise de um protótipo vibrátil laboratorial para tratamento de água de produção de petróleo e emulsão congênere, mediante operação híbrida de adsorção e "autoflotação"*. 2014. 261f. Tese (Doutorado em Engenharia de Petróleo) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Departamento de Engenharia de Petróleo, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN – Brasil.

RESUMO

Um protótipo vibrátil *autoflotador* de acionamento eletromecânico para tratamento de água de produção de petróleo e emulsão congênere é apresentado e avaliado. A produção de petróleo para refinamento e obtenção de derivados é realizada sob modalidades tecnicamente referidas como *on-shore* e *off-shore*, isto é, no continente e no mar. No Brasil 80% da produção petrolífera é feita no mar e área de implantação e escala de custo são preocupantes. Associa-se água oleosa de produção, efluente abundante em larga escala, carreadora de 95% do potencial poluidor da atividade cujo destino final é o meio ambiente marítimo ou terrestre. Embora diversificado conjunto de técnicas e sistemas de tratamento d'água encontram-se em uso ou pesquisa, propõe-se um sistema inovador que opera de forma sustentável sem aditivos químicos, para o bem do ecossistema. Utilizou-se labirinto adsorvente, em espirais metálicos, e escala laboratorial de fluxo. Patentes de equipamento e processo são reivindicadas. Realizaram-se tratamentos em vazões e faixas de frequência distintas, monitoradas com sistemas de controle, uns construídos, outros aquistados para tal. Medições do teor de óleo e graxa (TOG) do efluente tratado mantiveram-se dentro do intervalo de enquadramento legal nas condições de ensaio. Pesaram-se os adsorventes antes e após o tratamento para obtenção da impregnação de óleo, meta de desempenho da ação vibratória e tratamento como um todo. Tecnologias atuais de tratamento são referenciadas para comparação de desempenho, qualitativa e quantitativamente. Confrontou-se consumo energético operando-se em vibração, com e sem flotação convencional, e com autoflotação. Vislumbram-se boas perspectivas de rendimento do sistema proposto, sobretudo, na redução do tempo de residência por ação de capilaridade. Criou-se o parâmetro adimensional de impregnação e se lhe confrontou com consagrados parâmetros adimensionais, na versão vibracional, como número de Weber e número de Froud quadrático, referido como criticalidade vibrátil. Resultados sugerem limites à intensidade vibratória.

Palavras-chave: Vibração mecânica, adsorção, flotação natural, tratamento de água de produção de petróleo, sistema de fluxo contínuo, análise de desempenho.

DE LACERDA JÚNIOR, Jônatas Araújo. *Design construction and testing of a laboratory vibrating prototype for treatment of oil production water, emulsion or the like, through hybrid operation of adsorption and self-flotation.* 2014. 261f. Thesis (Doctorate in Petroleum Engineering) - Center of Exacts Sciences and Earth, Petroleum Engineering Department, Graduate Program in Science and Petroleum Engineering – Federal University of Rio Grande do Norte, Natal/RN – Brazil.

ABSTRACT

A self-flotator vibrational prototype electromechanical drive for treatment of oil and water emulsion or like emulsion is presented and evaluated. Oil production and refining to obtain derivatives is carried out under arrangements technically referred to as on-shore and off-shore, ie, on the continent and in the sea. In Brazil 80 % of the petroleum production is taken at sea and area of deployment and it cost scale are worrisome. It is associated, oily water production on a large scale, carrier 95% of the potential pollutant of activity whose final destination is the environment medium, terrestrial or maritime. Although diversified set of techniques and water treatment systems are in use or research, we propose an innovative system that operates in a sustainable way without chemical additives, for the good of the ecosystem. Labyrinth adsorbent is used in metal spirals, and laboratory scale flow. Equipment and process patents are claimed. Treatments were performed at different flow rates and bands often monitored with control systems, some built, other bought for this purpose. Measurements of the levels of oil and grease (OGC) of efluents treaty remained within the range of legal framework under test conditions. Adsorbents were weighed before and after treatment for obtaining oil impregnation, the performance goal of vibratory action and treatment as a whole. Treatment technologies in course are referenced, to compare performance, qualitatively and quantitatively. The vibration energy consumption is faced with and without conventional flotation and self-flotation. There are good prospects for the proposed, especially in reducing the residence time, by capillary action system. The impregnation dimensionless parameter was created and confronted with consecrated dimensionless parameters, on the vibrational version, such as Weber number and Froude number in quadratic form, referred to as vibrational criticality. Results suggest limits to the vibration intensity.

Keywords: Mechanical vibration, adsorption, natural flotation, treatment of crude oil production water, continuous flow system, performance analysis water.

Pensamento

O grande dilema da investigação cientifica é a dicotomia entre resultado positivo, carreadouro não raro de emoção e manifesta vaidade do investigador, e o gélido resultado verdadeiro. O primeiro distrai a razão; o segundo descortina limites que consagram majestade única à ciência.

Jônatas Araújo de Lacerda Júnior

Agradecimento Especial

Agradeço e dedico este trabalho, em especial, aos meus queridos, filho e esposa, Tácito Juno Queiroz de Lacerda e Darlene Magna Queiroz de Lacerda, e meus pais, Jonatas Araújo de Lacerda, "in memoriam", e Neuza Moreira de Araújo pela vigília e companheirismo à prova de tudo.

Lista de agradecimento

Agradeço, sobretudo, a Deus por ter me concedido saúde e determinação para trabalhar sem olhar para traz. Mas não poderia olvidar o apoio incondicional de pessoas e instituições a exemplo:

- da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica - UAEM da UFCG por me manter incondicionalmente liberado de atividades docentes;

- do Grupo de Design e Desenvolvimento Sustentável – GDDS, à época ligado à UADI da UFCG, em especial, fundado e coordenado pelo professor de desenho industrial, Dr. *Eduardo Cid Guimarães*, sob auxílio técnico-acadêmico dos alunos *Jose Willio de Albuquerque* e *Tamires Pedroza*, por disponibilizar incondicionalmente a oficina de prototipagem sem a qual se tornaria difícil construir o sistema em apreço;

- do Laboratório Multi-Disciplinar de Materiais e Estruturas Ativas LAMMEIA da UAEM da UFCG, na pessoa do professor coordenador de pós-graduação da unidade, Dr. *Carlos José de Araújo* pela cessão de equipamentos importantes de monitoramento do sistema em apreço, à exemplo de osciloscópio digital e sensor de relutância, LVDT;

- do laboratório de vibrações e instrumentação - LVI da UAEM da UFCG na pessoa do professor Dr. *Antônio Almeida Silva* pela cessão de equipamentos de suporte vibracional como gerador de sinais e mancais lineares e pelas discussões sobre mecânica oscilatória. Da mesma, ao aluno de mestrado em vibrações mecânicas *Diego David Silva Diniz* pela contribuição nas ilustrações computacionais e aquisição de dados por imagem;

- do professor Dr. *Cícero da Rocha Souto* coordenador do LaSEA do DEE da UFPB – Campus I pela cessão de equipamentos eletrônicos de acionamento e controle do sistema à exemplo de motor e acelerômetro, e assessoria em assuntos computacionais, eletroeletrônicos e de simulação digital;

- do professor Dr. *Juscelino de Farias Maribondo* da UAEM da UFCG pela assessoria em filmagem e análise metodológica de projetos;

- do professor Dr. *Yoge Jerônimo Ramos da Costa* da UAEM da UFCG pela cessão oportuna de equipamentos essenciais de aquisição de dados à exemplo de rotâmetro e estroboscópio;

- do Laboratório de Metalografia da UAEM da UFCG nas pessoas dos professores M.Sc. *João Baptista da Costa Agra de Melo*, M.Sc. *Manassés da Costa Agra de Melo* e Dr. *Marco Antônio dos Santos* pelo apoio dado em trabalhos de microscopia e pesagem de precisão;

- do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte na pessoa do professor Dr. *Djalma Ribeiro*, Diretor do CCET e coordenador do NUPPRAR, meu orientador acadêmico e, em especial, ao professor Dr. *Wilson da Mata* e demais professores do PPGCEP com os quais tive oportunidade de adquirir conhecimentos de ciência e engenharia de petróleo;

- da empresa de prestação de serviços eletroeletrônicos, adesivagem e artefatos em acrílico, Kromme na pessoa do dirigente técnico em telecomunicação Sr. Adilson Ferreira por préstimos em trabalhos com acrílico;

- do Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos da UAEM da UFCG na pessoa do professor Dr. *Antonio Gilson Barbosa de Lima*;

- da empresa, Indústria Laboremus na pessoa do amigo, dirigente e *designer* Sr. *Fabiano Guimarães de Souza*, por préstimos técnicos de soldagem;

- do hialotécnico diplomado, Sr. *Helmut Otto Probst* por préstimos na confecção de vidraria laboratorial;

- do professor Dr. *José Sérgio Rocha Neto*, coordenador do DEE da UFCG pela assessoria e discussão sobre problemas de aquisição de sinais digitais;

- dos engenheiros e alunos de pós-graduação da UAEM da UFCG, *Ângelo Emiliavacca*, *Rodrigo Leal Viana*, *Edjan Tomaz da Silva* e *Maurílio Beltrão d´Albuquerque* pela assessoria em eletrônica e computação;

- dos técnicos em mecânica da UAEM da UFCG, senhores *Mário Gomes da Silva*, torneiro mecânico, *Marcos Antônio de Farias*, fresador e *José de Anchieta da Costa Araújo*, soldador por préstimos oferecidos no início do trabalho;

- do Laboratório de Dessalinização - LABDES da UAEQ da UFCG nas pessoas do coordenador, professor Ph.D. *KIepler Borges França*, e professor Dr. *Hélio de Lucena Lira* pelo apoio nas medições de TOG;

- do amigo professor da UAEMa da UFCG Dr. *José Jefferson da Silva Nascimento* pelo apoio na realização de medições de TOG junto à UEPB;

- de todos que torceram para meu êxito;

- e do eterno parceiro de atividades acadêmicas e culturais de produção e edição de imagens, professor M.Sc. *Agostinho Nunes da Costa Lira*, coordenador da UAEP da UFCG, em particular, e finalmente, ao amigo e eterno professor de vibrações mecânicas, Dr. Natanael Victor de Oliveira pela confiança e entusiasmo acadêmicos com os quais a mim sempre se dirigiu.

Lista de símbolos

			Unidades SI
1.	A:	Área de superfície genérica	m^2
2.	AP:	Água produzida	
3.	APHA:	*American Public Health Association*	
4.	API:	*American Petroleum Institute*	
5.	ASTM:	*American Society for Testing and Materials*	
6.	AUT:	Ensaio de *autoflotação* em frequência e vazão	
7.	A_{ads}:	Área do plano médio absolvente	m^2
8.	A_e:	Área específica ou superfície relativa do adsorvente	m^2/kg
9.	A_s:	Área superficial do adsorvente	m^2
10.	A/O:	Emulsão água em óleo	
11.	b:	Designa sempre medida da base	m
12.	BS&W:	*Basic Sediment and Water*	
13.	C:	Constante de amortecimento	Ns/m
14.	C_a:	Número de capilaridade de Laplace	
15.	C_c:	Constante de amortecimento crítico	Ns/m
16.	C_{eq}:	Constante de amortecimento equivalente	Ns/m

17.	ddp:	Diferença de potencial ou voltagem	V
18.	dx:	Deslocamento infinitesimal na direção OX	m
19.	$DIR_{XY1:}$	Posição do sistema de eixos do acelerômetro em direções axial e perpendicular a força de excitação respectivamente	
20.	$DIR_{XY2:}$	Posição do sistema de eixos do acelerômetro a (– 45º) e (225º) em relação à força de excitação respectivamente	Graus
21.	e:	Erro de medição ou desvio	
22.	esp:	Espessura	m
23.	e_i:	Erro de medição do i-ésimo parâmetro	
24.	ē:	Erro médio de medição	
25.	E:	Módulo de elasticidade	N/m^2
26.	E±0_	Potência de 10 de (–99 a +99)	adimensional
27.	E.D.O.:	Equação diferencial ordinária linear	
28.	E_0:	Número de Eötvös	
29.	ETM_i:	Especificação técnica do i-ésimo sistema de monitoramento do *VIBRAUTO-FLOT*	
		ETM_1: Cronômetro digital KENKO KK5891	
		ETM_2: Câmera digital Handycam Sony – DCR SX 21 30 frames/s	
		ETM_3: Osciloscópio digital de dois canais Agilent Technologies – DSO 1002A 60 MHz 2G samples/s	
		ETM_4: Fonte de voltagem e amperagem variáveis DC Power Supply – Minipa MPL – 1303M	
		ETM_5: Fonte de corrente contínua estabilizada VS Hayama 12 volt 3,5 Amp mod. HY 123/5	
		ETM_6: Linear variable differential transformer – LVDT Solartron DG 5.0 haste fixa e retorno por mola, sensibilidade 0,625 V/mm	

ETM_7: Nivelador Momfort Prata 14 pol. Madeira estabilizada e bolha garantida

ETM_8: Acelerômetro piezoelétrico bi-dimensional Analogic Device ADXL202 JQC 3410879181 00 37 Resolução 2 mg Temp. drift 2 mg/^{0}C com placa amplificadora (ganho de 15 vezes), sensibilidade 0,312 V/g

ETM_9: Calibrador de acelerômetro PCB 394 C 06 SN 2538 DC 10 V/2 Amp. Aceleração 1g (9,8 m/s^2) frequência de teste 159,2 Hz Made in USA

ETM_{10}: Relógio comparador Mytutoyo HMG 428 Shock proof Resolução 0,01 mm, nº 20.465

ETM_{11}: Rotâmetro LAMDA, nº 78.287 (medidor de vazão de ar) Escala: 2 a 20 ft^3/h (6,56x10^{-1} a 0,66 m^3/h) fab. OMEL S/A Ind. Brasileira, pressão de trabalho 20 psig (20 lbf/pol^{2}g) Conical tube 4 x 5 x 120

ETM_{12}: Controlador de vazão de efluente (Registro de passagem, Lumegás - A com agulha de 1/8" e manopla)

ETM_{13}: Controlador de vazão de ar (Registro de passagem, Lumegás - A com agulha de 1/8" e manopla)

ETM_{14}: Balança digital Shimadzu AUY220 div 0.1 mg (10 mg - 220mg)

ETM_{15}: Microscópio digital MicroZOOMCap® 200X (max)

ETM_{16}: Microscópio eletrônico Olympus–Japan BX51TRF

ETM_{17}: Estroboscópio industrial FRATA 150 – 18.000 rpm ou 3 – 300 Hz

ETM_{18}: Martelo pendular graduado de raio r = 257 mm peso equivalente do malho (0,395 kgf = 3,87 N)

ETM_{19}: Balança Marte AL200C d = 0,001g Max. 200g Min. 0,02g e = 0,01g

ETM_{20}: Estufa com circulação de ar FANEM SPPDF 470 Mod. 320E – Controlador microprocessado Mod. MP (Precisão 0,1°C)

ETM_{21} : Gerador analógico de funções GIE GF2.

ETM_{22} : Proveta Pyrex TC 20°C 500 mℓ máximo

ETM_{23}: Viscosímetro Brookfield Mod. LVDV – II S64

ETM_{24}: Pipeta com bulbo de borracha $Ø_{int}$ 4 mm

ETM_{25}: Pipeta sem bulbo de borracha $Ø_{int}$ 2 mm

30. ETV_i: i-ésima especificação técnica do *VIBRAUTO-FLOT*

ETV_1: Dupla mola plana com engaste em cantoneira de alumínio # 3 mm (Largura = 22 mm; Comprim. = 118 mm; Vão-livre = 70 mm) em aço galvanizado ASTM A–917/1,11 mm

ETV_2: Rolamento linear com guia prismática NSK L1H20-Z e mancal plano LH20 NSK

ETV_3: Minicompressor Mycar Acessórios CE 12 volts DC 18 bar max. (1724 kPa) Pressão média de trabalho 2 atm (≅ 2 bar)

ETV_4: Motor de acionamento cc 150 W (peso do conjunto motor-mesa 2,436 kgf ≅ 23,90 N)

ETV_5: Coluna de alumínio com anéis de seguimento de borracha natural $Ø_{ext}$ 81 mm x $Ø_{int}$ 45 mm x 2 mm (peso do conjunto 0,96 kgf ≅ 9,42 N)

ETV_6: Célula piramidal em acrílico com diâmetro de base $Ø_{int}$ = 75 mm (peso da célula 0,204 kgf ≅ 2 N e volume efetivo de 370 mℓ)

ETV_7: Homogeneizador de efluente em vidro com motor de passo CC 30 W 816 rpm, altura manométrica máxima de 395 mm e variação máxima de altura manométrica de 78 mm, volume máximo efetivo 600 mℓ, volume máximo

de descarga 350 mℓ, dimensão 80 mm x Ø 150 mm x 2 mm

ETV_8: Polia desbalanceada com massa-média excêntrica de 0,09378 kg, $Ø_{ext}$ = 32 mm e excentricidade r_e = 20 mm.

ETV_9: Adsorvente: esponja espiral metálica Scoth Brite 3M do Brasil Ltda. Diâmetro da espiral Ø = 4 mm, em aço inoxidável ASTM A 240/316.

ETV_{10}: Manga de flotação construída com vela-filtro Cristalina de caulim e filito, ABNT – NBR 15175 Mod V6 Classe I (0,5 a 1 μm) de tamanho de poro, $Ø_{ext}$ = 50mm, em caulim e filito e chapa zincada ASTM A-879/0,6 mm

ETV_{11}: Mesa vibratória em chapa de aço-carbono ASTM A-283 # 1/4" (≈ 6,2 mm) 200 x 200 mm

ETV_{12}: Base da mesa vibratória em chapa de aço-carbono ASTM A-283 # 1/4" (≈ 6,2 mm) 400 x 400 mm

ETV_{13}: Mesa inercial em madeira com 4 amortecedores de vibração (*Vibrastop*), parafuso de nivelamento e engastada por dois suportes na parede (Peso total médio, 1.177 N)

ETV_{14}: Motor CA Newstar Sewing Machine Motor 60 Hz/220 V/1 A 100 W 6.000 rpm máx.

ETV_{15}: Funil coletor em vidro com alongador e respiro para ar $Ø_1$ = 50 mm x $Ø_2$ = 12 mm

ETV_{16}: Misturador Arno Mod. BCA Série SC 180W/220V

31.	f:	Frequência absoluta	rps ou Hz
32.	f_n:	Frequência natural absoluta	rps ou Hz
33.	F_r:	Número de Froud	adimensional
34.	F_0:	Máxima amplitude da força de oscilação	N
35.	F(t):	Força qualquer em Newton em função do tempo	N
36.	F_R:	Força de reação em Newton ou múltiplos	N

37.	FRV:	Ensaio em vibração e flotação em freqüência e vazão	
38.	g:	Aceleração gravitacional	m/s^2
39.	H:	Designa sempre medida de altura	m
40.	i:	Corrente	Amp
41.	I_{mp}:	Impregnação de óleo	mg/ℓ
42.	I^{E}_{mp}:	Impregnação de óleo em equipamento	mg/ℓ
43.	I^{*}_{mpv}:	Índice ou Número vibracional de impregnação	adimensional
44.	I^{*}_{mpve}:	Índice ou Número energético vibracional de impregnação	adimensional
45.	I_{YY}:	Momento de inércia da seção em relação ao eixo OY	m^4
46.	IW_v^{*}:	Intensidade volumétrica vibracional	adimensional
47.	k:	Indicador múltiplo de 1000	
48.	K:	Número característico de onda	rad/m
49.	K_c:	Constante de elasticidade corrigida	N/m
50.	K_{eq}:	Constante de elasticidade equivalente do sistema	N/m^2 ou Pa
51.	K_{est}:	Constante de elasticidade estática	N/m
52.	K_T:	Constante elástica à torção	N.m/rad
53.	K_Θ:	Constante de elasticidade torcional na charneira (apoio)	N.m/rad
54.	L:	Comprimento genérico de um corpo em metro ou múltiplos	m
55.	LVDT:	*Linear Variable Differential Transformer*	
56.	L_{ads}:	Comprimento linear médio do adsorvente	m
57.	L_c:	Comprimento característico	m
58.	L_{cap}:	Comprimento de capilaridade (Coeficiente de Laplace)	mm
59.	L_{fl}:	Comprimento de flambagem	m
60.	L_v:	Comprimento de capilaridade viscosa	mm
61.	$m_{a\ell}$:	Massa média do invólucro em papel alumínio de 145 mm x 145 mm x 0,1 mm ($m_{a\ell} = 0{,}7384 \times 10^{-3}$ kg)	kg

62.	M:	Massa de um corpo	kg
63.	M_{ads}:	Massa de adsorvente	kg
64.	M_{adso}:	Massa de adsorbato	kg
65.	NDTG:	Número e distribuição de tamanho de gota ou bolha	
66.	O_h:	Número de Ohnsorge	
67.	OX:	Direção no sentido positivo do eixo “X” (- OX negativo)	
68.	OY:	Direção no sentido positivo do eixo “Y” (- OY negativo)	
69.	OZ:	Direção no sentido positivo do eixo “Z” (- OZ negativo)	
70.	OXYZ:	Espaço newtoniano de referência tridimensional	
71.	O/A:	Emulsão óleo em água	
72.	PPI:	*Parallel Plate Interceptor*	
73.	Por_{abs}:	Porosidade absoluta da célula de tratamento	m^3
74.	Por_{rel}:	Porosidade relativa da célula de tratamento	adimensional
75.	P_0:	Pressão atmosférica	N/m^2 ou Pa
76.	P_a:	Pressão de ar ou gás	N/m^2 ou Pa
77.	P_{f1}:	Carga crítica de flambagem em Newton ou múltiplos	N
78.	P_G:	Peso gravitacional de um corpo em Newton ou múltiplos	N
79.	P_h:	Pressão hidrostática	N/m^2 ou Pa
80.	Q:	Vazão genérica	m^3/h
81.	Q_{ads}:	Vazão por unidade de área no plano médio adsorvente	m^3/h
82.	Q_{ar}:	Vazão de ar	m^3/h
83.	Q_{cel}:	Vazão efetiva da célula	m^3/h
84.	Q_{ef}:	Vazão efetiva de efluente	m^3/h
85.	Q_{efa}:	Vazão específica da célula	$m^3/h.m^2$
86.	Q_n:	Vazão nominal do regulador de fluxo	m^3/h
87.	r:	Raio interno	m

88.	R:	Raio externo	m
89.	s:	Segundo	s
90.	SF:	Ensaio em vibração sem flotação	
91.	SI:	Sistema Internacional de Unidades	
92.	t:	Tempo em segundo	s
93.	t_{ef}:	Tempo efetivo de fluxo	s
94.	t_f:	Tempo de fluxo	s
95.	t_R:	Tempo de residência	s
96.	t_{Rv}^*:	Tempo vibracional de residência	adimensional
97.	t_0:	Tempo de enchimento da cuba	s
98.	T_{Rn}:	Tempo nominal de residência	s
99.	TOG_i:	Teor de óleo e graxa inicial	mg/ℓ
100.	TOG_f:	Teor de óleo e graxa final	mg/ℓ
101.	V:	Volume genérico	m^3 ou 1000 ℓ
102.	*VIBRAUTO-FLOT*: vibrador *autoflotador*		
103.	V_{ads}:	Volume deslocado pelo adsorvente	m^3
104.	V_{cel}:	Volume da célula adsorvente (48,33 mℓ)	m^3
105.	V_{cub}:	Volume da cuba adsorvente (370 mℓ)	m^3
106.	V_{ef}:	Volume efetivamente vertido	m^3
107.	V_{efcel}:	Volume efetivo da célula adsorvente	m^3
108.	V_r:	Volume retido na cuba de tratamento	m^3
109.	V_{TRP}:	Volume efetivo de um tronco de pirâmide	m^3
110.	V_v:	Volume vertido de efluente	m^3
111.	W_e:	Número de Weber	adimensional
112.	W_v*:	Parâmetro vibracional (*supercriticalidade*)	adimensional
113.	X(t):	Deslocamento na direção OX em função do tempo	m

114.	$X(\omega)$:	Amplitude de oscilação na freqüência angular ($\omega = 2\pi f$)	m
115.	X_0:	Amplitude máxima de deslocamento	m
116.	$X_L(t)$:	Resposta em deslocamento da vibração livre	m
117.	$X_p(t)$:	Resposta em deslocamento da vibração permanente	m
118.	$\dot{X}_f$:	Velocidade de fase da onda	m/s
119.	$\dot{X}_g$:	Velocidade da gota de óleo	m/s
120.	$\dot{X}_{gr}$:	Velocidade de grupo da onda	m/s
121.	$\dot{X}(t)$:	Velocidade na direção OX	m/s
122.	$\ddot{X}(t)$:	Aceleração ou segunda derivada do deslocamento X(t)	m/s^2
123.	Y_0:	Deslocamento máximo	m
124.	Y(t):	Deslocamento na direção OY em função do tempo	m
125.	$\dot{Y}_b$:	Velocidade da bolha de ar	m/s
126.	$\dot{Y}_g$:	Velocidade da interface, gota ou partícula	m/s
127.	$\dot{Y}(t)$:	Velocidade na direção OY	m/s
128.	$\lvert \, . \, \rvert$	Valor absoluto da grandeza	
129.	(.*):	Grandeza adimensional	
130.	(. $_c$):	Grandeza característica	
131.	(.^):	Valor estimado	
132.	< . >:	Grandeza temporal em valor médio	

Letras gregas

133.	γ (ghama):	Peso específico	N/m^3
134.	Δ (dhelta):	Variação genérica de uma grandeza	
135.	Δ_i:	Diferença entre grandezas iguais relatadas por índice	

136.	ζ (zita):	Fator de amortecimento crítico adimensional	
137.	θ (thita):	Ângulo de fase em radiano	rd
138.	$\theta(t)$:	Deslocamento angular em função do tempo	rd
139.	$d\theta$:	Deslocamento angular infinitesimal em radiano	rd
140.	λ (lambda)	Comprimento de onda	m
141.	μ (mi):	Média aritmética	
142.	μ_v:	Viscosidade absoluta	$N/m.s^2$
143.	ν (ni):	Viscosidade cinemática (μ_v/ρ)	m^2/s
144.	π (pi):	Constante trigonométrica universal	rd
145.	ρ (ro):	Massa específica	kg/m^3
146.	σ (sigma):	Desvio-padrão	
147.	σ_s:	Tensão interfacial	N/m
148.	Ø (fi):	Diâmetro genérico	m
149.	$Ø_b$:	Diâmetro de bolha de ar em metro ou múltiplos	m
150.	$Ø_g$:	Diâmetro da gota de óleo em metro ou múltiplos	m
151.	ω (omegha):	Frequência angular ou velocidade angular	rd/s
152.	ω_d:	Frequência natural amortecida	rd/s
153.	ω_n:	Frequência natural	rd/s
154.	Π (pi-russo):	Pi de Buckinghan	adimensional
155.	∇ (nabla)	Gradiente de função	

Sistema Internacional de Unidades (SI)

Comprimento em metros [m]

Força em Newtons [N]

Energia em Joule [J]

Massa em kilograma [kg]

Pressão ou tensão [N/m^2]

Potência [J/s ou Watt]

Tempo em segundos [s]

Voltagem em Volts [V]

Símbolos dimensionais

[L]: Comprimento

[M]: Massa

[S]: Segundo

[F]: Força

Múltiplos

μ (mícron) = 10^{-6}

m (mili) = 10^{-3}

k (kilo) = 10^{3}

M (mega) = 10^{6}

Constantes físicas

$(\sigma_s)_{água/ar}$ = 0,072 N/m

$(\sigma_s)_{óleo/água}$ = 0,024 N/m

$(\sigma_s)_{óleo/ar}$ = 0,036 N/m

$\rho_{aço}$ = 7850 kg/m^3

$\rho_{água}$ = 1000 kg/m^3

$\rho_{óleo}$ = 865 kg/m^3 (média)

π = 3,1416135…

g = 9,81 m/s^2

$L_{cap/água}$ = 2,77 mm

$L_{cap/óleo}$ = 1,62 mm

$E_{aço}$ = 196.133 MPa

Conversão e Unidades

Força [N] ou [kN]

Potência [J/s], [Watt], [V.A]

Comprimento [m], [mm], [μm]

Massa [kg], [mg]

Tempo [s], [h] e 1h = 3600 s

Pressão ou tensão [N/m^2 ou Pa], [kN/m^2 ou kPa], 1 atm = 0,101325 MPa = 1,03 kgf/cm^2

Vazão [m^3/h] = 10^6 / 3600 [mℓ/s] = 277,78 [mℓ/s]

SUMÁRIO

Capítulo	Descrição	Página
1	Introdução	1
1.1	Introdução geral	1
1.2	Objetivo geral	5
1.3	Objetivo específico	6
1.4	Justificativa	7
1.5	Delimitação do trabalho	7
1.6	Estrutura do corpo da tese	9
2	Aspectos teóricos	12
2.1	Introdução	12
2.2	Água de produção ou água produzida e suas implicações	12
2.2.1	Fundamentos e importância contextual da adsorção física.	15
2.2.2	Emulsão e coloides	18
2.2.3	Sistemas usuais de tratamento de água produzida	21
2.2.3.1	Tratamento de óleo bruto ou primário	21
2.2.3.2	Tratamento de água produzida com hidrociclone.	24
2.2.3.3	Tratamento de água produzida com flotador convencional (FAI)	26
2.2.3.4	Tratamento de água produzida por Floculação-Flotação Centrífuga (FF)	27

2.2.3.5 Tratamento de água produzida por flotação centrífuga..... 29

2.2.3.6 Tratamento de água produzida por flotador a ar dissolvido (FAD)..... 30

2.2.3.7 Tratamento de água produzida por eletroflotação (EF)..... 31

2.2.3.8 Tratamento de água produzida por eletroflotação e processo Fenton..... 32

2.2.3.9 Outras técnicas de tratamento de água produzida.. 34

2.3 Teorema dos Π de Buckingham..... 36

2.4 Vibrações mecânicas e fenomenologia..... 41

2.4.1 Modelo de sistema massa – mola – amortecedor viscoso excitado por motor em desbalanceamento rotativo..... 42

2.4.2 Cálculo da frequência natural, amortecimento viscoso equivalente e fator de amortecimento equivalente viscoso... 46

2.4.3 Fatores que podem influenciar o cálculo da frequência natural do sistema..... 47

2.5 Aspectos introdutórios do estudo de onda superficial, formação de ondas e modelo matemático..... 50

2.5.1 Onda gravitacional e de capilaridade..... 56

2.5.2 Vibração de uma dispersão fluídica..... 60

2.5.3 Aspectos de fluidodinâmica inerentes ao impacto de gotas.. 66

2.6 Considerações finais..... 70

3 Concepção, caracterização mecânica do sistema e metodologia de ensaio 73

3.1 Introdução..... 73

3.2 Concepção do sistema vibratório de tratamento..... 75

3.2.1 Considerações de natureza física..... 75

3.2.2 Considerações de natureza operacional..... 76

3.2.3 Considerações sobre a geometria da cuba ou reservatório.... 77

3.2.4 Considerações sobre configuração geométrica da cuba de tratamento e detalhes construtivos..... 81

3.2.5 Concepção do sistema vibracional de tratamento..... 86

3.2.6 Considerações sobre o adsorvente, definição da unidade volumétrica que se refere por célula adsorvente e de parâmetros característicos..... 90

3.2.7 Considerações sobre velocidade de propagação de ondas e partículas 96

3.3 Construção e aferição de sistemas periféricos de controle auxiliar... 102

3.4 Caracterização dinâmica do sistema..... 111

3.5 Velocidade admitida para partículas dispersas nos processos analisados..... 130

3.6 Metodologia de ensaio do sistema 135

3.6.1 Preparação de emulsão sintética..... 138

3.6.2 Preparação, acondicionamento de adsorventes e instalação. 142

3.6.3 Abastecimento do homogeneizador..... 144

3.6.4 Execução do tratamento..... 145

3.6.5 Finalização do tratamento, leitura e registro de parâmetros obtidos (Tempo, TOG, volume efetivo, voltagem e corrente) 146

3.6.6 Remoção de adsorventes para secagem e esvaziamento da cuba..... 148

3.6.7 Medição de impregnação de óleo, estimativa do TOG inicial (TOG_i) e limpeza..... 149

3.6.8 Considerações finais..... 154

4 Resultados e discussões..... 156

4.1 Considerações iniciais..... 156

4.2 Grupamento lógico de resultados do ensaio..... 157

4.3 Análise de resultados..... 162

4.3.1 Análise do consumo energético despendido em três modalidades operacionais: Vibração com flotação a ar induzido (*Vibra-flot*); vibração sem flotação (*Vibra*) e vibração com flotação natural (*Vibrauto-flot*)..... 162

4.3.2 Eficiência de fluxo, tempo de residência e relação com efeitos vibratórios..... 166

4.3.3 Influência do efeito vibratório sobre o tempo de residência..... 167

4.4 Influência do efeito vibracional na separação de óleo (Queda de TOG) e desempenho do processo..... 168

4.5 Análise da potencialidade do sistema em impregnar óleo disperso no adsorvente metálico..... 180

4.6 Considerações finais..... 191

5 Conclusão geral e sugestões para futuros trabalhos..... 194

5.1 Conclusão geral 194

5.2 Sugestões para futuros trabalhos..... 198

6 Referências bibliográficas..... 203

6.1 Trabalhos publicados..... 203

6.2 Patentes..... 203

6.2.1 Patentes de invento..... 203

6.2.1.1 Depositante, inventor e titular: Jônatas Araújo de Lacerda Júnior..... 203

6.2.1.2 Depositante, inventor e titular: Jônatas Araújo de Lacerda Júnior..... 204

6.2.1.3 Depositante, inventor e titular: Jônatas Araújo de Lacerda Júnior..... 204

6.2.1.4 Depositante, inventor e titular: Jônatas Araújo de 205

Lacerda Júnior.....

6.2.2 Registro de marca..... 206

6.2.2.1 Depositante, inventor e titular: Jônatas Araújo de Lacerda Júnior..... 206

6.3 Documentos eletronicos..... 206

6.3.1 Documentos resgatados da internet..... 206

6.3.2 Vídeos..... 210

6.4 Bibliografia consultada..... 210

Apêndice..... 227

LISTA DE FIGURAS

Fig.	Descrição	Pág.
1.1	Imagens da quebra de ondas superficiais: a) Desestabilização e quebra da onda d'água, eclosão de bolhas de ar e ejeção (aerossol) b) Imagem subsuperficial da onda após a quebra com formação de macro e microbolhas....	4
2.1	Ilustração de três fases em equilíbrio de uma jazida de petróleo.....	13
2.2	Imagem de água produzida.....	14
2.3	Ilustração de gotas e angulação da interface.....	17
2.4	Ilustração do estado eletroquímico de uma partícula em emulsão.....	20
2.5	Imagem superficial de emulsão de petróleo em água.....	21
2.6	Fluxograma do tratamento primário de petróleo.....	22
2.7	Separador bifásico gás / (água+ óleo)	22
2.8	Separador trifásico água/gás/óleo.....	22
2.9	Separador de placas CPI	23
2.10	Separador gravitacional API (*American Petroleum Institute*).....	23
2.11	Ilustração esquemática de uma estação primária de tratamento de água produzida.....	25
2.12	Hidrociclone convencional De-Oilling.....	25
2.13	Flotação Jameson.....	27
2.14	Flotador a ar induzido (Nozzle)	27
2.15	Difusor de ar WESTFALL.....	27
2.16	Laboratório experimental LARA/CENPES. a) Floculador em serpentinas de difusão; b) Hidrociclones em acrílico para flotação centrífuga. (Proc. BR	29

PI0502626-1/ Osvaldo Pereira Jr. e Jailton Joaquim Rosa).....

2.17 Saturador de ar ou gás..... 31

2.18 FGD ou FAD..... 31

2.19 Difusor para floculação em linha (Kinecs) 31

2.20 Patente de *demulsificador* a micro-ondas; a) Ilustração esquemática do processo; b) Detalhe do demulsificador sem a fonte de micro-ondas..... 34

2.21 Ilustração esquemática do UT – MDIF..... 35

2.22 Modelo de Kelvin de um grau de liberdade (1 GDL)..... 43

2.23 Modelo aproximado do sistema em estudo com 1 GDL..... 43

2.24 Deslocamento adimensional *versus* frequência adimensional..... 45

2.25 Variação do ângulo de fase *versus* frequência adimensional..... 45

2.26 Ilustração de pulsos geradores de ondulação superficial..... 51

2.27 Ilustração do deslocamento de função..... 53

2.28 Reflexão de sub-harmônicas laterais..... 55

2.29 Ilustração de interferência construtiva de ondas de amplitude (a)..... 55

2.30 Ilustração esquemática da interferência construtiva de ondas. A linha em preto representa a onda resultante: (a) e (a') Interferência destrutiva com ângulo de defasagem θ = 180º; (b) Interferência construtiva com ângulo de defasagem θ = 45°; (c) e (c') Interferência construtiva com ângulo de defasagem θ = 0°..... 56

2.31 Ilustração da influência de um obstáculo submerso no comprimento de onda e velocidade de fase..... 57

2.32 Propagação de onda superficial: a) Movimento orbital de partículas fluídicas; b) Correnteza de Stokes..... 59

2.33 Modelo físico vibracional representativo de um sistema disperso: a) Modelo global; b) Modelos equivalentes segundo a freqüência de excitação..... 63

2.34 Influência da vibração na ascensão de uma bolha de ar..... 64

2.35 Dispositivos de aeração convencional, e vibratório: a) Injeção direta; b) 64

Misturador convencional do tipo *Stirred Vessel*; c) Coluna vibratória.b) Misturador convencional do tipo *Stirred Vessel*; c) Coluna vibratória.....

2.36 Quadro comparativo entre colunas gaseificadas: a) Estática; b) Em vibração a 16 Hz e 1.36 mm de amplitude; c) Estática; d) Em vibração a 40 Hz com comprimento de onda de 0,5 mm e velocidade de escape de ar do injetor de 5 mm/s 65

2.37 Ilustração do movimento da gota na interface fluídica (Velocidade de fase).. 67

2.38 Fluxograma lógico do coeficiente de salpicos de óleo (K_s)..... 68

2.39 Parâmtero de impacto (b/D) versus Número de Weber (W_e) com destacadas regiões de observação experimental: I - Colisões que resultam em coalescência; II - Resvalamento; III - Regime estável de coalescênia; IV - Separação reflexiva; V - Separação com alongamento. We_a (1,2 – 2,9); We_b (5 – 15,5); We_c (aprox. 23,5 – 42) 69

3.1 Conjunto de formas geométricas ensaiadas para verificação da intensidade de perturbação da interface líquida..... 78

3.2 Imagens do sistema em construção e fonte controladora de tensão: a) Mesa vibratória à torção; b) Mesa vibratória ao linear vertical..... 79

3.3 Ensaio do comportamento fluídico quanto à forma geométrica: a) Cúbica a distintas alturas; b) Tronco-cônica e piramidal..... 79

3.4 Ensaio de vibração sob fluído acondicionado em formas prismáticas: a) e b) Prisma de base retangular; c) e d) Prisma de base quadrada..... 80

3.5 Ensaio com duas classes de prismas piramidais invertidos de faces divergentes, e com duas faces paralelas: a) Vista frontal dos prismas invertidos, sendo o da direita de faces paralelas; b) Vista inclinada 81

3.6 Imagem do ensaio de prismas de base direta e cuba construída para prover interferência construtiva: a) Prismas de base direta medindo 20 mm por 20 mm de base menor e 80 mm por 80 mm de base maior; b) Ensaio da cuba de tratamento a 47 Hz..... 82

3.7 Cuba para fluxo contínuo, projetada e utilizada neste trabalho: a) Destaque para tomadas de alimentação e descarga; b) Destaque para a tampa com revestimento metálico e manga central de flotação (ETV_{10}). Este elemento é objeto de reivindicação de patente (Proc. BR PI 10 2013 024672 7)..... 83

3.8 Seqüência de elevação e quebra de onda (14 Hz) (a), (b), (c), (d), (e) e (f)..... 84

3.9 Ilustração esquemática e explicativa da seqüência de imagens da Figura 3.8: (a) Interferência construtiva, elevação da onda e formação da cavidade; (b) Desestabilização e quebra; (c) Elevação de pressão, implosão e ruptura de bolhas de ar; (d) Eclosão de bolhas e formação de jato (Jato de Worthinton[a,b], 2013); (e) Eclosão e formação de aerossol; (f) Elevação de nova onda..... 85

3.10 Esboço conceptivo do sistema vibratório de tratamento à mão-livre onde são mostradas cubas de tratamento contínuo, à direita, e em batel, montada à esquerda..... 86

3.11 Sistema elástico vibratório de tratamento contínuo. Sistema e processo é objeto de reivindicação de patente (Proc. BR PI 10 2013 024672 7)..... 88

3.12 Sistema elástico vibratório de tratamento a batelada. Sistema e processo é objeto de reivindicação de patente (Proc. BR PI 10 2012 023580 3)..... 88

3.13 Sistema vibratório rígido articulado de tratamento contínuo. Sistema objeto de reivindicação de patente (Proc. BR PI 10 2013 024672 7)..... 89

3.14 Vista do interior da coluna do sistema vibratório, tomada pela parte inferior, e detalhes do mecanismo interno de elevação..... 90

3.15 Vista da coluna do sistema vibracional (Pistão, eixo de transmissão, anéis de segmento em borracha)..... 90

3.16 Imagem do adsorvente espiral metálico..... 92

3.17 Imagem do adsorvente padronizado em duas unidades de 5,5g médios..... 92

3.18 Embutidura do adsorvente em acrílico para exame microscópico..... 92

3.19 Microscopia de aferição da espessura com embutidura em cera..... 92

3.20 Microscopia de aferição da largura do adsorvente com embutidura em acrílico..... 93

3.21 Microscopia de aferição da espessura do adsorvente com embutidura em acrílico..... 93

3.22 Desenho técnico mecânico da cuba de tratamento vibratório em vista lateral completa..... 94

3.23 Desenho técnico mecânico da cuba de tratamento vibratório em corte no plano A-A da Figura 3.22..... 94

3.24 Desenho computacional ilustrativo da cuba de tratamento vibratório plena 94

de efluente com destaque para o nível teórico operacional de fluído.....
3.25 Desenho computacional da cuba de tratamento vibratório em corte vertical (Norma técnica: Figura 3.22 e Figura 3.23)..... 94
3.26 Imagem diagonal do sistema realizando *auto-flotação* a 14 Hz..... 96
3.27 Imagem lateral do sistema realizando intensa *auto-flotação* a 33 Hz..... 96
3.28 Onda resultante de interferência construtiva e parâmetros característicos: Comprimento de onda ($\lambda \approx 54$ mm), amplitude pico-a-pico da interface (Y_0 = 23,92 mm) e comprimento local do contêiner (L = 81,80 mm). Abaixo, escala diametral para bolhas de ar ($\phi \approx 1{,}94$ mm)..... 97
3.29 Vista superior de um contêiner quadrado em vibração horizontal a 70 Hz (90 x 90 mm x 50 mm de profundidade) e disparos de sub-harmônicas inclinadas. Volume de fluído ao nível máximo..... 97
3.30 Configuração de interfaces fluídica a várias combinações de amplitude (mm) e frequência (Hz) em ordem crescente de cima para baixo: a) (aa) 1,16/44,5; (ab) 1,16/46,7; (ac) 1,27/48,9; (ad) 1,4/54; (ae) 1,4/57,5; (af) 1,54/61,8. O fluído superior é óleo automotivo ($\rho_{\text{óleo}} \approx 0{,}85$ g/mℓ) e o inferior, óleo de baixa viscosidade e mais pesado que água (*Fluorinert* ou flúor-carbono ρ = 1,87 g/mℓ). Os dados foram obtidos em recipiente retangular (20 x 20 x 140 mm); b) Imagem de flotação natural a 33 Hz e marcas indicadoras de prováveis quebras sequenciais de ondas em processo vibratório. 98
3.31 Ilustração do choque de uma gota de óleo, da eclosão de uma bolha de ar imersa em fluído e velocidade do jato que emana por colapso da cavidade ou cavitação da interface. O elemento metálico adsorvente ilustra o contato submerso..... 101
3.32 Sistema de aterramento..... 103
3.33 Conjunto de monitoramento, processamento e aquisição de sinal digital..... 103
3.34 Curva de calibração da freqüência absoluta do motor em Hertz [Hz] em função da voltagem da fonte de alimentação, em Volt [V]..... 103
3.35 Estroboscópio Frata utilizado para congelamento de imagem do sistema em vibração..... 104
3.36 Amortecedores de vibração da mesa inercial..... 104
3.37 Engaste de apoio da mesa inercial..... 104

3.38 Posicionamento do sensor LVDT para captação de sinal de deslocamento na posição DIR_{XY1}..... 105

3.39 Acelerômetro ADXL202 na posição DIR_{XY2}..... 105

3.40 Curvas de sensibilidade dos sensores LVDT e acelerômetro: a) Curva característica do LVDT DG 5.0; b) Curva de calibragem do acelerômetro ADXL202..... 105

3.41 Gráfico de sinais de entrada e saída da placa do acelerômetro em que se ilustra amplificação do sinal gerado em 15 vezes: a) Imagem gerada da tela do osciloscópio para determinação do ganho da placa de amplificação; b) Gráfico dos sinais gerados pelo gerador analógico de função em confronto com o calibrador de acelerômetro..... 106

3.42 Sistema de calibragem do controlador de fluxo de efluente..... 108

3.43 Sistema de alimentação gravitacional de efluente e homogeneização..... 108

3.44 Vazão de efluente em função da graduação do controlador para distintas alturas manométricas em termos de volume vertido..... 108

3.45 Processo de construção da manga de flotação do sistema (*Vibra-flot*): a) Torneamento da barra de caulim/filito; b) Elementos acabados; c) Manga de flotação..... 109

3.46 Sistema de produção de ar comprimido e controle: a) Sistema de produção de ar comprimido para flotação; b) Sistema de flotação a ar induzido em perfeito funcionamento..... 110

3.47 Curva de calibração do registro de ar comprimido em [mℓ/s]..... 110

3.48 Sistema de descarga e coleta de efluente tratado: a) Sistema de descarga de efluente tratado; b) Reservatório âmbar graduado coletor de efluente tratado..... 111

3.49 Modelo do sistema físico para análise de comportamento dinâmico..... 113

3.50 Dispositivos elásticos de suspensão do sistema vibratório..... 114

3.51 Vista superior do modelo do sistema físico para análise de comportamento dinâmico..... 115

3.52 Imagem de sinais captados com acelerômetro na posição $DIR_{XY1,}$ mostrados na tela do osciloscópio, onde o sinal de cima (amarelo), refere-se ao eixo na direção da força de excitação: a) Excitação a 14 Hz; b) Excitação a 42 Hz.... 116

3.53 Imagem de sinais captados com acelerômetro na posição $DIR_{XY2,}$ mostrados na tela do osciloscópio, onde o sinal de cima (amarelo), refere-se ao eixo na direção diagonal à mesa: a) Excitação a 36 Hz; b) Excitação a 44 Hz..... 117

3.54 Imagem de sinais de deslocamento captados com LVDT na posição $DIR_{XY2,}$ tangente ao círculo de 75 mm, mostrados na tela do osciloscópio: a) Excitação a 31 Hz; b) Excitação a 48 Hz..... 117

3.55 Nivelamento da mesa vibratória: a) Segundo OY; b) Segundo OX..... 118

3.56 Ensaio de deflexão estática para correção do valor da rigidez elástica do sistema e freqüência natural: a) Curva, carga versus deflexão estática; b) Sistema periférico construído para ensaio de deflexão estática..... 121

3.57 Estrutura construída para ensaio de impacto e obtenção dos parâmetros dinâmicos, rigidez (K_{eq}) e amortecimento viscoso equivalente (C_{eq}): a) Imagem demonstrativa do trajeto do martelo; b) Imagem de detalhes construtivos do martelo..... 122

3.58 Imagem de sinais de resposta do sistema ao impacto obtida por acelerômetro (amarelo) e LVDT (verde) projetados na tela do osciloscópio.. 123

3.59 Espectro de freqüências do sinal de deslocamento livre amortecido, obtido por LVDT, mostrado através da Figura 3.58..... 123

3.60 Gráficos de resposta ao impacto no tempo: a) Envoltórias do decremento logarítmico do deslocamento e tempo de duração de transientes; b) Gráfico da resposta no tempo ao impacto em maior escala..... 124

3.61 Espectro de freqüências e sinal de aceleração no tempo obtido através de sensor de aceleração (ETM_8) na posição DIR_{XY1}: a) Espectro de freqüências a proximadamente 14 Hz de excitação; b) Sinal de amplitude de aceleração no tempo a 14 Hz; c) Sinal de amplitude de aceleração no tempo a 47 Hz..... 125

3.62 Espectro de freqüências e sinal de aceleração no tempo obtido através de sensor de aceleração (ETM_8) na posição DIR_{XY2}: a) Sinal de amplitude de aceleração no tempo a 33 Hz; b) Espectro de freqüências a excitação de 47 Hz aproximadamente; c) Sinal de amplitude de aceleração no tempo a 47 Hz..... 127

3.63 Sinal de deslocamento obtido com LVDT (ETM_6) na posição DIR_{XY1}: a) Sinal de amplitude no tempo a 33 Hz; b) Sinal de amplitude no tempo a 47 Hz..... 128

3.64 Amplitude de deslocamento obtida com LVDT na posição DIR_{XY1} a 14 Hz: a) Espectro de freqüências da resposta; b) Sinal de deslocamento no tempo a 14 Hz..... 128

3.65 Amplitude de deslocamento obtida com LVDT na posição DIR_{XY2} a 33 Hz: a) Espectro de freqüências da resposta; b) Sinal de deslocamento no tempo a 33 Hz..... 129

3.66 Amplitude de deslocamento obtida com LVDT na posição DIR_{XY2} a 47 Hz: a) Espectro de freqüências da resposta; b) Sinal de deslocamento no tempo a 47 Hz..... 129

3.67 Representação esquemática do sistema e processo desenvolvidos..... 135

3.68 Imagem angular do conjunto experimental..... 136

3.69 Fluxograma de operações empregadas na metodologia de ensaio do sistema segundo Maribondo (2000)..... 137

3.70 Medição de viscosidade do óleo com viscosímetro Brookfield..... 139

3.71 Sais surfactantes da água produzida utilizada como dispersante..... 139

3.72 Elementos de semeadura de gotas de óleo para análise: a) Gota de 50 mg médios; b) Padrões de pipetas utilizados; c) Gotas de 200 mg médios 140

3.73 Preparação de emulsão de teste: a) Três modelos de impelentes construídos ou adaptados para preparação de emulsão; b) Modelo de impelente laboratorial SIEHE^{TM} industrial; c) Demonstração de preparação durante ensaios realizados..... 141

3.74 Semeadura de óleo sobre água produzida para preparação de emulsão: a) Antes do cisalhamento mecânico; b) Emulsão formada e pronta para teste.... 141

3.75 Micrografia de amostra de emulsão preparada para ensaio..... 142

3.76 Preparação de pares adsorventes: a) Seção; b) Pesagem e etiquetagem; c) Embalagem de pares adsorventes acondicionados prontos para ensaio..... 143

3.77 Cuba de tratamento pronta para ensaio (FRV e SF)..... 144

3.78 Reservatório homogeneizador em operação, com impelente acionado, abastecido com efluente sintético..... 145

3.79 Processo de coleta de efluente sintético relizado à entrada da cuba de 146

tratamento: a) Enchimento de um dos frascos âmbar na primeira coleta; b) Conjunto coletado antes do encaminhamento à medição de TOG, em vasilhames âmbar de 500 mℓ. Em segundo plano, vasilhames de 275 mℓ utilizados para exame visual e ilustração.....

3.80 Finalização de tratamento: a) Sistema coletor de efluente tratado; b) Amostras de efluente tratado em vibração e flotação natural (*Vibrauto-flot*) à faixa de freqüência, 14 Hz, 33 Hz e 47 Hz, respectivamente, da esquerda à direita. À direita, à extremidade, amostra do efluente sintético obtido à entrada da cuba de tramento..... 147

3.81 Processo de secagem de adsorventes: a) Abertura de embalagens; b) Colocação no forno de secagem..... 148

3.82 Ilustração da impregnação de óleo no adsorvente: a) Antes do tratamento; b) Após o tratamento..... 149

3.83 Impregnação em equipamentos de preparação de efluente sintético: a) Reservatório de preparação de efluente sintético e impelidores; b) Raspagem com espátula e depósito tarado para pesagem; c) O óleo que remanesce à parede extraiu-se com éter de petróleo para posterior evaporação natural..... 150

3.84 Impregnação no reservatório homogeneizador: a) Reservatório e espátula de raspagem; b) Extrato pronto para evaporação e pesagem; c) Impelente do homogeneizador impregnado..... 150

3.85 Impregnação de óleo na cuba, ductos e válvulas: a) Cuba impregnada; b) Conjunto limpo e extrato pronto para evaporação e pesagem..... 151

4.1 Comparação das potências de consumo entre processos (Vibra-flot, Vibra e Vibrauto-flot) e o comportamento em função da frequência de excitação. Os pontos indicam faixas de frequência de ensaio (14 Hz, 33 Hz e 47 Hz)..... 162

4.2 Potência consumida na operação com flotação a ar induzido em função do tempo de residência. Três curvas mostram o desempenho em diferentes faixas de frequência e pontos indicam vazão efetiva com relação a vazões nominais..... 163

4.3 Potência consumida em função do tempo de residência para as três 164

modalidades de tratamento a vazão efetiva correspondente à vazão nominal (Q_n = 10 mℓ/s). Pontos indicam faixas de frequência de análise.....

4.4 Comparação de elevação do rendimento efetivo em fluxo entre processos, *Vibrauto-flot*, *Vibra* e *Vibra-flot*, em função da frequência de excitação..... 166

4.5 Influência da frequência de excitação na vazão específica comparada à vazão nominal em fluxo aberto (sem adsorvente), em operação com flotação a ar induzido..... 167

4.6 Diminuição do tempo de residência em função da frequência no processo (*Vibrauto-flot*)..... 168

4.7 Queda percentual de TOG em função do tempo de residência para três faixas de frequência de excitação com o controlador de fluxo calibrado para máxima vazão de ensaio..... 169

4.8 Queda percentual de TOG em função da vazão efetiva específica para três faixas de frequência de excitação com o controlador de fluxo calibrado para máxima vazão de ensaio..... 170

4.9 Queda percentual de TOG em função da vazão efetiva específica em três faixas de frequência de excitação, e respectivas amplitudes de deslocamento, com varredura em vazão específica nominal no intervalo de ensaio (3,5 mℓ/s – 1.346 mℓ/s.m^2; 7,5 mℓ/s – 2.885 mℓ/s.m^2; 10 mℓ/s – 3.850 mℓ/s.m^2). Barras adicionais indicam intervalo de medição de ensaio e linhas pontilhadas, região de enquadramento do CONAMA. (*Vibra-flot*)..... 174

4.10 Queda percentual de TOG e aumento de vazão efetiva específica em função da frequência de excitação com varredura em vazão específica nominal no intervalo de ensaio (3,5 mℓ/s – 1.346 mℓ/s.m^2; 7,5 mℓ/s – 2.885 mℓ/s.m^2; 10 mℓ/s – 3.850 mℓ/s.m^2). Barras adicionais indicam desvio-padrão de medições de ensaio e linha pontilhada verde, faixa de enquadramento legal do CONAMA. (*Vibra*)..... 175

4.11 Queda percentual de TOG e elevação de vazão efetiva específica, em função da frequência de excitação com varredura em vazão específica nominal no intervalo de ensaio (3,5 mℓ/s – 1.346 mℓ/s.m^2; 7,5 mℓ/s – 2.885 mℓ/s.m^2; 10 mℓ/s – 3.850 mℓ/s.m^2). Barras adicionais indicam desvio-padrão de me- 177

dição de ensaio e linha pontilhada verde, região de enquadramento legal do CONAMA. (*Vibrauto-flot*).....

4.12 Índice de impregnação de óleo no adsorvente metálico em função do Número de Weber (W_e*) vibracional..... 185

4.13 Índice de impregnação de óleo no adsorvente metálico em função da s*uper-criticalidade* vibracional (W_v*)..... 187

4.14 Índice de impregnação de óleo no adsorvente metálico em função do tempo vibracional de residência (t_{Rv}*)..... 189

4.15 Índice de impregnação de óleo no adsorvente metálico em função da intensidade volumétrica vibracional (IW_v*)..... 190

5.1 Ilustração de rejeitos regionais..... 199

LISTA DE TABELAS

Tabela	Descrição	Página
2.1	Grandezas adimensionais de significância para engenharia.....	38
2.2	Grupos adimensionais de significância para engenharia e grupos equivalentes em sua versão vibracional.....	39
2.3	Propriedades de ondas superficiais regulares.....	52
3.1	Tabela da gravimetria de impregnação de óleo no sistema. A coluna grupo de ensaios se refere ao número e modalidade de ensaios sequenciais. Valores da tabela A, B, C e D são concentração de óleo em equipamentos em [mg/ℓ], recuperado por extração e raspagem.....	153
4.1	Resultados de ensaio do tratamento em vibração com flotação a ar induzido (FRV *Vibra-flot*).....	159
4.2	Resultados de ensaio do tratamento em vibração sem flotação (SF Vibra)...	160
4.3	Resultados de ensaio do tratamento em vibração com flotação natural (AUT *Vibrauto-flot*).....	161
4.4	Tabela de parâmetros adimensionais de vibração e impregnação.....	184
	Apêndice	
1	Pesagem de adsorventes em quilograma [kg] antes do ensaio, área superfical e estatística.....	227
2	Pesagem de adsorventes em quilograma [kg] após ensaio, área superficial e estatística.....	228
3	Tabela de graduação da válvula de controle de vazão de ar aferida com rotâmetro (ETM_{11}) à pressão de 1,41 atm.....	229
4	Tabela de calibragem frequência em função da voltagem com auxílio de	229

osciloscópio (ETM_3).....

5 Graduação do regulador de vazão em função da altura manométrica em termos de volume de referência em mililitros [mℓ], e tempo de escoamento em segundos [s]. Obs.: Desvio e = Q_n x (1 - (tempo-médio / t_1 ou t_2)) e Desvio-padrão= $\sigma = \sqrt{\Sigma(e^2)/n-1}$..... 230

6 Graduação do regulador de vazão em função da altura manométrica em termos de volume de referência em mililitros [mℓ], e tempo de escoamento em segundos [s]. Obs.: Desvio e = Q_n x (1 - (tempo-médio / t_1 ou t_2)) e Desvio-padrão = $\sigma = \sqrt{\Sigma(e^2)/n-1}$..... 231

7 Graduação do regulador de vazão em função da altura manométrica em termos de volume de referência em mililitros [mℓ], e tempo de escoamento em segundos [s]. Obs.: Desvio e = Q_n x (1 - (tempo-médio / t_1 ou t_2)) e Desvio-padrão = $\sigma = \sqrt{\Sigma(e^2)/n-1}$..... 232

Capítulo 1

Introdução geral

1. Introdução

1.1 Introdução geral

O processo de produção de petróleo bruto para refinamento e obtenção de derivados é realizado sob modalidades tecnicamente referidas como *on-shore* e *off-shore*, isto é, no continente e no mar. Em qualquer circunstância, é imprescindível realizar tratamento do óleo obtido e usualmente se faz através de estações ditas, "primárias de tratamento". Esse ofício adéqua petróleo a operações de refinamento que se sucedem.

Nas diversas etapas que conduzem à obtenção do petróleo natural ou, por assim dizer, em estado livre de elementos indesejáveis ao processamento de refino, considerável quantidade de água residual em seu conjunto, rica em potenciais contaminantes, é produzida e pode ter como destino final o meio ambiente. O volume de água de produção aumenta com o amadurecimento de poços, isto é, com o tempo de explotação, podendo chegar a quatro ou cinco vezes, às vezes mais, o volume de óleo bruto produzido (Thomas, 2004). Qual grande desafio do século XXI preconizado pela Lei das Águas, Lei N.º 9.433/97, gerir o volume de água disponível no planeta que, segundo (Meidment, 1993 *apud* Cavaco, 2004), 97,44% é salina, 1,77% se encontra congelada em geleiras, restando 0,79% de água potável disponível em curto prazo. Isto obriga setores produtivos e a população em geral, buscar formas de racionalização de consumo d'água, uma vez que qualidade e disponibilidade são fatores limitantes do desenvolvimento urbano, industrial e agrícola (Monteiro *et al*., s/d). Com esta preocupação, cumpre desenvolver sistemas de tratamento eficazes para a água produzida, capazes de devolver-lhe condições adequadas não somente de reuso por parte de segmentos petroleiros, como também para fins urbanos, industriais e agrícolas, e de reintegração ao meio ambiente.

O potencial poluidor da indústria de petróleo é quantitativa e qualitativamente elevado, sobretudo no que respeita água de produção, carreadora de mais de 95% do poder poluente da atividade (Thomas, 2004). No cujo ambiente imposição legal, de ordem governamental, para a salvaguarda ecológica são dia-a-dia mais restritiva. Ao passo em que é desafiador, o quadro é preocupante, e não por menos, distintas técnicas de tratamento para água residual, elaboradas sob os mais variados princípios, da separação gravitacional ao ciclone, da flotação aos métodos biológicos ou de filtração avançada, o escopo é sempre o mesmo: enquadrar o e-

fluente em padrão químico adequado à reintegração ao meio ou reuso, seja pelo próprio seguimento petrolífero ou outro seguimento da atividade humana.

Os processos de tratamento de água produzida ou de produção, como se sói referenciar, oriunda da extração e beneficiamento de óleo bruto estão inseridos em três grupos básicos: eletroquímicos, físico-químicos e biológicos. A natureza da união óleo-água é caracterizada por um lado, pela dimensão média das gotas de óleo inseridas, por outro, pela natureza da interligação dessas gotas com elementos usualmente presentes como sais, surfactantes, resíduos de fluido de perfuração, areia, argila, partículas de asfaltenos, etc, que contribuem no sentido de recrudescer o efeito de adsorção entre óleo e água. Estes e outros agravantes operacionais orientarão a decisão de empregar um ou outro processo em particular que, associado ao dispêndio de espaço físico, a guisa de como se sucede em produção *off-shore*, completará o equacionamento decisivo.

Neste sentido para se enxergar com propriedade a dimensão do problema, se imagina que gotas de óleo podem ser tornadas muito pequenas na dinâmica do processo a que se submetem. No percurso da jazida ou formação aos primeiros estágios de beneficiamento do óleo, a mistura trifásica água-gás-óleo bruto experimenta cisalhamento fluídico de natureza vária. Isto se dá por pressurização e turbulência imposta por rotores de bombas, estricção de válvulas, desaceleração e encurvamentos de tubulações. Também pela própria natureza do escoamento trifásico onde vapor e líquido misturam-se a altas taxas de fluxo levando água, óleo e sólidos finos a mesclarem-se em um quasi-estado de solução, difícil de separar. Isto obviamente requererá processos apurados de separação, sobretudo a concentrações da ordem de 5 mg/ℓ, e diâmetros de gota abaixo de 10 μm, usuais em operações de refino. Nesses casos processos de oxidação biológica e processos de filtração avançada são normalmente utilizados (da Rosa, 2002). Em qualquer dos casos, os primeiros, requerem reator aeróbico e anaeróbico, ou lagoa de estabilização, (Rego, 2008) com consequente demanda de área de instalação; o segundo, a cuja vazão que oferecem é relativamente limitada para atender a um volume de água de produção que não raro atinge 16.000 m^3 por dia (da Silva *et al*., 2007). Eis o desenho da magnitude do problema a que se entrega o setor petroleiro, sobretudo no cenário brasileiro onde a produção petrolífera é 80% *off-shore* (Corrêia Júnior, 2008).

Há quase um século o problema da contaminação de água por óleo tem recebido atenção de engenheiros, técnicos e pesquisadores como bem mostra (Hedestrand, 1923) sobre a deposição de fina camada de óleo sobre água. No Brasil a resolução nº 020/86 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional

do Meio Ambiente (SISNAMA), instituído pela Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), estabelece limites de 20 mg/ℓ para lançamento de águas oleosas ao mar ou corpos hídricos, e 5 mg/ℓ para injeção no subsolo (formação ou jazida) em operações de recuperação secundária de óleo. Esta operação consiste em pressionar óleo bruto na própria jazida com água quente ou vapor d'água para facilitar a explotação, principalmente em poços que sofrem depleção pela idade.

Em se tratando de plataformas se tolera iridiscência da água, porém, o limite é 20 mg/ℓ e 40°C máximos para descarte de dispersões de óleos e graxas em água. Em águas internacionais limites para plataformas estão entre 10 e 40 mg/ℓ (da Silva *et al*., 2007). Embora pareçam valores irrisórios da ordem de miligramas, cumulativamente estão longe disso. Havia dez anos a Bacia de Campos no Rio de Janeiro gerava 706.000 m^3 por dia de água produzida, dos quais 584.000 m^3 por dia foram descartados no mar, perfazendo um despejo de 40.000 toneladas de óleo no mar ao final de um ano (da Rosa, 2002). Inclui-se nessa equação, resíduo de substâncias químicas floculantes, desemulsificantes, coagulantes, enfim, todo um arcabouço químico, não menos poluente, de adjuntos de processamento em concentrações de 1 mg/ℓ a 300 mg/ℓ de efluente tratado (Rego, 2008).

Projetar adequado sistema de tratamento de água produzida que se insira no contexto tecnológico de um problema dessa ordem, requer abandonar um pouco práticas usuais fundadas na imediata ação química. Neste sentido propõe-se inovador estudo no campo de tratamentos físico-químicos de água residual. Particularmente, água de produção petrolífera é de interesse vital pelo imperioso volume e extensão envolvidos. O sistema que se propõe tem por base, agitação da massa líquida proporcionada por efeito vibratório. O efluente é forçado escoar por um labirinto metálico de características adsorventes e alta permeabilidade. Simultaneamente bolhas e microbolhas de ar são geradas por desestabilização da interface água/ar com formação e quebra de ondas superficiais. A criação de uma parede de macro e microbolhas de ar renitentemente lançadas em contracorrente, tem objetivo de frear gotículas de óleo qual peneira aérea, para expô-las à agitação oscilatória do fluído que as arrebata contra o adsorvente metálico. Equipamento e processo é objeto de reivindicação de patente do autor (PI BR 10 2013 024672 7 e PI BR 10 2012 023580 3) e registro de marca (BR 907094856).

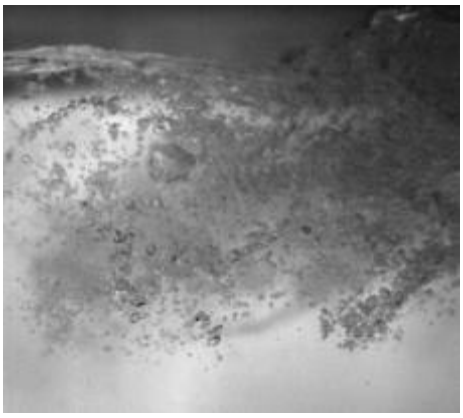
Nishi *et al*., (2011) relataram problemas ocasionados por resíduo de adjuntos químicos utilizados no tratamento de água para consumo humano, mais precisamente, a influência danosa do resíduo de alumino-sulfatos sobre o sistema neurológico. Filosoficamente se dis-

corda da deliberada adição de produtos igualmente poluentes e nocivos à saúde, como alternativa *sine qua non* de combate à poluição, sobretudo quando o efluente é água.

A natureza ensina de forma singela, como devolver-lhe o que se lhes tiram. É bastante examinar o diligente trabalho de (Bird, 2010) sobre cascatas de bolhas-filhas de ar que nascem da ruptura da fina interface marinha. O ponto-chave de seu brilhante estudo é a fenomenologia verificada ao nível do mar onde se estima que, por segundo, entre 10^{18} e 10^{20} bolhas de ar eclodem da quebra de ondas, proporcionando primoroso espetáculo natural de transferência e troca de massa e energia com a atmosfera, contabilizados como calor, gases dissolvidos e matéria biológica, essenciais à biogênese. As figuras, Figura 1.1a e 1.1b, ilustram o fenômeno. Deane & Stokes (2002) investigaram a distribuição do tamanho de bolhas nos segundos que se sucedem à quebra de uma onda para avaliar a aeração marinha subsuperfície, e que fatores determinam o espectro da distribuição.

a)

(Extraída de: CIOE, 2013)



b)

(Extraída de: Deane & Stokes, 2002)

Figura 1.1 Imagens da quebra de ondas superficiais: a) Desestabilização e quebra da onda d'água, eclosão de bolhas de ar e ejeção (aerossol) b) Imagem da região abaixo da superfície da onda após a quebra com formação de macro e microbolhas.

Cabe destacar que energia vibracional é menos poluente em todos os sentidos. Com mais propriedade caracteriza-se como conceito de sustentabilidade, a vez que impõe dinâmica sem que seja obrigatório o contacto e mais desempenho no que concerne ao consumo energético, pelo menos é o que apontam resultados deste trabalho oportunamente mostrados no decorrer da apresentação.

A fenomenologia do efeito vibratório não é estudo recente. Embora o advento de técnicas numéricas tenha ganhado corpo no âmbito da pesquisa a partir da década de 1990 (Mayor, 2005), já no primórdio da era moderna, por volta de 1831, *sir* Michael Faraday publicara os primeiros resultados de ensaios sobre descrição de fenômenos vibratórios vivificados na superfície da água e em leitos de materiais granulométricos (Faraday, 1831) e (Götzendorfer, 2007).

Em seu tratado de máquinas de transporte contínuo ou em batéis, Spivakovski & Dyachkov (1985) fornecem um bom panorama do uso de vibrações para variados fins. São relatadas premissas operacionais de se poder lidar com fluxos industriais de material granulométrico, orgânico ou inorgânico, de mais de 50 m^3/h (aprox. 130 t/h no caso de minério) a taxas entre 80 e 200 kg por metro linear. Unidades de transporte nesses casos podem atingir 6 metros de comprimento. Com devida diligência dimensional, são grandezas que guardam boa proporção se comparadas a volumes observados na geração de água produzida e seu tratamento, que não muito raro atingem 100 ℓ/s. O propósito aqui não propriamente esteja dirigido ao fluxo no sentido lato, mas, à semelhança de poder de operar grandes massas.

Embora o caráter dessa exposição deva ser meramente introdutório, parecendo prematura aqui, tal discussão, valores são fornecidos com intuito de estabelecer determinada relação de grandeza entre processos de princípios operacionais distintos. Associativamente na escala de proporção em que se realizou a pesquisa muito haverá de ser aprofundado no futuro para tornar possível estender resultados no universo de proporção industrial. Contudo existem semelhanças: valores de parâmetros operacionais de vibração citados por Spivakovski, & Dyachkov (1985) revelam ordens de 1,0 mm a 15 mm de amplitude e entre 5,0 e 20 Hz de frequência absoluta. Neste trabalho foram operados valores próximos situados na faixa de 0,5 mm a 2,8 mm de amplitude e entre 14 e 47 Hz de frequência de oscilação. Conclui-se que se por um lado há diferença de volumetria, por outro há concordância de fenomenologia.

1.2 Objetivo geral

No sentido mais abrangente o objeto desta pesquisa é projetar inovador sistema vibrátil para tratamento de água de produção de petróleo que prescinda uso de coadjuvante químico de tratamento, usualmente empregado para melhorar desempenho de processos. O sistema produz flotação natural, fomenta choque renitente de gotas dispersas de óleo entre si e com o

elemento adsorvente, sobretudo, por efeito vibratório que induz movimento por vórtice na vizinhança das peredes metálicas.

As principais características do adsorvente concentram-se na natureza metálica, hidrofílica e de retornabilidade por simples processo de limpeza. Sabe-se que produtos coadjuvantes químicos, em seu conjunto, à medida que aumentam o desempenho da técnica de separação, deixam resíduo na água tratada prejudicial ao ecossistema próximo e à saúde como um todo. Adicionalmente podem comprometer a pureza do óleo recuperado e dificultar operações subsequentes de refino. Técnica vibracional, pouco explorada no contexto de tratamento de efluentes, é empregada neste trabalho também como alternativa para abaixar custo energético à medida que pode produzir flotação natural ou, *autoflotação*, - nomenclatura criada para designar o fenômeno -. Em decorrência surgem perspectivas de prescindir uso de hidrociclone e flotador, comumente empregados para tratamento de efluente. Flotadores removem frações de gotas menores, impossíveis de serem separadas por efeito ciclone.

1.3 Objetivo específico

Para se alcançar o objetivo mais abrangente da pesquisa buscou-se:

- Construir o protótipo e um sistema elástico de suspensão de forma que o valor da frequência natural de vibração situe-se próximo de faixas operacionais de frequência recomendadas, na literatura científica, pelo bom desempenho em operações congênere.
- Caracterizar o comportamento dinâmico do sistema, a partir da identificação da frequência natural, e estabelecer parâmetros dinâmicos de ensaio como frequência e amplitude de deslocamento.
- Avaliar o comportamento fluídico do efluente em vibração quanto à geração de flotação natural para, dentre outros aspectos importantes, definir geometria apropriada ao reservatório de efluente do sistema de tratamento.
- Estabelecer um modelo matemático da velocidade admitida para gotas de óleo dispersas tendo-se por base valores relatados pela literatura científica como, vazão de alimentação, energia vibratória e velocidade devido à ascensão e eclosão de bolhas de ar.
- Avaliar consumo energético, vazão efetiva, teor de óleo e graxa remanescente no efluente tratado (TOG) e nível de impregnação de óleo no adsorvente metálico.

1.4 Justificativa

O caráter multidisciplinar do trabalho é a maior fonte de instrução do processo ensino, aprendizagem e pesquisa. O foco da pesquisa em seu conjunto contempla pormenores do universo científico, variados e inter-relacionados. Cita-se a concepção da geometria do sistema mecânico, a dinâmica e a fluidodinâmica intrínsecas, o controle, monitoramento e processamento de sinais digitais, análise e aquisição de dados por imagem, além de vasta fenomenologia físico-química permeio. Em particular neste último caso, fenômenos que se verificam na interface fluídica ar-água, ar-óleo e óleo-água, dominam o problema em apreço. O universo de forças de natureza molecular responsáveis pela interação de matérias diferentes em estreito contacto, denominadas, forças de fisissorção e de quimissorsão influencia eficiência e viabilidade do processo criando ou não perspectiva de estudo a curto ou longo prazo.

Água contaminada por óleo e congêneres é um sistema físico-químico emulsivo que sempre estará inserido na pauta de preocupações e prioridades das sociedades industrial e civil. Constitui desafio da ciência das operações unitárias, do ponto de vista ecológico, dos governos que almejam futuro venturoso para os filhos. O desafio de conceber sistemas e processos que permitam tratar efluente aquoso, sobretudo, contaminados por oleaginosos, para pronto restabelecimento de propriedades naturais dispensa justificativas. Sabe-se ser inumerável atuais sistemas e processos de tratamento de efluentes de produção de petróleo e congênere, eficiência, vantagens e desvantagens. Não obstante a busca por soluções que melhorem o desempenho em todos os sentidos, sem perder de vista princípios de sustentabilidade, é urgente, - inadiável -. Volumes de água envolvidos são gigantescos como também é o risco para a saúde do planeta. Eis a preocupação que justifica o esforço despendido nesta insipiente e inovadora pesquisa, cujo aprofundamento através de trabalhos futuros há de gerar bons frutos.

1.5 Delimitação do trabalho

O sistema que se concebeu e se batizou com acrograma, *VIBRAUTO-FLOT,* e ora se apresenta, é equipado com adsorvente espiral metálico. Se lhe investigou em vários aspectos operacionais para avaliar a fenomenologia envolvida e desempenho do tratador de efluente oleoso. Deve-se considerar o estágio insipiente de estudo da fenomenologia, de escassa bibli-

ografia. Portanto, não é escopo do trabalho descrever matematicamente a dinâmica intrínseca de movimento do fluío no interior do adsorvente e efeito sobre o desempenho do processo.

De um modo geral foi projetado para quatro modalidades de operação:

- Operação com vibração e flotação induzida por compressor;
- Operação com vibração unicamente;
- Operação com flotação induzida unicamente;
- Operação com vibração e flotação natural ou, *autoflotação*.

Realizaram-se operações em condições de fluxo contínuo e alimentação gravitacional controlada por controlador de vazão, construído e aferido para tal. Operações em que se realizou flotação induzida por compressor de ar, foram controladas por controlador de vazão construído e aferido com rotâmetro. Com especificações e modalidades operacionais definidas anteriormente o sistema limita-se ao estudo laboratorial, a vazão máxima específica (Q_{efa} = 3,7 $\ell/s.m^2$). O teor de óleos e graxas (TOG) do efluente sintético se manteve abaixo de 150 mg/ℓ.

A extensão de resultados a sistemas da ordem de grandeza industrial requer pesquisa mais aprofundada e construção de um sistema tecnicamente mais elaborado para este fim. Também não se pode avaliar e concluir sobre a influência da vibração na estabilidade de plataformas, ainda que suas massas sejam infinitamente superiores à do sistema. Não obstante, conclusões extraídas do conjunto de análises feitas permitem vislumbrar horizontes relativamente nítidos, uma vez que se procurou projetá-lo dentro do padrão mais próximo possível de sistemas reais, embora limitações de escala.

Do ponto-de-vista operacional, objeta-se especificamente aplicação ao tratamento de efluente aquoso para remoção de óleo emulsionado apenas. Nada se pode afirmar, no entanto, a respeito de elementos poluentes como sais, metais pesados, sulfobactérias, sólidos suspensos, alcalinidade ou matéria orgânica que não a guisa de oleaginosos. A remoção desses elementos consagraria o pleno tratamento de efluente para enquadramento ao grau de potabilidade, o que está fora do escopo e alcance do sistema que ora se propõe.

1.6 Estrutura de corpo da tese

O trabalho foi estruturado em capítulos contendo as seguintes subdivisões:

Capítulo 1: Introdução geral onde se apresenta o trabalho em seu conteúdo mais abrangente no que concerne à problemática da produção de água oleosa, legislação em curso, perspectiva mais promissora do trabalho. Delineam-se objetivo geral e específico. Apresenta-se justificativa para a realização da pesquisa e desenvolvimento. Delimita-se o sistema quanto à possibilidade de aplicação e extensão de resultados, isto é, o universo qualitativo e quantitativo afora de quê resultados não devem ser considerados válidos por mera extensão de propriedade e magnitude. O documento é amplamente ilustrado para fins didáticos e de consulta.

Capítulo 2: Aspectos teóricos que auxiliam a leitura do documento no que concerne água produzida, emulsão, adsorção, números adimensionais, princípios de vibrações mecânicas, fenômeno ondulatório em superfície fluídica e noções de ciência da interface. São fundamentos que embasam o estudo e discorrem sobre atualidades científicas da área.

Capítulo 3: Considerações metodológicas de pesquisa onde se procurou delinear o percurso que conduziu à consolidação da pesquisa do início ao estado atual. Da concepção aos primeiros ensaios, se procurou dotá-la de aspectos científicos no que concerne aos métodos que conduziram a definição de configurações geométricas e ao monitoramento dinâmico para adequada aquisição de dados. Espera-se com esta exposição deixar patente perspectivas promissoras da pesquisa e de sua aplicação em escala industrial. Procurou-se simular operações reais com relativa aproximação, por se tratar de um modelo de sistema de proporções reduzidas e de controle limitado, guardando-se limites de ordem orçamentária, em primeiro lugar. Dados coletados de ensaios são agrupados em tabelas autoexplicativas. As faixas de frequência de vibração e velocidade admitida para gotas dispersas fundam-se na bibliografia consultada. Finaliza-se o capítulo com exposição ilustrativa detalhada do sistema e metodologia experimentais onde se elenca procedimentos de aquisição de dados operacionais, a exemplo de vazão efetiva e potência consumida, e de analise de efluente tratado, para avaliação de desempenho. Materiais utilizados, preparação de emulsão sintética, processo de secagem do adsorvente pós-tratamento e técnicas de aferição do óleo impregnado em equipamentos foram delineadas

e sequencialmente descritas.

Capítulo 4: Resultados e discussões, a síntese teórico-experimental do trabalho realizado. Resultados de tratamentos obtidos mediante a tecnologia corrente são referenciados para avaliação de desempenho qualitativa e quantitativamente. O valor de TOG do efluente tratado é apresentado em conjunção com o índice de impregnação adimensional de óleo no adsorvente. Trata-se do mecanismo físico-químico primordial do processo e medida de desempenho, Avaliada em função de grandezas dimensionais como vazão efetiva e frequência ou adimensionais como número de vibração adimensional, correspondente ao número de Froude quadrático, e número de Weber em versão vibrátil.

Capítulo 5: Conclusão do trabalho e perspectiva de consolidação da área de pesquisa através de trabalhos futuros, aprofundamento do estudo, ramificação e extensão a áreas correlatas de conhecimento que se inserem no contexto científico e tecnológico.

Por fim, apresentam-se Referências bibliográficas, patentes reivindicadas e Apêndices, auxiliares de referência e consulta.

Capítulo 2

Aspectos teóricos

2. Aspectos teóricos

2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados aspectos teóricos que embasam a análise em apreço. Adicionalmente exibe-se um relativo panorama do quadro recente, ao menos dos últimos dez anos, da pesquisa em curso voltada a problemas do extrativismo petroleiro, particularmente relacionados com água de produção, efluente oleoso de grande significância ambiental. A contenda científico-tecnológica para minimização do impacto ambiental, de apuradas técnicas de separação do óleo em emulsão, é resumidamente demonstrada e discutida. Vantagens e desvantagens de técnicas industrialmente em curso são abordadas.

O objeto principal do trabalho é desenvolver um sistema de tratamento da água produzida com características inseridas no conceito de sustentabilidade e perspectiva de aplicação em escala industrial. Portanto, procurou-se delinear pormenores da ciência, mecânicos e físico-químicos, suficientes para compreensão da idéia proposta. Neste sentido se ilustra e se descreve conceitos inerentes à água produzida, emulsões e colóides, formação e fatores que podem influenciar a estabilidade ou, dificuldade de separação dos elementos emulsionados, o conceito de adsorção, técnicas usuais de separação de emulsões de água produzida, vibrações mecânicas, movimento ondulatório superficial e princípios físicos relacionados.

Para auxiliar a avaliação de resultados, explicação e interpretação da fenomenologia envolvida, procurou-se fornecer, de forma resumida, princípios físicos e matemáticos de análise dimensional com ênfase ao "Teorema dos Π de Buckingham" ou, Pi de Buckingham (Letra do alfabeto russo). O estudo embasa a criação do índice de impregnação para análise de eficiência, mostrado no Capítulo 4 sobre "Resultados e discussões".

2.2 Água de produção ou água produzida e suas implicações

O petróleo, segundo a mais aceita teoria de formação, é oriundo do depósito de grandes quantidades de matéria animal e vegetal decomposta sob a ação de bactérias, calor, e elevadas pressões de natureza geológica imposta pela crosta terrestre e sua incessante dinâmica

há milhões de anos. Misturas formadas majoritariamente por carbono e hidrogênio, elementos estruturais dos seres vivos, dão origem a hidrocarbonetos, elementos básicos constituintes do óleo denominado petróleo, alusão nascida do latim que quer dizer, *petra oleum*. Formado a intensa pressão e temperatura de rochas impermeáveis, migra dos locais de formação através de rochas porosas até encontrar rochas impermeáveis, seladoras, onde se acumula qual esponja caseira a embeber a água de um copo. A produção de um poço de petróleo, comparativamente, consistiria então em fazê-lo fluir do poço, no caso, o copo com água e esponja, até a superfície. Assim se lhe extrai, ou explota, como tecnicamente se sói referir, e a cuja quantidade e porosidade da dita esponja o classificará ou não como jazida comercial.

Dependendo da pressão e da formação onde se encontra o petróleo acumulado, pode haver gás natural, petróleo e água, na ordem da superfície ao subsolo, devido às diferenças de densidade, isto é, o menos denso fica em cima. A água que fica por baixo é chamada, água produzida, e por conta de condições necessárias à produção de petróleo flui em meio ao petróleo carreando areia, sais, bactérias, metais pesados, gases contaminantes como gás carbônico (CO_2) e gás sulfídrico (H_2S) (da Silva *et al*., 2007). Segundo Silva (2000), também um pouco de radioatividade. Abaixo, a Figura 2.1 ilustra a conformação de uma jazida de petróleo e na página seguinte, Figura 2.2, se mostra uma imagem do aspecto da água produzida comparada a água medianamente limpa.

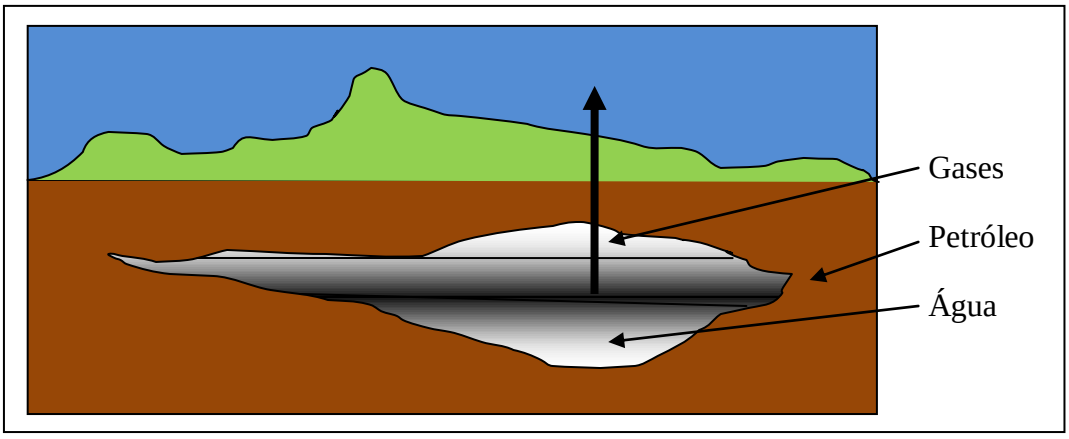


Figura 2.1 Ilustração de três fases em equilíbrio de uma jazida de petróleo.

A origem da água da jazida ou, água de formação, produzida com petróleo, está associada à outra fase de migração do óleo (migração secundária) para rochas sedimentares inundadas por água salina em grau variado (Cavaco & Bodstein, 2005). A produção continuada de petróleo e o envelhecimento do poço faz com que a quantidade de água produzida, relativa-

mente pequena no início, aumente. Adicionalmente, operações tecnicamente denominadas, secundárias, que consistem em injetar água do mar, água produzida, ou vapor d'água em locais estratégicos para pressionar o óleo a emergir a superfície, são igualmente responsáveis pelo aumento da quantidade de água de produção. O fluxo de gases nesse processo arrasta gotículas de água e óleo e cria um estado de mistura de fases denominada, emulsão, que será tratado com mais detalhes em tópicos seguintes.

Figura 2.2 Imagem de água produzida.
(Extraída de: Água produzida, 2013.)

Água é conhecida como solvente universal e dissolve quantidades de todos os componentes inorgânicos e muitos orgânicos. Neste estudo o componente objeto de extração é orgânico, óleo adsorvido na água produzida, associado a particulados e diversos sais com forte atividade superficial. Esses se denominam surfactantes, – do inglês, *active surface* –, e tem poder de dificultar a separação embora a quasi-imiscibilidade de ambos.

Estes e outros fatores fazem da água produzida, perfeito contaminante por possuir características físico-químicas semelhantes às da água potável. Isto lhe confere poder de misturar-se naturalmente e de percolar o solo atingindo facilmente lençóis freáticos de água potável, em geral, posicionados próximo à superfície. A composição química é bem conhecida. Faz-se necessário, portanto, tratamentos físico-químicos que minimizem o potencial impacto ambiental oriundo da atividade extrativista de petróleo, não só da água produzida, mas também, da carga química utilizada no tratamento.

Petróleo é essencial à sobrevivência do mundo moderno em face do que representa como produto socialmente necessário. Durante anos após a descoberta dos primeiros poços o Brasil contou com legislação pouco restritiva no que diz respeito aos problemas ambientais relacionados com água. Em 1934 foi sancionado o Código das Águas que assegurava uso gratuito de torrentes inclusive de propriedade particular da água. Meio século se passou para que

efetivamente surgissem instrumentos normativos de proteção ambiental. No meado da década de 1980 foi criado o SISNAMA (Sistema Nacional do Meio-Ambiente), através da Lei 6.938, que deu origem ao CONAMA (Conselho Nacional do Meio-Ambiente) e da Resolução N° 20. No final da década de 1990, foi estabelecida a Lei das Águas, N° 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e através da Resolução do CONAMA N° 265 de 2000, foi estabelecido à Petrobrás realizar auditoria ambiental independente em todas as suas instalações de petróleo e derivado em todo o território nacional.

2.2.1 Fundamentos e importância contextual da adsorção física

Para discutir fundamentos da adsorção é importante distinguir os tipos usuais de adsorção qual seja adsorção física ou *fisissorção,* e adsorção química ou, *quimissorção*. Na adsorção física, forças envolvidas são relativamente fracas, do tipo Van der Wals; na adsorção química formam-se ligações de natureza molecular entre moléculas do adsorbato e superfície do adsorvente. Não obstante, existem casos que se opõem não sendo, portanto, possível categorizar todos os casos inequivocamente. Aspectos distintivos da *fisissorção* e *quimissorção* são basicamente, falta de especificidade da *fisissorção,* baixo calor de adsorção (< 2 ou 3 vezes o calor de evaporação) e não ocorrência de transferência de elétrons embora possa acontecer polarização do adsorbato. Além disso, é rápida, reversível e pode formar monocamada ou multicamada (Ruthven, 1984).

Neste trabalho se busca fomentar adsorção física de óleo em meio ao campo fluídico oscilatório e movimento induzido por vórtices, verificado entre bolhas de ar e gotas de óleo, durante o processo de flotação, e entre gotas de óleo e superfície adsorvente metálica em aço inoxidável. Surfactantes naturalmente existentes no meio exercem notável influência no processo de interação do fluído com o gás, marcadamente na interface. É bastante citar que uma bolha de ar, ascende em uma coluna de água movida por forças de flutuação de Arquimedes, e a velocidade aumenta proporcionalmente ao diâmetro da bolha. Na presença de surfactantes, a pequenas concentrações, a velocidade é consideravelmente afetada pela imobilidade da interface da bolha, por adsorção de surfactantes. Detalhes aprofundados do estudo podem ser vistos em Clift *et al*., (1978). Segundo Waghmare (2008), em meio ao campo oscilatório, às forças de Arquimedes opõem-se forças de arrasto de *Björkness,* versão da força de arrasto de Stokes quando há oscilação fluídica. Na ascensão, surfactantes adsorvidos na interface deslocam-se para a parte inferior da bolha, alteram-lhe a velocidade e impõem movimento sinuoso

que pode fomentar contacto em colunas de adsorção aumentando o coeficiente de transferência de massa. Eis um princípio que norteia a idéia básica de concepção do método de separação ora proposto, em seu primeiro estágio de pesquisa.

A *fisissorção* do processo em apreço, ar/óleo no processo de *autoflotação*, e óleo/aço inox no processo de separação, se verifica em meio ao campo fluídico vibracional constituído por efluente onde à interface, interagem três fases distintas: óleo/metal/água, à superfície do adsorvente metálico, e ar/óleo/água no processo de flotação. Na primeira modalidade, fase decisiva do processo de separação, a molhabilidade do adsorvente por água e óleo, no confronto, pode conferir maior ou menor facilidade de adesão do óleo ao labirinto metálico. Segundo Tang; Richter; Nesic (2009) molhabilidade, em geral, é a interação de uma fase líquida com uma fase sólida quando envolta por uma fase gás ou uma segunda fase líquida. São exemplos de molhabilidade, o espalhamento de líquido sobre uma superfície, a penetração de líquido em um meio poroso ou o deslocamento de um líquido por outro.

No sistema proposto, o adsorvente metálico em forma de labirinto espiral se encontra imerso na emulsão óleo em água, efluente a ser tratado, como se mostrará oportunamente. A eficiência, dentre outros fatores, estará associada ao poder do óleo em deslocar água envolta para aderir ao adsorvente e ser removido. Água por suas características polares assim como o aço, exibem maior grau de interação entre moléculas da interface que óleo, apolar; embora a tensão interfacial sólido/líquido seja considerada muito baixa ou, quase nula (Physics of continuous matter Lautrup, 2013). Isso faz o aço, material fortemente hidrofílico, sujeito à molhagem por água, a despeito da forte tensão interfacial água/ar de 72 mN/m, responsável pelo recolhimento da água em gotículas sobre superfícies metálicas.

No mesmo domínio fenomenológico pesquisa tem sido realizada, embora com objetivo distinto, qual seja inibir processos de corrosão em ductos de condução multifásica de emulsão água em óleo (A/O) e óleo em água (O/A). A meta é diminuir a hidrofilia do aço como forma de evitar contato com a fase, água. Surfactantes, resinas e asfaltenos apresentam caráter relativamente polar podendo atuar como ponte entre óleo e aço para depósito de uma camada de óleo inibidora de corrosão em ductos (Ayello *et al*., s/d).

Tang; Richter; Nesic (2009) examinaram a influência do acabamento superficial sobre a molhabilidade e concluíram que o ângulo interfacial pouco se altera quando se muda de uma superfície rugosa para uma superfície polida, consequentemente pouca influencia sobre a molhabilidade. Possivelmente aumenta-se a adesão com a rugosidade crescente pelo aumento da superfície disponível. Li; Richter; Nesic (2013) investigaram o conjunto de elementos

químicos presentes no óleo e seus mecanismos capazes de alterar a hidrofilia do aço aumentando consequentemente a resistência à corrosão. Um goniômetro e um medidor de escala de fluxo foram especialmente projetados para tal, para medir ângulos estáticos de interfaces de gotas com a sólida superfície do aço para avaliar adesão e performance. O inconveniente da técnica, ou seja, a possibilidade de bloqueio de ductos por depósitos sucessivos de óleos, sobretudo pesados, já havia sido estudado por dos Santos *et al*., (2005). Concluíram sobre a possibilidade de reduzir o ângulo de contacto para 60°, por adição de 1% de meta-silicato de sódio e cloreto de sódio como forma de conter a deposição. Isto é característico de gota pendente, objetivo, naturalmente, de sentido inverso.

Molhabilidade é frequentemente descrita em termos do ângulo formado entre a superfície de contacto e a tangente à superfície da gota no ponto comum, da tríplice interface, formada entre água/óleo, água/aço e óleo/aço. A Figura 2.3 ilustra esquematicamente uma gota pendente (baixa molhabilidade) e de uma gota séssil (alta molhabilidade).

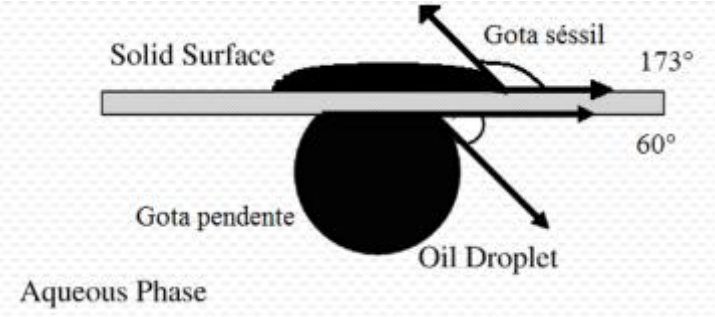


Figura 2.3 Ilustração de gotas e angulação da interface
(Extraída e adaptada de: dos Santos *et al.*, (2006))

De uma ou outra forma o princípio de tratamento proposto neste trabalho repousa sobre base lógica si se considerar resultados das investigações citadas anteriormente. A deposição continuada de óleo sobre o adsorvente como forma de separar óleo do efluente no processo de tratamento com vibração se mostra perfeitamente possível, sobretudo, por tratar-se de fluído com características similares. Quanto à possibilidade de saturação do adsorvente por óleo, o que provavelmente provocaria redissolução, e medidas adequadas à solução do problema, relega-se a outra esfera de investigação e ao maior aprofundamento do trabalho em pesquisa futura.

2.2.2 Emulsão e colóides

Água produzida é uma emulsão salina de óleo em água contendo outros componentes a exemplo de finos particulados de argila, areia, resinas, asfaltenos, metais pesados, gases, bactérias, etc., como citado. Segundo Bennet (1988) *apud* Rego (2008), um quadro típico de efluente oleoso ou emulsão de refinarias, com TOG de 300 mg/ℓ, apresentará a seguinte distribuição de concentração de óleo: 220 mg/ℓ (73,3%) é óleo livre; 75 mg/ℓ (25%) é óleo emulsionado, e 5 mg/ℓ (1,7%) encontra-se solubilizado. Conceitualmente, emulsão é definida como a mistura de dois fluídos imiscíveis, ou parcialmente miscíveis, onde uma das fases encontra-se dispersa na outra sob a forma de gotas de tamanho microscópico ou, coloidal (da Rosa, 2002), parte indissociável da ciência da interface (Mileva, 2010). Emulsões podem ser classificadas segundo o tipo de elemento dispersante e elemento disperso, envolvidos. Assim podem ser emulsão de líquido em líquido, líquido em sólido, líquido em gás, sólido em gás e gás em gás, como nuvens ou névoa por exemplo. A característica básica é a existência de finos componentes dispersos mantidos afastados por forças eletrostáticas. Quando dimensões do elemento disperso são menores que 0,1 μm chamam-se, microemulsão; quando dimensões são maiores, macroemulsão. É uma estrutura inerentemente instável e quanto à estabilidade cinética pode ser chamada: emulsão solta ou leve, dura poucos minutos; emulsão mediana que pode durar até dez minutos, e emulsão pesada, horas ou dias para desfazer-se (Kokal, 2002).

Estabilidade ou quebra de emulsão dependem de uma série de fatores e da origem da emulsão, principalmente, uma vez que a estrutura de particulados e composição química está relacionada com a fonte que a origina (Kokal, 2002). Como a estabilidade depende da resistência da interface ou bolsa *elasto-plástica* que envolve gotas e as impede de voltarem a aglutinar-se, a composição da dita bolsa está associada ao meio de formação e características dos integrantes.

Mcgllivray *et al*., (2009) investigaram a interface ar/óleo/água do ponto de vista da competição entre surfactantes de origem distinta: poli-isobutileno solúvel em óleo, sódio dodecil-sulfato e um surfactante a base de poliacrilamida, ambos solúveis em água. Constatou o poder do poli-isobutileno de estabilizar a emulsão fortemente e deslocar demais surfactantes da estrutura da interface. Credencia-se o poder surfactante do isobutileno, provavelmente, à longa cauda hidrofóbica e solubilidade em óleo. O estudo pode ser estendido a sistemas mais complexos como emulsões de petróleo, por exemplo, em face do alto conteúdo químico em

resíduo gerado da formação geológica natural e operacionalização do processo através do uso de anti-incrustante, desemulsificante, fluído de perfuração, etc..

A estabilidade da emulsão pode ser desejável, no caso de leite, manteiga, sorvete, cremes em geral, etc.. No objeto particular, aqui em estudo, a estabilidade da emulsão é um problema que deve ser solucionado e está relacionada com a eficiência do tratamento de separação óleo-água. Fatores que influenciam a estabilidade da emulsão são, temperatura, pH da salmoura, teor de partículas fortemente polar, idade da emulsão, tamanho e distribuição de gotas, composição da interface, carga cisalhante no curso operacional, enfim (Kokal, 2002).

O estudo de (Delft University, 2013) concluiu que não somente válvulas, estricções e demais particularidades do sistema de transferência de fluídos, são responsáveis pela quebra de gotas de óleo, mas a própria taxa de fluxo. Na proximidade da parede, a camada não deslizante contribui para reduzir o tamanho de gotas de óleo. Em escoamento turbulento favorece a distribuição uniforme de gotas o que estabiliza ainda mais a emulsão. Acrescenta ainda que a viscosidade crescente do óleo favorece a estabilidade da emulsão a diâmetros de gota muito maiores. Por outro lado, surfactantes adsorvidos na interface diminuem a tensão interfacial fragmentando gotas maiores. A interface então tende a contrair-se devido a forças atrativas dos constituintes da região interfacial, desbalanceadas com relação a forças existentes nos fluídos que integram a emulsão.

A energia-livre de Gibbs de uma emulsão é dada pela Equação (1) (Cunha, 2007):

$$\Delta G = \sigma \Delta A_s - T\Delta S \tag{1}$$

onde σ é a tensão interfacial, ΔA_s é a variação de área interfacial e $T\Delta S$, o termo de entropia. Esta equação permite concluir que uma redução na tensão interfacial por surfactantes, favorece o aumento da área interfacial. A Figura 2.4 ilustra, na página seguinte, uma partícula emulsionada e o estado eletrostático de interação onde se mostram duas camadas básicas, diretamente relacionadas com a estabilidade da emulsão:

- Camada principal interna, onde partículas condensam sobre a parte dispersa, conhecida como camada de Stern;
- Camada externa chamada camada difusa ou de Gauy-Chapman, limitada pelo plano de cisalhamento, que a separa da camada de Stern, e o plano de deslizamento que a separa do meio dispersante do ponto de vista eletroquímico.

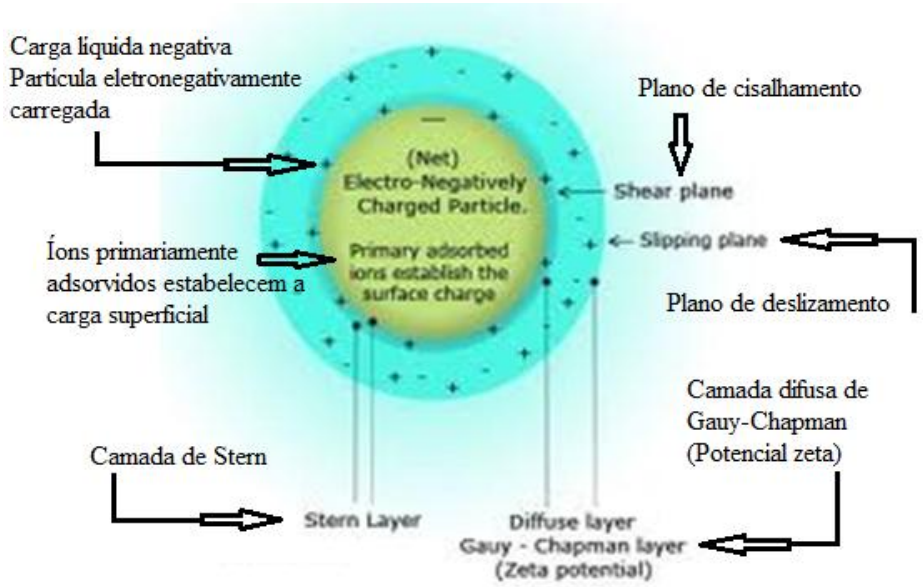


Figura 2.4 Ilustração do estado eletroquímico de uma partícula em emulsão (Extraída de:Goestch, 2006)

Observando-se a Figura 2.4, deve-se imaginar que o mecanismo de desestabilização da emulsão consiste em comprimir a dupla camada elétrica, adsorver para neutralizar a carga, formar ponte interpartícula (floculação) e precipitar. A carga superficial do coloide é o que determina a estabilização eletrostática. Um coloide instável apresenta alta taxa de agregação e no contexto, a movimentação da partícula está associada ao potencial *zeta* que determina sua configuração eletrônica e sua movimentação associada ao plano de cisalhamento na superfície da camada de Stern. O potencial *zeta* da água neutra é zero, também chamado, ponto isoelétrico. Água natural apresenta potencial *zeta* entre (– 20mV) e (– 40 mV) e salmoura, ao (pH = 11, - 19 mV) (Parfitt, 1969). A estabilidade ou instabilidade da emulsão é resultado do balanço entre forças de atração de Van der Waals e forças de repulsão eletrostática que podem ou não manter partículas ou gotículas em suspensão; o balaço dinâmico foi batizado de teoria DLVO em homenagem aos descobridores, precisamente, Djarguin e Landau em 1941, e Verwey e Overbeek, em 1948 (da Rosa, 2002) e (Harif, 2006).

A emulsão de petróleo em água ou oleaginosos em geral, com ênfase a primeira, é um complexo sistema coloidal que requer apurado tratamento para desestabilização e precipitação, tanto para condicionamento da água ou, dispersante, como do óleo ou dispergente, sobretudo com vista à recuperação de óleo. O desenvolvimento de técnicas que aportem um mínimo de carga química tem a vantagem de preservar o conteúdo de óleo a ser recuperado, com baixos índices de surfactantes residuais, e água como meta prioritária. A Figura 2.5 mostra a aparência superficial de uma emulsão de óleo em água salina de produção.

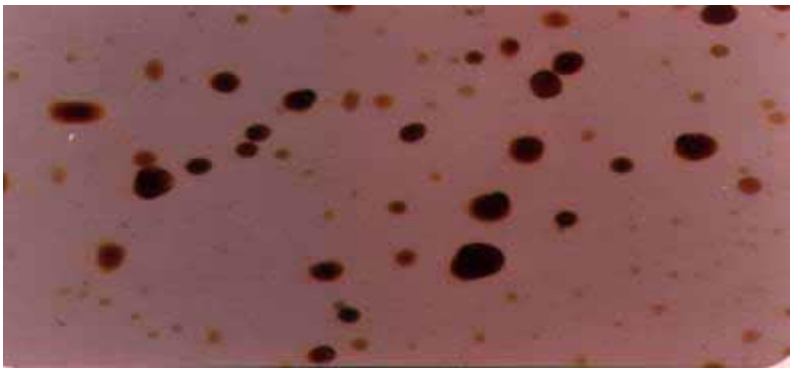


Figura 2.5 Imagem superficial de emulsão de petróleo em água
(Extraída de: Kokal, 2002)

2.2.3 Sistemas usuais de tratamento de água produzida

2.2.3.1 Tratamento de óleo bruto ou primário

Quando fluídos produzidos, gás, petróleo e água de produção, chegam à superfície, inicia-se à primeira fase de processamento denominada processamento primário de fluídos. Foi dito que água de produção se apresenta como uma mistura oleosa contendo particulados, muitos sais e uma fase gasosa à pressão formando mistura trifásica com petróleo. Parte da água apresenta-se na forma livre e parte, emulsionada com petróleo e sólidos diversos oriundos da formação e operações de extração. A porção d'água dita, livre, separa-se já aos primeiros estágios do processamento primário. A fração emulsionada, posicionada à superfície da água livre, segue para ser processada subsequentemente de forma a se habilitar ao descarte ou reinjeção. As figuras, Figura 2.6, Figura 2.7 e Figura 2.8, ilustram, esquematicamente, a fase primária de tratamento de fluídos produzidos.

A Figura 2.6 mostra em série, separadores bifásico e trifásico, devidamente posicionados no processo, sendo que no separador bifásico é feita separação água/gás e no separador trifásico, o tratamento primário do óleo. A água produzida separada pode atingir concentrações de óleo em emulsão na faixa de 50 a 5.000 mg/ℓ aproximadamente, Salinidade de 40.000 a 150.000 mg/ℓ de cloreto de sódio (NaCl) e teor de sólidos suspensos variando entre, 5 a 2.000 mg/ℓ (da Silva *et al*., 2007). A seguir mostram-se ilustrações esquemáticas de separadores bifásico e trifásico, Figura 2.7 e Figura 2.8, respectivamente, complementares do fluxograma, Figura 2.6.

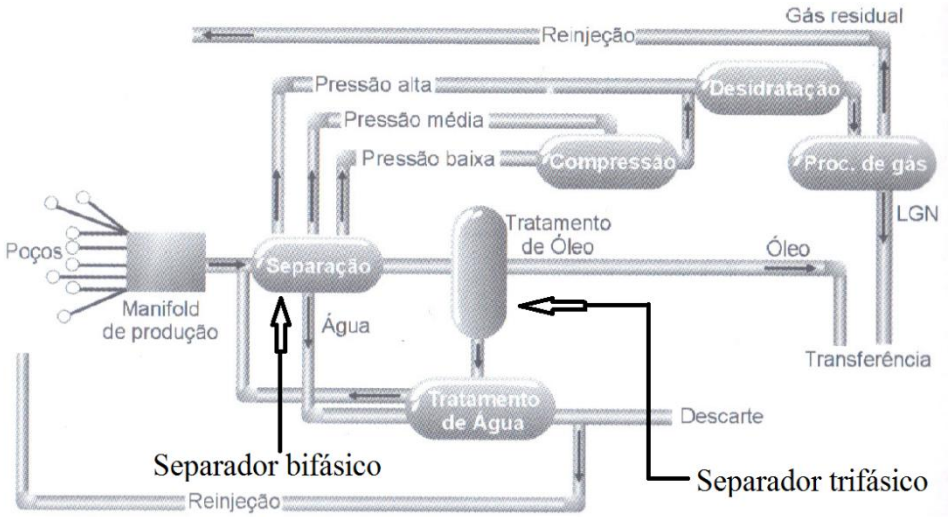


Figura 2.6 Fluxograma do tratamento primário de petróleo

Extraída de: (Thomas, 2004)

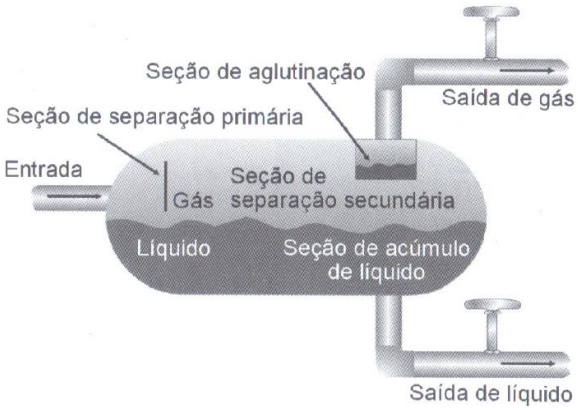


Figura 2.7 Separador bifásico gás/(água+ óleo)

(Extraída de: Thomas, 2004)

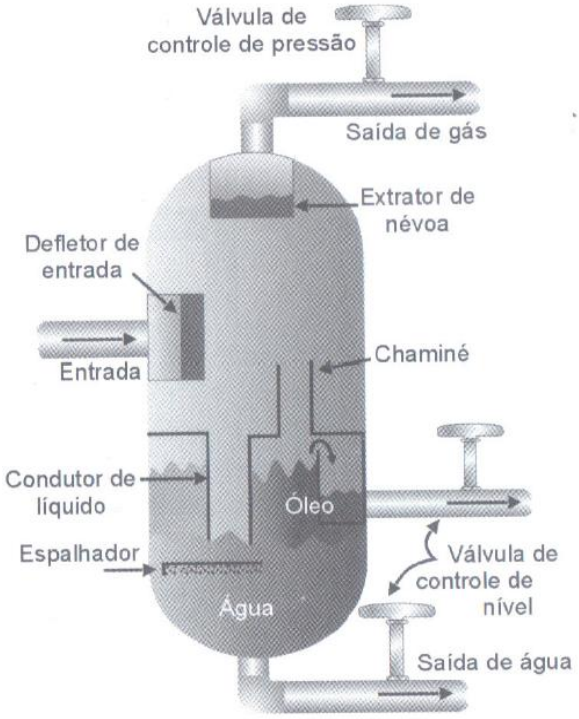


Figura 2.8 Separador trifásico água/gás/óleo

(Extraída de: Thomas, 2004)

O avanço tecnológico permitiu desenvolver acessórios compactos para aumentar a performance de tratadores trifásicos. São denominados coalescedores eletrostáticos de linha e

podem ser instalados no interior do separador trifásico. Operam aumentando a taxa de coalescimento de gotas d'água, em emulsão água em óleo (A/O); é a versão reduzida de tratadores de óleo de grande dimensão conhecidos como, tratadores eletrostáticos.

O processamento mostrado anteriormente, quando instalado em terra (*on-shore*), pode operar com tempo de residência mais longo (20 a 30 minutos) para alcançar concentrações de óleo em torno de 5,0 mg/ℓ, uma vez que problemas relacionados à área utilizada são menores. Entende-se por tempo de residência o intervalo de tempo durante o qual um volume unitário de fluído gasta para entrar e sair do tratador. Em plataformas (*off-shore*) é mais complexo; tempos de residência são menores e concentrações atingem 30 mg/ℓ (da Silva *et al.*, 2007).

Um consagrado sistema de tratamento utilizado em plataformas adota separadores trifásicos em linha seguidos de uma bateria de hidrociclones e flotadores. Polieletrólitos à base de poliacrilamida são adicionados à entrada do alimentador de ciclones. A água tratada é lançada ao mar ou armazenada em navios-tanques para posterior tratamento e reuso em operações de recuperação secundária. O sistema em pesquisa realiza flotação natural com perspectiva de compactar esta cadeia, sobretudo substituir hidrociclones e flotadores.

Objetivamente, o tratamento primário realizado ou em separadores bifásicos e trifásicos ou em API são tratamentos primários de óleo bruto. A água produzida que deixa tratadores primários é de fato, emulsão de petróleo e requer tratamentos mais apurados para separar o óleo da água, em hidrociclones e flotadores. As figuras, Figura 2.9 e Figura 2.10 ilustram tratadores de placas e API, respectivamente.

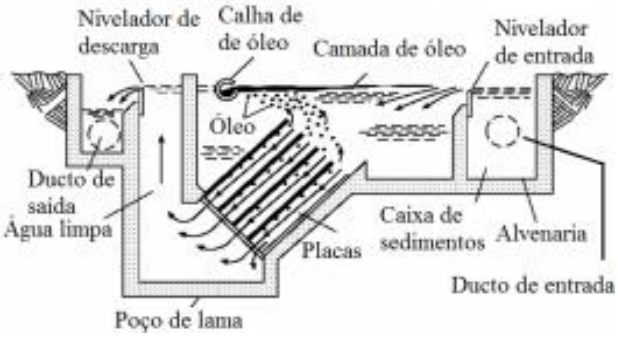


Figura 2.9 Separador de placas CPI (Extraída e adaptada de: ISI Engenharia, 2013)

Figura 2.10 Separador gravitacional API (*American Petroleum Institute*) (Extraída de: da Silva *et al.*, 2007)

O tratamento gravitacional, exclusivamente para operação terrestre, é realizado em sistemas convencionais de grande área conhecidos como sistemas API. Existem variantes desse sistema como forma de aperfeiçoamento, que operam basicamente sob o mesmo princípio, conhecidos como separadores PPI (*Parallel Plate Interceptor* – Interceptadores de placas lisas e paralelas) e os CPI (*Corrugated Plate Interceptor* – Interceptadores de placas corrugadas), mostrados anteriormente.

2.2.3.2 Tratamento de água produzida com hidrociclone

A crescente escalada de produção de petróleo e, por decorrência, de água produzida, tem levado a sociedade científica buscar técnicas eficientes de tratamento em face do volume crescente desse efluente. Seu poder poluidor, na vigília de legislação dia-a-dia mais austera, é o combustível propulsor que move diversificados setores acadêmicos e industriais na pesquisa de técnicas eficientes.

A recente discussão, há pelo menos cinco anos (da Silva *et al*., 2007), gira em torno da possibilidade de realizar tratamento subaquático da água produzida quando o destino é injeção. Propõe-se fazê-la imediatamente após a explotação, quando aflora ao poço. Isto prescindirá tratamentos de adequação da água que estará com características naturais alteradas por processos de explotação. Mas essa é outra discussão. O que se pretende é apresentar de forma sucinta resultados de pesquisa sob as mais variadas modalidades técnicas de separação de emulsão de petróleo das quais umas, representam inovações, outras, aperfeiçoamento, conjunção de técnicas, etc..

A Figura 2.11 mostra, esquematicamente, a fase de operação primária de tratamento concernente ao tratamento de água produzida sucedâneo do tratamento de óleo bruto. Este se realiza em separadores anteriormente citados, aplicáveis a plataformas marítimas. A Figura 2.12 a seguir, ilustra o separador hidrociclone em seus aspectos mais importantes. Em geral, de 10 a 20 unidades ou mais são montadas formando as chamadas, baterias de hidrociclones. É dos mais empregados equipamentos de separação água/óleo em plataformas marinhas (*offshore*). O princípio físico de operação de hidrociclones é o turbilhão em vórtice cujo fluxo dirige-se ao eixo central do redemoinho por ação centrípeta e pode superar 1.000 vezes a força gravitacional sobre a partícula (da Silva *et al*., 2007). O gradiente de pressão cria fluxo reverso na porção central e, por diferença de densidade o óleo, coalesce e flui em contracorrente

para cima onde é separado no vórtice guia (*vortex finder*) localizado ao alto da voluta (Figura 2.12).

Figura 2.11 Ilustração esquemática de uma estação primária de tratamento de água produzida.
(Extraída de: Thomas, 2004)

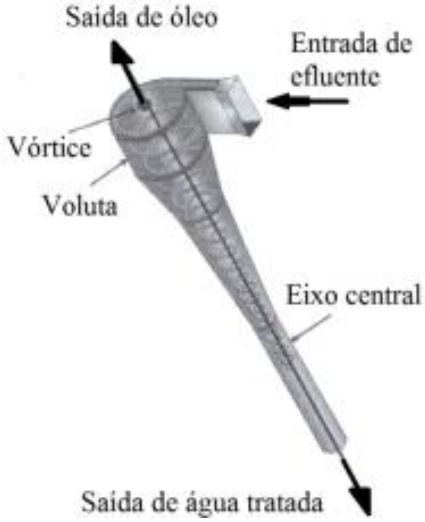


Figura 2.12 Hidrociclone convencional *De-Oilling* (Corrêia Junior, 2008). (Extraída e adaptada de: Thomas, 2004)

São compactos, de grande capacidade de fluxo por área instalada, não requerem uso de polieletrólitos, não possuem partes móveis, requerem pouca manutenção, consomem pouca energia e por operarem a alta velocidade de fluxo, são imunes ao balanço do mar. Por outro lado, não conseguem em uma única passagem enquadrar o efluente aos 20 mg/ℓ de óleo exigíveis por legislação nacional. Sofrem erosão (*scale*) devido à abrasão em ductos de entrada (*liners*) e entupimento por incrustação devido aos diâmetros reduzidos necessários para acelerar o fluído.

Hidrociclone tem demonstrado ser uma eficiente ferramenta de separação água/óleo, sobretudo, em plataformas marítimas onde área é preocupante. Rego (2008) estudou a redução de volume de um hidrociclone utilizando fluidodinâmica computacional. Para tal foi utilizado o *software* ANSYS (Workbench 10.0 e CFD 10.0) cujos valores simulados da eficiência de remoção de óleo comparados com dados reais obtidos junto ao CENPES da Petrobrás, apresentaram diferenças da ordem de 1%. O pesquisador conclui que reduções da ordem de um quinto da altura do hidrociclone e um terço da altura do vórtice (*vortex finder*), mostrados na Figura 2.12, pode proporcionar redução da ordem de 72% do volume global do hidrociclone.

Correia Junior (2008) estudou o problema da quebra de gotas de óleo no interior do hidrociclone como limitante da eficiência e elenca vantagens e desvantagens. Para tal desenvolveu modelos matemáticos de quebra de gota fundados em quebra por bipartição, em escoamento cisalhante, e quebra por capilaridade, verificada em escoamento *elongacional* com formação de inúmeras gotas a partir do alongamento de uma gota. Nesse último caso forças de inércia suplantam forças de capilaridade interfacial. Segundo afirma o autor, em hidrociclones a energia cinética prevalece à elevada velocidade de fluxo, e é proporcional ao quadrado da vazão; gotas de óleo então são submetidas a elevadas taxas de cisalhamento. Na simulação realizada, o número de Reynolds apresentou valor elevado para o escoamento e maior que um, (Re >1) para a gota; depreende-se que forças de inércia devem dominar o problema da quebra de gota. Segundo afirma o autor, ao ser considerada a quebra de gotas de óleo, a maior eficiência de separação em hidrociclones parece ocorrer a vazões entre, 1,0 ℓ/s e 2,5 ℓ/s. Destaca-se que vazões de fluente oleoso em plataformas podem facilmente atingir, 100 ℓ/s.

Filgueiras (2005) realizou análise numérica utilizando *software* Matlab 6.0 para avaliar a sensibilidade de hidrociclones, no que respeita a eficiência de separação. Foram consideradas perturbações na vazão de entrada provocada por escoamento em golfada oriundo do tratador trifásico. Segundo o autor, a eficiência de separação do hidrociclone é influenciada por variações na vazão de entrada, provavelmente pela ocorrência de transbordamento no vórtice, indicativo de eventual desaceleração do fluído no interior do corpo do hidrociclone. Em decorrência, a eficiência decresce quando gotas são menores de 50 μm.

2.2.3.3 Tratamento de água produzida com flotador convencional (FAI)

Flotadores são equipamentos que operam tratamento de efluente mediante injeção de pequenas bolhas de ar na parte inferior do equipamento. Devido a grande diferença de densidade entre ar e água, 1,243 g/ℓ para o ar e 1.000 g/ℓ para água, quase mil vezes, bolhas de ar ascendem à superfície e, no trajeto, ao chocarem com gotículas de óleo dispersas adsorvem e arrastam-nas à superfície permitindo a separação. As figuras, Figura 2.13 e Figura 2.14, mostram esquemas desse tipo de equipamento. O sistema da Figura 2.13 é conhecido como Jameson; o da Figura 2.14, convencional. Ambos se enquadram no conceito de flotador a ar induzido com tempo médio de residência em torno de 5 minutos (da Rosa, 2002).

A indução de ar em flotadores requer utilização de bocais e difusores (*nozzle*) para minimização do tamanho das bolhas de ar. Kress (1972) desenvolveu um bocal (*nozzle*) para

fracionamento e difusão de oxigênio dissolvido em bolhas de hélio, em meio a uma mistura água/glicerina, para medição do coeficiente de transferência de massa.

Figura 2.13 Flotação Jameson
(Extraída de: ISI Engenharia, 2013)

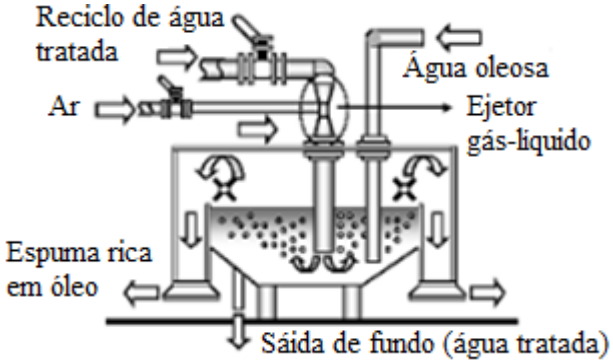


Figura 2.14 Flotador a ar induzido (Nozzle)
(Extraída de: da Silva *et al.*, 2007)

Fracionamento de bolhas de ar em escala laboratorial pode ser obtido através de materiais porosos em cerâmica, aço, vidro, borracha esponjosa, etc.. Todos geram bolhas de boa uniformidade (Tayler, 2011). A Figura 2.15 ilustra o difusor de ar, Westfall (Westfall, 2013) aplicável à floculação em linha.

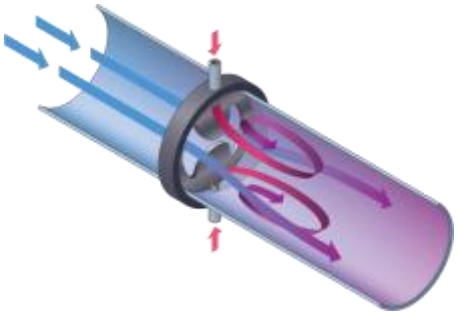


Figura 2.15 Difusor de ar Westfall - US Patent Nº 5,839,828
(Extraída de: Westfall, 2013)

2.2.3.4 Tratamento de água produzida por Floculação-Flotação Centrífuga (FF)

Matiolo (2003) *apud* Rego (2008) fornece bom quadro médio de dimensões de bolhas de ar alcançadas com diversas técnicas de fracionamento. Menores dimensões e uniformidade com pouca dispersão são obtidas com uso de eletrólise ou agitação mecânica, onde

são obtidos valores entre 10 e 40 μm e 10 e 100 μm, respectivamente. Demais técnicas apresentam quadro disperso com rango de 30 a 1.500 μm.

Da Rosa (2002) realizou brilhante trabalho em que foi desenvolvido e investigado inovador processo batizado de Floculação-Flotação Centrífuga (FF). A operação inicia-se com realização de floculação em linha, em serpentina de 20 hélices, utilizando polieletrólito catiônico (PVA - polivinilacrilato) à concentração de 2,0 mg/ℓ. O autor reportou tratamentos realizados em sistema gravitacional PPI da Refinaria Alberto Pasquallini, utilizando floculante catiônico de alto peso molecular (Mafloc-489) a uma concentração de 6,0 mg/ℓ. O efluente tratado apresentou concentração de óleo em torno de 8,0 mg/ℓ ou 91 % de remoção. O processo de Floculação-Flotação – FF também demonstrou ser eficiente por proporcionar efluente tratado com teor de óleo de 10 mg/ℓ, a vazão de ar de 40 ℓ/minuto e vazão específica de mais de 60 m^3/m^2.h. Da Rosa (2002) reportou haver removido outros poluentes como turbidez, sólidos suspensos e matéria orgânica (DBO). Para avaliação preparou-se efluente oleoso sintético de concentração, 140 mg/ℓ a 160 mg/ℓ de óleo, pH entre 6,5 e 7,0 e diâmetro médio de gotas entre 10 e 11 μm, medido com determinador de tamanho de gota (DTG) Malvern System 3601.

Sobre a importância da caracterização da emulsão, recomenda-se o trabalho de Oliveira (2010) em que são comparados métodos de determinação de tamanho de gota para caracterização de emulsão. O autor comparou técnicas de determinação do tamanho de gota via retroespalhamento de lazer e espectroscopia ultrassônica, no que tange a implicação de métodos em caracterizar emulsões. Concluiu que diferentes técnicas de medição parecem não trazer os mesmos resultados. Rodrigues & Rubio[b] (2003) e Moruzzi (2007) desenvolveram engenhosa técnica com auxílio de câmera e *software* de análise de imagem.

Da Rosa (2002) investigou a sensibilidade do processo em operar sem floculante. Na ausência de floculante o teor final de óleo no efluente tratado se quer ficou abaixo do intervalo, 117 mg/ℓ a 145 mg/ℓ, isto é, 25 % e 8 % de remoção apenas. Ao ser triplicada a vazão de ar (120 ℓ/min.) a eficiência praticamente manteve-se em patamar pouco alterado, 93 %. Avaliado sob vazão nula de ar, o sistema voltou a decair em eficiência produzindo efluente com teor de óleo na faixa de 80-115 mg/ℓ, distante do limite de enquadramento legal exigido. Sabe-se, - é importante frisar -, que flotador opera com sistema pneumático a pressões entre 1,5 atm e 2,5 atm ou mais, a depender da altura manométrica ou nível de efluente.

Outro parâmetro importante medido e avaliado por da Rosa (2002) foi o tempo de residência. O autor concluiu que entre 42 e 126 segundos não houve qualquer alteração na eficiência do sistema. Quanto ao custo envolvido nas condições de teste, o sistema Floculação-

Flotação (FF) de capacidade 45 m^3/h, apresentou custo operacional, US \$0,20/m^3, consumo energético, 0,326 kWh/m^3 e para construção, investimento de US \$50.307,80.

2.2.3.5 Tratamento de água produzida por flotação centrífuga

A técnica de flotação centrífuga é similar à técnica, *Air Sparged Hidrociclone* (ASF). Difere apenas por realizar a operação de flotação com adição de aditivos químicos floculantes, fora do hidrociclone, antes da chegada do efluente ao ducto de entrada (*liner*), em serpentina de difusão. Segundo Melo (2002), a capacidade média de processamento em ($m^3/h.m^2$) dos principais sistemas de tratamento de águas oleosas são: API (0,00085); FAD (0,00117-0,0040); FAI (0,01-0,12); Coluna (0,014-0,10); ASH (0,21) e Flotação centrífuga (0,4-0,6).

Para análise experimental pesquisadores do CENPES da Petrobrás, em conjunto com o Laboratório de Tratamento e Reuso de Água (LARA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, desenvolveram o referido sistema de flotação centrífuga em acrílico. As figuras, Figura 2.16.a e Figura 2.16.b, ilustram serpentina e flotador centrífugo, respectivamente.

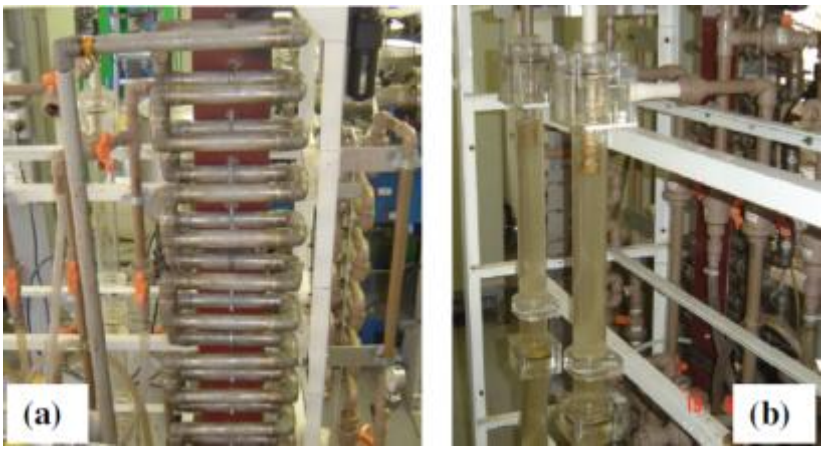


Figura 2.16 Laboratório experimental LARA/CENPES. a) Floculador em serpentinas de difusão; b) Hidrociclones em acrílico para flotação centrífuga. (Processo de reivindicação BR PI0502626-1/ Osvaldo Pereira Jr. e Jailton Joaquim da Rosa).
(Extraída de: Rego, 2008)

Acrescenta-se, que flotação centrífuga apresenta a vantagem da alta capacidade de fluxo, de não requerer compressores, utilizar pouco espaço, fácil manutenção, instalação, operação e ser de baixo custo. A desvantagem é o alto cisalhamento imposto ao fluxo, ineficiên-

cia quando a gota atingir, 10 μm de diâmetro, e não permitir separação completa em um único passe. O autor operou vazão de efluente contaminado de 2,0 m^3/h, TOG na faixa de 90 a 125 mg/ℓ, pH = 6,5, viscosidade do óleo 549 cP e 28,3°API, característico de óleos de campo marítimo embora valores abaixo disso (19,1/API) podem ser encontrados. O aditivo químico utilizado foi álcool polivinílico; a concentração final de óleo esteve sempre abaixo de 10 mg/ℓ de óleo residual, portanto, abaixo do limite de enquadramento legal.

2.2.3.6 Tratamento de água produzida por flotador a ar dissolvido (FAD)

A técnica de flotação a ar dissolvido remonta a década de 1920, usada na recuperação de fibras industriais. Foi tão só no meado da década de 1950 que passou a ser utilizada pela indústria petroquímica (Ellis & Fischer (1973) apud da Rosa (2002)). Vertente promissora surgiu na década passada e valeu o prêmio, "XIX Prêmio Jovem Cientista - 2003 – Água: Fonte de Vida", (Rodrigues & Rubio[a], 2003). Em parceria com a Petrobrás, desenvolveram e investigaram o processo inovador batizado de Flotação a Gás Dissolvido (FGD), em que degaseificadores em desuso existentes em plataformas marítimas, foram transformados em flotadores de relativo desempenho. Utilizou-se efluente sintético à base de sal refinado e sal de bário em concentrações de 60 mg/ℓ e 50 mg/ℓ, respectivamente, para obtenção de características próximas de efluentes industriais. Adicionou-se floculante não iônico, álcool polivinílico (APV), a concentração de entre 3,0 e 10 mg/ℓ. O efluente foi contaminado com óleo de 26 cP de viscosidade a concentrações de 250 a 695 mg/ℓ e diâmetro médio de gotas entre 10 μm e 70 μm medidos com (DTG) da marca Malvern 3601.

Asseguram seus autores, que quando a viscosidade da fase dispersa é muitas vezes maior que a viscosidade da fase contínua, a emulsão apresenta elevada estabilidade. Dimensões de gota utilizadas tornam a emulsão representativa para processos industriais. Estudos de distribuição de tamanho de gotas mostram que diferenciais de pressão de gás da ordem de 11 atm, aproximadamente, produz emulsão com diâmetro médio de gota, 12 μm (Dickinson (1994) apud Rodrigues & Rubio[a] (2003)). Resultados obtidos para exames com Flotação a Ar Dissolvido (FAD) e Flotação a Gás Dissolvido (FGD) mostraram redução de óleo do efluente de 600 mg/ℓ para 50 mg/ℓ em média, o que equivale a 90% de eficiência, mas acima do limite consignado em lei. Utilizaram-se vazões entre 0,4 e 2 m^3/h e o tempo de residência foi em torno de 20 minutos.

Nos ensaios em que não foi utilizado floculante a eficiência foi inaceitável, da ordem de 57 % equivalente a descarga de efluente com 270 mg/ℓ de óleo. O autor acredita que adequações devem ser operadas uma vez que o sistema parece remover óleo livre apenas. Em muitos ensaios a concentração inicial de óleo do efluente variou consideravelmente de 570 mg/ℓ a 1.700 mg/ℓ, o que dificulta estabelecer um padrão de referência para cálculo de eficiência. As figuras, Figura 2.17, Figura 2.18 e Figura 2.19, ilustram o sistema e mostram o saturador com leito de percolação, o vaso degaseificador e o difusor estático Kenics, para floculação em linha, respectivamente.

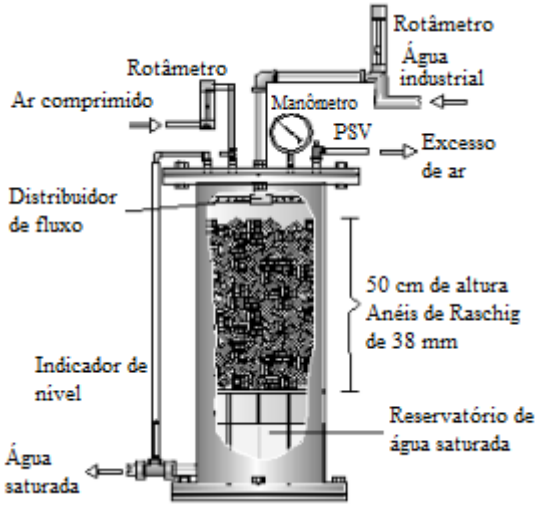


Figura 2.17 Saturador de ar ou gás.
(Extraída de: Rodrigues & Rubio[a],2003)

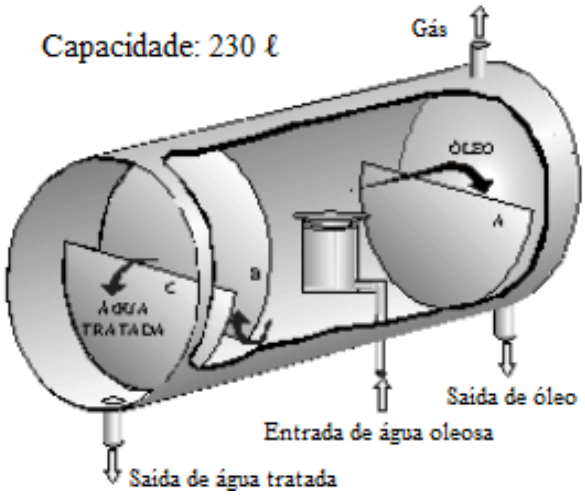
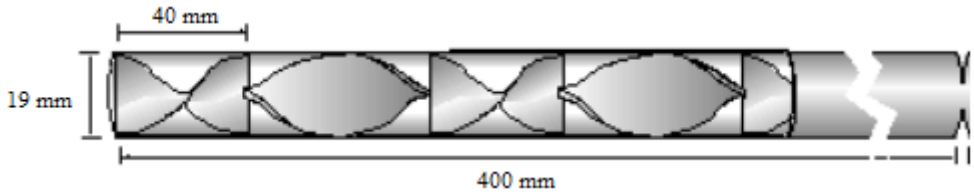


Figura 2.18 FGD ou FAD
(Extraída de: Rodrigues & Rubio[a], 2003)



2.19 Difusor de floculação em linha (Kenics)
(Extraída de: Rodrigues & Rubio[a], 2003)

2.2.3.7 Tratamento de água produzida por eletroflotação (EF)

Outro princípio de tratamento de água produzida e efluente em geral enquadra-se no campo de tratamentos eletroquímicos. Dos Santos *et al*., (2007) investigaram o tratamento de

efluente oleoso usando técnicas de eletroflotação, que consiste em gerar microbolhas de gás utilizando-se cela eletroquímica. O aparato experimental usado compõe-se de cela eletroquímica como gerador de bolhas, de compartimento único, em forma de reator cilíndrico vertical com ânodo (ADE – Ânodo Dimensionalmente Estável) e cátodo em aço inoxidável 316. O efluente executa fluxo contínuo através de uma entrada e uma saída a vazão entre 0,22 mℓ/s e 0,33 mℓ/s.

O efluente sintético, de petróleo e água, foi preparado a concentração entre 245 e 360 mg/ℓ. A tabela de resultados apresentada pelos autores mostra medidas de TOG inicial e final, para a cela desligada, de 360 mg/ℓ e 202 mg/ℓ respectivamente, o que indica impregnação de óleo da ordem de 160 mg/ℓ, em torno de 44 % do valor de óleo inicialmente semeado para obtenção do efluente sintético. Isto se deve levar em consideração para fins de referência no cálculo da eficiência de tratamento. Os autores utilizaram faixa de temperatura entre 30 °C e 60 °C. Resultados obtidos foram apresentados embora se tenha constatado mudança no valor do pH do efluente quando se elevou a vazão de 0,22 mg/ℓ para 0,33 mg/ℓ. Observa-se que a vazões menores de efluente o pH mudou de valor, de 5,5 a 6,0 observado à entrada para, 4,0 a 4,8 na saída. Isto pressupõe haver havido acidificação, nesse intervalo, de natureza não explicada. Si se toma vazões maiores, na faixa de 0,33 mg/ℓ ou mais, se constata o inverso, aumento substancial do pH inclusive até a faixa de alcalinidade, entre 6,2 e 8,4.

Não propriamente explicado, o baixo pH é indicador de adição de ácido ao efluente o que contribui para a desemulsificação do óleo, e distancia o efluente de características naturais da água produzida. O melhor resultado obtido pelos autores através desse método, foi o TOG de 9,5 mg/ℓ ao pH=5,0, com tempo de retenção de 180 min.. Trata-se de valor bastante elevado e, considerando-se aplicações industriais onde vazões ultrapassam 100 ℓ/s, seriam necessários 100 m^3 de armazenagem. Resumidamente, métodos eletroquímicos apresentam melhores resultados a baixo pH com considerável dispêndio de carga ácida para tratamento.

2.2.3.8 Tratamento de água produzida por eletroflotação e processo Fenton

Variante congênere de tratamento eletroquímico de água produzida foi realizada por Gomes (2009) baseando-se na conjunção de eletroflotação com o processo Fenton. O processo Fenton consiste na geração do radical livre, hidroxil, altamente reativo, com potencial oxi-redução superior ao do ozônio e tempo de meia vida da ordem de milésimo de segundo.

Para realização dos experimentos foi confeccionado um reator em acrílico, com 15 litros de capacidade, para processamento em batéis, equipado com ânodo dimensionalmente estável (DAS De Nora – $Ti/Ru_{0,3}Ti_{0,7}$) e cátodo em aço inoxidável (ASTM 316). A maior eficiência de redução de TOG foi de 91,7 % com 100 mg/ℓ de Fe^{2+} consumidos e 180 minutos de tempo de retenção. Peróxido de hidrogênio é utilizado para gerar radicais na presença de ativadores que pode ser sais de ferro, ozônio ou luz ultravioleta. É um processo de mecanismo relativamente complexo onde o radical hidroxil (*OH), altamente oxidante, reage com a maioria dos contaminantes o que é vantajoso, exceto para o aparelhamento metálico. Temperaturas acima de 45° contribuem para degradação rápida do peróxido, diminuindo-se a capacidade de geração de radicais livres. Isto é desvantajoso si se cosiderar temperaturas naturais de água produzida.

O autor não explicita a vazão nominal em batelada. Medianamente se pode presumir girar em torno de 1,4 mℓ/s com base em volumes envolvidos, TOG inicial de 347 mg/ℓ e emulsão preparada com Ultra Turrax T-50 (Janke & Kunkel) de 8.000 rpm máximos. O processo se realizou ao pH = 3,0 com concentração adicional de 1.000 mg/ℓ de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) deixando resíduo da ordem de 3,39 mg/ℓ e o tempo de meia-vida de 3 minutos. Observa-se que esta classe processos envolve adição de componentes químicos com conseqüente geração de resíduo contaminante, além de exigir alto tempo de retenção.

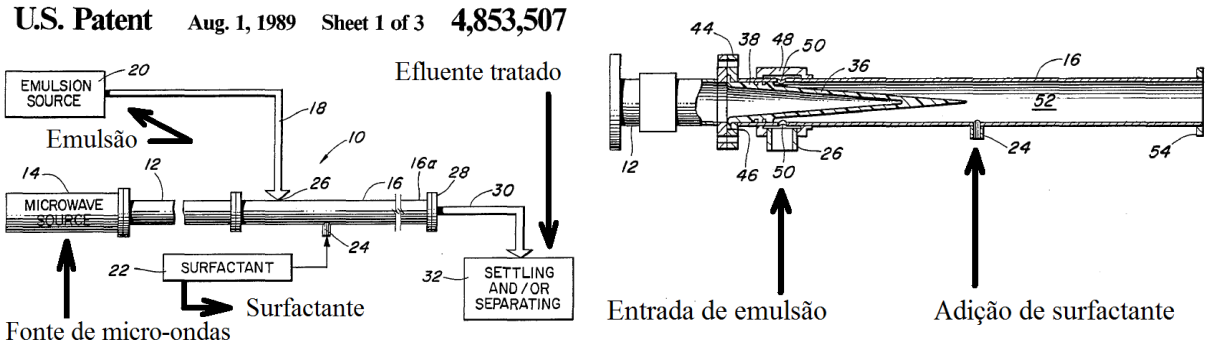
Segundo o autor, tratamento convencional é frequentemente pouco eficiente para água produzida e acrescenta que qualquer processo que requer filtração, floculação ou adsorção, produz resíduo oleoso concentrado e dificulta a exposição de rejeitos. Não obstante, assegura que processos oxidantes avançados apresentam-se como alternativa atrativa para tratamento ou pré-tratamento de efluentes oleosos.

Obviamente se deve enxergar a afirmação com diligência uma vez que tais processos deixam resíduo por impureza de aditivos químicos e impossibilidade de reação absoluta ou balanceamento perfeito de reação, indiferentemente da técnica empregada. É patente o potencial de poluir a água tratada e de diminuir a qualidade do óleo recuperado. Acrescenta-se que baixos níveis de pH (pH = 3), em que o efluente é tratado, não são atingidos rapidamente após adição de ácido, considerando-se um efluente altamente salobro como água produzida. Eis o problema que associado ao tempo de retenção, inviabiliza esta classe de tratamento, sobretudo si se tomar em conta, altos volumes gerados de efluente na produção petrolífera.

Com esta preocupação o trabalho que ora se apresenta realiza-se sem resquício de produto químico coadjuvante, adição ácida para desestabilização de emulsão efluente ou adequação de pH à valores que assegurem condição de isoeletricidade.

2.2.3.9 Outras técnicas de tratamento de água produzida

A utilização de energia de micro-ondas se enquadra no grupo de tecnologia de processo para tratamento de água produzida que se pode considerar recente ou, de uma ou duas décadas atrás, como mostra Fortuny *et al*., (2008) em trabalho de revisão da aplicação de tecnologia de micro-ondas à indústria de refino de petróleo. Nicolas (1989) baseou-se no princípio da água absorver energia de micro-onda e óleo, muito pouca. Patenteou um aparato inovador de separação de emulsão óleo em água e água em óleo (O/A e A/O), mostrado através da Figura 2.20, com direito cessionário à *E. I. Dupont de Nemours & Company*, publicado pelo instituto de engenharia elétrica, *Institution of Electrical Engineers publication entitled "Industrial Microwave heating", A. C. Metaxas & R. J. Meredith, pp. 225, 226*, sob número, USA PN 4,853,507 1989/08 e número de aplicação (187,667).



a) **b)**

Figura 2.20 Patente de *demulsificador* a micro-ondas; a) Ilustração esquemática do processo; b) Detalhe do demulsificador sem a fonte de micro-ondas.
(Extraída e adaptada de: Patente - Nicolas (1989))

É um sistema aplicável a ambos os tipos de emulsão por simples variação do comprimento de onda. Um maior teor de água entre fases, acima de 80%, requererá comprimento de onda menor. Segundo relata, é um sistema compacto, simples, de pouca manutenção, capaz de aquecer rapidamente água promovendo boas taxas de decantação, ideal para operações *off-*

shore. Por necessitar pouca adição de surfactante, proporciona despejo no mar menos prejudicial ao ecossistema local. Resultados operacionais do sistema, segundo afirma o inventor, são muito bons onde se logra 95 % de separação de óleo a pressão pouco acima da pressão atmosférica (1,06 atm), à vazão de aproximadamente 1.0 ℓ/s e tempo de retenção de 15 minutos. O sistema segundo afirma, demonstrou alta eficiência a frequência de 915 MHz e potência de 50 kW e não necessita frequência padrão de 2.450 MHz. Cabe ressaltar que a esta frequência, rendimentos foram mais baixos.

Um princípio não convencional de tratamento foi desenvolvido por Fernandes Júnior (2006). Trata-se de uma unidade de tratamento de águas produzidas denominada, UT – MDIF, ilustrada esquematicamente através da Figura 2.21. O sistema operou em planta de tratamento de efluentes de petróleo. O princípio de separação é inversão de fases e, segundo o autor, trata água produzida de baixo teor de óleo (30 a 150 mg/ℓ) à vazão específica, 47,4 $m^3/h.m^2$, em área de 100 m^2. Requer em torno de 13,24 kW de potência instalada (18 cv).

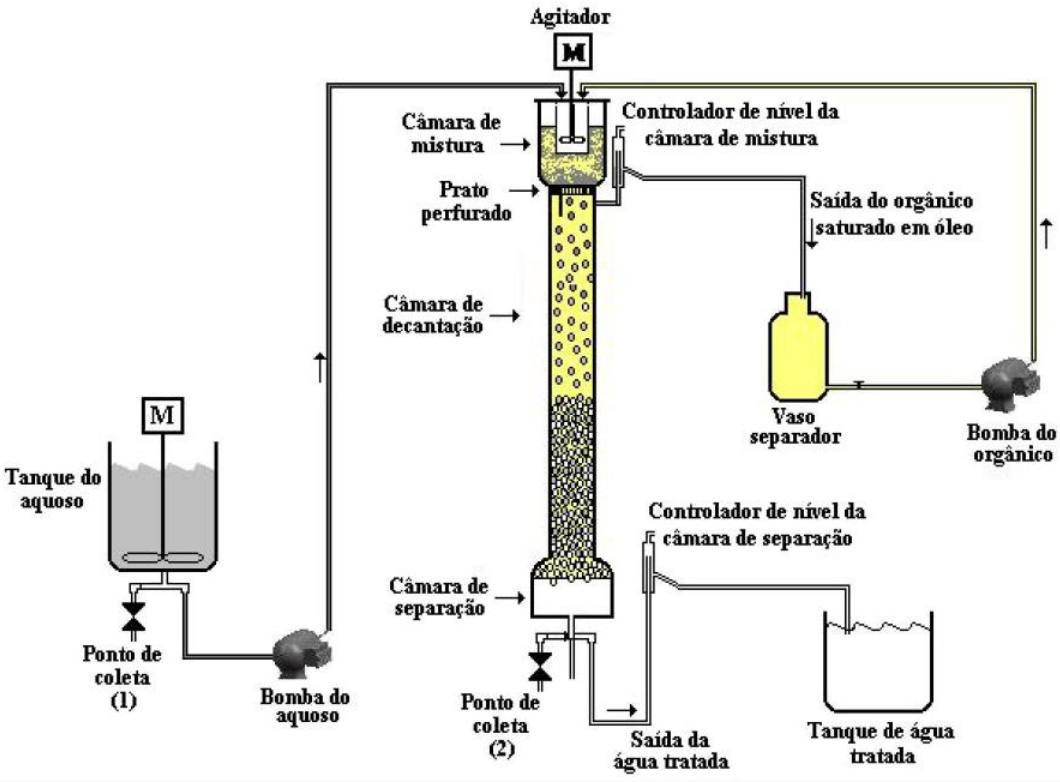


Figura 2.21 Ilustração esquemática do UT – MDIF.
Extraída de: (Fernandes Júnior, 2006)

O processo não se sujeita à salinidade do efluente, portanto, prescinde adição ácida para correção de pH. Em certo ponto de vista é importante para conter-se o desenvolvimento

de sistemas que utilizam deliberada adição de aditivos químicos que, além de elevar o custo do tratamento produz resíduo no óleo recuperado e na água tratada. O misturador de decantação a inversão de fase trabalha com aguarrás como fase orgânica. Segundo o autor, apresentou rendimento de mais de 76 % a alta vazão, nos limites do experimento, a alta rotação de agitação (96 rpm), quando a relação volumétrica orgânico/aquoso é 1/6. O orgânico é aguarráz.

2.3 Teorema dos Π de Buckingham

O desenvolvimento da Mecânica de Fluídos depende muito de resultados experimentais, porque são poucos os escoamentos reais que podem ser resolvidos apenas por métodos analíticos (Fox & McDonald, 1988). Na prática, a resolução de problemas deve contemplar resultado de procedimentos analíticos amparados em resultados experimentais cujo confronto, permite refinar a análise. Isto quer dizer, aproximar a descrição teórico-analítica do comportamento presumido, do comportamento real.

Contudo o trabalho experimental consome tempo e dinheiro. A meta óbvia é obter o maior número de informações com o menor número de ensaios, e exposição no menor número de gráficos. Nesse caso a ferramenta apropriada ao desenvolvimento de protótipos em escala laboratorial, alternativa de baixo custo para a condução de projetos em escala semi-industrial e industrial, é a análise dimensional e semelhança. Uma lei de escala bem conhecida entre o protótipo laboratorial, ou modelo, e o sistema real deve ser estabelecida.

Quando, por exemplo, o fenômeno envolvido diz respeito a um fluído que escoa a dada ou determinada vazão, de forma turbulenta ou laminar, carreando ou não elementos sólidos ou fluídicos de densidade distinta, sempre se associa ao processo um conjunto de parâmetros. Tais parâmetros podem ser geométricos e fluidodinâmicos, à vez que comumente alguma modalidade de energia em transformação está associada, - cinética ou potencial -. Si se supõe, por outro lado, uma esfera fixa em meio ao escoamento de um fluído e se deseja obter a força de arrasto sobre ela, pode-se admitir depender do diâmetro da esfera, da velocidade e viscosidade do fluído; a densidade também pode ser importante. Nesse caso pode-se escrever a função simbólica de correlação de grandezas:

$$F = f\,(D, V, \mu, \rho)$$

Conquanto existam outras grandezas que podem influenciar e não foram consideradas aqui, o problema está formulado e estas grandezas podem ser medidas em laboratório. Si

se imagina que se deve verificar o comportamento de (F) em função da velocidade, é bastante se manter fixas as demais grandezas. Se isto for feito para todas as outras grandezas logo se chega a 10^4 ensaios que possivelmente necessitasse de 100 gráficos enfim. Na melhor das hipóteses tais resultados teriam importância limitada.

A análise dimensional possibilita simplificar esse quadro com resultados muito mais significativos e ao menor dispêndio geral. Para este caso particular da esfera em arrasto fluídico, uma relação funcional entre dois parâmetros adimensionais pode agrupar todos os dados relacionados com a força de arrasto:

$$\frac{F}{\rho V^2 D^2} = f_1\left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)$$

A grande conveniência experimental deste resultado é que se não mais precisa de 10^4 ensaios, mas, 10 ensaios apenas. Somente a razão, ($\rho VD/\mu$), deve ser variada. Esta é a essência do *Teorema dos Π de Buckingham*.

Em verdade é o teorema de Vaschy-Buckingham**;** teorema central na análise dimensional. Estabelece que, se em uma equação física que envolve certo número (n) de variáveis físicas dimensionais, sendo que estas variáveis são representadas por (r) dimensões físicas primárias fundamentais e independentes, a equação do processo ou sistema físico pode ser re-escrita como uma equação de ($p = n - r$) variáveis adimensionais (parâmetros π), construídas a partir das variáveis primárias originais, ainda que a equação seja desconhecida (Fox & McDonald, 1988).

Este teorema, hoje conhecido como "teorema π", foi pela primeira vez enunciado por Aimé Vaschy, em 1892, no artigo, "Sobre as leis da semelhança em física". Vinte e dois anos após o enunciado publicou-se em 1914 o famoso artigo de Edgar Buckingham : "Sobre sistemas fisicamente semelhantes: ilustrações do uso de equações dimensionais". Portanto, o *Teorema dos Π de Buckingham* diz que: Dada relação entre n parâmetros da forma,

$$g\,(q_1, q_2, q_3, \ldots\ldots, q_n) = 0$$

podendo-se também expressá-la na forma,

$$q_1 = f\,(q_2, q_3, q_4, \ldots\ldots, q_n),$$

estes n parâmetros pode ser agrupados em ($n - m$) razões adimensionais independentes, ou parâmetros Π, expressos na forma funcional,

$$G\,(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \ldots\ldots, \Pi_{n-m}) = 0 \qquad \text{ou,} \qquad \Pi_1 = G_1\,(\Pi_2, \Pi_3, \ldots\ldots, \Pi_{n-m})$$

O número *m* é usualmente, mas nem sempre, igual ao menor número de grandezas primárias independentes necessárias para especificar as dimensões de todos os parâmetros, q_1, q_2, q_3,....., q_n. O parâmetro deixará de ser independente se puder ser escrito como combinação em quociente ou produto de dois outros parâmetros. Os ($n - m$) grupos adimensionais obtidos são independentes mas não os únicos e se for igual a um, o teorema diz que esse parâmetro Π único deve ser constante. Se for escolhido um grupo de diferentes grandezas primárias ou, repetitivas, como se costuma referir, diferentes grupos serão obtidos. A escolha, por exemplo, de ($\rho[M/L^3]$), ($V[L/t]$) e comprimento característico ([L]) como grandezas repetitivas, em geral conduz a um conjunto de parâmetros adimensionais mais apropriado para correlacionar extensa gama de dados experimentais.

A título de exemplo, sabe-se que força de inércia é importante na maioria dos problemas de Mecânica dos Fluídos. Da segunda lei de Newton ($F = ma$). A massa pode ser escrita assim: ($m = \rho V$). Como o volume tem dimensão ($[L]^3$), qualitativamente se pode dizer que ($m \propto L^3$). A aceleração pode ser escrita, ($a = dv/dt = vdv/ds$). Então, qualitativamente, ($a \propto v^2/L$) e a força de inércia é proporcional a ($\rho v^2 L^2$).

Tabela 2.1 Grandezas adimensionais de significância para engenharia.

Ord.	Grandeza	Dimensionalidade
1	Força de viscosidade	$\tau A \ \alpha \ \mu \frac{d\dot{X}}{dY} A \ \alpha \ \mu \frac{\dot{X}}{L} L^2 = \mu \dot{X} L$
2	Força de gravidade	$Mg \ \alpha \ g\rho L^3$
3	Força de tensão superficial	σL
4	Força de pressão	$(\Delta P)A \ \alpha \ \Delta P L^2$
5	Força de inércia	$F \ \alpha \ \rho \dot{X}^2 X^2$

Há vários anos centenas de grupos adimensionais importantes para a engenhaia foram identificados. Segundo a tradição a cada grupo foi dado o nome de um cientista ou um engenheiro proeminente, de regra o primeiro a utilizá-lo. Na tabela anterior, Tabela 2.1 e na tabela a seguir, Tabela 2.2, são mostrados importantes grupos adimensionais e grandezas

dimensionais da engenharia, das quais W_e, F_r, O_h e Coef. de Laplace são particularmente importantes, sobretudo neste estudo.

Tabela 2.2 Grupos adimensionais de significância para engenharia e grupos equivalentes em sua versão vibracional.

Ord.	Grandeza	Adimensionalidade	Parâmetro vibracional
1	N° de Reynolds da gota ou partícula	$Re = \frac{\rho \dot{X} \phi}{\mu} = \frac{\dot{X}\phi}{\upsilon}$	$Re^* = \frac{X_0 \omega \phi \Delta\rho}{\mu}$
2	N° de Froude	$Fr = \frac{\dot{X}}{\sqrt{gL_C}}$	$W_V^* = \frac{(X_0\omega)^2}{gL_C}$
3	N° de Bond ou N° de Eötvös	$E_o = B_o = \frac{\Delta\rho g {L_C}^2}{\sigma}$	
4	N° de capilaridade ou N° de Laplace-Young	$Ca = \frac{\mu \dot{X}}{\sigma}$	
5	N° de Weber	$We = \frac{\rho \dot{Y}_g^2 L_C}{\sigma}$	$We^* = \frac{\rho\omega^2 X_0^2}{\sigma}\phi_b$
6	Parâmetro capilar ou Const. de Laplace	$L_{cap} = \sqrt{\frac{\sigma}{\Delta\rho g}}$	$L_c^* = \frac{X_0}{L_{cap}}$
7	N° de Ohnesorge	$Z = \frac{t_{visc}}{t_R} = \frac{\frac{\mu\phi}{\sigma}}{\sqrt{\frac{\rho\phi^3}{\sigma}}} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma\phi}}$	

Os primórdios do universo dos chamados "homens números" remonta 1805. Embora grandezas adimensionais fossem desconhecidas à época, pioneiros do campo da tensão superficial e capilaridade como Pierre-Simon Laplace, do "*L'Institut national de France*", e Thomas Young da "*Royal Society Londres*" (Goldman, 2009) e, mais tarde, Michael Faraday, em 1831, através do artigo sobre vibrações, ondas superficiais e efeitos de capilaridade (Faraday, 1831), criaram a base termofísica do estudo. Posteriormente foram criados outros números à medida que se aprofundavam os estudos de engenharia, sobretudo na área de hidráulica. O

mais significativo deles é o número de Osborn Reynolds ou, Número de Reynolds (R_e) nascido quase meio século mais tarde.

Parâmetros adimensionais quando convenientemente rearranjados traduzem competição entre forças no fluído de distinta natureza. O número de Reynolds, por exemplo, traduz a relação dominante entre forças inerciais e forças viscosas para caracterizar escoamentos. O número de William Froude (F_r), arquiteto naval e Edmund Froude seu filho, traduz a relação entre forças inerciais e forças gravitacionais em um escoamento em canal aberto (Fox & Mcdonald, 1988). Uma grandeza adimensional de muita importância é o número de Weber (W_e). Traduz a relação entre forças inerciais e forças interfaciais ou de capilaridade. O número de Ohnsorge (O_h ou Z), como se pode ver na tabela, Tabela 2.2, captura a razão entre escalas de tempo de um fio fluídico mostrando quão grande é o tempo de afinamento ou, escala de visco-capilaridade, se comparado com a escala de tempo de quebra de um jato *invíscido* conhecida como escala de tempo de Rayleigh (t_R).

Em termos práticos trata-se de procurar descrever comportamento físico a partir da correlação de grandezas que variam em função concomitante de muitos parâmetros. Si se estuda, por exemplo, a estabilidade de um barco, um comprimento característico poderia ser o comprimento do barco por sua relação com propriedades do fluído que o suporta. Uma gota de óleo ou uma bolha de ar imersa em um fluído sob alguma pressão apresenta tensão interfacial interfluídos dependente de um comprimento característico, e pode ser o diâmetro. Estes e outros conceitos já referenciados, no âmbito da física e química, são de extrema importância si se considerar a emulsão e perturbações impostas como universo dominado por fenômenos que eventualmente podem ser descritos a partir desses conceitos.

Outro aspecto importante do estudo diz respeito, em decorrência de propriedades termofísicas, a grandezas adimensionais guardarem relação de funcionalidade segundo leis bem definidas: $R_e = 1/O_h^2$ e $W_e = (R_e.O_h)^2$, por exemplo (Mckinley & Renardy, 2013). O espalhamento de uma gota que impacta uma superfície rígida ou branda pode estar condicionado ao produto, $(O_h (R_e)^{5/4} \geq 50)$ (Derby (2010) apud McKinley & Renardy (2013)).

Bolhas ou gotas quando possuem muito pequenos diâmetros, comportam-se, em meio ao fluído em que se dispersam, como corpos sólidos. Isto se deve à alta pressão descrita por Laplace-Young e alta tensão interfacial. Uma bolha de ar de um milímetro tem pressão interna negligente, suplantando a pressão atmosférica em 300 N/m^2 apenas (1 atm = 10^5 N/m^2) conquanto uma bolha de 1μm de diâmetro o diferencial de pressão é de 3 atm.

Finalmente são apresentadas grandezas adimensionais do ponto de vista vibracional, obtidas a partir da introdução de grandezas que caracterizam a dinâmica do movimento oscilatório como amplitude de deslocamento (X ou X_0, amplitude máxima), velocidade (ωX), aceleração ($\omega^2 X$) e freqüência de vibração (ω ou $f = \omega/2\pi$).

Os números de Weber, Froude e Reynolds vibracionais são obtidos mediante considerações apropriadas de parâmetros característicos que levam em conta a natureza oscilatória do movimento do fluído. A Equação (8) e Equação (9) mostradas na Tabela 2.2, segundo Ivanova; Kozlov; Evesque (2001) e Ivanova & Kozlov (2002) aplicam-se à dinâmica média do movimento fluídico vibracional quando a tensão interfacial partícula/fluído for muito baixa, característica de dispersões sólido/líquido, e quando a dispersão for líquido/líquido (W_v*). Nos experimentos desenvolvidos por estes autores foram utilizados água e areia, e água, álcool e glicerina, respectivamente, para obtenção de dispersões.

Neste estudo a dispersão é salobra, tipo líquido/líquido, com alta taxa de tenso-ativo, e a dimensão média de partículas é muito inferior a 1 mm. Isto confere ao particulado, característica de sólido. A utilização da Equação (2) para dispersão líquido/líquido, objeto de estudo deste trabalho, não parece ser inadequada, embora haja presença de surfactantes na dispersão que contribuem no sentido de diminuir a taxa de mobilidade de partículas. Isto se expressa como velocidade de deslizamento da interface e segundo Malysa; Krasowska; Krzan (2005) e Krzan & Malysa (2012) diminui na presença de surfactantes em baixa concentração, em experimento realizado com bolhas de ar.

2.4 Vibrações mecânicas e fenomenologia

Processos oscilatórios são característicos de toda a natureza orgânica e inorgânica, da célula à comunidade dos organismos, do átomo às galáxias. Eles são importantes na vida psiconeurológica dos seres humanos e mesmo na esfera dos fenômenos sociais. Eis o porquê da significância filosófica da ciência vibracional ser inquestionável, segundo o professor, dr. Illya Blekhman da "*Russian Academy of Sciences*" de St. Petersburg. Talvez seja a explicação da natureza preferir em seus processos, oscilações ao invés de fluxos monotônicos. Em sua grande obra encontram-se referências de grandes pensadores de ontem e hoje (Goldacre, 1960 apud Blekhman, 2003; Machiavelli, 1973; Frolov, 1984).

A utilização de vibrações torna literalmente possível revolucionar grandes indústrias e prover efeitos técnicos e econômicos. Aplicações da tecnologia de vibrações embora não exauridas cientificamente, parecem ter futuro promissor. É bastante observar títulos das seções do livro (Blekhman, 1988) e constatar o universo de tendências que se refletem nos temas, "vibração muda", "vibração separa e classifica", "vibrações intensifica processos e tratamento de peças", "vibração consolida", "vibração destrói", "vibração retarda e matém rotação", "vibração intensifica e anula a vibração", "vibração ajuda a medir", "vibração impede a medição", "vibração cura", "vibração causa doença", enfim, "vibração é anormal". Neste sentido o sistema em estudo propõe utilizar vibração com intuito de separar. Uma perspectiva de aprofundamento do estudo envolveria recuperar o adsorbato (óleo) impregnado no adsorvente (esponja metálica), utilizando-se a mesma energia de vibração. Neste caso, não somente se realizaria separação, mas desengraxamento e recuperação de óleo e do adsorvente.

2.4.1 Modelo de sistema massa–mola–amortecedor viscoso excitado por motor em desbalanceamento rotativo

Quando um sistema é impulsionado por uma força qualquer harmônica variante no tempo a máxima amplitude da força independe da frequência de excitação. Se o sistema for excitado por uma massa rotacional cujo centro de gravidade esteja fora do eixo de rotação, diz-se que há desbalanceamento, e é esta a fonte de excitação. No entanto a força que excita o sistema, neste caso, depende da frequência de excitação porque origin-se da centrifugação proporcionada pela massa rotacional. Neste caso dependerá do quadrado da frequência de rotação e, obviamente, do nível de excentricidade. Diz-se, entretanto, que é uma excitação de aceleração (Church, 1963).

Eis uma origem de corrente trepidação em sistemas reais; por analogia basta imaginar que a massa desbalanceada esteja na armadura do motor. A massa total nesse caso seria a massa desbalanceada da armadura somada à massa do estator e da máquina trepidante.

A Figura 2.22 ilustra o modelo de sistema conhecido como Modelo de Kelvin (Aseka, 2008), empregado para descrição do comportamento dinâmico do sistema em estudo. Quatro molas planas lineares, que se mostram através da Figura 2.23 seguinte, são representadas em termos do efeito equivalente (K_{eq}), assim como o amorteimento estrutural, em termos de amortecimento equivalente viscoso (C_{eq}).

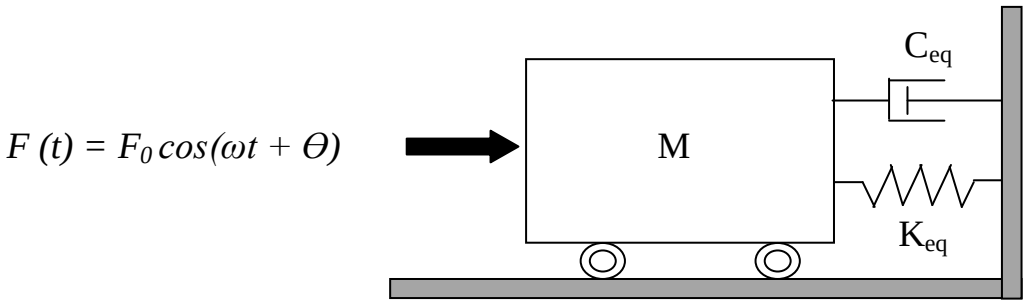


Figura 2.22 Modelo de Kelvin de um grau de liberdade (1 GDL)

Por analogia a ilustração, Figura 2.23, mostra, de forma esquemática, o sistema operacional em estudo cuja massa total é (M = 4,7 kg). É assumido que o sistema possui 1 GDL e que a massa total move-se unicamente na direção horizontal. Embora não haja dispositivo de amortecimento, tão só de natureza estrutural, se lhe tomará em termos de amortecimento viscoso equivalente (C_{eq}). Para metais os valores são reduzidos, se comparados ao amortecimento viscoso; é razoável se admitir comportamento característico de subamortecimento.

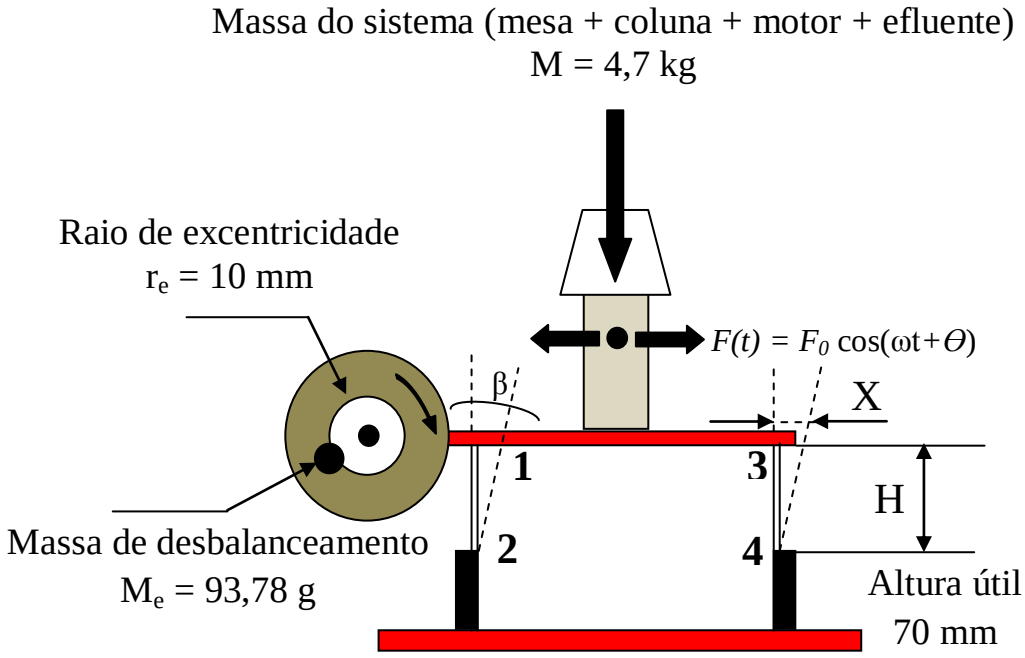


Figura 2.23 Modelo aproximado do sistema em estudo com 1 GDL.

Para uma massa (M) considerando-se a força dinâmica, a equação do movimento é:

$$M\ddot{X}(t) = -C_{eq}\dot{X}(t) - K_{eq}X(t) + \frac{M_e}{M}Mr_e\omega^2 \qquad (2)$$

ou, de outra forma,

$$M\ddot{X}(t) + C_{eq}\dot{X}(t) + C_{eq}X(t) = \frac{M_e}{M}Mr_e\omega^2 \tag{3}$$

A solução geral do modelo matemático, Equação (3), é dada por:

$$X(t) = e^{-\zeta\omega_n t}(-A\cos\omega_b t + \frac{\omega_B - n_A}{\omega_b} sen\omega_b t) + A\cos\omega t + Bsen\omega t \tag{4}$$

com,

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \text{ onde, } \zeta = C_{eq}/(2M\omega_n) \quad \text{e} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_{eq}}{M}} \tag{5}$$

O ângulo de fase (θ) pode ser obtido fazendo-se:

$$tg\theta = \frac{C_{eq}\omega}{K_{eq} - M\omega^2} \tag{8}$$

Desde que,

$$\cos\theta = X_0\left(\frac{K_{eq} - M\omega^2}{\frac{M_e}{M}Mr_e\omega^2}\right) \tag{9}$$

e, $sen\theta = \left(\frac{C_{eq}\omega X_0}{\frac{M_e}{M}Mr_e\omega^2}\right)$, se pode deduzir, por simples operações trigonométricas, que

$$\frac{X_0}{\frac{M_e}{M}r_e} = \frac{\frac{\omega}{\omega_n}}{\sqrt{\left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)}} \tag{10}$$

Construindo-se o gráfico $\left(X_0 / \frac{M_e}{M}r_e\right)$ versus (ω/ω_n) a partir da Equação (9),

obtém-se a curva ilustrada na Figura 2.24. A linha tracejada mostra o crescimento assintótico da amplitude quando (C_{eq} = 0), característico de sistema não amortecido. Quando existe amortecimento, ainda que subcrítico, a máxima amplitude nunca ocorre quando (ω/ω_n = 1). Para razões de excitação maiores que (1,0) a força defasa-se em mais de 90º do deslocamento e a amplitude máxima de deslocamento decai rapidamente quando a relação, ($X_0 / \frac{M_e}{M} r_e$ = 1).

Quando o sistema é não amortecido, representado pela linha tracejada na Figura 2.24, a razão de frequências é dada por:

$$\frac{\omega_d}{\omega_n} = \sqrt{1-2\zeta^2} \tag{11}$$

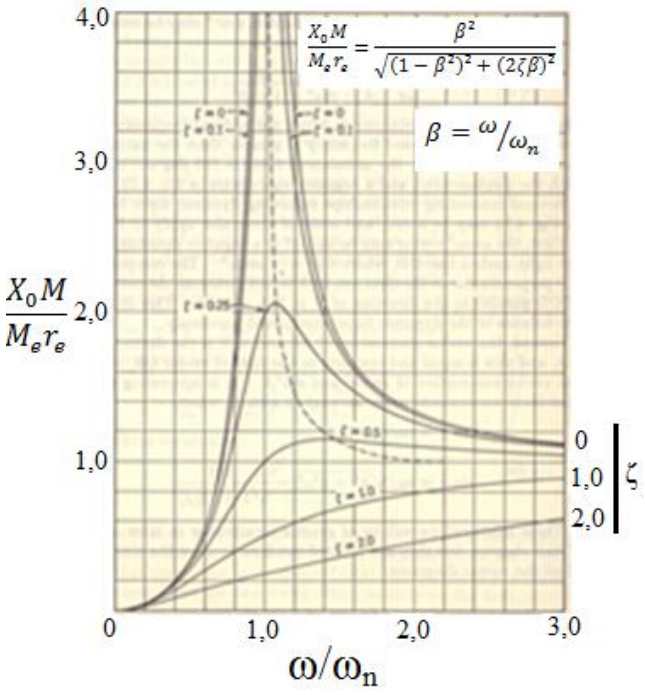


Figura 2.24 Deslocamento adimensional versus frequência adimensional (Extraída e adaptada de: Church, 1963)

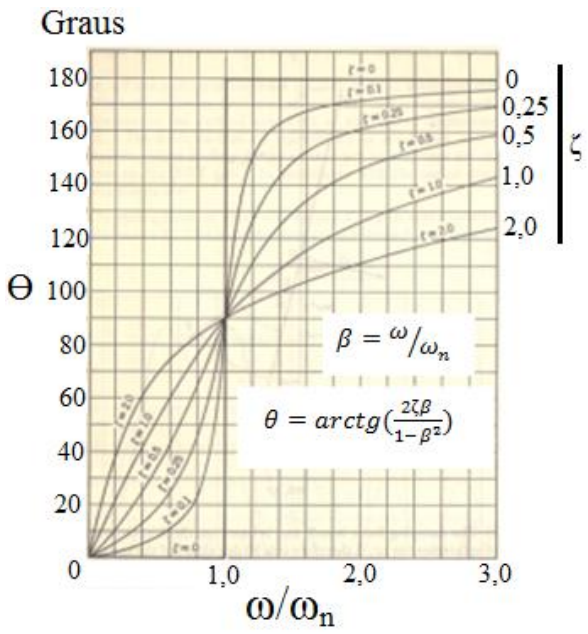


Figura 2.25 Variação do ângulo de fase versus frequência adimensional (Extraída e adaptada de: Church, 1963)

A Figura 2.25 mostra o ângulo de fase (θ), calculado através da expressão (9), em função da razão de frequências (ω/ω_n) e do fator de amortecimento (ζ). O ângulo de fase entre força e deslocamento vibracional pode ser alterado mediante introdução de amortecimento no sistema.

2.4.2 Cálculo da frequência natural, amortecimento viscoso equivalente e fator de amortecimento equivalente viscoso.

Sistemas vibratórios de uso comum em engenharia podem, com razoável aproximação, ser representados por um modelo de sistema massa-mola-amortecedor viscoso como se mostrou. Em seu conjunto, podem ou não possuir dispositivos dissipadores de energia vibratória, conhecidos como amortecedores de vibração. Em todo caso sempre existirá dissipação de energia em várias modalidades de perda como energia sonora, através de ruídos gerados pelo sistema devido a desajustes, folgas, impactos devido à trepidação, atrito entre componentes e atrito estrutural, ao nível da rede molecular cristalográfica por deslizamento de planos de cristais. Ainda que não exista a presença física de amortecedores como acessório, recomenda-se representar perdas em termos de conteúdo equivalente que neste estudo se define como, amortecimento equivalente viscoso.

Não menos importante é a obtenção da frequência natural do sistema. É um parâmetro característico oriundo de peculiaridades elásticas e estruturais. Condensa e traduz, em um único numeral, quando o sistema possui um único grau de liberdade (1 GDL), a natureza elástica do conjunto deformável. Nesse caso cumpre obter-se o valor mais aproximado possível da frequência natural como primeiro passo necessário ao estudo da dinâmica do sistema.

De acordo com Rao (2009) uma boa técnica consisite em obter, de forma aproximada, o valor de constantes de amortecimento e elasticidade através do decaimento logarítmico em amplitude de oscilação, observado através da resposta do sistema ao impacto e do pseudo-período associado. Expressões, Equação (5), mostradas no item anterior, permitem calcular a frequência natural através do decaimento logarítmico entre sucessivas amplitudes de movimento livre amortecido da seguinte forma:

$$\delta = \ln\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = \zeta\omega_n T_d = \zeta\omega_n \frac{2\pi}{\sqrt{1-2\zeta^2}\,\omega_n} \tag{12}$$

considerando-se que, ($\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$) e ($T_d = t_2 - t_1$), para obtenção da média de vários ciclos.

A partir de (T_d) se pode calcular (ω_n) aproximadamente por:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_d} \text{ [rad/s]} \quad \text{ou} \quad f_n = \frac{1}{T_d} \text{ [Hz]} \tag{13}$$

O fator de amortecimento (ζ) pode ser obtido fazendo-se:

$$\zeta = \frac{\delta}{\omega_n T_d} = \frac{\ln\left(\frac{X_1}{X_2}\right)}{\omega_n T_d} \tag{14}$$

Através de uma das expressões, Equação (5), pode-se escrever:

$$\zeta = \frac{C_{eq}}{C_c} \quad \text{com } C_c = 2M\omega_n \tag{15}$$

Isto permite obter-se a constante de amortecimento equivalente viscoso de forma aproximada:

$$C_{eq} = \zeta C_c \tag{16}$$

com (ζ) obtido através da Equação (14). Quando (ζ) for menor que (0,3) se pode fazer a aproximação, ($\zeta \approx \delta/2\pi$). Segundo (Rao, 2009) não acarretará erro considerável.

2.4.3 Fatores que podem influenciar o cálculo da frequência natural do sistema

Como foi dito, a frequência natural fornece uma medida quantitativa da elasticidade do sistema, consequentemente do potencial de resposta rápida à excitação externa. Sistemas vibratórios com características dinâmicas próprias, a exemplo de sistemas elásticos excitados por massa em desbalanceamento rotativo, de reconhecida aplicação industrial (Spivakovski & Dyachkov, 1985) e (Blekhman & Vaisberg, 2007), requerem identificação precisa de freqüências e modos próprios de vibrar, sobretudo quando baixas ou elevadas amplitudes de vibração são determinantes do desempenho de uma ou outra aplicação.

Essa necessidade é menos recorrente em sistemas vibracionais articulados, onde amplitude de deslocamento independe da frequência de excitação. O sistema, objeto de estudo, se enquadra no conjunto de sistemas elásticos mais utilizados em aplicação industrial.

O efeito elástico global do sistema pode ser traduzido pela capacidade de deformação elástica das partes que o compõem, comumente representadas, para fins de análise, em termos de mola equivalente associada. Com essa premissa, cumpre serem observadas, com adequado rigor, no que concerne à descrição matemática, condições de apoio dos dispositivos elásticos de suspensão. A descrição traduz, no âmbito matemático, a capital influência dos apoios na configuração defletida do sistema deformado e, consequentemente, na rigidez equivalente do sistema e seu comportamento global. Com esta preocupação é imperioso analisar a rigidez dos apoios e estabilidade elástica dos dispositivos de suspensão (molas), sobretudo quando molas são delgadas, de baixa razão espessura/comprimento.

Crede (1972) recomenda corrigir o cálculo da rigidez equivalente quando molas são aparentemente mais rígidas que apoios. Preceitos teóricos se fundamentam em apoios propriamente rígidos, no sentido de rigidez infinita, se comparada à rigidez de componentes do sistema (Hibbeler (2004) e Hibbeler (2011)).

Segundo Morley (1943) e Chopra (1995) a constante de mola equivalente de um sistema modelado de acordo com a Figura 2.23, considerando-se a mola livre em uma das extremidades, pode ser dada por:

$$K_{eq} = \frac{3nEI_{YY}}{H^3} \tag{17}$$

No sistema em estudo, molas representadas pelos segmentos, (1–2) e (3–4), vistas em desenho plano, somam em total, 4 unidades, esquematicamente ilustrado através da Figura 2.23, item 2.4.1. Encontram-se engastadas em ambas as extremidades e, portanto, apresentam comportamento similar ao de molas livres em uma das extremidades com a metade do comprimento. O comprimento de flambagem da mola bi-engastada é a metade do comprimento de flmbagem da mola com uma extremidade livre. Então:

$$K_{eq} = \frac{3nEI_{YY}}{(H/2)^3} = \frac{24nEI_{YY}}{H^3} \tag{18}$$

onde (n) é o número de molas em paralelo, (E) o módulo de elasticidade e (I_{YY}) o momento de

inércia da seção transversal da mola em torno do eixo OZ, perpendicular ao plano de desenho, dado por:

$$I_{YY} = \frac{L.esp^3}{12} \tag{19}$$

com, (L) representando a largura da mola e (esp), a espessura.

A correção recomendada por (Crede, 1972) quando apoios não são totalmente rígidos, se comparado às molas do sistema, tecnicamente tratado como apoios concordantes, é considerar pequena rotação do apoio em torno de um eixo que passa no centro de cada apoio, perpendicular ao plano do desenho. Neste caso modela-se a mola como alavanca rígida, e o apoio, uma charneira de torção. A rigidez real é pouco menor, obtida pela associação em série de dois efeitos que se sobrepõem a uma mesma mola:

$$K_c = \frac{K_{eq}K_\theta}{K_{eq} + K_\theta} \tag{20}$$

onde, K_{eq} é a constante equivalente segundo (Morley, 1943) e K_Θ, a constante devido ao efeito de torção no apoio (charneira) dado por,

$$K_\theta = \frac{F}{X} = \frac{K_T\beta}{HX} \approx \frac{K_T X}{HXH}$$

Fazendo-se a aproximação, tg$\beta \approx (X / h)$ conforme Figura 2.23, para (n) molas:

$$K_\theta = \frac{nK_T}{H^2} \tag{21}$$

com K_T em (N.m/rad). Considerando-se que (F/X) é a inclinação do gráfico, carga *versus* deflexão estática do sistema, ter-se-á:

$$K_c = \frac{K_{eq}K_{est}}{K_{eq} + K_{est}} \tag{22}$$

onde, (K_{est}) é a rigidez estática medida como inclinação da curva ($F(\delta_{est}) = K\delta_{est}$), e proporciona valores meramente aproximados, quando o sistema é dinâmico.

2.5 Aspectos introdutórios do estudo de onda superficial, formação de ondas e modelo matemático

O mecanismo principal, objeto deste trabalho, é geração e desestabilização de ondas superficiais de efluente, precisamente, água de produção de petróleo, ou emulsão congênere, através da perturbação vibracional do sistema em fluxo. A desestabilização de ondas superficiais tem o propósito de agitar o volume líquido e gerar microbolhas de ar que em sistemas convencionais se faz mediante injeção direta de ar ou despressurização de fluido gaseificado. Neste último, provoca-se segregação de microbolhas de ar, ou gás dissolvido. Isto já foi reportado através de notáveis trabalhos de Rodrigues & Rubio[a] (2003) e da Rosa (2002).

Ondulação superficial em água, como se reportou, trata-se de um fenômeno estudado há primórdios da história moderna, em finais do Século XVIII, pelo francês, Simon de Laplace. O fluído objeto deste estudo se trata de água, mas, emulsão derivada. As viscosidades são bastante aproximadas não sendo, portanto, inadequada extrapolação de escala se enquadrar água produzida nos limites de fluído *invíscido* ou, sem viscosidade.

Ondas superficiais são perturbações em um volume fluídico onde não há transferência de massa, mas, de energia, unicamente. O estudo da dinâmica de propagação de ondas e efeitos de gravidade e capilaridade depende, sobretudo, da profundidade do leito de fluxo que exerce marcada influência na relação de dispersão (SMS - 491, 2013). Neste trabalho, a altura do reservatório de tratamento, si se toma o fundo do reservatório por leito, representa profundidade, no termo em que aqui se refere, conferindo características de águas infinitamente profundas ou não ao sistema em estudo. Cabe destacar que menores profundidades favorecem quebra de ondas superficiais por atrito com o leito.

Entende-se por relação de dispersão a solução em frequência da equação da onda superficial gerada (Equação de Laplace). O maior significado recai sobre cada frequência ($\pm\ \omega$) de propagação, em um sentido ou o contrário, associar-se a um comprimento de onda (λ). O número de onda (k) e a frequência (ω) conectam-se segundo a relação de dispersão.

A teoria linear de ondas regulares considera propagação em águas rasas, correnteza onde a profundidade de leitos é menor que um vinte avos do comprimento de onda em propa-

gação. Quando esta relação está entre um vinte avos e um meio do comprimento de onda, diz-se, profundidade intermediária. Propagação em águas profundas se dá quando a profundidade é a metade ou mais do comprimento de onda. Krogstad & Arntsen (2000) fornecem bom panorama do assunto, teoria linear de ondas regulares ou harmônicas. O resumo mostra-se a seguir, através da Tabela 2.3, página 52. Ao meio comprimento de onda de profundidade, a velocidade da camada fluídica é aproximadamente 4 % da velocidade superficial (Krogstad & Arntsen, 2000). O perfil de velocidades denota-se por correnteza de Stokes (Figura 2.32, pág. 59). A Figura 2.26 ilustra o problema da propagação em contexto matemático.

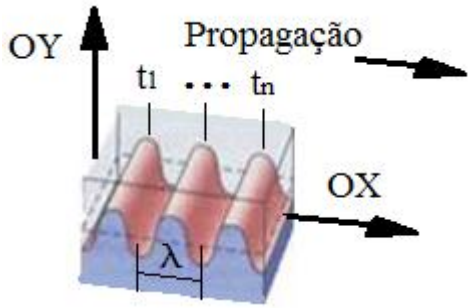


Figura 2.26 Ilustração de pulsos geradores de ondulação superficial.
(Extraída e adaptada de: Thurman (1997) apud SMS – 491 (2013))

A solução mais geral da Equação de Laplace e relações de dispersão decorrentes para propagação unidimensional de uma onda bidimensional podem ser vistas na bibliografia recomendada, particularmente, Fitzpatrick (1963, pg. 168). Mostra-se que a propagação em águas profundas é naturalmente dispersiva, isto é, a velocidade de fase da onda é diferente da velocidade de grupo, e duas vezes maior. Em termos práticos, entende-se por velocidade de fase da onda, a rapidez com que se move a interface água/ar da onda, e por velocidade de grupo, a velocidade da correnteza do conjunto de ondas.

O caráter dispersivo da propagação se deve às componentes de Fourier da onda, se propagar a velocidades diferentes (Acheson, 1990). Diferentes frequências e comprimentos de onda são responsáveis pelo distúrbio geral. A propagação em águas rasas, como na costa litorânea, é naturalmente não dispersiva e velocidades de fase e de grupo são aproximadamente iguais. Fisicamente, velocidade de fase ($\dot{X}_f$) é velocidade de propagação e velocidade de grupo ($\dot{X}_{gr}$), velocidade de transporte de energia (Thurman, 1997 apud SMS-491, 2013).

A Tabela 2.3 a seguir condensa resultados e princípios da teoria linear de ondas:

Linear theory of regular waves review			
Wave property	SHALLOW WATER ($d/\lambda < 1/20$)	INTERMEDIATE WATER ($1/20 < d/\lambda < 1/2$)	DEEP WATER ($d/\lambda > 1/2$)
Velocity potencial ($u = \nabla\varphi$)	$\emptyset = \frac{ag}{\omega}\frac{cosh\,K(z+d)}{cosh\,Kd}\Omega_c$	$\emptyset = \frac{ag}{\omega}\frac{cosh\,K(z+d)}{cosh\,Kd}\Omega_c$	$\emptyset = \frac{ag}{\omega}e^{Kz}\Omega_c$
Dispersion relation	$\omega^2 = gK^2d$	$\omega^2 = gK\,tgh\,Kd$	$\omega^2 = gK$
Wave length–wave period relation	$\lambda = T\sqrt{gd}$	$\lambda = \frac{g}{2\pi}T^2 tgh\,\frac{2\pi d}{\lambda}$	$\lambda = \frac{g}{2\pi}T^2 \cong 1{,}56T^2$
Wave profile	$\eta = a\,\Omega_s$	$\eta = a\,\Omega_s$	$\eta = a\,\Omega_s$
Dinamic pressure	$P_d = \rho g a\,\Omega_s$	$P_d = \rho g a\frac{\cosh\,K(z+d)}{\cosh Kd}\,\Omega_s$	$P_d = \rho g a e^{Kz}\Omega_s$
Horizontal particle velocity	$u = \frac{\omega a}{Kd}\,\Omega_s$	$u = \omega a\frac{\cosh\,K(z+d)}{\sinh Kd}\,\Omega_s$	$u = \omega a\,e^{Kz}\,\Omega_s$
Vertical particle velocity	$w = \omega a\frac{z+d}{d}\,\Omega_c$	$w = \omega a\frac{\sinh\,K(z+d)}{\sinh Kd}\Omega_c$	$w = \omega a e^{Kz}\Omega_c$
Horizontal particle acceleration	$\dot{u} = \frac{\omega^2 a}{Kd}\Omega_c$	$\dot{u} = \omega^2 a\frac{\cosh\,K(z+d)}{\sinh Kd}\,\Omega_c$	$\dot{u} = \omega^2 a e^{Kz}\,\Omega_c$
Vertical particle velocity	$w = \omega a\frac{z+d}{d}\,\Omega_c$	$w = \omega a\frac{\sinh\,K(z+d)}{\sinh Kd}\Omega_c$	$w = \omega a e^{Kz}\Omega_c$
Horizontal particle acceleration	$\dot{u} = \frac{\omega^2 a}{Kd}\Omega_c$	$\dot{u} = \omega^2 a\frac{\cosh\,K(z+d)}{\sinh Kd}\,\Omega_c$	$\dot{u} = \omega^2 a e^{Kz}\,\Omega_c$
Vertical particle acceleration	$\dot{w} = -\omega^2 a\frac{z+d}{d}\,\Omega_s$	$\dot{w} = -\omega^2 a\frac{\sinh\,K(z+d)}{\sinh Kd}\,\Omega_s$	$\dot{w} = -\omega^2 a e^{Kz}\,\Omega_s$
Group velocity	$c_g = c$	$c_g = \frac{1}{2}c(1+\frac{2Kd}{sin2Kd})$	$c_g = \frac{1}{2}c$
Legend	$\Omega_c = \cos(\omega t - Kx)$ $\Omega_s = \sin(\omega t - Kx)$ $\omega = 2\pi/T$, $K = 2\pi/\lambda$ T = wave period ω = wave length a = wave amplitude g = acceleration of gravity $c = \lambda/T$ = phase speed	t = time x = direction of propagation z = vertical co-ordinate positive upward, origin at still water level d = water depth	p_d = dynamic pressure $p_d - \rho gz + p_0$ = total pressure in the water ($-\rho gz$ = hydrostatic pressure, p_0 = atmospheric pressure) $E = \frac{1}{2}\rho g a^2$ = wave energy (per unit surface area) $P = Ec_g$ = wave energy flux (per unit width along the wave crest)

Tabela 2.3 Propriedades de ondas superficiais regulares.
(Extraída e adaptada de: Krogstad & Arntsen, 2000).

Matematica e resumidamente se pode descrever o fenômeno da propagação unidimensional de onda da seguinte maneira: Imagina-se uma sucessão de diversos deslocamentos

funcionais sobre o eixo de propagação, ou nível d'água, onde cada função é uma ondulação formada em uma escala de tempo coincidente com a perturbação do sistema a cada (t_n). A Figura 2.27 ilustra o processo. Cada função, ou ondulação, sofre deslocamento ($\Delta x_i = \dot{X}_f t_i$, t_i = *1, 2,...,n*) no sentido positivo (OX).

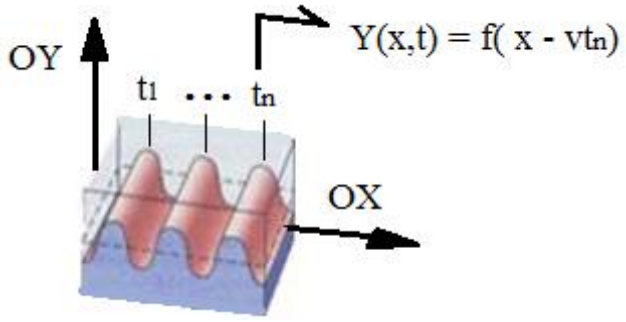


Figura 2.27 Ilustração do deslocamento de função.
(Extraída e adaptada de: Thurman (1997) apud SMS – 491 (2013))

Por analogia com as figuras, Figura 2.26 e Figura 2.27, o volume fluídico instantâneo em vibração, objeto do trabalho, sofre perturbações que geram, teoricamente, uma ondulação a cada (t_n). Perturbações são proporcionadas à mesa elástica por um rotor em desbalanceamento rotativo, na forma de impulsos sequenciais. A ondulação formada, de acordo com a Figura 2.26, a cada intervalo de tempo, tem comprimento de onda (λ) dependente da rotação do motor, ou frequência de perturbação, e se mede de uma crista de onda a outra.

Em verdade, perturba-se a interface ar/água e se lhe põe em propagação a cada intervalo de tempo, quando novas ondulações se vão formando. O quadro disposto sequencialmente corresponde à superfície aquática regularmente encrespada devido à perturbação harmônica. O modelo de propagação unidimensional de onda superficial que descreve a configuração da interface perturbada ar/água é adequadamente obtido através do conceito matemático de deslocamento de funções mostrado na Figura 2.27.

De acordo com a Figura 2.27, ter-se-á:

$$Y(X,t) = f(X \pm Vt) \tag{23}$$

onde o sinal (+) indica propagação no sentido (OX_+) e o sinal (−), propagação no sentido (OX_-). Fazendo-se a substituição, $U = X \pm vt$, tem-se que $\partial U / \partial X = 1$ e $\partial U / \partial t = \pm v$.

A segunda derivada de $Y(X, t)$ obtem-se a partir da regra da cadeia. Substituindo-se na equação da onda resulta:

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = \frac{\partial Y}{\partial U}\frac{\partial U}{\partial X} \quad \text{e,} \quad \frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\partial Y}{\partial U}\frac{\partial U}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 Y}{\partial U^2} \quad \text{e,} \quad \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = V^2\frac{\partial^2 Y}{\partial U^2}$$

Substituindo-se na equação da onda:

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} - \frac{1}{V^2}\frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 Y}{\partial U^2} - \frac{1}{V^2}\left(V^2\frac{\partial^2 V}{\partial u^2}\right) \tag{24}$$

Isto prova que $Y(X,t)$ é solução não-estacionária da equação de Laplace na forma:

$$Y(X,t) = Y_0 sen(kX - kVt) \tag{25}$$

Os parâmetros da onda são dados por:

$$\lambda = VT \tag{26}$$

onde, (λ) é o comprimento de onda. A frequência angular é:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\frac{v}{\lambda} \tag{27}$$

e, sabendo-se que a equação de onda harmônica é [$Y(X) = Asen(2\pi/\lambda)X$]:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{28}$$

universalmente conhecido como número de onda, e ($\omega t = (2\pi/\lambda)Vt = kX$).

O termo (kV) da Equação (25) pode ser escrito na forma: ($kV = (2\pi/\lambda)f\lambda = 2\pi f = \omega$), a velocidade de fase, e ($V_f = (\omega/k) = (g/k)^{1/2}$), a velocidade de grupo, ($V_g = d\omega/dk$).

Portanto, pode-se reescrever a Equação (25) assim:

$$Y(X,t) = Y_0 sen(kX - \omega t) \tag{25}$$

onde, para (t) fixo, [$Y(X,t) = f(X)$] e para (X) fixo, [$Y(X,t) = f(t)$].

Neste estudo vale lembrar que ondas encontram paredes do sistema, obstáculo à propagação, e se refletem. Por restrição se consideram ondas propagando-se na direção (OX) e interferências ocorrem seguidamente. A frente de onda vista através das figuras, Figura 2.26 e Figura 2.27, permanece perpendicular ao sentido de propagação, e não se admite ocorrência de sub-harmônicas laterais (Figura 2.28). Nesse caso ondas consecutivas denotam-se por:

$$Y_1(X,t) = Y_0 sen(kX - \omega t) \tag{29}$$

$$Y_2(X,t) = Y_0 sen(kX - \omega t + \theta) \tag{30}$$

O ângulo de fase é (θ). Quando é zero, se diz que a interferência é construtiva e partículas da interface vibrarão com amplitude (Figura 2.37) da ordem de:

$$Y(X,t) = Y_1(X,t) + Y_2(X,t) = 2Y_0 sen(kX - \omega t) \tag{31}$$

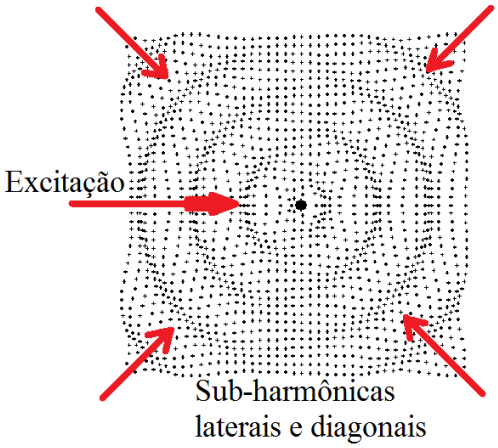


Figura 2.28 Reflexão de sub-harmônicas laterais.
Extraída e adaptada de: (Allen, 2013)

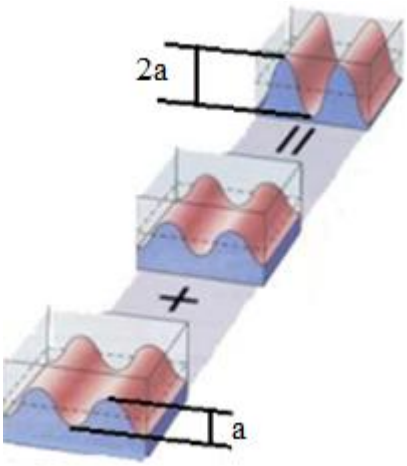
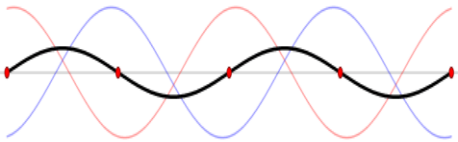
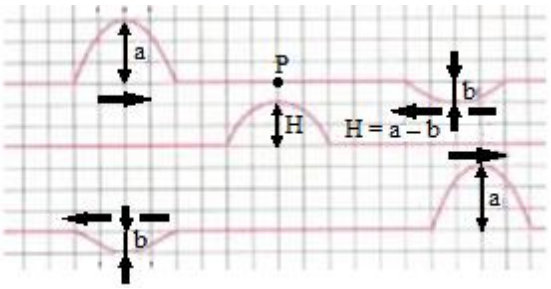


Figura 2.29 Ilustração de interferência construtiva de ondas de amplitude (a).
Extraída e adaptada de: (Thurman (1997) apud SMS – 491 (2013))

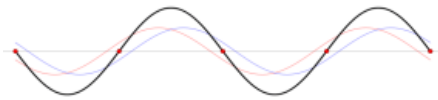
A Figura 2.29 mostra interferência construtiva entre ondas de mesmo comprimento (λ). O conjunto, Figura 2.29 (a), (b), (c), (d) e (e), mostra o fenômeno, esquematicamente:



(a)

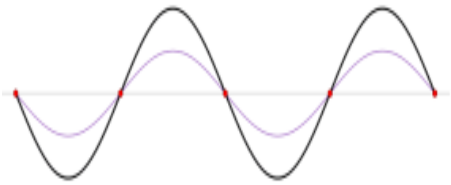


(a') θ = 180º

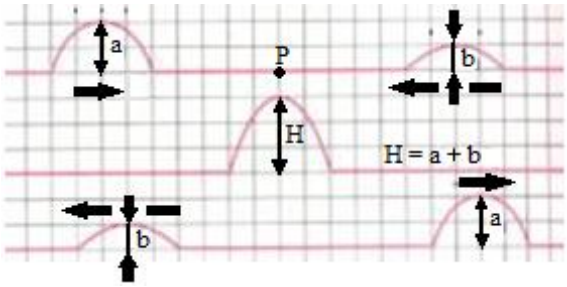


(b)

θ = 45º Interferência construtiva semelhante à (c)/(c').



(c)



(c') θ = 0º

Figura 2.30 Ilustração esquemática da interferência construtiva de ondas. A linha em preto representa a onda resultante: (a) e (a') Interferência destrutiva com ângulo de defasagem θ = 180º; (b) Interferência construtiva com ângulo de defasagem θ = 45°; (c) e (c') Interferência construtiva com ângulo de defasagem θ = 0°.

(Extraída e adaptada de: Ascendino, 2013)

2.5.1 Onda gravitacional e de capilaridade

Distúrbios na interface entre dois fluídos geram ondas superficiais. O fenômeno de interface é entre ar e água, neste estudo, por exemplo. Expressão de maior rigor para a veloci-

dade de fase da onda (Tabela 2.3) deve levar em conta a diferença de densidade entre fluídos. Considerando-se (v_f) e (v_g) velocidades de fase e grupo, respectivamente:

$$v_f^2 = \frac{g}{k}\left(\frac{\rho_a - \rho_{ar}}{\rho_a + \rho_{ar}}\right) \tag{32}$$

Quando interface forma-se entre ar e água, considerando-se a massa específica do ar (ρ_{ar} = 1,22 kg/m^3) relativamente pequena se comparada à massa específica da água (ρ_a = 1.000 kg/m^3), pode-se relevar a diferença na expressão e tomá-la de acordo com a Tabela 2.3. Quando a diferença é pequena a exemplo de fluídos de características físicas similares como água pura e água salobra (ρ = 1.004 kg/m^3 (Fernandes Júnior, 2006)), a velocidade de fase torna-se reduzida. Em caso de a densidade aumentar bastante com a profundidade, ondas gravitacionais submersas propagar-se-ão através do corpo fluídico por forças de flutuação gravitacional (Acheson, 1990). A curiosidade física explica correntezas marinhas submersas.

Quando existe obstáculo submerso, ou ao nível interfacial, ondas estacionárias podem se desenvolver com alteração de comprimento de onda, velocidade de fase e de grupo. A figura abaixo, Figura 2.31, ilustra o problema. A onda que se forma, tanto a montante como a jusante do obstáculo, é uma onda permanente. Quando a velocidade da correnteza for maior que a velocidade de fase, dois números de onda diferentes determinarão a mesma velocidade de grupo a montante e a jusante. Ondas a montante são dominadas por forças de capilaridade enquanto que ondas a jusante, por forças gravitacionais. O adsorvente utilizado no sistema em estudo constitui igualmente, obstáculo submerso. Acredita-se que a perturbação fluídica interfacial, antes e após obstáculos, não diminui a cinética de promoção de choque entre partículas dispersas e adsorvente, necessária ao processo de separação proposto neste trabalho.

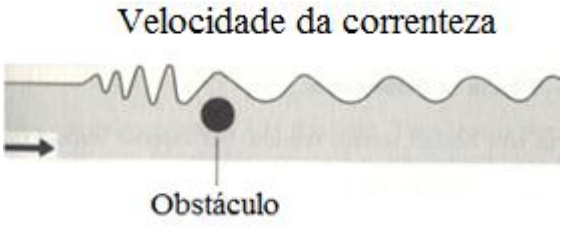


Figura 2.31 Ilustração da influência de um obstáculo submerso no comprimento de onda e velocidade de fase.
(Extraída e adaptada de: Acheson, 1990).

Forças, gravitacional e de capilaridade, são sempre restauradoras do equilíbrio interfacial gás/líquido ou líquido/líquido (Fitzpatrick, 1963). O método vibracional utilizado neste estudo tem por princípio, desestabilização da interface e geração de microbolhas de ar. Com isto aumenta-se a cinética fluídica como mecanismo que fomenta choque interpartículas e entre partículas e adsorvente. Neste caso o domínio de forças de inércia sobre forças restauradoras, de capilaridade ou gravidade, deve prevalecer.

Este estudo inspira-se em ondas superficiais provocadas por ação da ventania em corpos d'água, igualmente fonte energética natural de perturbação de mares, lagos e oceanos. O simples lançamento de uma pedra em um lago ou poça d'água provocará efeito semelhante. Com essa premissa o efeito pode ser obtido, no limite da estabilidade interfacial ou acima, mediante uso de energia vibratória a adequada combinação de frequência e amplitude de excitação ou, perturbação.

Um importante resultado do estudo de onda superficial, no limite de águas profundas ($k.h >> 1$), onde (h = profundidade), é o número de onda para qual a razão entre velocidades grupo e fase é um. A relação de dispersão modificada nesta condição é (Fitzpatrick, 1963):

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \sqrt{gk + \frac{\sigma}{\rho}k} \tag{33}$$

Fazendo-se,

$$\frac{v_g}{v_f} = \frac{1}{2}\left[\frac{1+\frac{3\sigma k^2}{\rho g}}{1+\frac{\sigma k^2}{\rho g}}\right] \tag{34}$$

onde ($k = k_0 = L_a \equiv \sqrt{\rho g / \sigma}$), chega-se a, ($\lambda \approx 2$ cm). Portanto, a velocidade mínima de fase atinge o valor, ($\sqrt{2}\sqrt[4]{\sigma / \rho g}$) que corresponde a, (0,2 m/s). Ondas de comprimento ($\lambda \approx 2$ cm) possuem velocidade de grupo igual à velocidade de fase. Conclui-se, portanto, que para valores ($k << k_0$) dominam forças gravitacionais para as quais ($v_f = 2v_g$); quando ($k >> k_0$), dominam forças de capilaridade e ($v_f = 0{,}67v_g$).

A correnteza ou velocidade de grupo, si se considerar a profundidade mínima que separa os domínios água rasa e água profunda, no sentido hidrodinâmico, é determinada por

condições físico-químicas ambientais cujas relações podem ser determinadas segundo este estudo. A propagação de ondas superficiais, manifesta interação de fluídos através da interface e sua descrição *físicomatemática*, podem, de forma aproximada, ser descrita em termos do perfil de velocidade de partículas fluídicas. Intuitivamente, o estado dinâmico das diversas camadas sobrepostas de líquido, em condição de incompressibilidade, permite deduzir a natureza do estado de intenso movimento cisalhante, a que são submetidas partículas dispersas no meio, sobretudo, de dimensoes reduzidas.

A Figura 2.32 ilustra o perfil de velocidade, da superfície à camada de velocidade mínima ($0{,}04v_f$), considerando-se a razão de propagação em águas profundas ($\lambda/h > 0{,}5$), expressa anteriormente. Partículas movem-se em velocidade crescente ($h = 0$), à superfície, à escala de raio orbital ($r(h) = ae^{kh}$) onde (a = amplitude da onda) e (k = número de onda). Em águas rasas a órbita é elíptica devido ao aumento da velocidade de grupo em relação à de fase ou de propagação da onda (Krogstad & Arntsen, 2000).

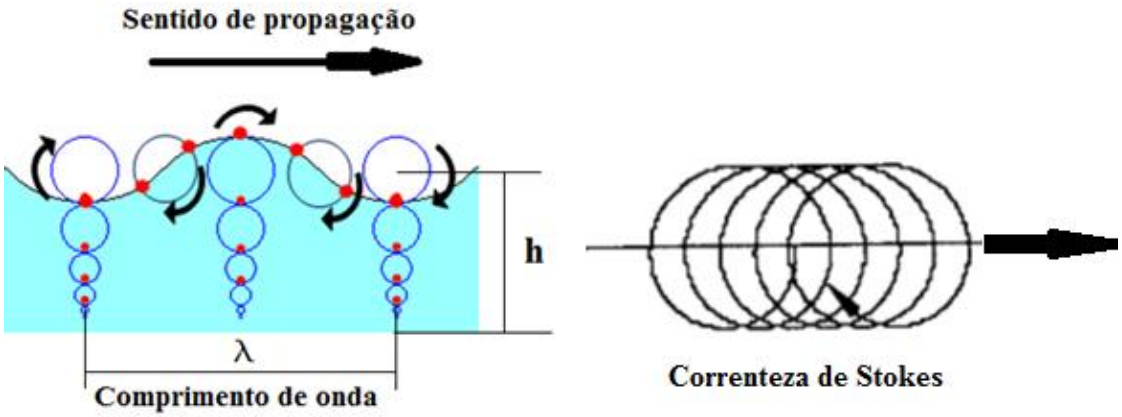


Figura 2.32 Propagação de onda superficial: a) Movimento orbital de partículas fluídicas; b) Correnteza de Stokes.
(Extraídas e adaptadas de: a) Wave (2013) e b) Krogstad & Arntsen, 2000).

Como a velocidade orbital superior é sempre maior que a velocidade inferior em uma mesma órbita, a liquidez, no sentido da propagação, é conhecida como correnteza de Stokes. Através da Figura 2.32 se pode observar que abaixo de um dado limite de profundidade, não mais há movimento fluídico causado por perturbação superficial.

2.5.2 Vibração de uma dispersão fluídica

Quando se submete um volume de fluído à vibração harmônica imposta por rotor em desbalanceamento rotativo, a fenomenologia associada, no que concerne à fluidodinâmica, guarda similaridade com perturbação provocada por ventania, fenômeno de marés, terremotos submarinos, transporte veicular de volume fluído (Ardakani & Bridges, 2010), oscilações de uma caixa d'água suspensa (Nonlinear liquid sloshing, 2013), etc.. Particularmente, neste trabalho, se submete certo volume de dispersão, óleo em água, a pertubação controlada de natureza harmônica, buscando-se imprimir movimento relativo entre fases com vista à separação.

No que concerne à natureza do elemento disperso, massa específica é determinante no comportamento relativo das fases. Quando a fase dispersa é mais densa que o líquido dispersante, a exemplo de dispersões sólido/líquido, afora a granulometria, o movimento relativo é menos acentuado, sobretudo, devido à inércia. Em caso contrário, a exemplo de dispersões líquido/líquido, o movimento relativo tende ser menos acentuado devido às forças que unem o disperso ao dispersante. Comparativemente, o estudo de dispersões sólido/líquido em vibração tem recebido maior destaque em face da demanda industrial, principalmente em operações unitárias no âmbito da química e mineralogia (Blekhman, 2003). O mesmo não se observa para dispersão líquido/líquido, de escassa literatura.

O estudo do comportamento de dispersões em vibração, referido como *microvibroreologia*, é essencial ao controle de propriedades reológicas, princípio de criação dos chamados materiais dinâmicos. Basicamente duas questões põem-se de interesse: A primeira, o que propriamente vem a ser amplitude relativa e absoluta? A segunda: Que aporte energético é necessário para vibrar determinada massa? A começar pela segunda questão, de acordo com Spivakovski & Dyachkov (1985), o aporte energético necessário, em fluxo horizontal, pode variar de, 0,3 kWh/m^3 para fluxo de 10 m^3/h a, 0,13 kWh/m^3 para fluxo de 65 m^3/h. Antes de responder à primeira questão, é importante destacar que vibração em volumes de dispersão, usualmente, tem como finalidade diminuir viscosidade (Loskutova *et al*., 2004), diminuir densidade global (materiais dinâmicos com densidade equivalente) ou acelerar reações químicas (Blekhman, 2003).

Do ponto de vista da análise e descrição dinâmica, dispergente versus disperso, restrições à baixa concentração de disperso de modo a não haver contacto entre partículas as quais se supõe, separadas pelo menos três vezes o diâmetro médio, são impostas para simplificação matemática. Sob tais restrições, e com base nelas, dispersões sólido/líquido possuem viscosi-

dade similar a da água, (ν_a = 1 cP), podendo chegar a 70 % deste valor em vibração de baixa frequência, isto é, abaixo de 250 Hz (Blekhman, 2003). Em estudo analítico sobre vibração de dispersão sólido/líquido em dispersantes de distintas viscosidades (1 cP e 0,2 cP), Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005) reportaram que partículas menores oscilam com maior amplitude em todos os casos, e o valor supera em pelo menos, 30%, a amplitude de partículas maiores. Quando a viscosidade da dispersão for cinco vezes menor, esse valor aumenta para 200% ou 300%. Este resultado é relevante para este estudo considerando-se o princípio de separação que se emprega, qual seja, choque renitente entre adsorvente e óleo disperso.

Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005) analisaram dispersões com particulado da ordem de 10 μm a 100 μm. A seguinte descrição matemática foi utilizada, supondo-se deslocamento (X^{liq}) e velocidade ($\dot{X}^{liq}$) do líquido dados por:

$$X^{liq}(t) = X_0 sen(\omega t) \tag{35}$$

$$\dot{X}^{liq}(t) = \dot{X}_0 \omega \cos(\omega t) \tag{36}$$

respectivamente.

Pode-se então escrever a Lei de Newton na forma:

$$m\frac{d\dot{X}}{dt} = -3\pi\mu\phi_g(\dot{X} - \dot{X}^{liq}) \tag{37}$$

A massa (m) deve ter conotação equivalente, isto é, além de representar efeito inercial deve reunir outros efeitos como atrito fluídico e força de arrasto. Considerando-se a esfericidade média de partículas e (ρ_a), a massa específica da água, si se lhe toma em termo equivalente, pode-se escrever:

$$m = m_{partícula} + \rho_a \frac{1}{2}\left(\frac{\pi\phi_g^3}{6}\right) \tag{38}$$

onde se considerou a metade do volume da partícula como inércia devido ao líquido. À página seguinte mostra-se a solução geral da equação diferencial resultante, para velocidade e deslocamento da partícula, em termos das constantes, ($k_1 = -3\pi\mu\phi/m$ e $k_2 = -a\omega k_1$):

$$\dot{X}(t) = \frac{k_1 k_2 e^{k_1 t} - k_2[k_1 \cos(\omega t) - \omega sen(\omega t)]}{k_1^2 + \omega^2} \tag{39}$$

$$X(t) = \frac{k_2[\omega e^{k_1 t} - k_1 sen(\omega t) - \omega \cos(\omega t)]}{\omega(k_1^2 + \omega^2)} \tag{40}$$

isto é, velocidade e deslocamento em função do tempo, respectivamente.

A solução permanente é facilmente obtida removendo-se o termo transiente exponencial das equações (39) e (40). A amplitude máxima de oscilação das partículas obtem-se igualando (39) a zero e substituindo em (40):

$$X_g = \frac{k_2}{\omega\sqrt{k_1^2 + \omega^2}} = \frac{3\pi\mu\phi_g X_0}{m\omega\sqrt{1 + \left(\frac{3\pi\mu\phi_g}{m\omega}\right)^2}} = \frac{3\pi\mu\phi_g X_0}{m\omega\sqrt{1 + X_0^{*2}}} = \frac{X_0^* X_0}{\sqrt{1 + X_0^{*2}}} \tag{41}$$

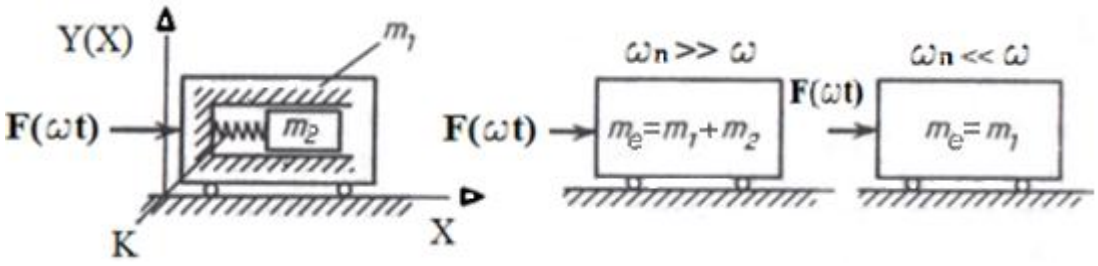
O parâmetro adimensional ($X_o^* = 3\pi\mu\phi_g/m\omega = 9\mu/\pi\phi_g^2\nu\rho$) caracteriza a capacidade da partícula de reagir às oscilações do meio. Por ser dependente do diâmetro das partículas, admite-se que seja condição necessária, mas não suficiente, para desintegração de coágulos no meio, o que dependerá da energia imposta.

Embora não se possa representar o sistema em estudo como dispersão sólido/líquido, principalmente pela massa específica do óleo disperso, razoável aproximação pode ser feita. É bastante considerar o comportamento de gotículas de óleo dessa ordem como partícula sólida. A massa específica *per si* já se encontra contemplada na descrição.

A Figura 2.33, adiante, mostra um modelo físico adequado à descrição de sistemas particulados. De acordo com a ilustração a Figura 2.32 (a) mostra a massa interna, representante de um sistema qualquer, passível de movimentar-se com perturbação externa. O sistema elástico interno de suspensão (mola) pode ser representativo da força gravitacional de restauração de equilíbrio do líquido. A Figura 2.33 (b) representa o equivalente inercial (m_e) quando se excita o sistema de forma super ou sub-ressonante. A ilustração está de acordo com resultados de Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005) sobre a menor amplitude de oscilação de partículas maiores, obviamente devido ao maior efeito inercial. À medida que se aumenta a freqüência de excitação, em ambos os casos, partículas maiores que a média assim como menores, estarão menos sujeitas ao efeito de forças viscosas, atenuadas por vibração.

No caso particular deste estudo, guardados efeitos combinados de menor densidade e diâmetro do disperso, o efeito resultante sobre dispersão óleo em água qual seja, movimento relativo entre fases, é consequentemente menor. Porém, em contrapartida, se pode lograr acentuado movimento relativo entre fluído e elemento adsorvente fixo, por extensão, entre elemento disperso e adsorvente. Atinge-se dessa forma o objeto central de processo.

A natureza da dispersão, objeto de interesse deste trabalho, é emulsão oleosa. Se tém como característica, menor densidade do dispergente ou disperso, o óleo, frente ao dispersante, a água. De acordo com (Blekhman, 2003), no caso da densidade da partícula, ou disperso, ser menor que a densidade do fluído, a amplitude de gotículas adiantar-se-á em fase à oscilação, podendo chegar a amplitudes maiores que a amplitude de excitação do sistema. Esse efeito pode elevar a intensidade de choques interpartículas e entre estas e paredes do adsorvente, por aumentar a escala de abrangência do deslocamento de partículas. Considerando-se este efeito, objeto de processo, se pode admitir maior intensidade no interior do labirinto adsorvente. O efeito é promissor no sentido de melhorar a eficiência do processo de separação proposto, através da enérgica ação, a depender dos níveis de excitação. Com isto acredita-se fomentar choque de gotículas de óleo entre si e contra o labirinto adsorvente.



a) **b)**

Figura 2.33 Modelo físico vibracional representativo de um sistema disperso: a) Modelo global; b) Modelos equivalentes segundo a freqüência de excitação.
(Extraída de: Blekhman, 2003)

O efeito vibratório pode influenciar outra classe de sistemas dispersos a exemplo de fluídos em colunas de gaseificação. Flotadores e outros sistemas de transporte de massa podem ter os coeficientes de transferência de massa elevados por ação do efeito vibratório em reduzir o tamanho de bolhas de ar geradas. Waghmare (2008) demonstrou o uso de vibração vertical para aumentar a performance de um reator trifásico a coluna de bolhas de um sistema gás-líquido-sólido de adsorção física (POMR). Concluiu que o coeficiente de transferência de

massa aumentou 500 % e a retenção de bolhas de gás (*voidage* ou *hold-up*), acima de 200 % em regimes de baixa amplitude de vibração (0,5 a 2,5 mm), baixa frequência de excitação (0 a 25 Hz) e 0,036 m^3/h de vazão de ar. Investigações sobre levitação de bolhas de ar em colunas de líquido, mostrado na Figura 2.34, podem ser vistas em Trolinger *et al.*, (2013).

A Figura 2.35 mostra experimentos de Krishna *et al.*, (2000) os quais investigaram três modalidades de geração de bolhas. Concluíram que na faixa de frequência de 100 Hz a 150 Hz o desempenho da coluna ressonante foi superior às demais técnicas convencionais obtendo-se redução correspondente de 70% do tamanho de bolhas, ao dispêndio energético de 0,5 kW/m^3. Outros resultados envolvendo levitação de bolhas se podem ver em Krishna *et al.*, (2000), Ellenberger; Van Baten; Krishna (2003), Krishna & Ellenberger (2003) e Ellenberger & Krishna (2007).

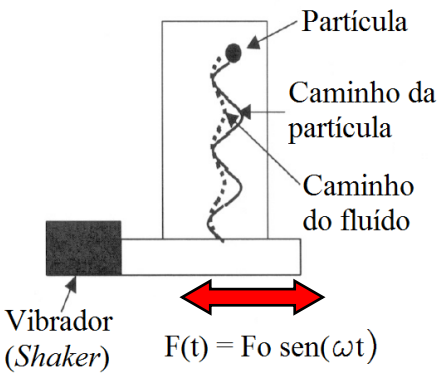


Figura 2.34 Influência da vibração na ascensão de uma bolha de ar. (Extraída e adaptada de: Trolinger, 2013).

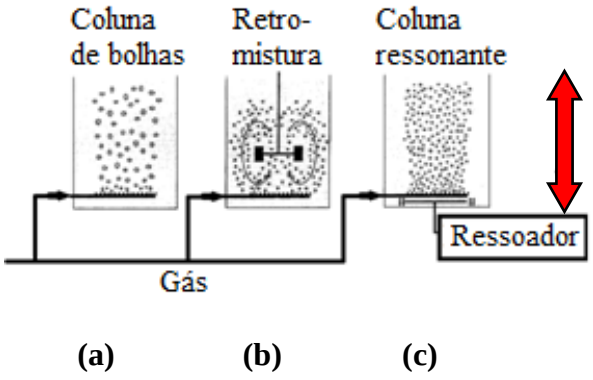
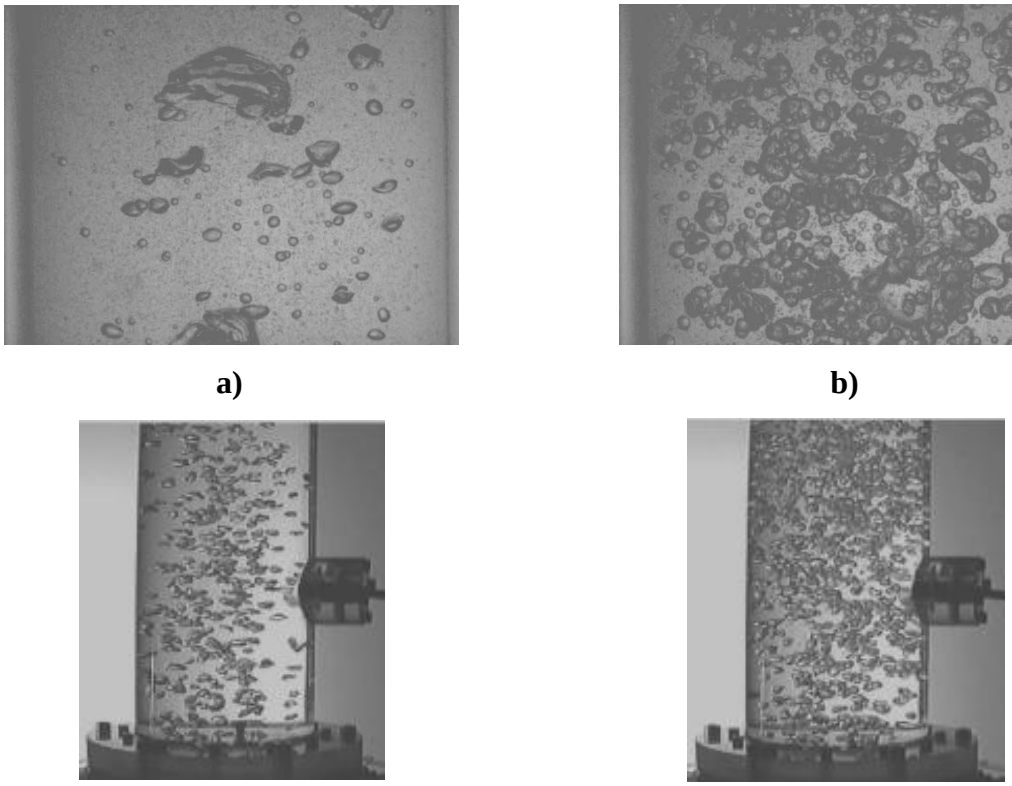


Figura 2.35 Dispositivos de aeração convencional e vibratória: a) Injeção direta; b) Misturador convencional do tipo *Stirred Vessel*; c) Coluna vibratória. (Extraída e adaptada de: Krishna *et al.*, 2000)

Segundo Baird & Garstang (1972) apud Waghmare (2008) o uso de reatores vibracionais não é exatamente técnica recente. Remonta a 1938 através de trabalhos de Martinelli e Boelter em que estimaram 400% o aumento de eficiência na transferência de calor e massa, posteriormente confirmados por Ellenberger & Krishna (2002). Os últimos, adicionalmente, reportam substancial aumento de correlação da redução do tamanho de bolha com amplitude de vibração.

As figuras, Figura 2.36 (a), (b), (c) e (d) a seguir mostram ação vibracional em colunas gasosas. Na referida figura, precisamente, (b) e (d), foram aplicadas frequências de 16 e 40 Hz, 1.36 mm de amplitude e vazão de ar de 36,4 mℓ/s (0,01 m^3/h), respectivamente, enqunto que (a) e (c) permaneceram estáticas. Em todos os casos as bolhas foram obtidas através de bico de injeção capilar.



a) **b)**

c) **d)**

Figura 2.36 Quadro comparativo entre colunas gaseificadas: a) Estática; b) Em vibração a 16 Hz e 1.36 mm de amplitude; c) Estática; d) Em vibração a 40 Hz com comprimento de onda de 0,5 mm e velocidade de escape de ar do injetor de 5 mm/s.
(Extraídas de: Waghmare (2008) (a) e (b))
(Extraídas de: Ellenberger & Krishna (2002) (c) e (d))

Embora os autores não façam referências à força cisalhante à altura da interface bolha/líquido, em meio ao fluído vibrante, sabe-se que, adicionalmente às pulsações da bolha de ar, soma-se cisalhamento na camada não deslizante de Stokes, responsável pela ruptura interfacial e produção de bolhas-filhas menores. No trajeto da bolha, quando esta deixa o bico injetor, opõem-se forças de arrasto de Stokes e forças pulsantes de Björkness (Björkness (1909),

Lamb (1932) e Landau & Lifshitz (1982)). Tais forças opõem-se à forças de flutuação de Arquimedes dirigidas para cima.

Segundo Zouesthiagh *et al*., (2006) vibração induz fluxo anular no entorno da bolha de ar cuja relação diametral de influência é 1 a 2,2 vezes o diâmetro da bolha. O fluxo se torna caótico após implosão da bolha. Zouesthiagh *et al*., (2006) desenvolveam um modelo de geração de bolhas pós-ruptura da interface e sugere proporcionalidade do número de bolhas geradas à frequência de vibração imposta. O aprofundamento da pesquisa confirmará ou não. Em caso afirmativo consolidará a importância do processo de *autoflotação* proposto neste trabalho, em latente estágio de pesquisa.

Björkness considerou a pulsação volumétrica, ou volume pulsante instantâneo da bolha de ar, e derivou a seguinte e pressão:

$$F(t) = [V_0 + \Delta V_{\max} sen(\omega t)]\rho_a [g - \omega^2 Y_0 sen(\omega t)] \tag{42}$$

A ponderação sobre um ciclo dá a força média:

$$F = V_0 \rho_a g - \frac{\omega^2 Y_0 \Delta V_{\max} \rho_a}{2} \tag{43}$$

2.5.3 Aspectos de fluidodinâmica inerentes ao impacto de gotas

Diante do exposto pode-se constatar variados princípios físicos operados em sistemas vibracionais, passíveis de se levar à prática em aplicações como operações unitárias de separação de emulsões. O sistema em apreço, embora em fase preliminar de estudo, foi projetado, como será mostrado no próximo capítulo, para extrair com máximo rendimento, benefícios de processos meramente naturais que podem ser reproduzidos em condições controladas. Perturbação vibracional de meios fluídicos, por exemplo, surge como promissora técnica de fomento de choque interpartículas e de desestabilização de ondas superficiais para geração de microbolhas de ar.

O mecanismo que se utiliza para provocar choque de gotículas de óleo contra o labirinto adsorvente metálico espiral é energia cinética imposta ao fluído por efeito vibratório e, por conseguinte, às gotas dispersas. A perturbação da interface ar/água provocada por movimentos oscilatórios do sistema induz movimento às partículas, sobretudo na região interfacial,

de acordo com a teoria da ondulação de Faraday mostrada através das figuras, Figura 2.32 (a) e (b). A velocidade de ascensão da interface e, por extensão, de gotículas, ilustrada através da Figura 2.37, pode ser calculada com aproximação através da Tabela 2.3, item 2.5. Por outro lado, partículas dispersas em meio ao campo vibracional são atraídas por paredes ou corpos imersos, na proporção de suas dimensões, e por movimento induzido por vórtices. Saadatmand & Kawaji (2010) e Hassan & Kawaji (2007) derivaram uma expressão para a força de atração entre partículas e parede de uma célula em microgravidade. Reportaram que a aceleração da partícula é proporcional à quarta potência da distância instantânea do centroide da partícula à parede mais próxima.

Figura 2.37 Ilustração do movimento de gotas na interface fluídica (Velocidade de fase) (Extraída de: Hsu, (s/d))

O mútuo movimento relativo de corpos imersos cria grandes áreas de baixa pressão localizadas à vizinhança desses corpos por descolamento da camada limite (Fox & McDonald, 1988). Isto se explica, si se considerar o movimento da partícula no fluído e o movimento relativo do fluído contra o adsorvente, devido ao fluxo normal ao plano horizontal e à oscilação da cuba ou reservatório de tratamento, Isto é extensivo ao efluente por se enquadrar na classe de fluído *invíscido*. Esse efeito pode eventualmente contribuir para aproximar partículas umas das outras e do adsorvente metálico.

O fluxo natural do sistema contínuo é também propulsor do processo em que se levam gotículas de óleo ao choque contra o adsorvente. A velocidade dependerá da vazão operacional empregada, incrementada ou não por bolhas de ar de flotação, ou *autoflotação,* quando adsorvidas às gotículas. A velocidade terminal de ascensão, segundo reporta (Goldman, 2009), pode ser dada por:

$$\dot{Y}_b = \dot{Y}_g = \frac{2}{3}\sqrt{gr} \tag{44}$$

A frequência de pulsação é dada a seguir pela fórmula de Minnaert (1933):

$$f = \frac{1}{2\pi R}\sqrt{\frac{3\sigma\Delta P}{\rho}} \tag{45}$$

Quando diâmetros são de 1 mm, afirma Minnaert (1933), a frequência de pulsação é de, 3,0 kHz. Neste estudo nenhuma consideração se faz com relação à frequência de pulsação e possíveis efeitos no processo de separação objeto de estudo.

Finalmente, atenção se dá à eclosão de bolhas de ar à superfície livre. O processo gera aerossóis que podem contribuir com o mecanismo de choques que se verificam à região emersa do adsorvente, através do lançamento de gotículas de óleo à superfície e vizinhança fluídica da bolha de ar (Duchemin *et al*., (2002) e Goldman (2009)). Imagens espetaculares de eclosão de bolhas podem ser vistas em Jato de Worthinton[a] (2013) e Jato de Worthinton[b] (2013).

Sobre choque de gotas contra superfícies fluídicas emersas, Farrall; Hibberd; Simmons (2006) realizaram estudo numérico do lançamento de gotas de óleo de 25 μm de diâmetro médio contra superfície com fina camada de óleo e compararam com resultados experimentais. Trata-se de ambiente típico de câmara de mancais rotacionais de 10.000 rpm capazes de lançar gotas com 5.0 m/s de velocidade. A consequência é a queda de rendimento de lubrificação, verificada em máquinas de aviação, por resvalamento de gotas (*splash*). Isto se explica por manter até 25% da capacidade mássica de óleo da câmara sem realizar troca de calor por perda de contacto e tempo de residência na câmara ou, flutuação. A Figura 2.38 mostra resutados do estudo de Farrall; Hibberd; Simmons (2006).

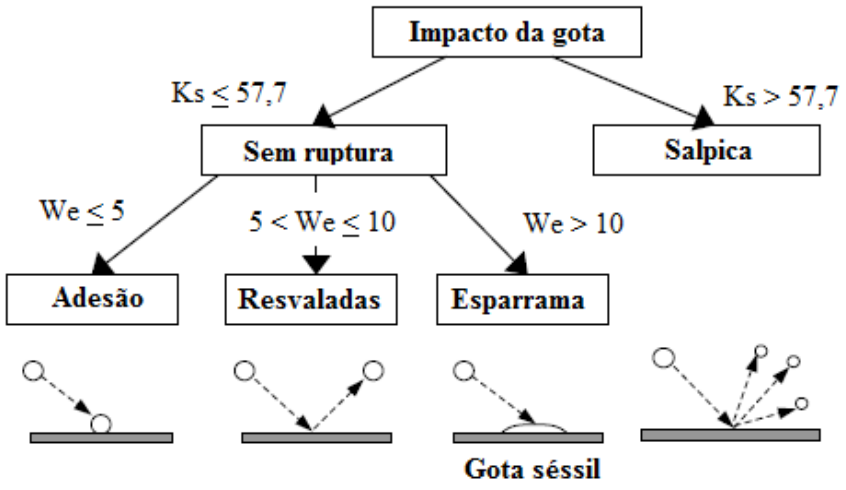


Figura 2.38 Fluxograma lógico do coeficiente de salpicos de óleo (K_s).
(Extraído e adaptado de: Farrall; Hibberd; Simmons (2006)).

A adesão séssil de gotas às paredes da câmara, portanto, pode evitar resvalamento. Faixas de velocidade de impacto são governadas pelo número de Weber (W_e).

No estudo mostrado através da Figura 2.38, pesquisadores definiram o coeficiente de salpicos (K_s), para avaliação lógica da quebra de gotas. A densidade do ar foi considerada 2,932 kg/m^3, o que pressupõe pressão ambiente de aproximadamente 2 atm no interior da câmara; a viscosidade absoluta: 1,837 kg/m.s. Segundo os autores, resultados numéricos estão em boa concordância com dados experimentais.

Em âmbito similar, Orme (1997) investigou eventos que ocorrem na colisão entre duas ou mais gotas. O estudo se aplica à combustão de orgânicos de aviação e representa extensivo conjunto de dados de colisão entre gotas de água e óleo. O resultado da colisão pode ser coalescência seguida ou não de separação, fragmentação catastrófica ou resvalamento.

Muito se tem estudado sobre colisão de gotas de água (Ashgriz & Poo (1990), Ernest *et al*., (1995), James *et al*., (2003), Pasandideh-Fard (1996), Ashley; Marc; Ari (2003) e Chen (2005), mas, segundo Orme (1997), o comportamento de óleo em colisão é notavelmente diferente do comportamento da água. Abaixo, Figura 2.39, são mostrados resultados de Jiang *et al*., (1990) apud Orme (1997) em que se relata parâmetros de impacto em função do Número de Weber.

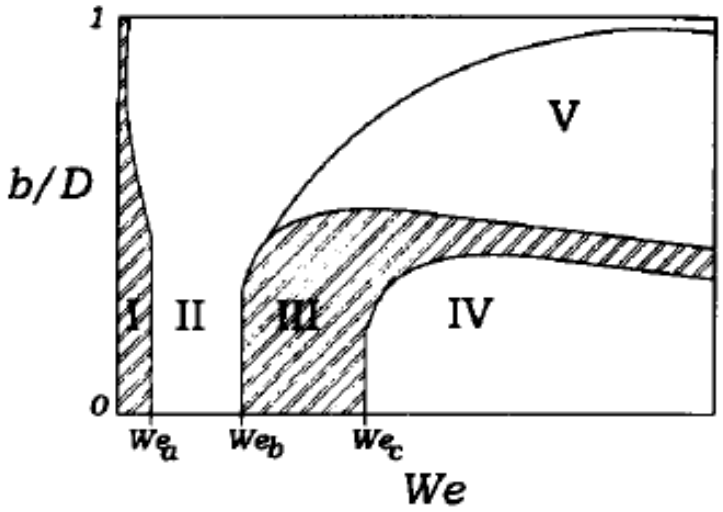


Figura 2.39 Parâmetro de impacto (b/D) versus Número de Weber (W_e) com destacadas regiões de observação experimental: I - Colisões que resultam em coalescência; II - Resvalamento; III - Regime estável de coalescênia; IV - Separação reflexiva; V - Separação com alongamento. We_a (1,2 – 2,9); We_b (5 – 15,5); We_c (aprox. 23,5 – 42). (Extraída de: Jiang et al., (1990) apud Orme (1997))

Eis um criterioso método de busca de descrição unificada do problema da colisão entre gotas de óleos. Na investigação foram utilizadas gotas de 150 μm e intervalo de número de Weber de 0 a 100. O parâmetro de impacto (b/D) é confrontado com o número de Weber, onde (b) é a distância entre centroides de gotas e (D) é o diâmetro da gota. A descrição do modelo de impacto encontra-se em Wunch (2009).

2.6 Considerações finais

A exposição bibliográfica científica que se fez tem como objetivo amealhar subsídios de forma a possibilitar explicar de modo aceitável, a fenomenologia envolvida no estudo e resultados. Foram elencados dados e resultados doutras fontes de pesquisa, direta ou indiretamente relacionadas, de modo a estabelecer um conjunto de informações de conteúdo físico, químico e matemático do assunto. A meta é obter-se discernimento de que ou quais princípios podem ser admitidos governar a área de estudo e sua relação com o processo vibratório. Nesse particular busca-se estabelecer promissora base de investigação, pautada em princípios científicos, com razoáveis credenciais de confiabilidade.

O estudo de sistemas vibratórios e sua dinâmica, a ciência de operações unitárias, indissociável de processos de extensão industrial, a consciência ambiental e a busca por meios sustentáveis de tratamento d'água, são questões sociais e industriais onipresentes. Associativamente à atividade petroleira, formam um conjunto amplo de oportunidade para iniciativa no campo da investigação. Muito do conhecimento científico delineado até aqui, embora suficientes no campo peculiar a que se aplicam, podem eventualmente se limitar à base de análise qualitativa para compreensão da fenomenologia em estudo. O sistema em estudo, o qual será detalhado no próximo capítulo, tem por princípio operacional, energia cinética vibracional para fomento de choque entre micropartículas em dispersão. A semelhança em estado físico do óleo com água e a dimensão micrométrica das bolhas de óleo constituem o grande desafio à técnica de separação de fases.

Não se dispõe, todavia, de bibliografia especialmente dirijida sobre fenômenos que envolvem óleo em água e dinâmica permeio. Dispersões mais estudadas nesse sentido são de natureza sólido/líquido, líquido/gás e suas combinações como foram mostradas. Não se pretende comprovar física e matematicamente resultados e eventuais desencadeamentos do processo de separação ou procurar explicá-los em toda a extensão. É prematuro concluir ou con-

jecturar sobre comportamento físico de dispersões, óleo em água, em regime vibratório caótico e a relação com padrões de redução do teor de óleo obtidos. Acrescenta-se que o processo é auxiliado por fluxo de bolhas de ar criado por desestabilização de ondas superficiais.

A literatura científica que porta reultados relevantes de pesquisa realizadas em meios semelhantes ao investigado neste trabalho é razoavelmante apresentada e discutida. Procurou-se apresentar tema e sistemas diretamente relacionados com fenômenos envolvidos, abordados à luz do estudo de vibrações e movimento ondulatório.

Capítulo 3

Metodologia experimental

3. Concepção, caracterização mecânica do sistema e metodologia de ensaio

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados aspectos técnicos e científicos de concepção e caracterização mecância do sistema e a metodologia experimental empregada. Com vista à obtenção de resultados que propiciam quadro de análise razoavelmente comparativo, realizaram-se três modalidades operacionais de tratamento designadas, *Vibra-flot* (FRV), isto é, tratamento vibratório auxiliado por flotação convencional ou, induzida, *Vibra* (SF) que corresponde ao tratamento simplesmente vibratório, e *Viabrauto-flot* (AUT), objeto central do trabalho, correspondente ao tratamento vibratório com flotação natural. Todos os ensaios foram realizados sem aditivos químicos. A utilização de adjuntos químicos de processo constitui prática corrente no âmbito industrial.

O método de concepção empregado na construção do sistema físico, obtenção de configuração geométrica apropriada, princípios mecânicos de acionamento e descarga do fluente tratado e fenomenologia que envolve o corpo fluídico em operação são descritos e apresentados. Sistemas analógicos e digitais para monitoramento e controle do processo foram construídos ou aquistados. Técnicas de aferição de dispositivos de controle e de monitoramento para adequada aquisição de dados são apresentadas e discutidas.

Foram concebidos dois sistemas de processamento, um a fluxo contínuo e outro, a batelada. Concebeu-se para ambos os sistemas duas modalidades de acionamento e suspensão: Acionamento mecânico inercial e a biela; suspensão elástica e sem elasticidade. Elementos mecânicos necessários à consolidação dessas configurações foram construídos. Aspectos físicos e de construção inerentes foram resumidamente apresentados. Por limitação de tempo e financeira, somente o sistema de suspensão elástica a fluxo contínuo foi utilizado.

Para obtenção de parâmetros dinâmicos operacionais como amplitude de movimento vibratório e respectivas faixas de frequência de vibração, realizou-se adequado monitoramento de operação com auxílio de sensores de deslocamento e aceleração. Estabeleceu-se como referência dinâmica operacional, frequência natural do sistema e modo próprio de vibrar, ob-

tidos por ensaios de caracterização dinâmica por impacto e métodos analíticos consagrados na literatura. Como instrumentação auxiliar utilizou-se dispositvos de análise por microscopia e imagem, obtidas através de iluminação estroboscópica. Instrumentos mecânicos e digitais de aquisição de dados numéricos e por imagem foram utilizados, auxiliados por procedimentos analíticos descritos na literatura e *softwares* aplicativos.

A metodologia empregada para avaliação de desempenho operacional, da preparação de efluente sintético ao abastecimento do sistema, da captação da descarga do efluente tratado à síntese de dados resultantes e aferição, é descrita e ilustrada. Parâmetros de ensaio e resultados de pesquisas, obtidos a partir de técnicas congêneres de tratamento, foram utilizados como referencial de partida no procedimento experimental.

Cabe ressaltar que o processo básico idealizado e concebido neste trabalho empregado para separação de óleo disperso em água, constitui vibrar a massa efluente em fluxo, em meio ao labirinto adsorvente. A meta buscar-se máxima impregnação de óleo no elemento adsorvente, a despeito do emprego de aditivos químicos ou similares, como industrialmente se faz para aumento de desempenho de processos. Resumidamente o processo consiste em:

- Perturbar o volume fluídico de forma controlada para desestabilização de ondas superficiais de efluente. O que se logra são pequenas e abundantes bolhas de ar, convencionalmente obtidas por indução de ar comprimido ou gases dissolvidos.
- Criar, através da abundância de bolhas de ar, nuvem de pequenas bolhas lançadas em contracorrente fluídica à exemplo de barreira, ou peneira gasosa, que se entremea em um labirinto adsorvente metálico de alta permeabilidade. Como objetivo, freiam-se gotículas de óleo em ascensão e se lhe arrematam ao adsorvente.
- Aumentar a energia cinética do fluxo efluente de gotículas oleaginosas dispersas por meio de vobração, fomentando-se choques enérgicos contra o elemento adsorvente.

A seguir apresenta-se concepção, caracterização do sistema proposto e metodologia de ensaio empregada. Princípios físicos, físico-químicos, tecnológicos e o conjunto de acessórios necessários à realização experimental são minunciosamente descritos e ilustrados. Para avaliação apropriada do processo de impregnação de óleo no adsorvente metálico, se criaram índices de impregnação designados, “Índice de impregnação vibracional” e, “Índice de impregnação energético vibracional”. Os índices quantificam a impregnação de óleo em função da frequência de excitação e do produto entre frequência e amplitude de vibração, respectivamente.

3.2 Concepção do sistema vibratório de tratamento

3.2.1 Considerações de natureza física

A concepção do sistema em estudo, seu caráter inovador, quando se compara a técnicas usuais de tratamento em escala industrial, pressupõe diligente definição de configuração mecânica no que respeita forma geométrica, geração e propagação de ondas de efluente, regime de fluxo, forma de vibrar e, sobretudo, mecanismo de suspensão e impulsão. Como se trata de um sistema em escala laboratorial submetido a diversos e diversificados regimes de ensaio, deve-se prepará-lo para receber efluente de forma controlada. Isto pressupõe processar e descarregar o efluente de forma a garantir que exames e medições subsequentes permitam pronto estabelecimento do desempenho.

O caráter inicial da pesquisa e limitações de tempo e custo inerentes impede em primeira-mão, extrapolar escala com vista à aplicabilidade industrial. Ademais, outros elementos poluentes que normalmente integram efluentes dessa classe, estão além da fronteira limítrofe de aplicação da pesquisa. O objeto principal é remover óleo disperso com isenção de aditivos químicos. Para tal, utiliza-se ação vibrátil sobre o adsorvente hidrofílico, recuperável por simples extração de óleo com uso de solventes, como sói utilizar-se em operação de limpeza doméstica e industrial (dos Reis (1982) e Marathon Oil Corporation (2013)).

O termo oscilar, ou vibrar, sugere movimento em vai-e-vem. Do ponto de vista cinético envolve inércia, esforço, velocidade, aceleração e deslocamento. São variadas formas de se impulsionar um sistema vibracional, dentre as quais, motorização a energia química (Combustão interna), a energia elétrica, energia potencial e elástica convertidas de um choque, jato, queda d'água etc. (Hibbeler[a] (2011) e Hibbeler[b] (2011)). O conversor de energia pode ser um sistema eletromagnético, pneumático, hidráulico, mecânico clássico a engrenagem, a biela e manivela, came e seguidor, pendular, etc., descritos na literatura corrente de mecânica técnica.

A configuração mecânica global foi defininda partindo-se de tais premissas. O mecanismo e a forma geométrica, escolhidos para confecção do sistema, não somente está relacionado a conceitos físicos expressos anteriormente, dependentes da modalidade de energia disponível e viável de ser estrategicamente implantada, mas, a particularidades de construção mecânica e operacionais. Não obstante, se pode lograr vibração mecânica, neste caso, de mas-

sa fluídica, mediante membrana pulsante de alto-falante a impulsionar o volume fluídico (Krishna *et al*., 2000), ou através de elementos vibrantes de imersão (Issenmann & Falcon, 2012).

Questão de natureza física relevante relacionada a este trabalho é, por exemplo, o modo de vibrar. Pode ser linear, horizontal ou vertical, rotacional e basculante ou combinação de ao menos dois tipos, referida como vibratório translacional. Não menos importante é a natureza dinâmica do sistema abordada anteriormente. Em geral se designa elástica, quando se manifesta com caracterísiticas dinâmicas próprias, ou do contrário, articulada.

3.2.2 Considerações de natureza operacional

A operação que se empreendeu ao tratamento do efluente foi fluxo contínuo, embora contenha o sistema, meios que lhe faculta realizá-la a batéis ou, volumetricamente. A opção por um ou outro tipo de operação está ligada ao contexto funcional de sistemas produtivos em que estaria supostamente inserido, o sistema de tratamento, e também à demanda volumétrica. Neste trabalho ponderou questões de custo experimental e a razão de serem sistemas contínuos, mais simples e apropriados. Cabe um parêntesis no que concerne ao modo de vibrar: A inércia gerada por grandes volumes pode inviabilizar o modo vibracional vertical linear, por exemplo, devido à dificuldade associada ao efeito gravitacional, em operação a frequência, ainda que muito baixa.

Por outro lado, sistemas articulados apresentam problema similar, independentemente do modo de vibrar, pela intensidade de cargas inerciais que se desenvolvem. No conjunto deste trabalho foi desenvolvida a versão articulada do sistema, apoiado em guias de rolamento plano (ETV_{13}) a serem mostradas em tópicos adiante. Observou-se que esta modalidade mecânica, em iguais condições de operação, eleva o consumo energético em cerca de 700%. Tal diferença explica-se por atrito e inércia existente, comparado à suspensão elástica que possuem caracterísiticas dinâmicas prórpias permitindo ao motor de propulsão trabalhar em quase vazio, isto é, com relativamente baixo consumo energético (Spivakovski & Dyachkov, 1985).

Outro incoveniente de se utilizar vibrações verticais, mesmo se operando sistema elástico, é a grande resistência mecânica que deveriam ter os dispositivos elásticos de suspensão para suportar grandes cargas. Neste caso, poderosas molas haveriam de ser empregadas com esta finalidade, de frequência natural muito mais elevada, consequentemente proporcionando pequenas amplitudes de vibração e nível de energia transmitida à massa fluída. Resul-

tados observados na literatura científica atestam quão-dominante é o produto entre frequência e amplitude (ωX_0) nesses casos, traduzido como termo de energia cinética necessária ao choque de partículas (Ivanova; Kozlov; Evesque, 2001).

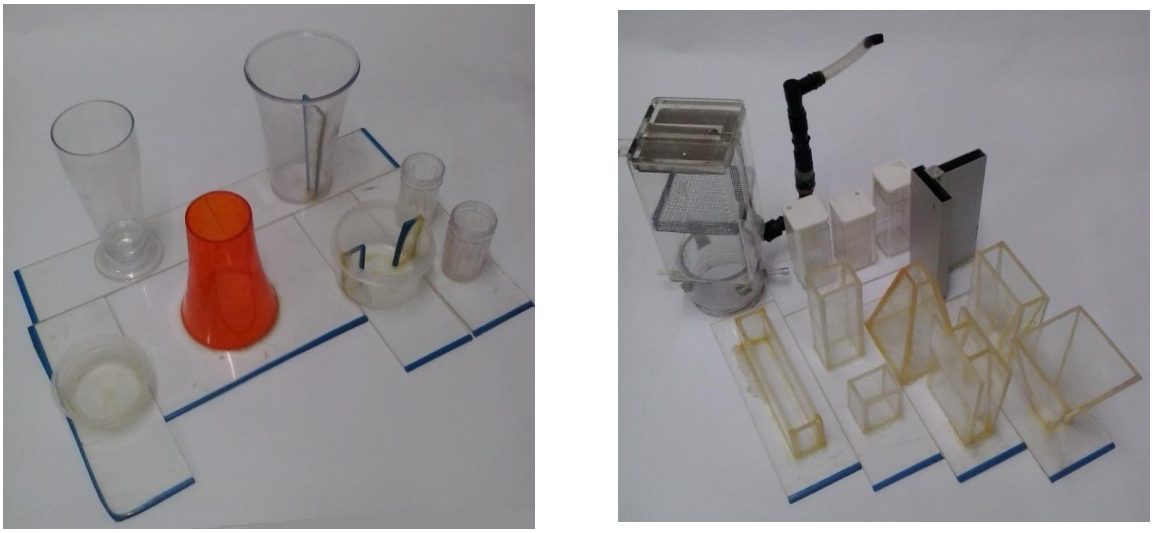
3.2.3 Considerações sobre a geometria da cuba ou reservatório

Forma geométrica regular aplica-se melhor que de natureza complexa, principalmente para simplificar o processo de fabricação. Salvo em casos estritamente necessários, em casos especiais, configurações geometricamente complexas são empregadas em construções de uma forma geral. É uma premissa natural em construção de máquinas e visa, sobretudo, facilitar a confecção, beneficiar a resistência mecânica, permitir construção desmontável e modular e, principalmente, atender requisitos indispensáveis de limpeza e manutenção. Formas cilíndricas, cônicas, tetraédricas cúbicas ou retangulares são mais difundidas quando a utilização destina-se a armazenamento, processamento ou transporte. Em particular formas esféricas são preferidas quando se emprega alta pressão de operação, pela distribuição equitativa de tensão que propicia. Correntemente se vê em tancagem de gases na indústria de petróleo.

No caso particular do sistema em estudo, a premissa de redução de área exigível em operações *off-shore* sugere baixas relações largura/altura, isto é, pouco espaço plano horizontal para grande volume operado. Fez-se necessária, portanto, realização de exame visual com auxílio de microscópio digital dotado de escala de medição (ETM_{15}) e iluminação estroboscópica (ETM_{17}). Observou-se que pequena relação altura/largura adéqua razoavelmente o processo vibratório à perturbação da interface do efluente, oportunamente mostrado através das figuras, Figura 3.4 (a), (b), (c) e (d), página 78.

A literatura corrente não trás artigos que tratem especificamente do assunto, além de fortuitas referências de forma geométrica e influência com enfoque à estabilidade de ondas. Neste sentido, Lakiza (2005) estudou aglomeração de bolhas de gás ao fundo de um tronco cônico acoplado a uma esfera oca na parte superior. Reportou maiores pressões hidrodinâmicas do fluxo criado no cone se comparado ao fluxo na esfera oca, quando submetidos à vibração vertical. Issenmann & Falcon (2012) estudaram experimentalmente, lei de força para turbulência de capilaridade-gravidade em reservatórios de seção circular e quadrada, estando a força espacialmente localizada e sobre todo o contêiner. Concluiram que embora a direção da força prevaleça em qualquer caso, o vaso circular é mais isotrópico que o retangular. As várias direções de reflexão de onda são proporcionadas pela curvatura da parede.

A pouca isotropia da forma retangular de reservatórios de líquidos favorece a formação e quebra de ondas, necessárias ao objeto operacional do tratador em estudo. Ensaiou-se várias formas geométricas com fluído, em vibração horizontal, para exame da formação e elevação máxima de ondas superficiais. A Figura 3.1 (a) e (b) mostram diversos modelos ensaiados para seleção da forma mais apropriada para a cuba de tratamento do sistema. Optou-se, portanto, pela forma piramidal pela capacidade de gerar ondas bolhas de ar.



(a) **(b)**

Figura 3.1 Conjunto de formas geométricas ensaiadas para verificação da intensidade de perturbação da interface líquida.

Para verificação do comportamento do líquido em vibração, elementos geométricos foram construídos e montados na mesa vibratória. Em seguida, abastecidos d'água ao nível máximo de forma a evitar transbordamento, devidamente fixados com grampo mecânico. Foram utilizadas freqüências de excitação de 14 Hz, 33 Hz e 47 Hz tomando-se por base resultados apresentados na literatura (Waghmare, 2008).

Construiu-se uma mesa vibratória universal. O caráter universal é a versatilidade de vibrar em três modos básicos distintos: horizontal e verticalmente, e em torcedura. Na Figura 3.2, se vê à fonte de tensão e a mesa em fase inicial de construção. Através da Figura 3.2 (a) mostra-se a mesa em estágio de construção com motor posicionado para vibrar à torcedura; a Figura 3.2 (b) mostra a mesa com grãos de areia e o motor posicionado para promover vibração vertical.

(a) **(b)**

Figura 3.2 Imagens do sistema em construção e a fonte controladora de tensão: a) Mesa vibratória à torção; b) Mesa vibratória ao linear vertical.

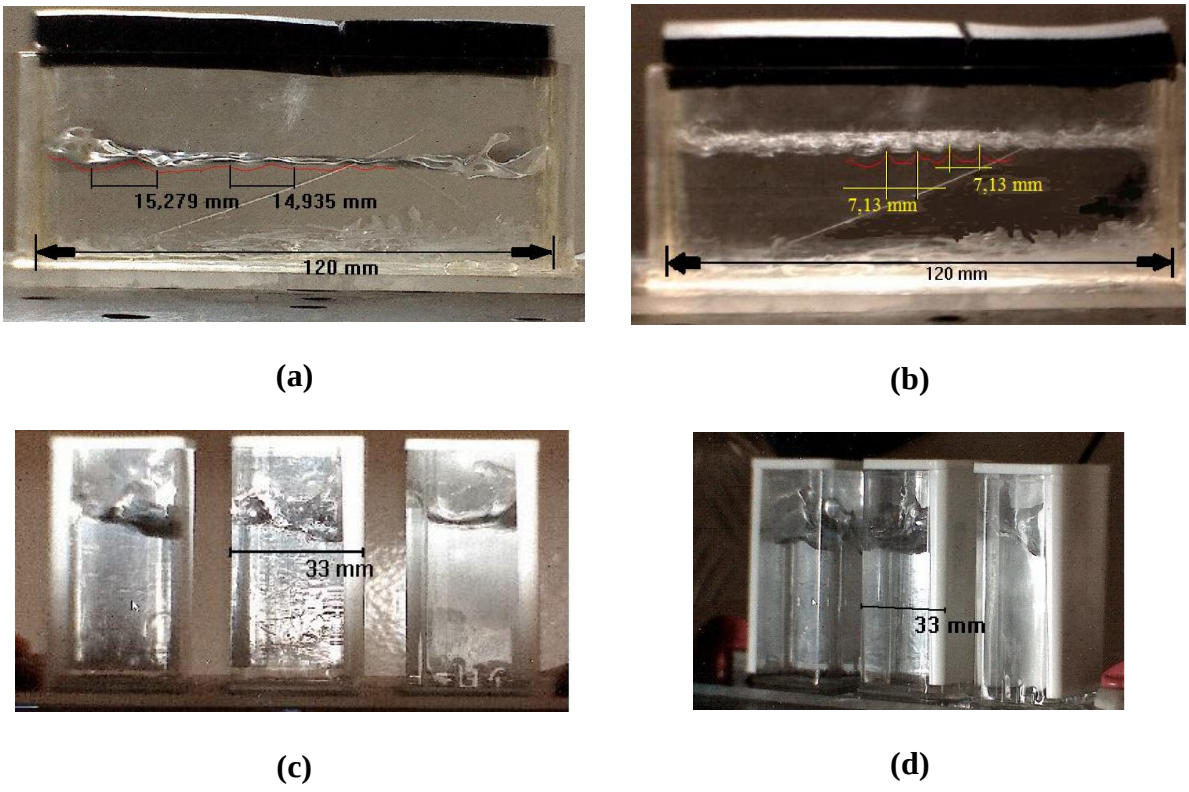
Através das figuras, Figura 3.3 (a) e (b) e Figura 3.4, de (a) a (f) mostram-se imagens do exame de vibração de fluído em cascas de distintas geometrias e a influência da forma no comportamento do fluído em vibração, respectivamente.

(a) **(b)**

Figura 3.3 Ensaio do comportamento fluídico quanto à forma geométrica: a) Cúbica em distintas alturas; b) Tronco-cônica e piramidal.

As figuras, Figura 3.4 de (a) a (f), mostram comportamentos distintos do fluído a freqüências de 14 Hz (Figura 3.4 (a), (c) e (d)) e 47 Hz (Figura 3.4 (b)). Particularmente (Figura 3.4 (b)), observa-se que o comprimento de onda (λ) é pequeno se comparado à dimensão horizontal do reservatório (L = 120 mm).

A menor tendência à desestabilização se deve à pequena amplitude de vibração ($X_0 \approx$ 0,55 mm). Observa-se que a dimensão do reservatório é comparativamente maior que o comprimento de onda formado tomando-se por base reservatórios mostrados através das figuras, Figura (c) e (d). Vê-se (L = 33 mm), e comprimentos médios de onda, (λ = 15 mm). Nota-se que a amplitude de vibração imposta é dominante por determinar o comprimento de onda gerado. Neste sentido, reservatórios de dimensão industrial certamente apresentarão maior dificuldade de gerar ondas elevadas e a extrapolação de dimensões à escala industrial requererá pesquisa mais aprofundada. É necessário investigar que comprimento máximo do reservatório limitaria ou esgotaria o desempenho da técnica.



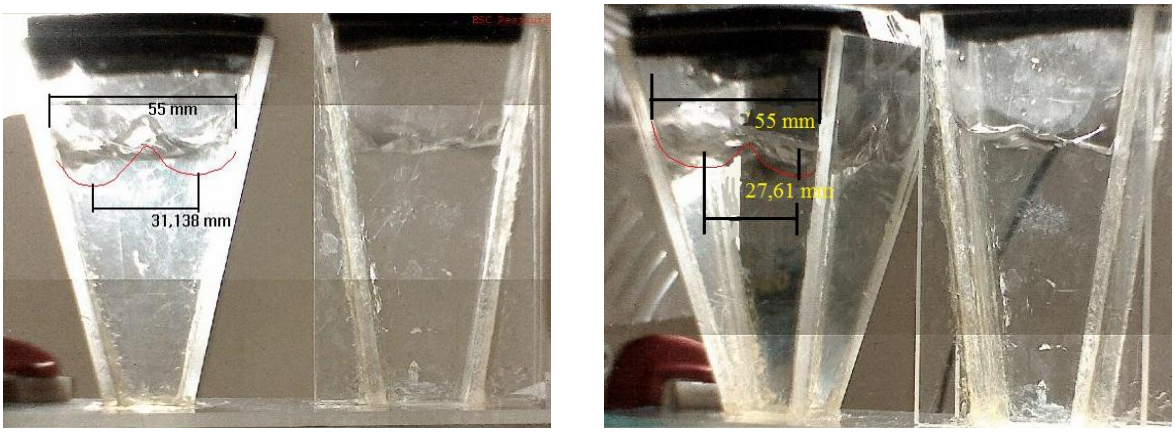
(a) **(b)**

(c) **(d)**

Figura 3.4 Ensaio de vibração sobre fluído acondicionado em formas prismáticas: a) e b) Prisma de base retangular; c) e d) Prisma de base quadrada.

As figuras, Figura 3.5 (a) e (b), mostram ensaios de vibração em fluído acondicionado em prismas inveridos de base quadrada e retangular. O prisma de seção retangular contém um par de faces paralelas medindo 15 mm por 75 mm de base maior; e 15 mm por 33 mm de base menor. O prisma de seção quadrada mede 33 mm por 33 mm de base e ambos medem 80 mm de altura.

A imagem do prisma à esquerda (Figura 3.5 (a) e (b)), mostra onda relativamente altas formada com certa estabilidade; ao menos não quebravam em frequências na faixa de 14 Hz a 20 Hz. A inclinação divergente parece tornar menor a influência da perturbação, além de constituir difícil processo de fabricação, sobretudo, no que tange resistência mecânica. A onda central estabilizada não propiciou efeito de autoflotação nas condições empregadas, que requer violenta quebra para dissolução de ar aprisionado na cavidade ou rim da onda. Este motivo, associado à dififculdade de construção, parece inviabilizar a utilização destes formatos.



(a) **(b)**

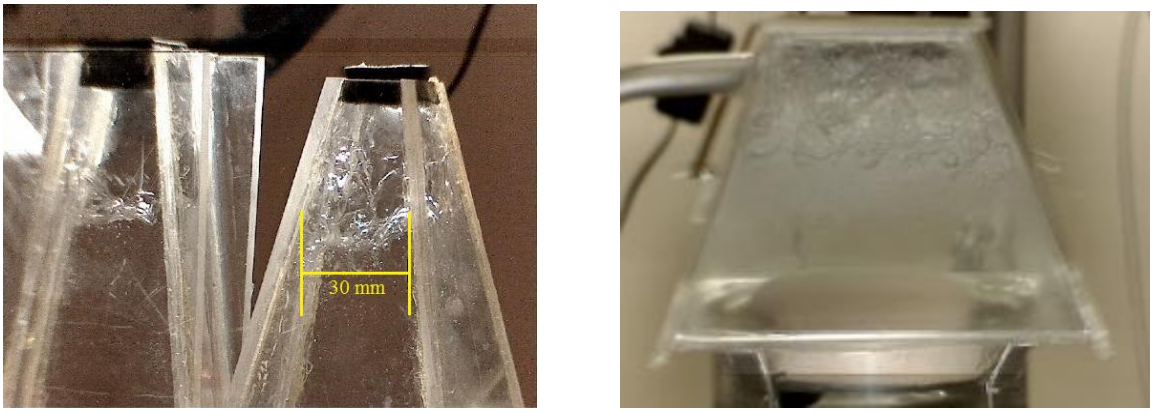
Figura 3.5 Ensaio com duas classes de prismas piramidais invertidos de faces divergentes, e com duas faces paralelas: a) Vista frontal dos prismas invertidos, sendo o da direita de faces paralelas; b) Vista inclinada.

3.2.4 Considerações sobre configuração geométrica da cuba de tratamento e detalhes construtivos

Mostrou-se no tópico anterior que a geometria do reservatório ou cuba de tratamento do sistema pode influenciar o desempenho do processo a depender do nível de perturbação imposto. Não obrigatoriamente se pode afirmar que exista diferença considerável entre uma e outra uma vez que não se lhes ensaiou exaustivamente em todos os aspectos. Não obstante, formas piramidais e cúbicas demonstram serem mais adequadas, sobretudo, do ponto de vista construtivo, e por estarem menos sujeitas à reflexão direcionalmente variada que se verificam em seções circulares.

No tópico 2.5 discutiu-se ser a questão da interferência construtiva de ondas, essencial para aumento de amplitude e quebra da onda resultante. Uma comparação oportuna a esse respeito pode ser feita ao observar uma corda fortemente atada a uma coluna, sem liberdade de movimento vertical devido à forte atadura, e outra que pode movimentar-se verticalmente por estar com a atadura folgada. Ao imprimir perturbação à extremidade livre da corda, a forte atadura propiciará interferência destrutiva e atadura folgada, interferência construtiva (Vide Figura 2.29). Efeito similar correspondente à reflexão de ondas com atadura folgada é produzido pela inclinação da parede da pirâmide, resultando interferência construtiva. Portanto, a configuração projetada para a cuba de tratamento, obtida com base na Figura 3.6 (a) é mostrada na Figura 3.6 (b). Testes mostram ocorrência de difusão de pequenas bolhas de ar em fluxo, sobretudo em contra-corrente, e propagação caótica de ondas.

Embora invisíveis na imagem à direita, nervuras longitudinais no sentido da força de excitação foram implantadas (Figura 3.7 (b)) para dirigir a propagação da onda e promover impedância à sub-harmônicas laterais que interferem destrutivamente (Figura 2.28, item 2.5 Cap. 2). Na Figura 3.6 (a) mostram-se prismas de base quadrada, de faces concorrentes e de faces paralelas, ensaiados a 14 Hz.



(a) **(b)**

Figura 3.6 Imagem do ensaio de prismas de base direta e cuba construída para prover interferência construtiva: a) Prismas de base direta medindo 20 mm por 20 mm de base menor e 80 mm por 80 mm de base maior; b) Ensaio da cuba de tratamento a 47 Hz.

O modelo mostrado através das imagens da Figura 3.7 (a) e (b) foi finalmente foi concebido e construído para operação em fluxo contínuo. Outros modelos foram construídos dos quais dois para fluxo em batelada e um prismático, de seção quadrada, para fluxo contínuo.

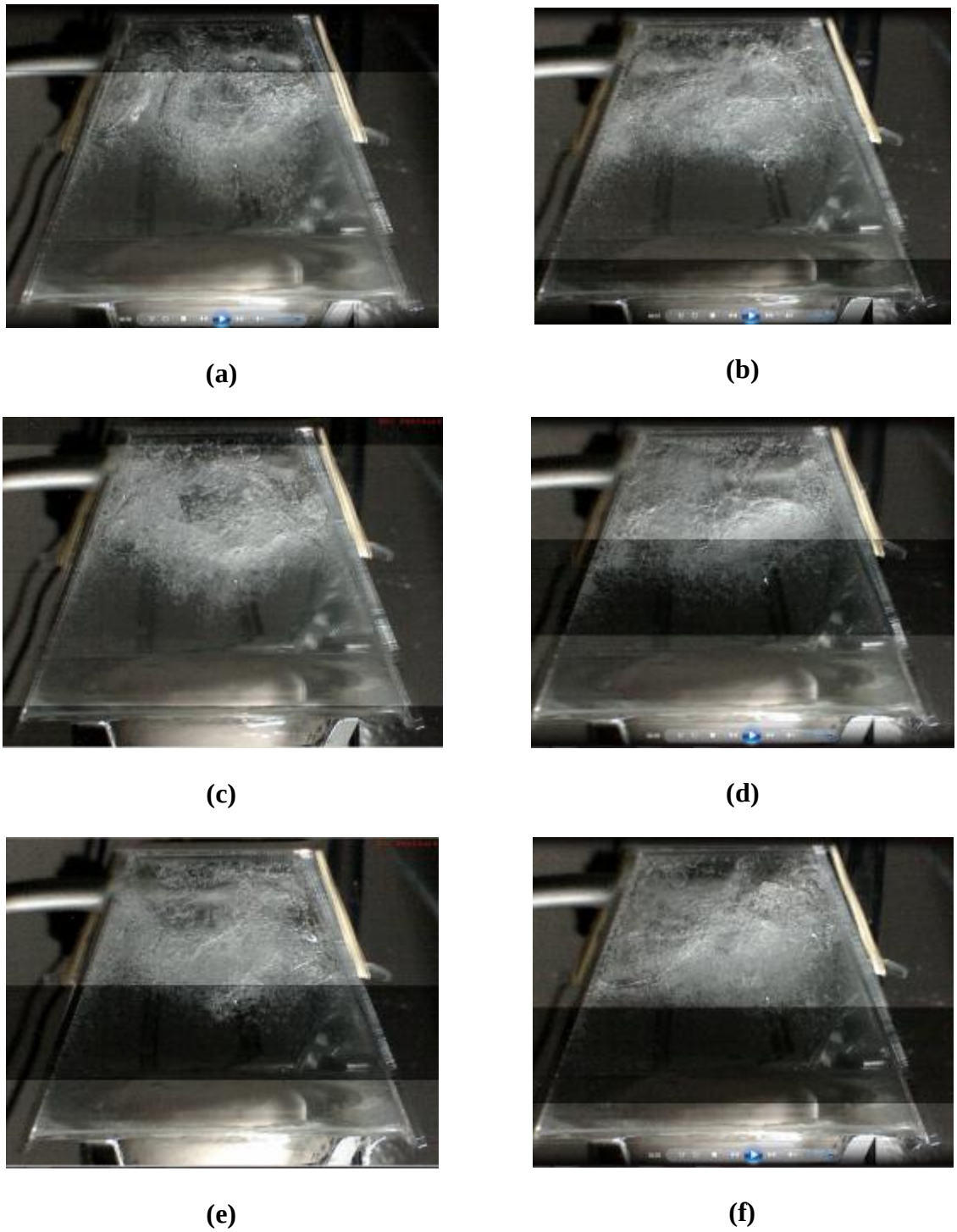
Esse último se pode ver através da Figura 3.1 (b) à esquerda. O relativamente grande volume (870 mℓ), se comparado ao volume da cuba piramidal (ETV_6) mostrada através da Figura 3.7 (a) e (b), de 370 mℓ, apresentou problemas em decorrência da inércia e resistência mecânica. Isto impediu ensaio exaustivo dessa unidade, sobretudo, por questão de segurança de elementos eletrônicos satélites que poderiam ser atingidos caso houvesse colapso do reservatório. Testes realizados deram bons resultados no que respeita à geração de bolhas de ar.

(a) **(b)**

Figura 3.7 Cuba para fluxo contínuo, projetada e utilizada neste trabalho: a) Destaque para tomadas de alimentação e descarga; b) Destaque para a tampa com revestimento metálico e manga central de flotação (ETV_{10}). Este elemento é objeto de reivindicação de patente (Proc. BR PI 10 2013 024672 7).

Finalmente foram realizados testes com a cuba piramidal operando a 14 Hz. Imagens sequenciais, mostradas através das figuras, Figura 3.8 (a), (b), (c), (d), (e) e (f), foram captadas com auxílio de estroboscópio (ETM_{17}) por um microscópio digital (ETM_{15}) em interface com o *software* (Image-Pró Plus 6.0). As figuras, Figura 3.9 (a), (b), (c), (d), (e) e (f), mostram o fenômeno esquematicamente. Pode-se observar através da ilustração esquemática da Figura 3.9, formação de onda subsequente após dois ciclos da cuba. Parece concordar com o que *sir* Michel Faraday reportara de pesquisas (Faraday (1831)), e Goodridge; Hentschel; Lathrop (1999). Ivanova; Kozlov; Evesque (2001) contestam ao afirmarem sobre oscilações de

contêiner e fluído serem síncronas. Provavelmente ocorram a frequências mais altas. Imagens da Figura 3.8 não confimam. É uma importante discussão para o cálculo médio da velocidade de oscilação da interface, relacionada com choque interpartícula e com o labirinto adsorvente.



(a) **(b)**

(c) **(d)**

(e) **(f)**

Figura 3.8 Seqüência de elevação e quebra de onda (14 Hz); (a), (b), (c), (d), (e) e (f).

Uma versão relativa desse modelo global de fluxo constitui admitir o labirinto adsorvente mover-se no fluído com a velocidade do contêiner, si se tomar a velocidade de movimento do efluente determinada unicamente pela vazão. Eis o processo de forma esquemática:

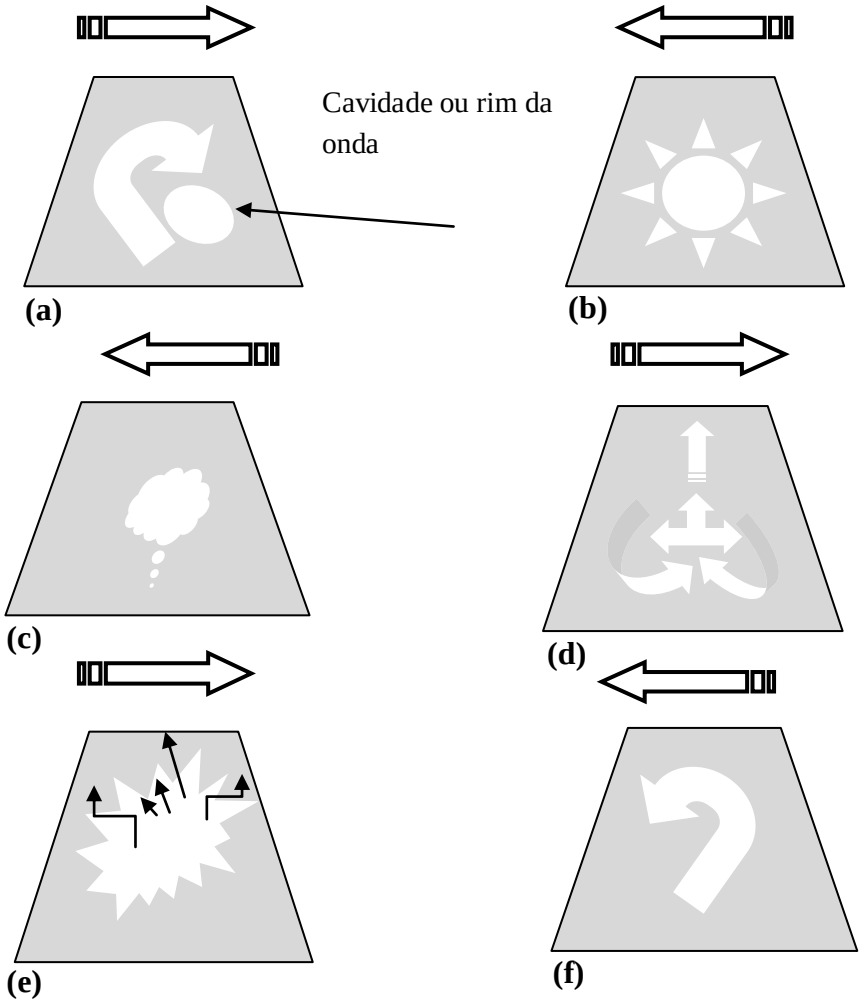


Figura 3.9 Ilustração esquemática e explicativa da seqüência de imagens da Figura 3.8: (a) Interferência construtiva, elevação da onda e formação da cavidade; (b) Desestabilização e quebra; (c) Elevação de pressão, implosão e ruptura de bolhas de ar; (d) Eclosão de bolhas e formação de jato (Jato de Worthinton[a,b], 2013); (e) Eclosão e formação de aerossol; (f) Elevação de nova onda.

Por fim, ainda no contexto discutido sobre a relação entre excitação externa e comportamento fluídico, Puthenveettil & Hopfinger (2009) reportam que ondas de Faraday, em excitação vertical (paramétricas) ou horizontal (síncronas), regem-se por leis semelhantes do ponto de vista da quebra e ejeção de gotas da crista. A frequência de transição do domínio de

quebra, gravitacional (*smoothing*) para capilar (*ripple*), para fluído de baixa viscosidade como água, por exemplo, obedece a relação, $\omega_{to} < \omega < 3{,}5\omega_{to,}$ onde (ω_{to}) é a frequência de transição da onda e ω a frequência de excitação. Tratando-se d'água, valores giram em torno de 5,8 Hz e 20,3 Hz e a quebra ocorre a aceleração 35% menor em vibração horizontal. Os autores utilizaram a relação de dispersão dada na Tabela 2.3, para águas profundas.

3.2.5 Concepção do sistema vibracional de tratamento

Finalmente, com base em ensaios descritos anteriormente e no exame da literatura científica sobre tratamento de efluentes oleaginosos de aplicação corrente, procurou-se elaborar um sistema eletromecânico de caráter inovador. Se lhe dotou de dispositivos de controle e monitoramento adequados à análise de desempenho em seu primeiro estágio de investigação.

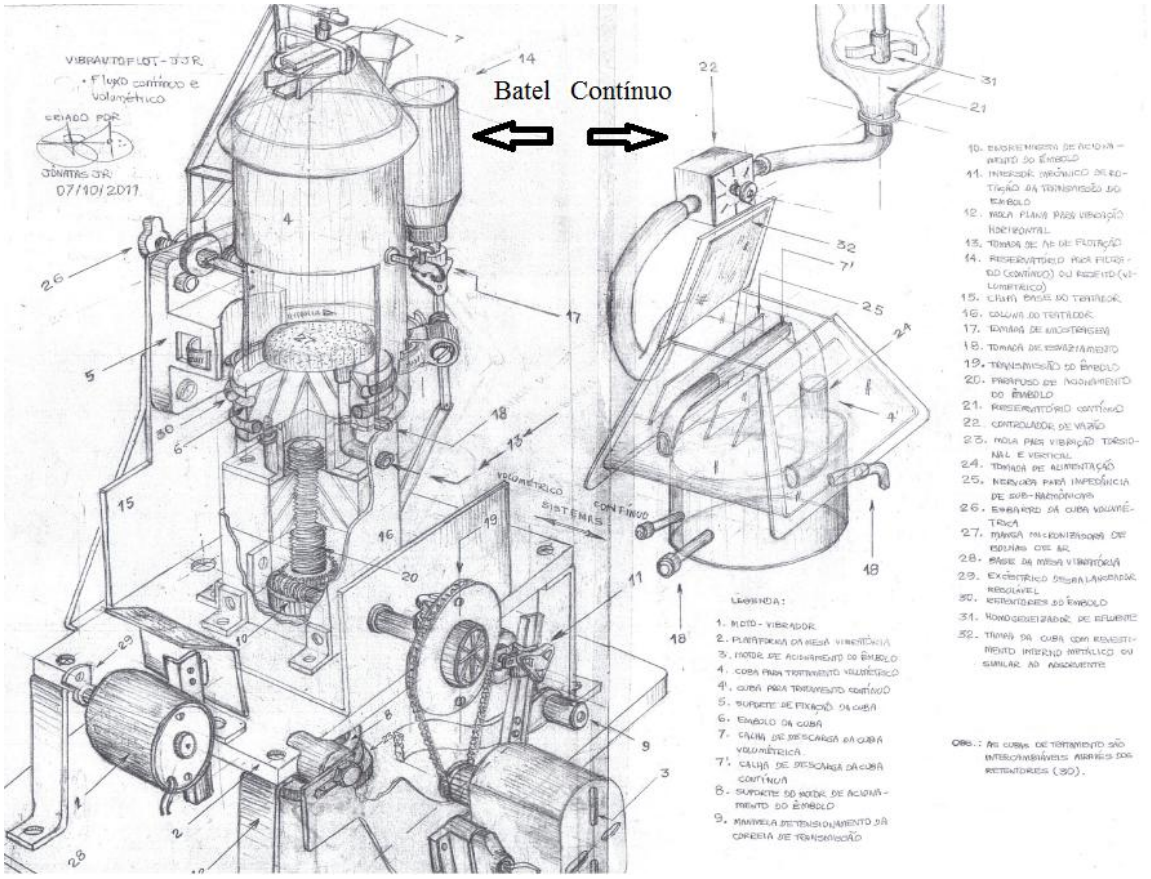


Figura 3.10 Esboço conceptivo do sistema vibratório de tratamento à mão-livre onde são mostradas cubas de tratamento contínuo, à direita, e em batel, montada à esquerda.

A Figura 3.10 é o esboço mecânico do sistema, à mão-livre, realizado para construção de forma planejada. Projetos mecânicos naturalmente sofrem alterações no curso da construção devido a imprevisto e descobertas que surgem no contexto tecnológico. Basicamente elaboraram-se duas modalidades de sistemas elásticos: uma para tratamento contínuo, e outra para tratamento em batéis (batelada) mostrados respectivamante, através da Figura 3.11 e Figura 3.12. Por questões já mencionadas não se utilizou o sistema a batelada.

Construiu-se também um modelo alternativo de transmissão e suspensão de forma a permitir realizar varredura livre em frequência e amplitude para avaliação de desempenho. O sistema com tais cracterísticas independe de elasticidade intrínseca. Entende-se por natureza elástica, isto é, - sobre molas -, o conjunto de característica geométrica e elástica pré-definidor do comportamento dinâmico perante excitações externas. O modelo alternativo mostrado através da Figura 3.13 apresenta transmissão à biela e suspensão articulada inelástica, - rígida -, ademais de se aplicar a ambas as técnicas, a batelada ou contínua.

A versão articulada não parece industrialmente adequada, sobretudo em aplicações de carga elevada, por inércia e esforços decorrentes. O sistema elástico, se entende ser de maior aplicabilidade industrial (Spivakovski & Dyachkov (1985), Blekhman (1988), Blekhman & Vaisberg (2007) e Abreu (2007)). Não obstante, no plano de escala laboratorial, é imprescidível, do ponto de vista analítico, pela eficácia na geração de informações que municiam o projeto e identificação de parâmetros de tratamento vibratório, essenciais à contrução do sistema elástico. O sistema articulado também não foi utilizado por questões citadas. Se lhe limitou à medição de consumo energético como parte do método de busca por um sistema adequado. Ensaios mostraram o consumo energético do sistema articulado, nas condições empregadas. A amperagem, percentualmente, aumentou 700% em média, consequentemente o consumo.

Adicionalmente cabe ressaltar, que a variante do sistema com transmissão articulada, em sua forma construtiva neste estudo, aplica-se unicamente à vibração horizontal. O sistema elástico *per si* tem caráter mais amplo porque é aplicável a três modos de vibração.

Sistemas elásticos, a exemplo do que se mostra através da Figura 3.11 e Figura 3.12, vibra devido ao desbalanceamento rotativo do motor de propulsão. A demanda de potência se deve unicamente à rotação imposta ao rotor desbalanceado sendo, portanto, o motivo do baixo consumo energético. Os sistemas, Figura 3.12 e Figura 3.13, adiante, não foram utilizados no trabalho em face do tempo e análises químicas requeridas para avaliação de desempenho e já se fez referência. Foram apresentados, no entanto, a título de apoio didático e perspectiva para a próxima fase de investigação, no desenvolver da pesquisa.

Sobre o sistema a batelada (Figura 3.12) se pode assentar considerações de utilidade técnica. Sistema a batel requer área e tempo adicional de tratamento para ascensão de gotículas de óleo disperso, se comparado aos contínuos. O sistema API tratado no item 2.2.4.1., limita-se à separação de gotas maiores de 150 μm (da Rosa (2002) e da Silva *et al*., (2007)) e

Figura 3.11 Sistema elástico vibratório de tratamento contínuo. Sistema e processo é objeto de reivindicação de patente (Proc. BR PI 10 2013 024672 7).

Figura 3.12 Sistema elástico vibratório de tratamento a batelada. Sistema e processo é objeto de reivindicação de patente (Proc. BR PI 10 2012 023580 3).

trabalham com elevado tempo de retenção, não menos de 4,0 minutos (Thomas, 2004), para ascensão de gotas, em geral, óleo livre. Grandes volumes requererão grande área e relativamente alto tempo de retenção.

Particularmente, o objetivo do sistema em estudo (Figura 3.11) é prescindir utilização de flotação induzida a gás ou ar comprimido, a partir de flotação natural. Flotação, dentre muitas funções, contribui para diminuir o tempo de elevação de gotas de óleo. Operando-se com o sistema a batéis, ter-se-ia de dispensar tempo de retenção para ascensão completa de gotas e, a princípio, poderia inviabilizar a utilização prática. A lógica solução envolveria redução de altura da cuba. Segundo (Lakisa, 2005), pode-se provocar intensa convecção fluídica de bolhas de ar por efeito vibratório. Isto pressupõe gerar flotação de alguma forma.

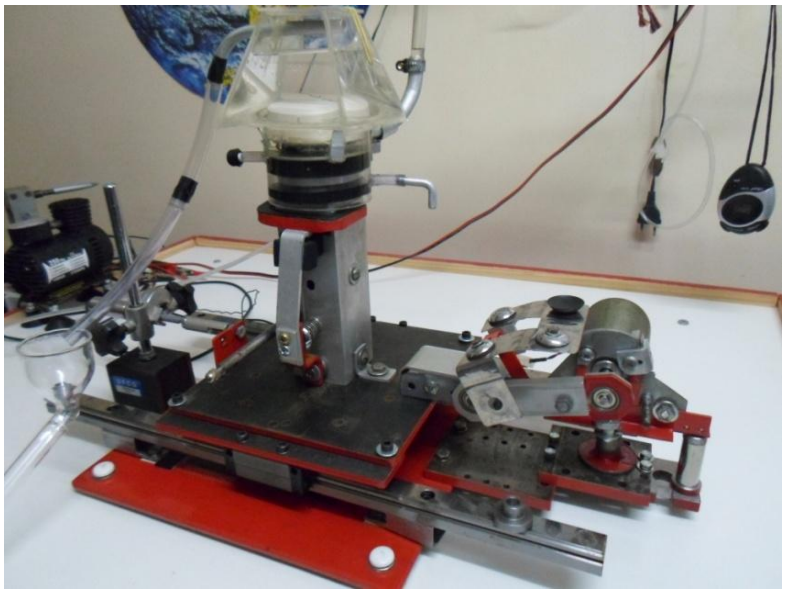


Figura 3.13 Sistema vibratório rígido articulado de tratamento contínuo, objeto de reivindicação de patente (Proc. BR PI 10 2013 024672 7).

Como se vê são diversos fatores tecnológicos que influenciaram a concepção do sistema em estudo e versões alternativas. Particularidade inerente ao processo vibratório e fluidodinâmico foi considerada através da teoria linear de ondas e conceito de domínio distintivo, águas rasas *versus* águas profundas, regra importante do estudo. Considerações sobre interferência de ondas foram resumidamente apresentadas no embasamento teórico do trabalho (Ítem 2.5 Cap. 2). A princípio, ao reduzir a altura da cuba (Propagação em águas rasas) se distancia o regime de propagação de ondas do conceito de meio infinitamente profundo e vice-versa.

Outras implicações advéem deste conceito. O meio de propagação assume, portanto, caráter não dispersivo. A velocidade de fase da onda é igual à velocidade de grupo (Vide item 2.5.1), e mais facilmente determina a quebra de onda, a depender da amplitude de vibração. Ainda sobre redução da altura da cuba, menor altura requer maior área horizontal e, para grandes volumes, representa um inconveniente em operações *off-shore*.

O sistema a batéis pode apresentar vantagem, superado problemas de área. O fluxo depende de características de carregamento e descarga, e o tempo de retenção, teoricamente, não difere em grande maneira se comparado ao sistema contínuo, por depender unicamente da vazão e da velocidade de ascensão de gotas de óleo. Isto demonstra quão extensa é esta linha de pesquisa e isto, em parte, justifica a remissão a trabalhos futuros.

Com essa percepção e, sobretudo, diligência em investigar exaustivamente, se construiu um sistema para operar de dois modos, através do mecanismo interno da coluna princi-

pal (ETV_5) que suporta a cuba, mostrado através da Figura (3.14) e Figura (3.15). Dotou-se a coluna de motorização (ETV_{14}) e transmissão a parafuso de potência, para deslocamento vertical do pistão. O mecanismo serve a cuba de fundo móvel para tratamento a batelada (Figura 3.15), expulsando o rejeito impregnado de óleo pela parte superior. O efluente tratado se recolhe à média altura da cuba.

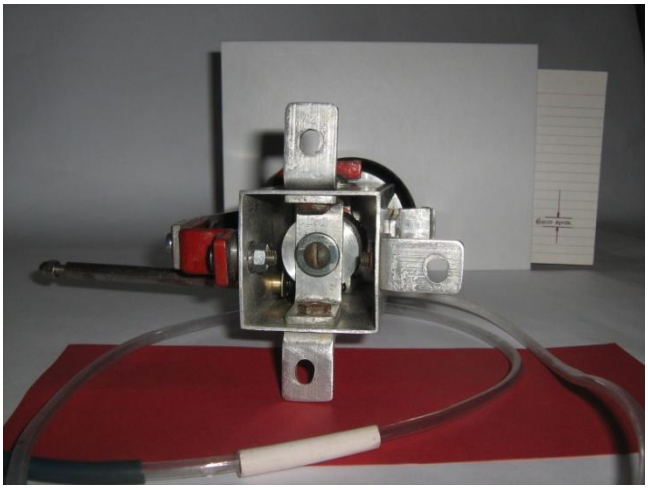


Figura 3.14 Vista do interior da coluna do sistema vibratório, tomada pela parte inferior, e detalhes do mecanismo interno de elevação.

Figura 3.15 Vista da coluna do sistema vibracional (Pistão, eixo de transmissão e anéis de segmento em borracha).

3.2.6 Considerações sobre o adsorvente, definição da unidade volumétrica que se refere por célula adsorvente e de parâmetros característicos

O adsorvente a ser empregado a princípio, deve reunir características que o insiram no contexto simples e inovador em que está inserido o sistema e, sobretudo, que se enquadre na política indissociavelmente ambiental de processos sustentáveis. Objetivamente deve apresentar boa resistência ao ataque químico e físico, boa resistência mecânica, rigidez suficiente, mas, que possa ser moldado e adquira forma geométrica firme, flexível e dúctil, facilmente lavável, recuperável, longevo, de fácil obtenção no âmbito regional, durável e de relativamente baixo custo. Muito rejeito regional pode ser enquadrado ou cumprir parte desses requisitos, principalmente por ser rejeito ou descarte e todo reaproveitamento é ecologicamente benéfico.

Não obstante há de se separar absorventes e adsorventes, impermeáveis e porosos. Quando o adsorbato, ou absorbato, é oleofílico, o quadro de vantagem e desvantagem reveste-

se de específico caráter no que tange o rejeito. Outros problemas podem surgir como incrustação de elementos potencialmente poluentes como petróleo e derivados, o destino a ser dado ao rejeito impregnado, além, obviamente, de problemas inerentes a custo adicional.

Há muito se tem estudado sobre rejeitos urbanos e industriais e forma de reaproveitá-los em processo de limpeza. São exemplos: Rejeito de caulim, borracha natural e sintética, principalmente de pneumáticos veiculares, apara de papel, resto de sisal, fibra de casca de coco, reaspa e serragem, retalho de couro, raspa de PVC (cloreto de polivinil), diversos materiais orgânicos extraídos de rios e mares como a superabundante planta aquática, *Eichhornia crassipes*, vulgo a baronesa gigoga, semente de Moringa oleífera Lam, etc.. Para ter-se uma ideia do potencial residuário do Brasil, há uma década, só em Belém do Pará eram produzidas 500 toneladas/ano de raspa e serragem de madeira, ao baixo custo, US \$2,0/m^3. Outras informações podem ser vistas na bibliografia recomendada, mais precisamente sobre rejeito de caulim (Benvindo da Luz *et al*., (2005), Harif (2006) e Wan Sulaiman; Park; Lee (2012)); papel (Mattos *et al*., 2006); borracha (Pagliuso *et al*., 2004); serragem e raspa de madeira (Hoadley (2000), Rodrigues *et al*., (2002), Lu & Wu (2005) e Soares et al., (2011)); fibra de coco e sisal (Kapulskis; de Jesus; Mei, 2005); baronesa gigoga (Mendonça; Ferreira; Sobrinho, 2013) e moringa oleífera (Nishi, 2011).

Selecionou-se para o sistema em apreço, como elemento adsorvente integrante do conjunto, esponja espiral metálica *Scoth Brite* (ETV_9) em aço inoxidável (ASTM 316), de uso doméstico. O custo do elemento por miúdo é US \$0,084/g e são utilizados em média 11g por tratamento. A quantidade foi determinada segundo o conceito, célula adsorvente, isto é, espaço físico superior da cuba acima das nervuras (Figura 3.7 (b)). Preenche-se o espaço com 11g de adsorvente firmemente posicionado e relativamente comprimido.

No tratamento em flotação natural (*Vibrauto-flot*: Processo de Registro de Marca de Produto Mista, N° 907094856) utiliza-se a metade em massa de adsorvente (Figura 3.17) a seguir, para restar espaço livre de forma a permitir entrada de ar necessário à flotação natural. Assim se evita bloqueio provocado por mistura de bolhas de ar e efluente com o labirinto adsorvente permeio. A tensão interfacial ar/efluente é forte o bastante para bloquear o acesso de ar por elevação do nível de efluente até o teto ou tampa da cuba. Este mecanismo é útil em ensaio de vibração sem flotação e vibração com flotação induzida. É uma forma de evitar flotação natural (*Vibra-flot*).

A Figura 3.16 a seguir, mostra o adsorvente inteiriço em detalhe; a Figura 3.17, em bipartição no padrão de ensaio. Para tecnicamente especificar o elemento adsorvente de pro-

va, se realizou pesagens em duplicata de cada elemento do par adsorvente (Figura 17), conforme Apêndice, Tabela 1, individualmente, para cada ensaio a ser realizado, e se denominou, massa do elemento antes do ensaio. Para determinação da área superficial específica (Figura 3.19, e página a seguir, Figura 3.20 e Figura 3.21), realizou-se exame microscópico com auxílo de um Olympus (ETM_{16}).

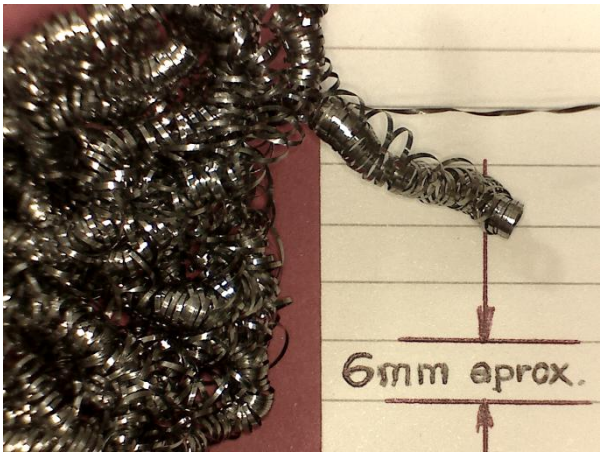


Figura 3.16 Imagem do adsorvente espiral metálico.

Figura 3.17 Imagem do adsorvente padronizado em duas unidades de 5,5 g médios.

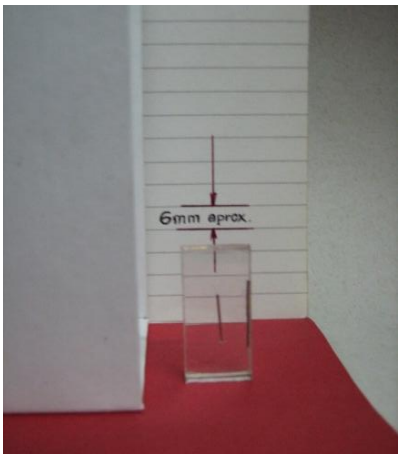


Figura 3.18 Embutidura do adsorvente em acrílico para exame microscópico.

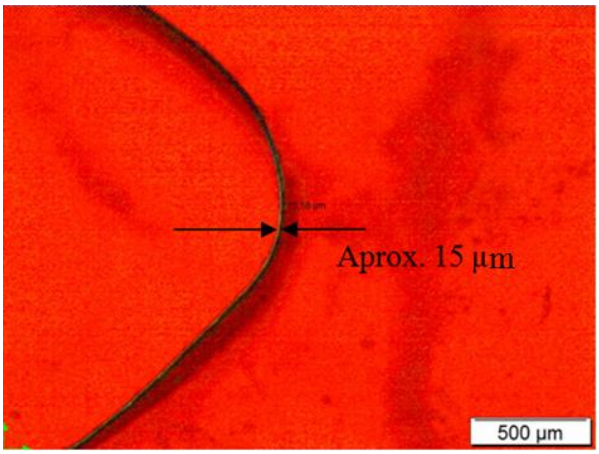


Figura 3.19 Microscopia de aferição da espessura com embutidura em cera.

Realizou-se micrografia para se estimar a área específica média de adsorvente espiral que se disponibiliza ao processo de choque e adsorção. As figuras, Figura 3.18, Figura 3.19, na página anterior, exibem amostras extraídas de adsorvente, embutidas em acrílico e cera pa-

ra aferição da largura e espessura. As figuras, Figura 3.20 e Figura 3.21, mostram, respectivamente, largura e espessura aproximadas para estimação da área superficial específica.

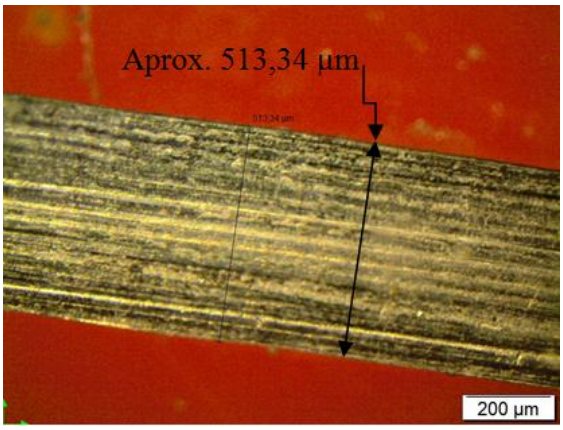


Figura 3.20 Microscopia de aferição da largura do adsorvente com embutidura em acrílico.

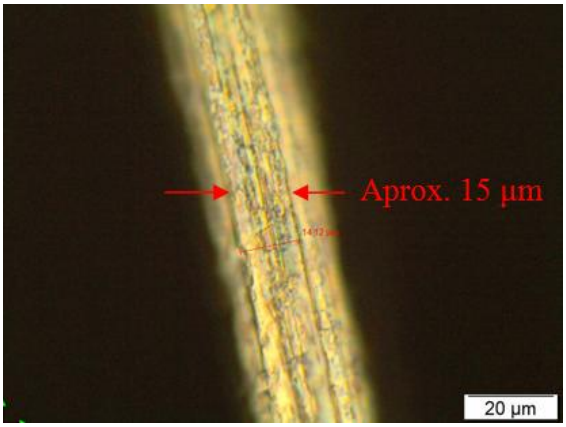


Figura 3.21 Microscopia de aferição da espessura do adsorvente com embutidura em acrílico.

A área específica foi calculada a partir do somatório da área frontal, posterior, laterais, superior e inferior tomando-se a amostra por um tetraedro retangular de altura ($H \approx 513$ µm), profundidade ($esp \approx 15$ µm), e comprimento expresso em função do volume estimado, através da massa obtida por pesagem em balança de quatro casas decimais (ETM_{14}) e massa específica do aço ($\rho_{aço} = 7{,}85$ kg/ℓ). A expressão resultante com, $V = M_{ads}/\rho_{aço}$. é:

$$A_e = 2/M_{ads}(V/esp + V/H + esp.H) \quad (46)$$

Portanto a área específica estimada para o adsorvente é, ($A_e = 15{,}056$ m^2/kg).

Como dito anteriormente, observando-se a Figura 3.7 (b), a porção geométrica superior da cuba de tratamento compreendida entre a tampa e nervuras longitudinais, quando preenchida com o adsorvente metálico, recebe o nome, célula adsorvente. Esta unidade, definida dessa forma, precisa ser especificada em termos de parâmetros geométricos auxiliares, de suma importância para a caracterização técnica do equipamento e avaliação de desempenho.

As figuras, Figura 3.22 e Figura 3.23, apresentam o desenho técnico dimensional da cuba de tratamento, acrescido da ilustração do nível de efluente teórico operacional. A área horizontal defini-se como plano-médio adsorvente.

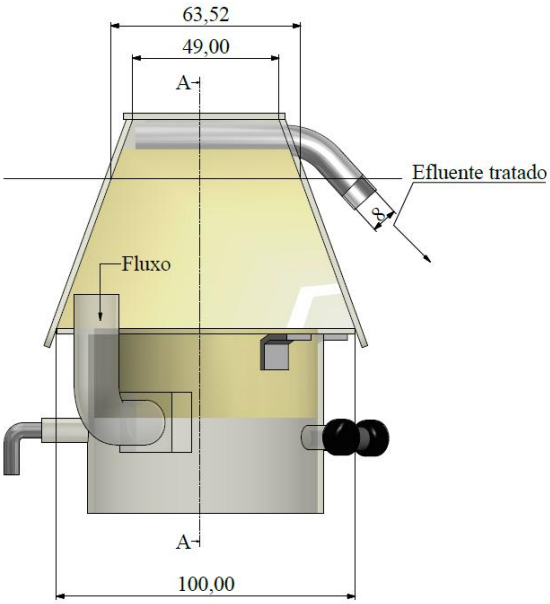


Figura 3.22 Desenho técnico mecânico da cuba de tratamento vibratório em vista lateral completa.

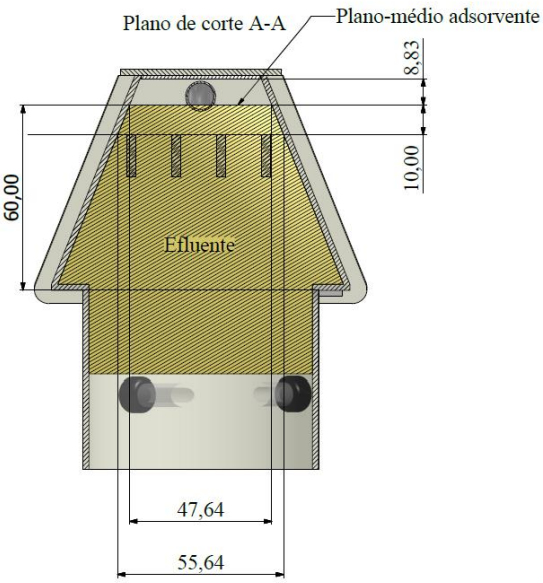


Figura 3.23 Desenho técnico mecânico da cuba de tratamento vibratório em corte no plano A-A da Figura 3.22.

Figura 3.24 Desenho computacional ilustrativo da cuba de tratamento vibratório plena de efluente com destaque para o nível teórico operacional de fluído.

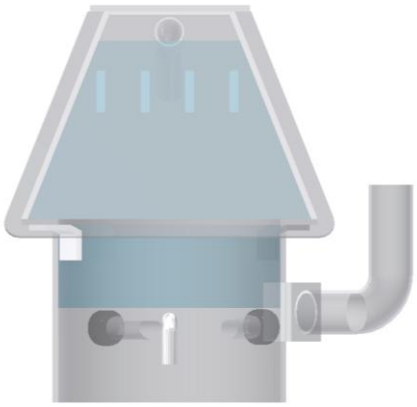


Figura 3.25 Desenho computacional da cuba de tratamento vibratório em corte vertical (Norma técnica: Figura 3.22 e Figura 3.23).

A utilização da expressão “nível teórico operacional” na página anterior, refere-se ao nível máximo atingido, a partir do qual o fluido escoa pelo ducto de descarga de efluente tratado, visto no alto e ao centro das figuras, Figura 3.23 e Figura 3.24. Em processamento, por

motivos discutidos anteriormente, o plano teórico médio-adsorvente perde sentido operacional quando a cuba é totalmente invadida por efluente, exceto em processo a flotação natural.

O valor calculado do plano-médio adsorvente, descontada a área do tubo de descarga de efluente tratado é, (A_{ads} = 0,0026 m^2). O volume em vazio da célula adsorvente pode ser calculado mediante geometria espacial elementar considerando o volume de um tronco de pirâmide cujas medidas encontram-se na figura, Figura 3.22 e Figura 3.23. O volume de um tronco de pirâmide, considerando A_{BG} e A_{BP} como áreas da base maior e menor, respectivamente, e H, altura do tronco, ter-se-á:

$$V_{TRP} = H\,(A_{BG} + A_{BP} + \sqrt{A_{BG}A_{BP}}\,) \tag{47}$$

De acordo com a fórmula (47) o volume do tronco de pirâmide é: (V_{TRP} = 52,26 mℓ). Como o tubo de descarga de efluente ocupa parte desse volume e possui volume de deslocamento (V = 3,93 mℓ), o volume líquido efetivo em vazio da célula adsorvente, descontado o volume do tubo de descarga, será: (V_{cel} = 48,33 mℓ).

Com base na massa específica de adsorvente metálico espiral ($\rho_{aço}$ = 7,85 kg/ℓ), e na massa média tomada como base para pares de unidades adsorventes, (M_{ads} = 11g), o volume deslocado por um par adsorvente pode ser medianamente estimado como sendo, (V_{ads} = 1,4 mℓ). Finalmente o vazio ou porosidade absoluta média estimada da célula adsorvente será: ($Por_{abs} = V_{cel} - V_{ads}$ = 48,33 mℓ - 1,4 mℓ) ou, (Por_{abs} = 46,93 mℓ), e a porosidade relativa, (Por_{rel} = 0,971 ou Por_{rel} (%) = 97,1 %).

Adsorventes comerciais clássicos como carvão ativado e sílica-gel, segundo Ruthven (1984), apresentam as seguintes propriedades físicas:

- Sílica-gel mesoporosa: Por_e = (0,43 – 1,15) mℓ/g; A_e = (340.000 – 800.000) m^2/kg; $\rho_{sílica}$ = (0,6 – 1) kg/ℓ;
- Carvão ativado micro, meso e macroporoso: Por_e = (0,02 – 0,95) mℓ/g; A_e = (500 – 1.000.000) m^2/kg; Por_{rel} (%) = (40 – 60)%, $\rho_{carvão}$ = (0,6 – 0,9) kg/ℓ, para não citar Zeolitas microporosas, (Por_e = 0,25 mℓ/g).

Observa-se que adsorventes clássicos apresentam muito maior área superficial. No entanto, a percolação, dificulta a recuperação do óleo ou pelo menos, a torna mais custosa e ineficiente, se comparada à simples lavagem de um elemento metálico impermeável.

A instalação do adsorvente na cuba para compor a célula de tratamento é mostrada através das figuras, Figura 3.26 e Figura 3.27. Ambas demonstram o processo de flotação natural a 14 Hz com metade da carga adsorvente (5,5g em média) e com a carga inteira de 11g, respectivamente, sendo que no segundo caso (Figura 3.27) foi estancado o fluxo ao nível um pouco abaixo do ducto de descarga para evitar bloqueio da entrada de ar. Imagens foram obtidas com estroboscópio (ETM_{17}), microscópio digital (ETM_{16}) e *software* para captura de imagem, a exemplo de imagens anteriores (Figura 3.8).

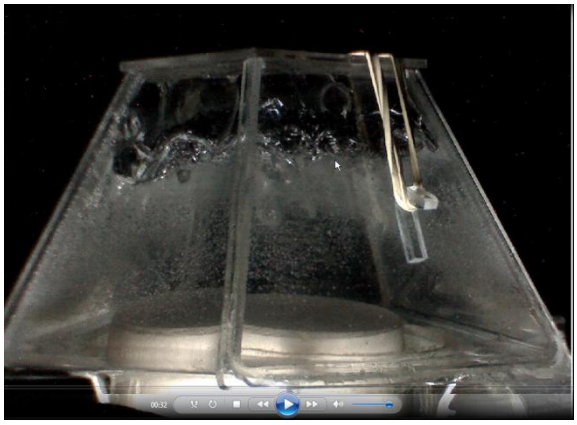


Figura 3.26 Imagem diagonal do sistema realizando *auto-flotação* a 14 Hz.

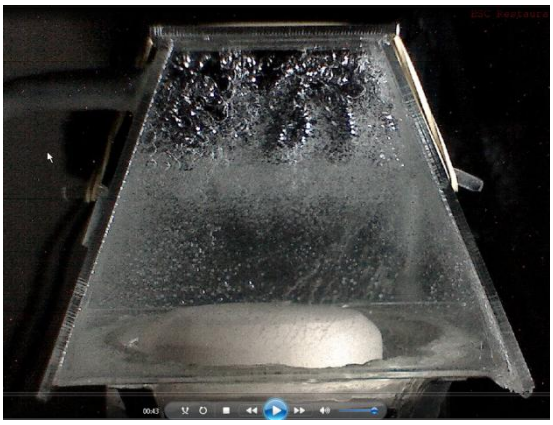


Figura 3.27 Imagem lateral do sistema realizando intensa *auto-flotação* a 33 Hz.

3.2.7 Considerações sobre velocidade de propagação de ondas e partículas

O processo *autoflotação*, como se dicutiu, é tanto melhor quanto maior a desestabilização da interface e consequente quebra de ondas. A intensidade de vibração, que se define como *criticalidade*, é parâmetro mais importante, do ponto de vista analítico, que amplitude ou frequência de vibração se tomados individualmente (Ivanova; Kozlov; Evesque (2001) e Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005)). Neste particular, interferência construtiva realiza papel importante no que respeita a altura da onda formada. Segundo Faraday (1831), LAMB (1932) e Oceanography II (2014) uma onda superficial perde a estabilidade e quebra-se, quando a altura atinge aproximadamente 14% do comprimento de onda (λ). Por outro lado, se não olvidar sub-harmônicas, que se propagam lateralmente como mostra a Figura 3.29.

Porter *et al.*, (2012) reportam que a suposição de propagação transversal de ondas paramétricas é falha, e dispõem sobre propagação inclinada. Maior rigor matemático na des-

crição de ondas superficiais moduladas, harmônica e sub-harmônica, em contêiner de seção quadrada, e força limite de disparo de sub-harmônicas laterais, são dados por Varas & Vega (2007).

As figuras, Figura 3.28 e Figura 3.29, mostram, respectivamente, imagem de interferência construtiva de ondas a 14 Hz, obtida com parâmetros característicos aferidos com software analisador de imagem, e vista superior de um contêiner quadrado em vibração horizontal a 70 Hz, com sub-harmônicas disparadas inclinadamente com relação à fonte de excitação. Por diligência científica, nervuras longitudinais instaladas (Figura 3.7 (b)) visam conter ação de sub-harmônicas ressonantes que dispersam o meio.

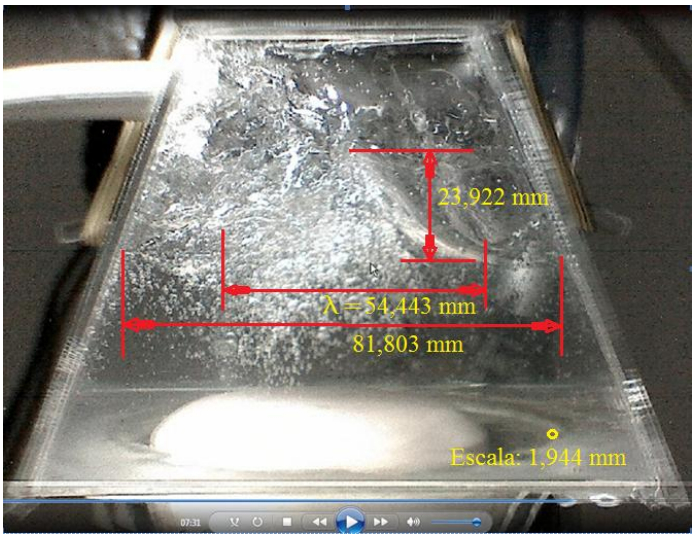


Figura 3.28 Onda resultante de interferência construtiva e parâmetros característicos: Comprimento de onda (λ ≈ 54 mm), amplitude pico-a-pico da interface (Y_0 = 23,92 mm) e comprimento local do contêiner (L = 81,80 mm). Abaixo, escala diametral para bolhas de ar (ϕ ≈ 1,94 mm).

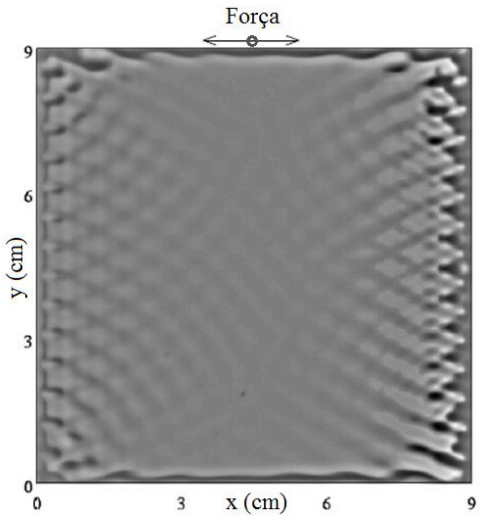
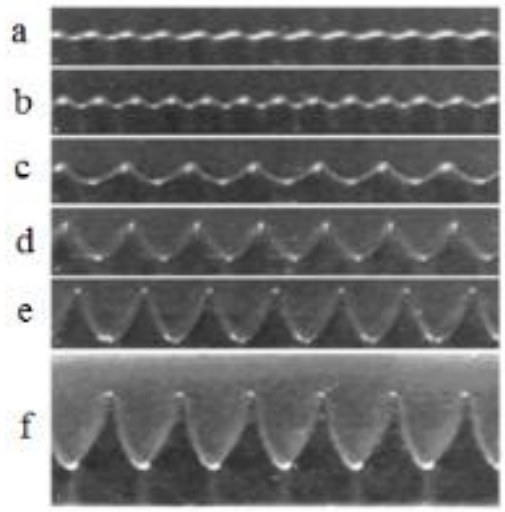


Figura 3.29 Vista superior de um contêiner quadrado em vibração horizontal a 70 Hz (90 x 90 mm x 50 mm de profundidade) e disparos de sub-harmônicas inclinadas. Volume de fluído ao nível máximo. (Extraída de: Porter *et al.*, 2012).

Bolhas de ar se formam e se lançam em contracorrente, ainda que à baixa frequência (Figura 3.28). A questão que se coloca é a propagação de ondas em meio ao adsorvente, na presença de obstáculos submersos. A velocidade do fluído, quebra de ondas e ejeção de bolhas e gotas, é vital em processos de troca fisicoquímica verificados à interface fluída (Puthenveettil & Hopfinger (2009)). A presença do adsorvente como elemento ou obstáculo sub-

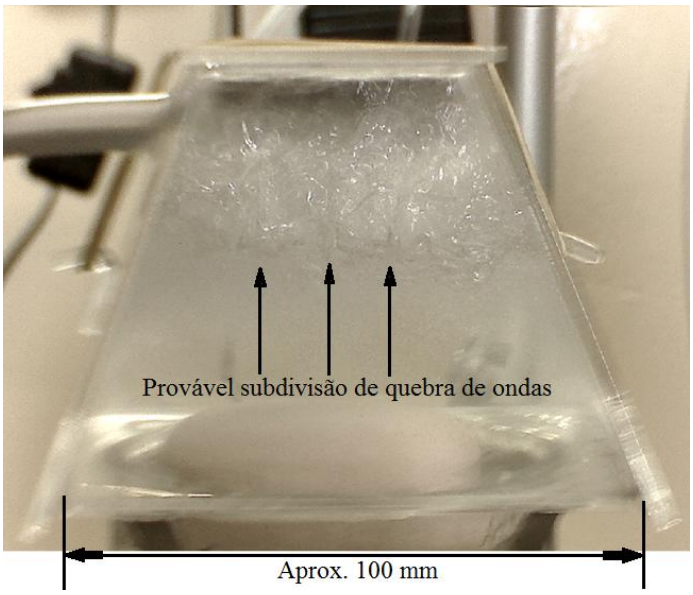
merso, segundo Acheson (1990), age no sentido de aumentar o comprimento de onda e, por decorrência, a velocidade de grupo (Figura 2.31, Capítulo 2, item 2.5.1).

Hassan *et al.*, (2006) estudaram o movimento de uma esfera suspensa em líquido vibrante a frequências sub e sobrerressoantes. Reportaram que arames de diâmetro abaixo de 150 μm não influenciaram consideravelmente o movimento da esfera. Dimensões do adsorvente são aproximadamente (15 μm x 500 μm). A estricção à passagem é cerca de 3%, demonstrado no item (3.2.6 Cap 3). A velocidade média assegura a manutenção da vazão (Fox & McDonald, 1988). Portanto, obstáculos submersos não parecem provocar alteração considerável que comprometam o desempenho.



(a)

(Extraída de: Ivanova; Kozlov; Evesque (2001))



(b)

Figura 3.30 Configuração de interfaces fluídica a várias combinações de amplitude (mm) e frequência (Hz) em ordem crescente de cima para baixo: a) (aa) 1,16/44,5; (ab) 1,16/46,7; (ac) 1,27/48,9; (ad) 1,4/54; (ae) 1,4/57,5; (af) 1,54/61,8. O fluído superior é óleo automotivo ($\rho_{óleo} \approx 0{,}85$ g/mℓ) e o inferior, óleo de baixa viscosidade e mais pesado que água (*Fluorinert* ou flúor-carbono $\rho = 1{,}87$ g/mℓ). Os dados foram obtidos em recipiente retangular (20 x 20 x 140 mm); b) Imagem da flotação natural a 33 Hz e marcas indicadoras de prováveis quebras sequenciais de ondas em processo vibratório.

A Figura 3.30 (a) mostra estabilidade de ondas de capilaridade verificada em sistema multifásico em vibração horizontal investigado por Ivanova; Kozlov; Evesque (2001). De ci-

ma abaixo ondas são apresentadas em ordem crescente de transferência de energia de vibração, representada por combinações de amplitude e frequência.

O congelamento serrilhado da interface na faixa de frequência de 40 a 60 Hz se deve à sobreposição do fluído menos denso, na camada superior, no caso a água, e à fricção entre eles devido à diferença de massa específica, por decorrência, de velocidades. A Figura 3.30 (b) mostra efeito similar onde o fluído superior é ar, a frequência muito mais baixa de 33 Hz e amplitude de 2,39 mm, acima da faixa limite de restauradoras forças de capilaridade. Marcas indicadas se podem denotar possível subdivisão ocasionada por quebras sucessivas de ondas.

Estabilidade permanente não se verifica nesses níveis de perturbação quando o sistema é ar sobre água, resultando perda total de estabilidade e implantação de estado caótico verificado no sistema em estudo. Foi dito anteriormente que a faixa de frequência de transição quando sistema é ar/água, é muito mais baixa (5,8 a 20,3 Hz) abaixo da qual, forças de restauração da interface são gravitacionais. A imagem exprime a formação de onda cuja quebra dar-se-á em níveis mais elevados de frequência excitação.

Em se tratando de onda superficial, como as que se observam no fenômeno das marés, quando a profundidade diminui abaixo da metade do comprimento da onda (águas rasas), forças de fricção entre onda e solo marinho são disparadas freando a frente da onda (Figura 2.26 e Figura 2.27, item 2.5, Cap 2). Isto ocorre no sentido diminuir-lhe o comprimento (λ), pela pressão hidrodinâmica a montante do grupo, e provocar a quebra por derramamento (*spilling*) ou por mergulho (*plunging*) com formação de tubo de ar. O efeito que se busca como mecanismo de flotação natural (*autoflotação*) neste trabalho, provoca-se por sucessiva quebra de ondas e abundante dissolução de ar contido nos tubos que se formam.

A análise de resultados obtidos, no que concerne à impregnação de óleo no elemento adsorvente metálico, pode requerer, em plano estatístico, o cálculo de velocidade provável dos elementos dispersos, gotículas de óleo, para diversas frequências de excitação. Em meio a um fluxo caótico, turbulento, sobretudo, verificado em labirinto percolador em aço inoxidável, o cálculo aproximado da velocidade do fluído, ou efluente, é bastante difícil e complexo. Foi dito no início que está fora do alcance do trabalho procurar descrever matematicamente a dinâmica não linear do processo em estudo, com vista à predição de desempenho.

Não obstante, a partir de princípios consagrados em investigações discutidas e correlacionadas anteriormente, seja na esfera da vibração de colunas gasosas ou vibração de corpos fluídicos em contêineres, procura-se condensar resultados que municiam, da forma mais adequada, a inferência da dinâmica média do fluxo perturbado por fontes e parâmetros conheci-

dos. Interesse especial se deve devotar à velocidade média do fluxo no labirinto adsorvente porque a ela se associa resultados de impacto de gotas (Figura 2.38, página 68).

Resumidamente se podem assentar resultados da bibliografia consultada, no que concerne à velocidade fluídica, que auxiliam a análise de desempenho processo em estudo:

- Segundo Lamb (1932) a seguinte relação se pode atribuir à propagação de ondas superficiais de capilaridade em vibração horizontal: λ_1 = 0,5 mm, $\dot{X}_{gr1}$ = 960 mm/s, f_1 = 1930 Hz; λ_2 = 1 mm, $\dot{X}_{gr2}$ = 680 mm/s, f_2 = 680 Hz; λ_3 = 5 mm, $\dot{X}_{gr3}$ = 300 mm/s, f_3 = 61 Hz.
- Segundo Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005) a máxima amplitude de oscilação de uma partícula em um fluído vibrante, de acordo com (Equação (41), Cap. 2, item 2.5.2) é:

$$X_0 = \frac{k_2}{\omega\sqrt{k_1^2+\omega^2}} = \frac{3\pi\mu\phi a}{m\omega\sqrt{1+\left(\frac{3\pi\mu\phi}{m\omega}\right)^2}} = \frac{3\pi\mu\phi a}{\sqrt{1+X_0^{*2}}} \quad \text{com, } X_0^* = 3\pi\mu\phi/m\omega$$

Assim, de acordo com Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005) se pode admitir que a velocidade de uma partícula dispersa em um meio fluídico em vibração pode ser dada por: $\dot{Y}p = X_o\omega$, onde (ω) é a frequência de excitação do meio e (X_o) a amplitude de vibração. Outros pesquisadores reportam relações analíticas com a mesma finalidade:

- Segundo Krogstad & Arntsen (2000) (Tabela 2.3) a velocidade horizontal ou vertical da partícula ou interface pode ser dada por: $\dot{Y}g = 2\pi f Y_0 e^{(2{,}015 Y_0 f^2)}$, considerando-se a coordenada (z = 0) à superfície do fluído.
- Segundo Fitzpatrick (1963), item 2.5.1 Cap. 2, a Equação 34, resulta, para (λ = *2 cm*, $V_g = V_f$) isto é ($k = L_c$) o que equivale dizer-se, o número de onda iguala-se ao comprimento de capilaridade, ou Constante de Laplace, e para água vale, ($L_c \approx 2{,}7$ mm); para ($k << L_c$), a gravitação domina a capilaridade (σ), ou tensão interfacial, e vice-versa, para ($k >> L_c$).

A Figura 3.31 a seguir é uma ilustração esquemática adaptada do que sucede momentos antes da eclosão de uma bolha de ar ao chocar-se contra paredes do labirinto adsorvente. A ruptura da interface promove cavitação e leva à formação do jato ilustrado. O efeito é explo-

rado neste trabalho com mecanismo de arremesso de gotículas de óleo contra o adsorvente no momento em que a interface da cavidade ou cratera se lança contra o adsorvente, impregnada de gotículas de óleo.

A eclosão de bolhas de ar dispersas em fluídos entre muitos, foi reportada por:

- Duchemin *et al*., (2002), em estudo realizado numericamente. Segundo afirmam, a velocidade do jato devido ao colapso de uma cratera gerada por bolha de ar como mostra a Figura 3.31, com (ϕ = 1,7 mm) aproximadamente, para fluído de baixa viscosidade, ($\nu = 10^{-6}$ m^2/s, σ = 0,072 N/m e ρ = 1.000 kg/m^3), desde que a relação entre comprimento de capilaridade viscosa, diâmetro da bolha de ar e comprimento de capilaridade seja, ($2L_v < \phi_b < 2L_c$), onde (L_v = 0,014 μm) e o comprimento de capilaridade, ou Constante de Laplace (Tabela 2.2, Cap. 2, item 7), seja (L_c = 2,7 mm), se tem: ($\phi_b / 2L_v = 2{,}88.10^5$), onde ($L_v = \rho v^2/\sigma$ e $\dot{Y}g_c = \sigma/\rho v$). Segundo os pesquisadores, pode-se calcular a velocidade do jato fazendo-se, ($\dot{Y}g = 2\dot{Y}g_c = 2\ x\ 0{,}072/1.000\ x\ 10^{-6}$ = 1,44 m/s), ou seja, a velocidade do jato mostrado na ilustração, Figura 3.30, é ($\dot{Y}g$ = 1,44 m/s). O resultado reportado por Duchemin *et al*., (2002) é contestado por Goldman (2009) que afirma ser a velocidade, muito maior.

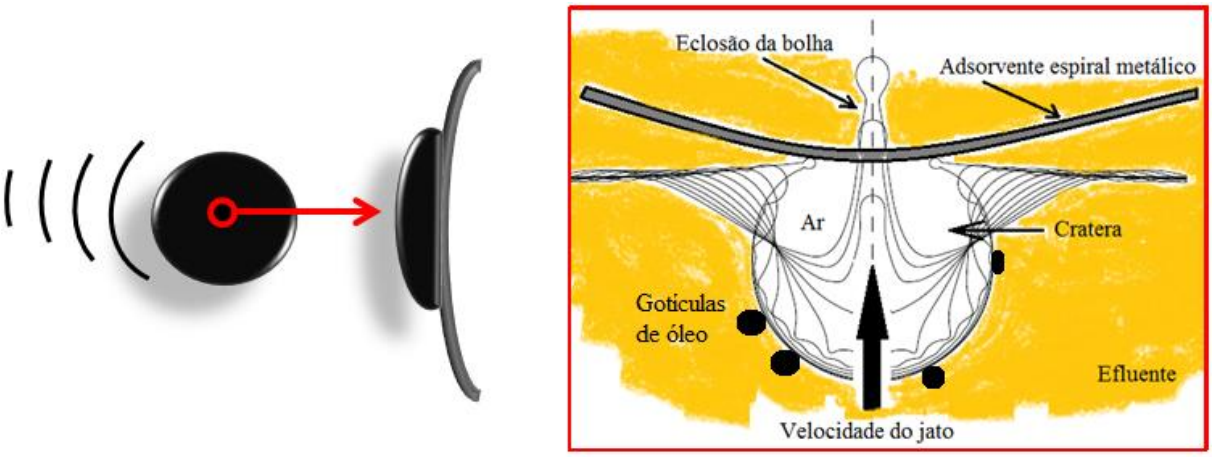


Figura 3.31 Ilustração do choque de uma gota de óleo, da eclosão de uma bolha de ar imersa em fluído e velocidade do jato que emana por colapso da cavidade ou cavitação da interface. O elemento metálico adsorvente ilustra o contato submerso.
(Extraída e adaptada de: Duchemin *et al*., (2002))

- Zeff *et al*., (2000) investigaram a eclosão de bolhas de ar provocadas por perturbação horizontal de 8 Hz em uma solução de água e glicerina ($\nu = 1{,}94.10^{-4}$ m^2/s). Imagens

captadas pelos autores com câmera de alta resolução mostram a ejeção de gota pelo jato formado, que segundo Spiel *et al*., (1995) apud Duchemin *et al*., (2002) pode atingir 1/100 do diâmetro da cratera que a originou e 70 mm de altura, aos 33 ms após a singularidade. Foi realizado o cálculo aproximado da velocidade inicial do jato e, por decorrência, se lhe admite como velocidade de choque do efluente com o adsorvente metálico, de acordo com a Figura 3.30, considerando-se o choque da bolha de ar e ruptura da interface. A velocidade aproximada é, ($\dot{Y}g$ = 2,72 m/s).

Finalmente, a velocidade média que se admite para choque entre partículas dispersas e adsorvente tomou-se por base premissas discutidas anteriormente. Portanto, no domínio que se define como célula adsorvente, considerando-se parâmetros físicos de controle como frequência de excitação (ω) e amplitude máxima de vibração (X_o), o modelo matemático de velocidade que se admite neste trabalho é:

$$<\dot{Y}g> = [\dot{X}g]_{inércia} + [\dot{Y}g]_{vazão} + [\dot{Y}g]_{eclosão} + [\dot{Y}g]_{empuxo} \quad (48)$$

3.3 Construção e aferição de sistemas periféricos de controle auxiliar

Adequada operação do sistema para análise de desempenho exige monitoramento à altura, sobretudo, apropriada aquisição de dados, seleção de faixas de frequência e amplitude correspondente e definição de parâmetros operacionais como vazão de efluente e ar de flotação. O último considera-se de grande relevância para análise comparativa.

O controle e monitoramento do processo envolve várioas sistemas: Sistema de aterramento particular, sistema de tratamento (*Vibrauto-flot*), sensores de deslocamento e aceleração, dispositivos de controle e aquisição de sinais analógicos e digitais, mesa inercial, controladores de vazão, minicompressor e alimentador gravitacional com homogeneizador. A Figura 3.32, mostra o sistema particular de aterramento com duplo arame de alumínio (ϕ = 6,23 mm). Na extremidade instalou-se um eletrodo medindo 1000 mm de comprimento. Construiu-se o aterramento para conter interferência da rede elétrica em sinais digitais aquistados, causada por elevada diferença de potencial (ddp = 70 Volts) entre terra e neutro na rede. A medida empregada abaixou a diferença de potencial para, 2,0 Volts, 50% abaixo da recomendação normativa para sistemas de aterramento. A Figura 3.33 mostra o conjunto de aquisição, acon-

dicionamento e processamento digital de sinais. Compõe-se de osciloscópio (ETM_3) ao centro, fonte controldora e variadora de tensão e corrente (ETM_4), à direita; gerador analógico de função (ETM_{21}), fonte estabilizada de tensão (ETM_5) e microscópio digital (ETM_{15}), à esquerda. Medições da fonte (ETM_4) permitem calcular a potência instantânea consumida.

Figura 3.32 Sistema de aterramento.

Figura 3.33 Conjunto de monitoramento, processamento e aquisição de sinal digital.

O gráfico que se mostra através da Figura 3.35 é a curva característica da fonte Minipa (ETM_4), obtida para controle operacional do sistema vibratório.

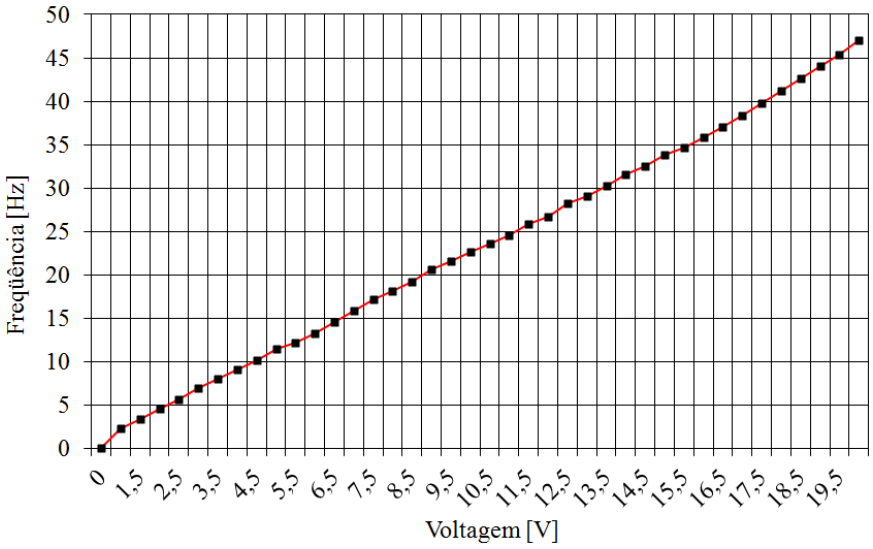


Figura 3.34 Curva de calibração da freqüência absoluta do motor em Hertz [Hz] em função da voltagem da fonte de alimentação, em Volt [V].

A curva da Figura 3.35 permite-se selecionar a frequência de excitação operacional com base na leitura da voltagem instantânea medida através de osciloscópio. A Tabela 3 do Apêndice mostra medições de voltagem e frequência absoluta do eixo motor em desbalanceamento rotativo.

A captura de imagens congeladas do comportamento do fluído em vibração foi obtida com auxílio de estroboscópio (ETM_{17}) mostrado na Figura 3.34. Frequências do processo vibratório são impostas por motor em desbalanceamento rotativo (ETV_4) e (ETV_8).

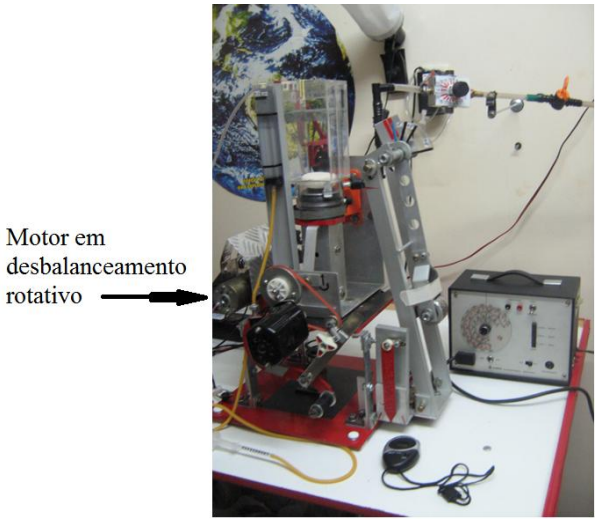


Figura 3.35 Estroboscópio Frata utilizado para congelamento de imagem do sistema em vibração.

A base inercial do sistema constitui-se de mesa em madeira (ETV_{13}) pesando aproximadamente, 1.177 N, suportada por amortecedores de vibração em borracha natural (*Vibrastop*), Figura 3.36, e parafuso de nivelação. Engastes em aço fixam-na à parede (Figura 3.37).

Figura 3.36 Amortecedores de vibração da mesa inercial.

Figura 3.37 Engaste de apoio da mesa inercial.

Para aquistar sinal de deslocamento foi utilizado transdutor de deslocamento (LVDT – ETM_6), sensor de relutância variável amplamente utilizado na indústria. Sinais de aceleração foram aquistados com acelerômetro (ETM_8), do tipo piezo-elétrico bidimensional para captação de sinais de aceleração em direções ortogonais, mostrados, respectivamente, através das figuras, Figura 3.38 e Figura 3.39. A Figura 3.40 (a) mostra a curva de calibragem do LVDT e a Figura 3.40 (b), a curva de calibragem do acelerômetro.

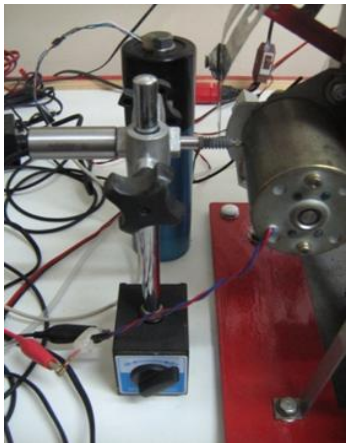


Figura 3.38 Posicionamento do sensor LVDT para captação de sinal de deslocamento na posição DIR_{XY1}.

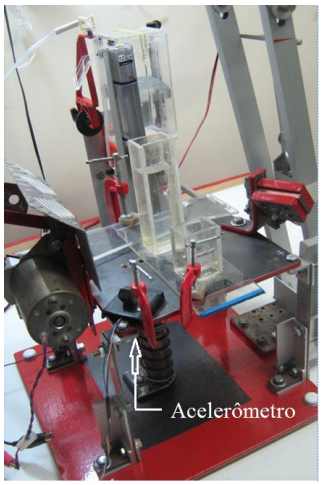
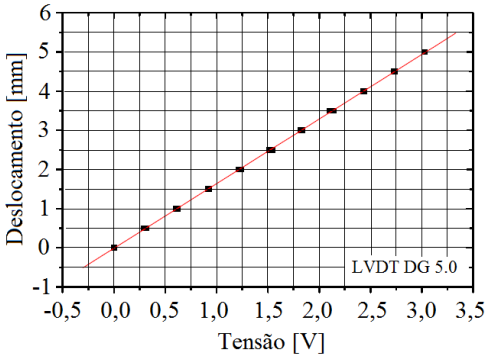
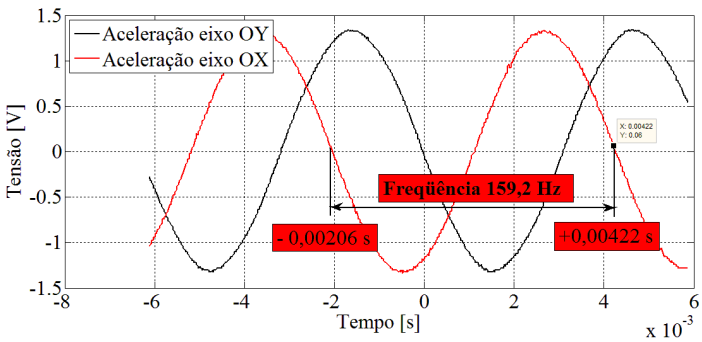


Figura 3.39 Acelerômetro ADXL202 na posição DIR_{XY2}.



(a)

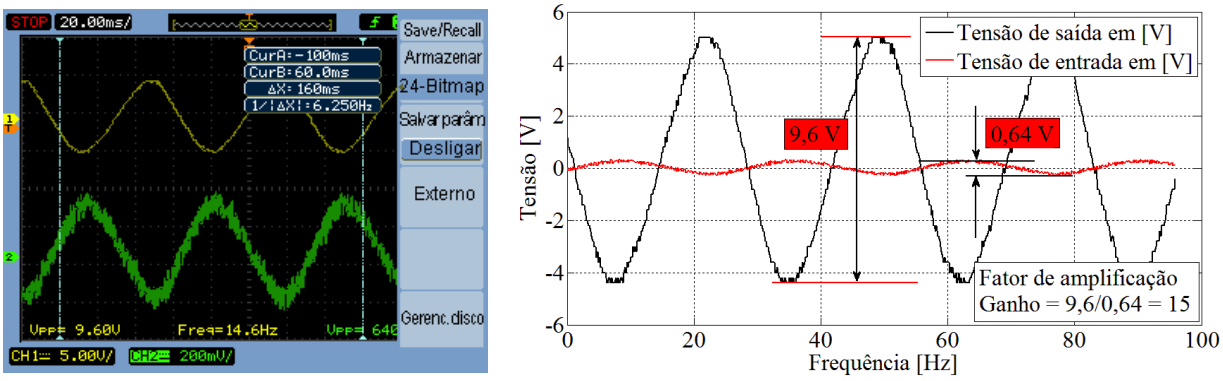


(b)

Figura 3.40 Curvas de sensibilidade dos sensores LVDT e acelerômetro: a) Curva característica do LVDT DG 5.0 (Extraída e adaptada de: dos Reis (2007); b) Curva de calibragem do acelerômetro ADXL202.

O acelerômetro utilizado pode ser visto através da Figura 3.39. O sensor foi calibrado por comparação de sinais gerados com calibrador de acelerômetro de frequência constante (159,3 Hz – ETM_9). O dispositivo é mostrado através da Figura 3.38, em segundo plano, por trás do LVDT. O processo de calibragem consistiu em confrontar o sinal captado com sinal harmônico, de mesma frequência, gerado por gerador de sinal analógico (ETM_{21}), aquistado com auxílio de osciloscópio (ETM_3), mostrados através da Figura 3.33. A curva de calibragem do acelerômetro é mostrada através da Figura 3.40 (b).

Acelerômetros ADXL202 limitam-se à aceleração máxima (2g), isto é, aproximadamente 19,62 m/s^2. O acelerômtro utilizado possui placa de amplificação para possibilitar leitura de sinais de baixa amplitude. Fez-se necessário calcular o fator de amplificação (Ganho da placa) mostrado através das figuras, Figura 3.41 (a) e (b). A figura, Figura 3.41 (a) mostra a imagem da tela do osciloscópio. O sinal em amarelo (9,6 V pico-a-pico) é a resposta amplificada à entrada do sinal em verde (640 mV pico-a-pico) gerado por gerador de função. Análises mostram que o fator de amplificação, ou ganho, é de 15 vezes.



(a) **(b)**

Figura 3.41 Gráfico de sinais de entrada e saída da placa do acelerômetro em que se ilustra a amplificação do sinal gerado em 15 vezes: a) Imagem gerada da tela do osciloscópio para determinação do ganho da placa de amplificação; b) Gráfico de sinais gerados pelo gerador analógico de função em confronto com o calibrador de acelerômetro.

Falou-se anteriormente que a aquisição de sinais de deslocamento se realizou com auxílio de sensor de relutância, LVDT (ETM_6). Embora não se tenha procedido, é possível reconstruir sinal de deslocamento através de acelerômetros. No entanto, o produto ($X_0\omega^2$) não pode ser utilizado devido à aceleração não ser constante. Obviamente, a reconstrução do sinal mediante aplicação da transformação inversa de Fourier dará resultados *biasados.* O problema

da introdução de erro se deve à conjunção de refinadas taxas de evolução diferencial de um sinal de aceleração no domínio do tempo, com taxas relativamente grosseiras de resolução no domínio da frequência.

A predeterminação de taxas de amostragem no domínio do tempo e da frequência para reconstruir sinais de alta frequência no domínio do tempo e sinais de baixa frequência no domínio da frequência produz erros na aquisição e armazenagem, devido à perda de significativas componentes de Fourier do sinal. Uma proposta de contornar o problema por ajuste de curva em torno de significativas componentes de frequência é apresentada por Han (2010) com resultados satisfatórios. Neste trabalho sinais obtidos com acelerômetro foram utilizados tão só para avaliação da dinâmica do sistema e dos modos de vibrar.

Como parte integrante do conjunto periférico de operação e controle, foi construído um sistema de alimentação, descarga e coleta do efluente tratado para análise química. Um sistema pneumático de produção de ar comprimido com controle de pressão e vazão de ar foi construído para realização de processos de flotação a ar induzido.

O processo de alimentação de efluente oleoso é gravitacional contínuo e compõe-se basicamente de um reservatório em vidro (ETV_6) mostrado através da Figura 3.43. Proveu-se o sistema de motor e impelidor para homogeneização, com capacidade máxima de rotação de 880 rpm. Um registro geral de esfera, de aproximadamente 12,23 mm de diâmetro interno, e uma válvula controladora de vazão (Figura 3.42) adaptada de uma válvula de agulha (ETM_{12}), foi instalado. Para adequado controle operacional, a válvula controladora foi devidamente graduada e aferida por medição direta (Fox & McDonald, 1988) com auxílio de uma proveta de 500 mℓ (ETM_{22}). Válvula e proveta são vistas através da Figura 3.42.

Através da Figura 3.43, mostrada na página seguinte, ilustra-se o conjunto de alimentação e cotas hídricas. Parâmetros hídricos a exemplo de altura manométrica e nível mínimo permissível de descarga de efluente do reservatório para abastecimento da cubra são apontados. Deve-se procurar manter o nível do reservatório homogeneizador entre marcas indicadas e referenciadas por (ΔV) para evitar variação expressiva de vazão (Limite máximo de 4%).

A Figura 3.44, mostra o gráfico do comportamento da vazão para vários níveis do reservatório de abastecimento e homogeneização. Pode-se constatar que acima de 350 mℓ variações não variam mais que 4%. Este limite foi observado em todos os experimentos através de realimentação de efluente, sempre que o nível se aproximava do valor limite. No Apêndice encontram-se tabelas, Tabela 5 (a), (b) e (c) com valores medidos para aferição do controlador de vazão.

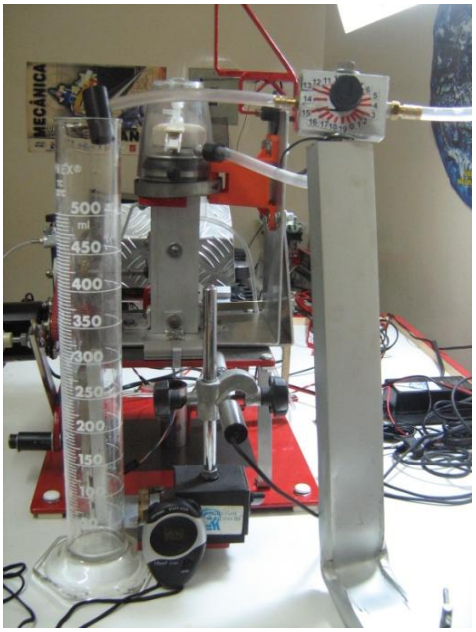


Figura 3.42 Sistema de calibragem do controlador de fluxo de efluente.

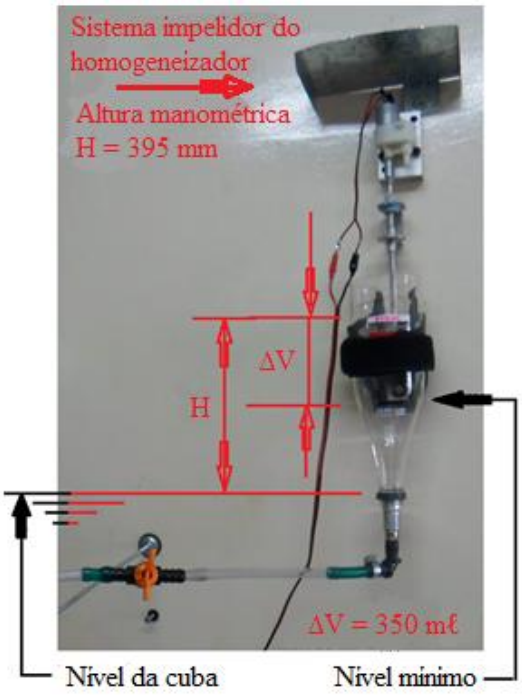


Figura 3.43 Sistema de alimentação gravitacional de efluente e homogeneização.

O processo de medição direta foi realizado com auxílio de cronômetro (ETM_1) e proveta Pyrex (ETM_{22}), ilusrado através da Figura 3.42.

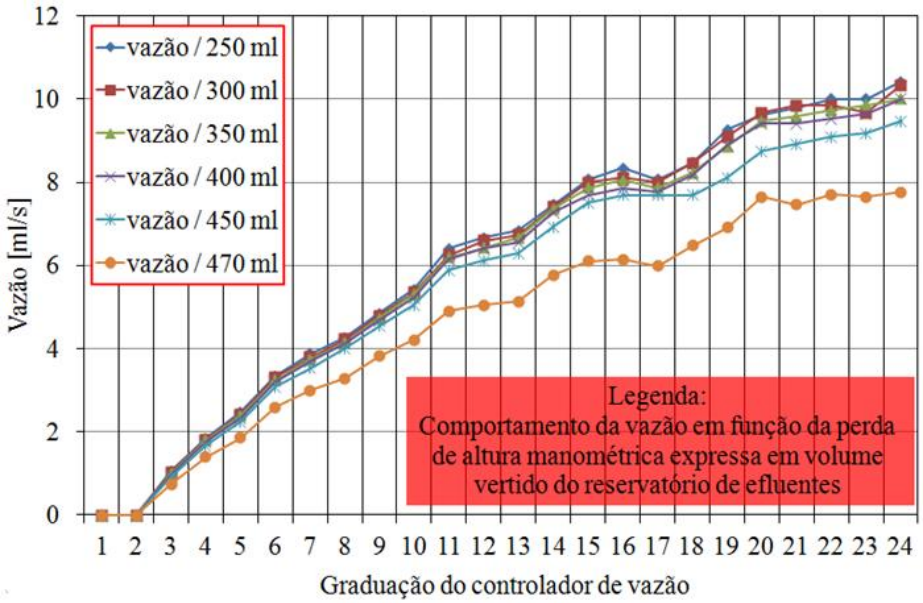


Figura 3.44 Vazão de efluente em função da graduação do controlador para distintas alturas manométricas em termos de volume vertido.

Definiu-se a escala de graduação para abertura da válvula de 1 a 24. A partir da vigésima divisão não mais se verificaram variações de vazão, ou seja, a saturação da válvula dá-se após a vigésima divisão. Valores obtidos de vazão se definiram como vazão nominal de efluente (Q_n). Para ensaio os seguintes valores foram selecionados: 3,5 mℓ/s; 7,5 mℓ/s e 10 mℓ/s.

Para produção de ar comprimido construiu-se um sistema utilizando-se minicompressor automotivo (ETV_3) e controlador de vazão de ar (ETM_{13}) a válvula de agulha. O controlador de vazão de ar foi construído e aferido. A curva de comportamento da vazão pode-se ver adiante através da Figura 3.47. Ductos de condução de ar feitos de mangueira cristal (ϕ = 6 mm) e conexões foram utilizados. Para conduzir o ar pressionado ao volume de efluente no interior da cuba, realizaram-se perfurações na coluna (ETV_5) ilustrada através da Figura 3.14 e Figura 3.15, e perfurações ortogonais no pistão de base da cuba, da base até a superfície interna, se encontra instalada a conexão de tomada de ar da manga de flotação (ETV_{10}).

O processo de fabricação da manga de flotação é mostrado através da Figura 3.45 (a),

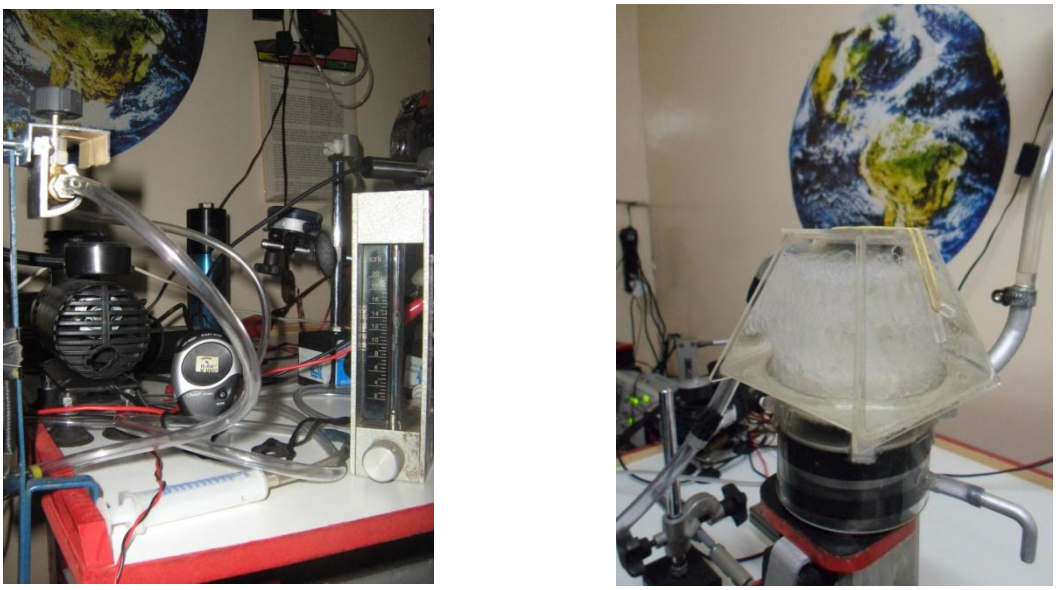
(a) **(b)** **(c)**

Figura 3.45 Processo de construção da manga de flotação do sistema (*Vibra-flot*): a) Torneamento da barra de caulim/filito; b) Elementos acabados; c) Manga de flotação.

(b) e (c). Torneou-se uma barra circular em caulim e filito, estampou-se a calota esférica em chapa zincada (ASTM 879/0,6 mm) e realizou-se a montagem com adesivo industrial.

A aferição da válvula controladora de vazão de ar fez-se com auxílio de um rotâmetro (ETM_{11}). A pressão monitorou-se através do manômetro do compressor. Estes elementos podem ser vistos através da Figura 3.46 (a) onde figuram o rotâmetro à direita, o compressor e válvula, à esquerda. O sistema de flotação a ar induzido pode ser visto em perfeito funcionamento através da Figura 3.46 (b). A vazão de ar que se utilizou foi 0,184 m^3/h (51,11 mℓ/s), à pressão, 1,41 atm (138.274 N/m^2). Valores selecionados mantiveram-se como parâmetros operacionais constantes durante os ensaios com flotação a ar induzido. Critérios de seleção le-

varam em conta, fluxo de bolhas de ar de pouca turbulência, relativamente denso, uniforme de modo a evitar transbordamento ou geração de espuma.



(a) **(b)**

Figura 3.46 Sistema de produção de ar comprimido e controle: a) Sistema de produção de ar comprimido para flotação; b) Sistema de flotação a ar induzido em perfeito funcionamento.

A Figura 3.47 mostra a curva de calibragem do regulador de vazão de ar. A tabela de medição pode ser vista no Apêndice, Tabela 4.

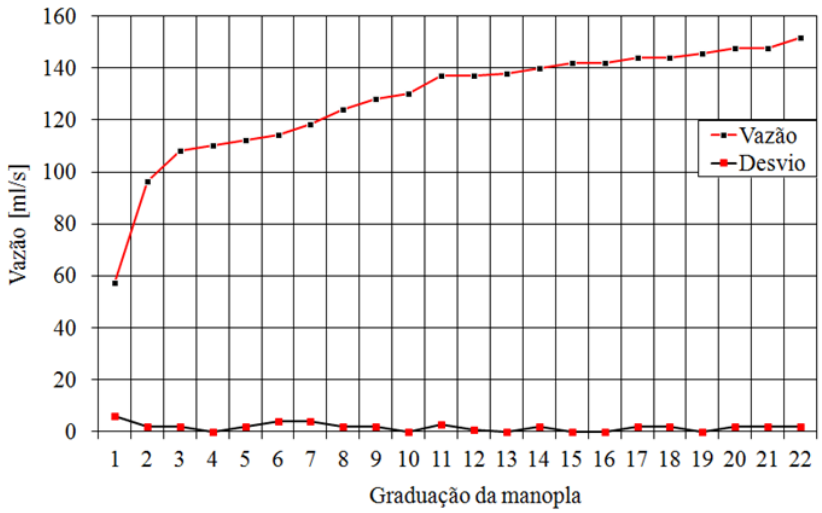
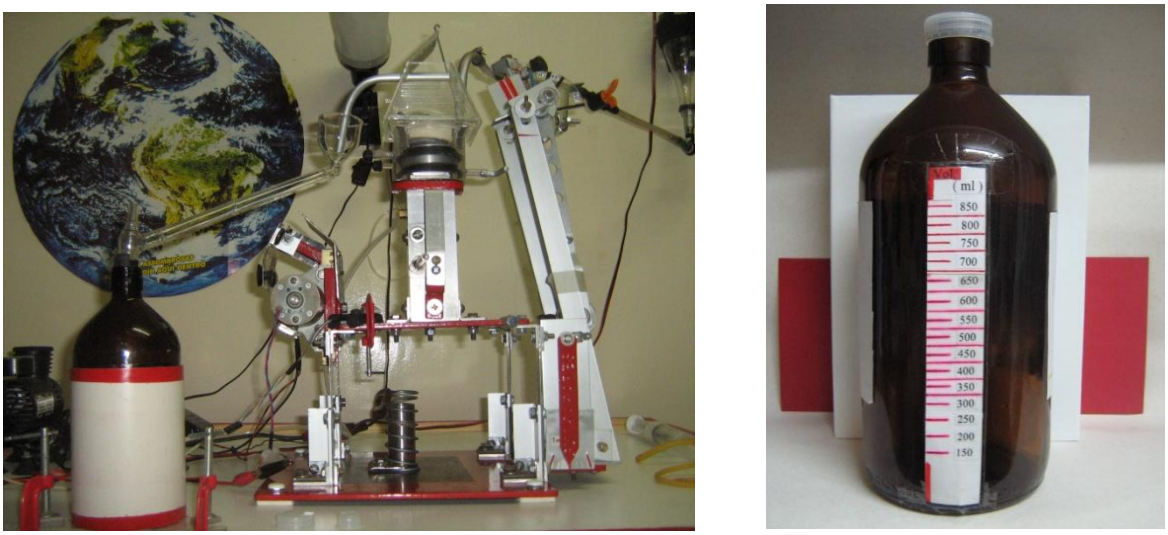


Figura 3.47 Curva de calibração do registro de ar comprimido em [mℓ/s].

O sistema de descarga de efluente tratado é mostrado através da Figura 3.48 (a). A cuba de tratamento dispõe de ducto de descarga para canalizar o efluente tratado ao funil coletor em vidro com alongador e respiro para ar (ETV_{15}).

O sistema de descarga e coleta construiu-se isoladamente, com borracha, para evitar risco de ruptura do funil em vidro. Dessa forma se permitiu descarregar o efluente tratado diretamente no reservatório acondicionador para análise química. O reservatório em vidro (Capacidade 1.000 mℓ) foi graduado por aferição direta em subdivisões de 50 mℓ no intervalo de 150 a 850 mℓ. Quando o volume excedia esse valor (925 mℓ por exemplo) em alguns casos, fez-se extensão da régua de aferição com auxílio de régua graduada. A descarga foi monitorada por cronômetro digital (ETM_1) para cálculo da vazão efetiva de efluente (Q_{ef}).



(a) **(b)**

Figura 3.48 Sistema de descarga e coleta de efluente tratado: a) Sistema de descarga de efluente tratado; b) Reservatório âmbar graduado coletor de efluente tratado.

3.4 Caracterização dinâmica do sistema

Dentre parâmetros necessários à analise do tratamento em apreço isto é, tratamento em vibração e flotação natural, e da habilidade do sistema vibratório concebido em processá-lo, pelo menos dois parâmetros foram definidos, de acordo com a base teórica apresentada: A velocidade média adotada para o fluxo fluídico, consequentemente de partículas dispersas, através da Equação (48), item 3.2.7, Cap. 3, e vazões de vertedura de efluente (Item 3.3, Cap. 3). Adicionalmente, no item 3.2.5, falou-se de modalidades dinâmicas concebidas para o sistema das quais, a elástica, caracterizada por modo próprio de vibrar. Quer-se dizer que o

sistema vibrará com determinada amplitude de deslocamento, de acordo com parâmetros intrínsecos como rigidez do sistema, por exemplo, a dada freqüência de excitação, e não mudará sem que se processe alteração no valor da força de excitação ou da freqüência.

Esta foi, entretanto, a razão de ter sido construída a modalidade alternativa articulada do sistema, ou seja, sem características dinâmicas próprias, (Figura 3.13, item 3.2.5, Cap. 3). Por questões adversas remeteu-se a última, a futuros trabalhos com o progresso da pesquisa. Não obstante se deve essaltar a importância do sistema articulado, na obtenção de parâmetros de fluidodinâmica vibracional, na orientação de projetos de suspensão elástica que *a priori* reproduziriam o mesmo desempenho fluidodinâmico em idênticas condições de análise.

Resumidamente, se prefixa uma freqüência e se realiza varredura em amplitude, ou seja, se transfere intensidades distintas de energia cinética ao fluído por combinações adequadas de velocidade angular e amplitude. Em sistemas elásticos não é possivel devido a uma freqüência corresponder a uma, e somente uma, amplitude, ao menos teoricamente. Combinações de freqüência e amplitude em sistemas elásticos, resultam distintos aportes de energia com mais intensidade na faixa de ressonância. No âmbito analítico, se pode afirmar que sistemas vibratórios articulados são bastante difundidos e eficientes. Para consulta se recomenda Ivanova & Kozlov (2002) e Waghmare (2008). No que concerne à escala de produção industrial, a implementação não se recomenda por motivos discutidos anteriormente relacionados à inércia, esforços e consumo energético.

Cabe no entanto, nesta discussão, definir faixas de freqüência e amplitude, adequadas à análise do processo, realizando ensaio com sistema elástico. Para tal se desenvolveu estudo teórico-experimental através de sensores de aceleração e deslocamento, vistos anteriormente, auxiliados por sistemas de processamento e acondicionamento de sinais digitais. Sinais coletados foram matematicamente processados através do *software*, Matlab®, versão 2010ª. Isto permitiu analizar o comportamento dinâmico, obter significativas componentes de freqüência, identificar a freqüência de ressonância, constante de rigidez e o amortecimento equivalente viscoso. Resultados experimentais foram confrontados com resultados analíticos através dos quais foi obtida a rigidez teórica do sistema.

O modelo de sistema é visto através da Figura 3.49 na página seguinte. Admitiu-se possuir um grau de liberdade (1 GDL) com quatro duplas molas planas engastadas (ETV_{16}), suportando um peso (P_G = 46,11 N onde M = 4,7 kg) e ser excitado por motor (ETV_4) com rotor (ETV_8) em desbalanceamento rotativo. A força de excitação é harmônica, na direção indicada, e foram definidos posicionamentos para os sensores: DIR_{XY1} e DIR_{XY2} de acordo com a figura.

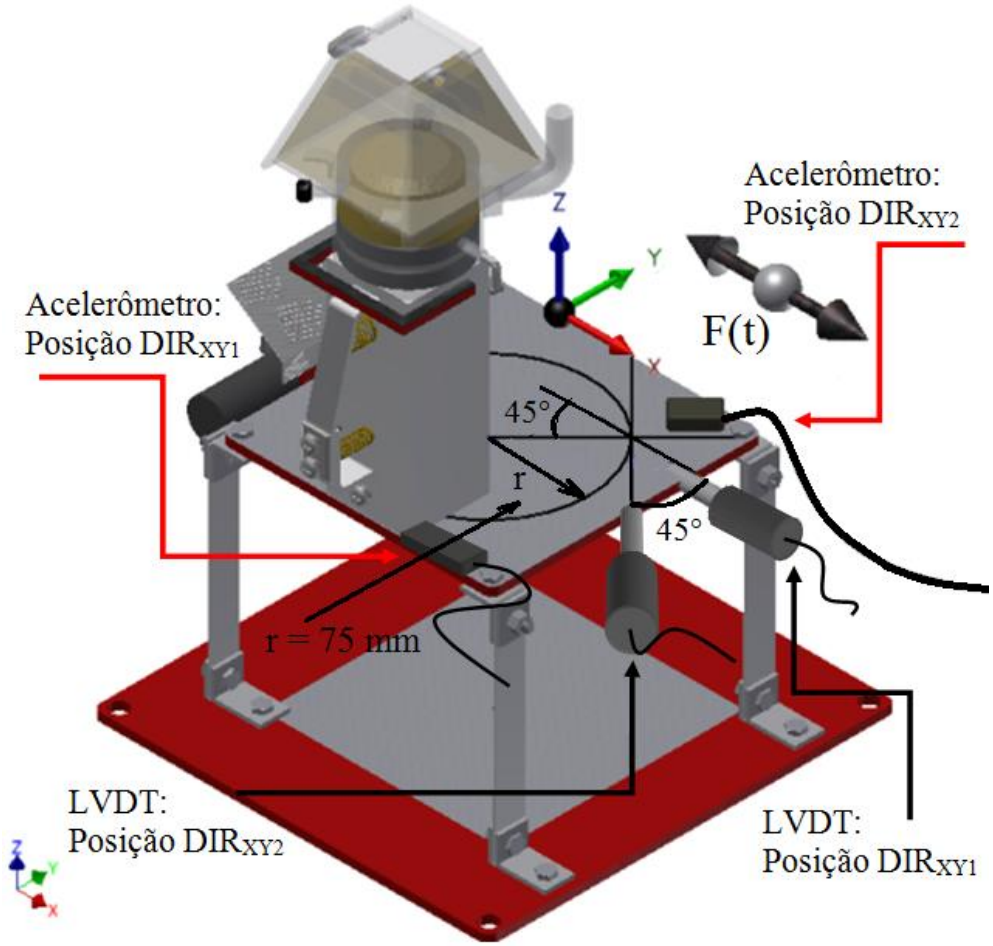


Figura 3.49 Modelo do sistema físico para análise de comportamento dinâmico.

Para que o sistema se coloque em movimento vibracional, construiu-se um conjunto elástico de suspensão (ETV_{16}) mostrado através da Figura 3.50, na parte superior da imagem. As molas da porção inferior da imagem foram inicialmente testadas, no entanto resultou baixo coeficiente de rigidez, consequentemente baixa freqüência natural de aproximadamente 6 Hz. Isto resulta muito baixas amplutudes de vibração, a freqüências acima da freqüência natural, e se deve à total inversão de fase entre força e deslocamento sobretudo em sistemas fracamente amortecidos (Church (1963) e Fonseca (1964)). O efeito pode ser avaliado através das figuras, Figura 2.24 e Figura 2.25, item 2.3.1, Cap. 2. Cabe ressaltar a possibilidade de se mudar o ângulo de fase entre força e deslocamento, por aumento do fator de amortecimento, e se obter maiores amplitudes de vibração.

Para aumentar a rigidez do sistema elástico de suspensão utilizou-se molas de maior largura (22 mm) e em pares, resultando 2,22 mm de espessura total para cada unidade do conjunto. Adicionalmente reduziu-se o vão-livre da suspensão à pouco mais da metade (70

mm), através de engastes em cantoneiras de alumínio (Figura 3.50), esquematicamente representados no modelo físico, Figura 2.23, item 2.4.1, Cap. 2.

Na parte superior da figura há um conjunto de duas molas que se vê ao centro. Trata-se de protensão regulável a parafuso que se construiu para permitir alterar a rigidez do sistema a intervalos pequenos, por conseguinte, a frequência natural. Isto permite e avaliar a dinâmica do sistema variando-se a elasticidade.

Figura 3.50 Dispositivos elásticos de suspensão do sistema vibratório.

Para municiar o processamento, sobretudo, análise, em se tratando de um protótipo laboratorial, sistemas mecânicos não raramente podem apresentar distribuição desuniforme de massa devido à posição de componentes. Neste sistema montou-se o motor de acionamento com o eixo principal do corpo cilíndrico, perpendicular à linha de ação da força de excitação. O centro de massa neste caso, localiza-se fora da linha de ação. A freqüências mais altas, acima da freqüência natural, distribuição desuniforme de massa pode gerar efeitos de auto-excitação quando parâmetros mudam de valor a exemplo de rigidez elástica. Distintos modos de vibrar podem ter lugar associados a freqüências paramétricas, com faixas de estabilidade e de instabilidade. Podešva & Polák (2008) estudaram oscilações paramétricas em transporte de minério realizado através de cabo e caçamba, que se manifestam horizontalmente em diagonal e verticalmente, devido à rigidez do cabo de aço. A solução analítica do problema de oscilações paramétricas é conhecida como *Equação de Mathieu* (Thompson, 1972).

A análise do comportamento dinâmico fez-se de acordo com a Figura 3.49. Posições assinaladas, DIR_{XY1} e DIR_{XY2}, referem-se à orientação dos sensores, segundo seus eixos, com relação à linha de ação da força de excitação. O mecanismo assegura coletar sinais com os referidos sensores, LVDT e acelerômetro, na direção da linha de ação da força, (DIR_{XY1}), ou inclinada de ± 45° (DIR_{XY2}). A segunda opção se refere à linha diagonal à mesa (ETV_{11}).

A Figura 3.51 mostra a vista superior da mesa. O círculo de raio, 75 mm, cruza o centro geométrico da coluna. Em frequências próximas de 33 Hz sinais de monitoramento indicam movimento oscilatório em torno do centro "0", à torcedura, constituindo frequência paramétrica.

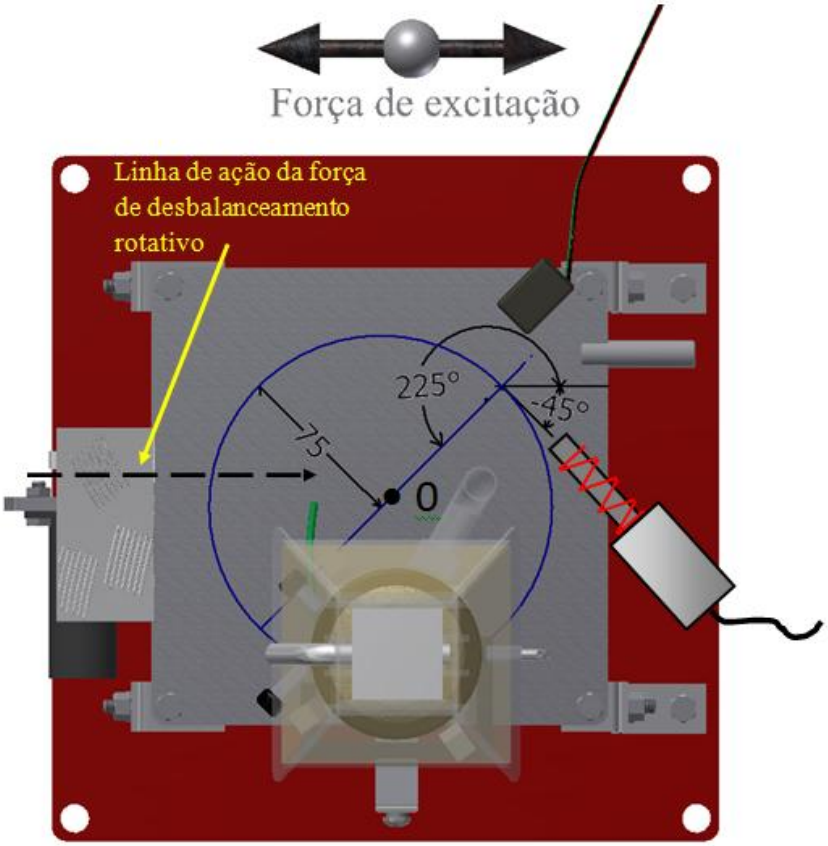
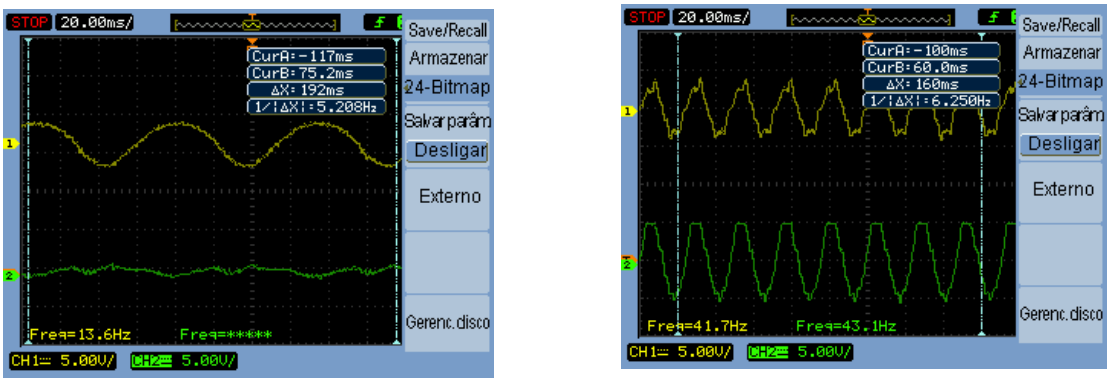


Figura 3.51 Vista superior do modelo do sistema físico para análise de comportamento dinâmico.

Resultados de monitoramento são mostrados através da Figura 3.52 (a) e (b), Figura 3.53 (a) e (b) e Figura 3.54 (a) e (b). A Figura 3.52 (a) e (b), mostram o comportamento do sistema à freqüência de 14 e 42 Hz. O ensaio foi realizado com a coluna ao centro da mesa.



(a) **(b)**

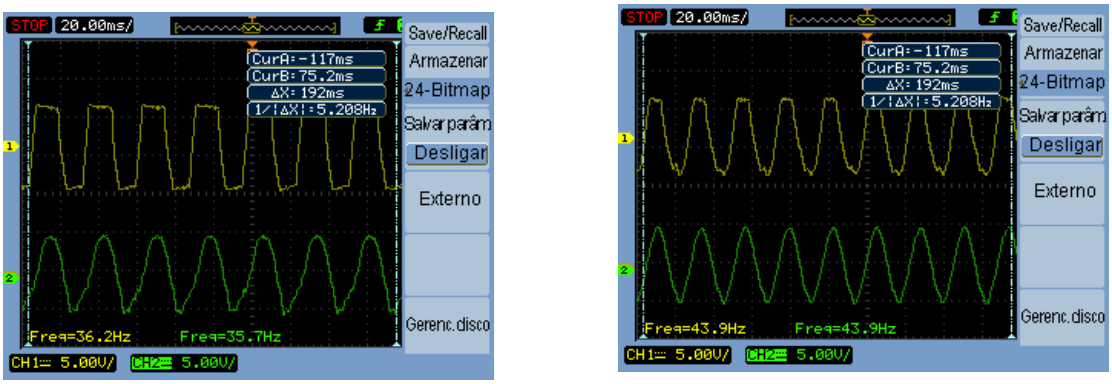
Figura 3.52 Imagem de sinais captados com acelerômetro na posição DIR_{XY1}, mostrados na tela do osciloscópio, onde o sinal de cima (amarelo), refere-se ao eixo na direção da força de excitação: a) Excitação à 14 Hz; b) Excitação à 42 Hz.

Através da Figura 3.52 (a) mostra-se que, à freqüência de 14 Hz, componentes de aceleração dirigem-se segundo a linha de ação da força de excitação. Deduz-se a inexistência de força ou, pelo menos, pequena intensidade transversal, por conseguinte, de deslocamento. O comportamento diverge à medida em que se aumenta a freqüência de excitação acima de 28 ou 30 Hz como se mostra através da Figura 3.52 (b). Os deslocamentos correspondentes são relativemente pequenos.

À luz estroboscópica se percebe oscilação do conjunto em torno do centróide da mesa vibratória (ETV_{11}). Para lograr-se amplitude sobre a circunferência do círculo, decidiu-se deslocar a coluna para a margem da mesa por um raio de 75 mm como se mostra através da Figura 3.51. Os deslocamentos tangenciais de 2 mm se considera pequenos, comparados à dimensão do raio de curvatura. Nesta circunstância se admitiram válidos os deslocamentos tangenciais para ensaios a frequências acima de 30 Hz.

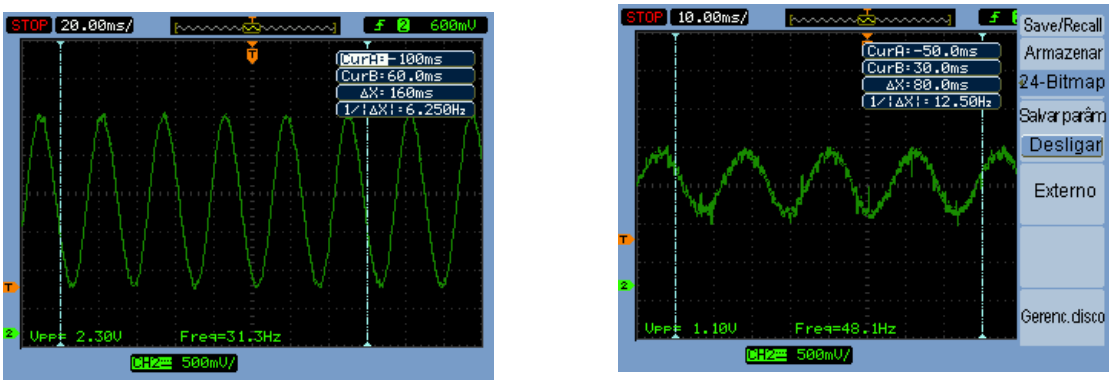
A Figura 3.53 (a) e Figura 3.53 (b) mostram sinais de aceleração coletados com a coluna do tratador deslocada ao raio de 75 mm, até a margem da mesa (Figura 3.51). Observa-se relativa regularidade da intensidade da aceleração revelada em ambos os sinais sendo o de cor amarela, axial à diagonal da mesa e o de cor verde, perpendicular à diagonal da mesa, em posição designada, (DIR_{XY2}).

A Figura 3.54 (a) e Figura 3.54 (b) a seguir, mostram sinais de deslocamento obtidos com LVDT na posição DIR_{XY2}, a 31 e 48 Hz, respectivamente. Percebe-se acentuada queda no valor do deslocamento quando a freqüência atinge 48 Hz. A observação da dinâmica da mesa através dos sinais de aceleração captados se deve à função bi-dimensonal do sensor.



(a) **(b)**

Figura 3.53 Imagem de sinais captados com acelerômetro na posição $DIR_{XY2,}$ mostrados na tela do osciloscópio, onde o sinal de cima (amarelo), refere-se ao eixo na direção diagonal à mesa: a) Excitação à 36 Hz; b) Excitação à 44 Hz.



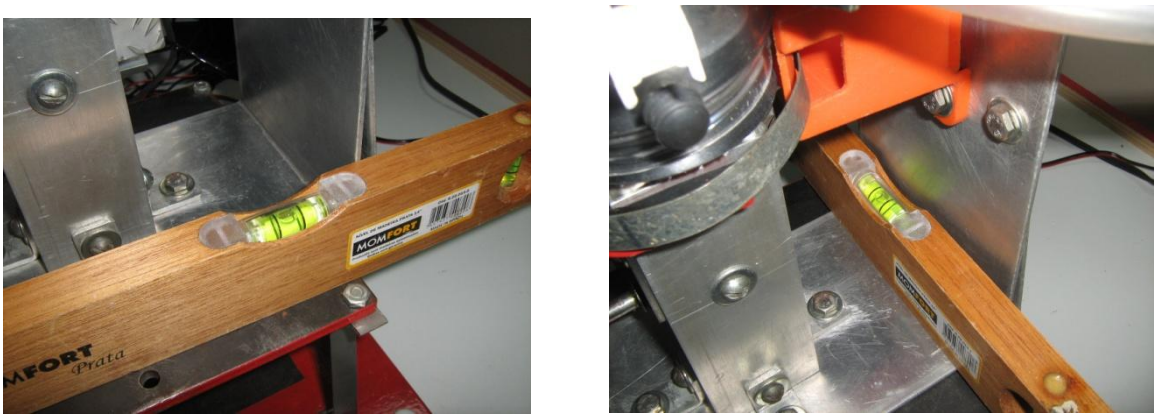
(a) **(b)**

Figura 3.54 Imagem de sinais de deslocamento captados com LVDT na posição $DIR_{XY2,}$ tangente ao círculo de 75 mm, mostrados na tela do osciloscópio: a) Excitação à 31 Hz; b) Excitação à 48 Hz.

A aproximação que se admite para o deslocamento do sistema no sentido da força de excitação, tomado circunferencialmente, em verdade, verifica-se no perímetro da elipse que se a partir da síntese de duas harmônicas de freqüências próximas. O movimento resultante de componentes perpendiculares entre si, nesse caso, é eliptico. A trajetória resultante se conhece como curva de Legendre-Lissajous (Church, 1963) e se pode implementar numericamente com auxílio do *software, Wolfran Mathematic® 7.0.*

A obtenção de sinal de forma apropriada, pressupõe condições mínimas de nivelamento da messa vibratória, em face dos problemas relacionados à inércia que se

verificam às altas frequências. Cabe ressaltar a necessidade de se evitar problema de alinhamento. Para tal nivelou-se o sistema segundo direções, OX e OY, com nivelador em madeira (ETM_7), como mostram a Figura 3.55 (a) e Figura 3.55 (b).



(a) **(b)**

Figura 3.55 Nivelamento da mesa vibratória: a) Segundo OY; b) Segundo OX.

A configuração geométrica do sistema, distribuição de massa dos constituintes e características elásticas determinam o comportamento dinâmico e a fequência característica natural. Para determinação da primeira frequência ou, freqüência natural, utilizou-se métodos analíticos e teórico-experimentais. A distribuição mássica do sistema é basicamente: Motor de acionamento (1,32 kg); base da coluna ou mesa (1,21 kg), coluna de tratamento com 370 mℓ de efluente (1,73 kg) e demais elementos de montagem.

Observando-se a Figura 3.49 se pode enxergar a desuniformidade mássica através do posicionamento dos elementos determinado por necessidade funcional do sistema. Sinais coletados, mostrados através da Figura 3.53 (a) e (b), sugerem a existência de movimento torsional de freqüência natural mais elevada, devido à maior rigidez estrutural em torção (Chopra, 1995). Eis o caráter de oscilações paramétricas do sistema por auto-excitação.

A Figura 2.22 repetida a seguir, e Figura 2.23 (Cap. 2, item 2.3.1) são modelos cuja descrição matemática se discutiu no Capítulo 2:

$$M\ddot{X}(t) + C_{eq}\dot{X}(t) + K_{eq}X(t) = \frac{M_e}{M}Mr_e\omega^2 \qquad \text{Repetida (3)}$$

A obtenção dos parâmetros pode-se realizar através das seguintes expressões:

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2}\ ;\quad \xi = C_{eq}/(2M\omega_n);\quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_{eq}}{M}} \qquad \text{Repetida (5)}$$

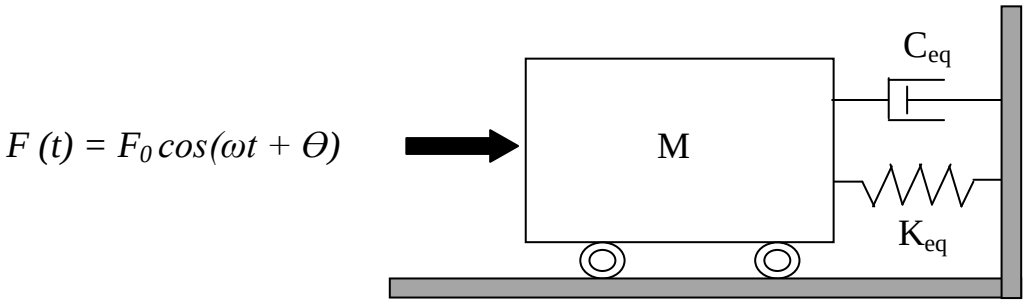


Figura 2.22 Modelo de Kelvin de um grau de liberdade (1 GDL) – Repetida

A determinação da freqüência natural (ω_n) se realizou analitica e experimentalmente. Com auxílio do modelo representativo adotado para o sistema (Figura 2.22 – Repetida) e com base na configuração elástica da suspensão, mostrada através da Figura 3.49, procedeu-se a análise teorico-experimental.

Segundo Morley (1943) e Ugural (2009), e considerando-se a rigidez da placa da mesa infinita se comparada à das molas (Chopra, 1995), o coeficiente de rigidez equivalente (K_{eq}) pode ser dado pela Equação (18) (Item 2.4.3, Cap. 2) com (I_{YY}) dado pela Equação (19). Consideraram-se os seguintes parâmteros físicos do sistema elástico: Largura da mola (L = 0,0220 m); espessura total do par (esp = 0,0022 m); módulo de elasticidade do material (E = 210.10^6 N/m^2); número de molas duplas (n = 4) e massa total sobre a mesa (M = 4,7 kg).

Portanto, de acordo com a Equação (18), se pode calcular a rigidez teórica:

$$K_{eq} = (24{,}0 \text{ x } 4{,}0 \text{ x } 196.133.10^6 \text{ x } 2{,}01.10^{-11})/3{,}43.10^{-4}, \quad K_{eq} = 1.103.376{,}78 \text{ N/m}$$

De acordo com Morley (1943) (Equação (5) Repetida) discutida no Capítulo 2, item 2.3.1, a frequência natural é:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{eq}}{M}} = 485{,}52 \text{ rd/s} \quad \omega_n = 485{,}52 \text{ rd/s} \quad f_n = 77{,}11 \text{ Hz}$$

Um aspecto importante do estudo, diretamente relacionado com a dinâmica, que se não pode olvidar junto a considerações metodológicas, refere-se à influência da instabilidade

elástica na identificação precisa da frequência natural. Sabe-se que está-se operando sistema cuja suspensão elástica se compõe de elementos esbeltos,-quatro molas planas-, sob peso total (P_G = 46,11 N). A totalidade do peso envolve efluente (aprox. 3,63 N), coluna de tratamento (ETV_5 e ETV_6), motor de propulsão (ETV_4) e mesa vibratória (ETV_{11}). A intensidade da carga pode gerar instabilidade elástica das molas planas, consideradas esbeltas, ou de baixa relação espessura versus comprimento.

A aproximação da carga total do que se considera limite crítico de flambagem, pode influenciar a precisa obtenção do valor da freqüência ressonante, se comparado à condições normais de carga. Para contornar o problema deve-se adotar fator de segurança apropriado. Morley (1943) expressa que a carga crítica de flambagem para barra bi-engastada, equivalente à montagem de molas do sistema, deve ser dada por:

$$P_{fl} = \frac{4\pi^2 EI_{YY}}{H^2} \tag{49}$$

De acordo com a Equação (49), a carga crítica de flambagem do sistema é:

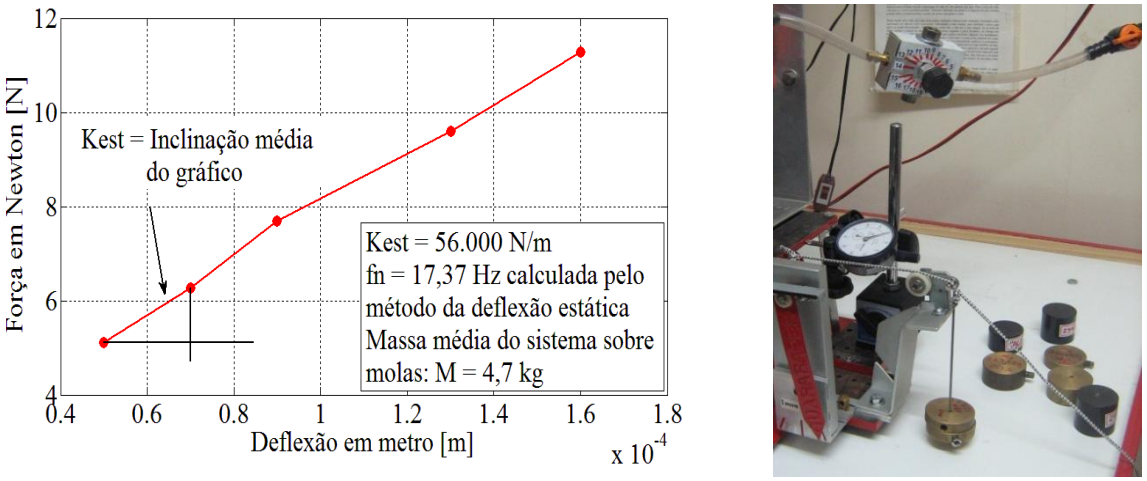
$$P_{fl} = 4\frac{4x9{,}87x210x10^{6}x2{,}01x10^{-11}}{0{,}070^2} = 136{,}04N$$

A carga sobre molas é 46,11 N, portanto, muito abaixo de 136,04 N. Neste caso o fator de segurança próximo de (3,0) isenta o sistema de problemas de instabilidade elástica. Um fator de segurança dessa magnitude atende padrões recomendáveis de engenharia.

Suportes construídos para redução do vão-livre das molas à metade do comprimento inicial, mostram-se através da Figura 3.50. Reduziu-se o vão das molas de 140 mm para 70 mm, com objetivo de aumentar a freqüência natural do sistema, a priori, considerada baixa. Baixas frequências naturais caracterizam sistemas flexíveis, e excitados em desbalanceamento rotativo geram perturbação insuficiente na massa fluída, de acordo com propósitos da técnica que se mostram atravé dos ítens 3.2.3 e 3.2.4 deste capítulo, sobretudo à freqüência elevada.

Os apoios que se adaptou não constituem exatamente apoio rígido ideal, no sentido lato. Crede (1972) recomenda correção para o cálculo da rigidez equivalente, devido a esse problema, por meio da rigidez obtida segundo a deflexão estática. A Equação (22), mostrada no Cap. 2, item 2.4.3, representa a correção proposta pelo autor quando se considera a rigidez da base infinita se comparada aos apoios, reportado anteriomente.

A Figura 3.56 (a) e (b) mostram o gráfico do comportamento elástico versus deflexão estática, quando se aplicam cargas estáticas, e o aparato utilizado, respectivamente.



(a) **(b)**

Figura 3.56 Ensaio de deflexão estática para correção do valor da rigidez elástica do sistema e freqüência natural: a) Curva, carga versus deflexão estática; b) Sistema periférico construído para ensaio de deflexão estática.

O aparato de medição mostrado através da Figura 3.56 (b) é constituído de base em alumínio, roldana e cabo de fibra vegetal, auxiliados por relógio comparador (ETM_{10}) para medição de deflexões. Finalmente esboçou-se o gráfico cartesiano, peso versus deflexão através da Figura 3.56 (a). Pequenos valores de deflexão estática foram usados de modo a não violar condições de linearidade. Obteve-se a rigidez elástica do sistema a cargas estáticas, através do cálculo da derivada da função média linear e, a partir de (K_{est} = 56.000 N/m), se obteve a freqüência natural:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{est}}{M}} = 109{,}16 \text{ rd/s} \qquad \omega_n = 109{,}16 \text{ rd/s} \qquad f_n = 17{,}37 \text{ Hz}$$

Utilizando-se a correção segundo Crede (1972) ter-se-á:

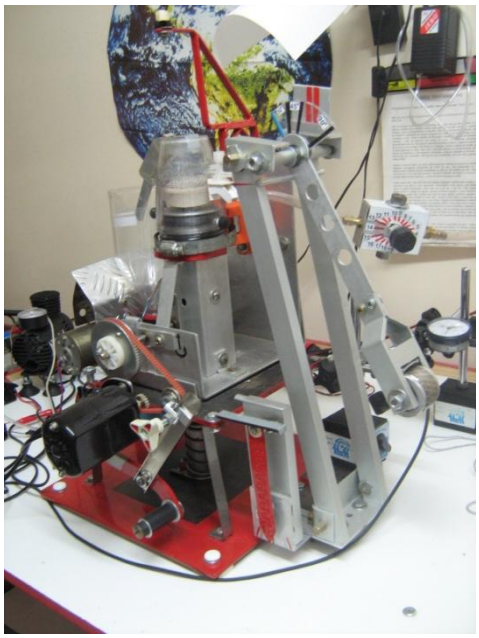
$$K_c = \frac{K_{eq} K_{est}}{K_{eq} + K_{est}} \qquad \text{Repetida (22)}$$

$$\text{Logo, } K_c = \frac{1.103.376{,}78 \times 56.000}{1.103.376{,}78 + 56.000} = 53.290 \text{ N/m} \quad \omega_n = 106{,}48 \text{ rd/s} \quad f_n = 16{,}95 \text{Hz}.$$

Resultados obtidos mostram grande divergência entre valores da frequência natural, calculados analiticamente, quando restrições de natureza teórica são violadas a exemplo da condição de engaste perfeito. O resultado experimental obtido a partir da deflexão elástica parece dominar a questão, uma vez que ensaios com o sistema funcionando em sub-ressonância ou super-ressonância é notável, à luz estroboscópica, ainda que de forma atenuada, milimétrico balanço de apoios construídos em alumínio.

Adicionalmente à análise teórico-experimental para obtenção de parâmetros elásticos do sistema realizou-se ensaios de impacto para confrontá-los com tais resultados. Sinais coletados com sensores de deslocamento (LVDT: ETM_6) e de aceleração (ETM_8) foram matematicamente tratados. O Sinal de deslocamento no tempo foi passado ao domínio da frequência através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) com auxílio de *software*, Matlab® 2010.a.

Através da Figura 3.57 (a) e (b), mostram-se os sistemas, de tratamento e martelo (ETM_{18}) construído para tal. A posição em que se vislumbra o martelo é tão só demonstrativa. Golpes foram proferidos com o malho na posição de máxima elevação, com o pêndulo a 90° do eixo vertical da mesa, proporcionando à massa-média de 395g, queda de 257 mm.



(a)

(b)

Figura 3.57 Estrutura construída para ensaio de impacto e obtenção dos parâmetros dinâmicos, rigidez (K_{eq}) e amortecimento viscoso equivalente (C_{eq}): a) Imagem demonstrativa do trajeto do martelo; b) Imagem de detalhes construtivos do martelo.

As figuras, Figura 3.58 e Figura 3.59, mostram amplitudes de deslocamento do sistema. A Figura 3.59 mostra o espectro de amplitudes harmônicas que sintetizam o sinal. A Figura 3.58 mostra a amplitude da harmônica principal correspondente à freqüência natural. Observa-se que o valor obtido via sensor de relutância (LVDT), situa-se próximo do valor calculado de 16,95 Hz. A correção do coeficiente de rigidez fez-se como sugere Crede (1972).

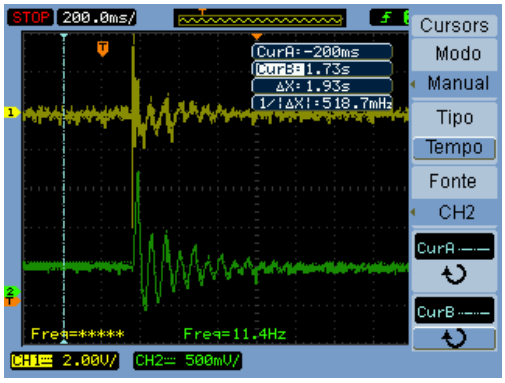


Figura 3.58 Imagem de sinais de resposta do sistema ao impacto obtida por acelerômetro (amarelo) e LVDT (verde) projetados na tela do osciloscópio.

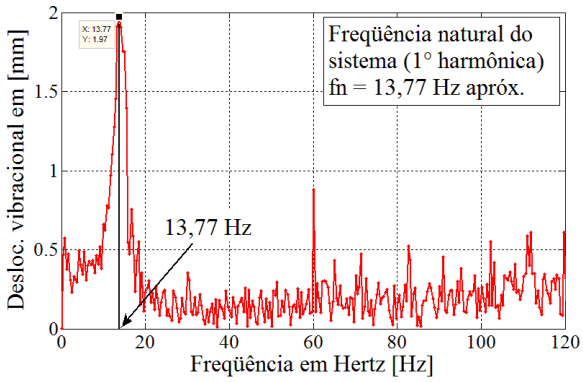


Figura 3.59 Espectro de freqüências do sinal de deslocamento livre amortecido, obtido por LVDT, mostrado através da Figura 3.58.

Aquistar sinais digitais com sensor dessa classe, amplamente utilizado na indústria, não só depende da precisão do sensor, mas, da forma como se instala para evitar resvalamento do seguidor do sensor no ponto de contato. O desvio dos valores de freqüência obtidos é da ordem de 18 a 22%. Considera-se relativamente alto para padrões de erro de sensibilidade eletrônica. Não obstante, em mecânica geral, sistemas dinâmicos estão sujeitos a problema de desalinhamento, desbalanceamento e ajustes, de uma maneira geral, sobretudo o sistema em estudo em seu caráter inicial de investigação.

A amplitude máxima de oscilação do sistema ao instante do golpe de martelo se pode obter conforme (Rao, 2009). A expressão para o deslocamento decrementar na forma de (Rao, 2009), provocada por impacto, ($F_{t-\tau}\Delta t = M\dot{X}(t-\tau)$), capaz de mudar o estado de movimento ou velocidade do sistema no tempo ($t = \tau$), permite, por aproximação, determinar a amplitude máxima da harmônica principal. É bastante tomar-se: (H = 0,257 m), altura de abandono do martelo; (m_m = 0,395 kg), massa do malho do martelo; (g = 9,81 m/s^2), aceleração gravitacional; (M = 4,7 kg), massa do sistema, e ($\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \approx \omega_n = 2\pi(13{,}77\ \text{Hz})$), frequência natural amortecida.

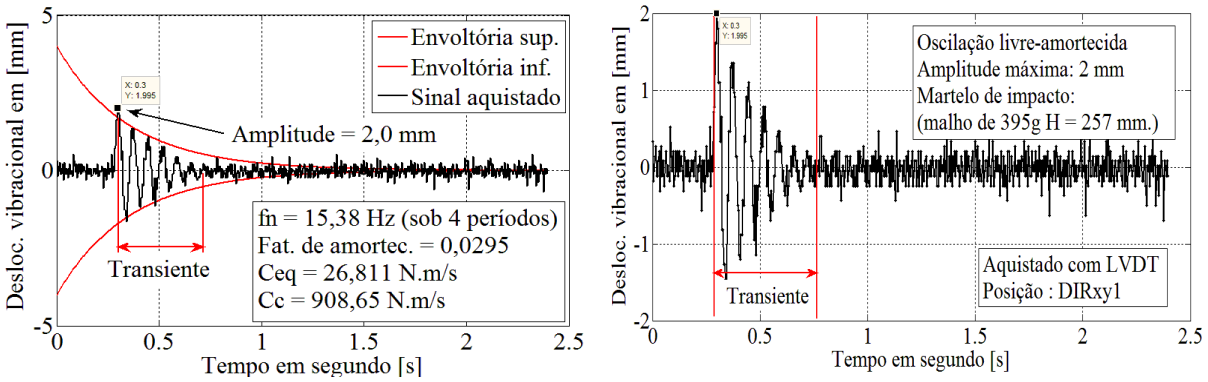
Dessa forma, considerando-se o sistema subamortecido, isto é, ($\zeta^2 \approx 0$), pode-se obter a amplitude máxima fazendo-se:

$$X_0 = \frac{F_{t-\tau}}{M\omega_d} \approx \frac{m_m}{M\omega_n}\sqrt{2gh} = \frac{0{,}395}{4{,}7x2\pi x13{,}77}\sqrt{2x9{,}81x0{,}257} = 2{,}18mm$$

Assim se obtém (X_0 = 2,18 mm), valor próximo obtido para a harmônica principal, mostrado através da Figura 3.59.

As figuras, Figura 3.60 (a) e (b), mostram o decaimento logarítmico de ampliude da vibração livre provocado por amortecimento estrutural, ou de histerese, através do qual se calcula, segundo Rao (2009), o fator de amortecimento e o coeficiente de amortecimento em termos de amortecimento viscoso. O valor baixo desse parâmetro caracteriza o sistema como subamortecido, sujeito à inversão total de fase entre força e deslocamento a freqüências acima da freqüência natural. Como consequência se tem redução de amplitude e nível de energia cinética transferida à massa fluídica.

A freqüência natural, segundo o método do decremento logarítmico, obteve-se sobre quatro períodos de oscilação amortecidos, resultando 14,08 Hz. O valor encontra-se na faixa de freqüência natural obtida por métodos supracitados, à exemplo do método da deflexão estática e da correção segundo Crede (1972).



(a) **(b)**

Figura 3.60 Gráficos de resposta ao impacto no tempo: a) Envoltórias do decremento logarítmico do deslocamento e tempo de duração de transientes; b) Gráfico da resposta no tempo ao impacto em maior escala.

Frequência obtida por decremento de amplitude se denomina, freqüência de pseudo-período. O valor diverge pouco do valor obtido quando se lhe mede através de osciloscópio (ETM_3). Isto provavelemente se deve ao número de períodos que o osciloscópio utiliza para

obtenção do valor médio. À medida em que a dissipação estrutural amortece o sistema, a onda sofre dispersão com aumento de período e diminuição de freqüência. O transiente de 0,5 segundos, aproximadamente, constitui o tempo necessário ao sistema, para que ele adquira regime permanente, como se mostrou anteriormente através das figuras, Figura 3.60 (a) e (b).

Por fim realizaram-se ensaios do sistema em vibração forçada, com o motor (ETV_4) em desbalanceamento rotativo (ETV_8). As figuras, Figura 3.61 (a), (b) e (c) diagnosticam.

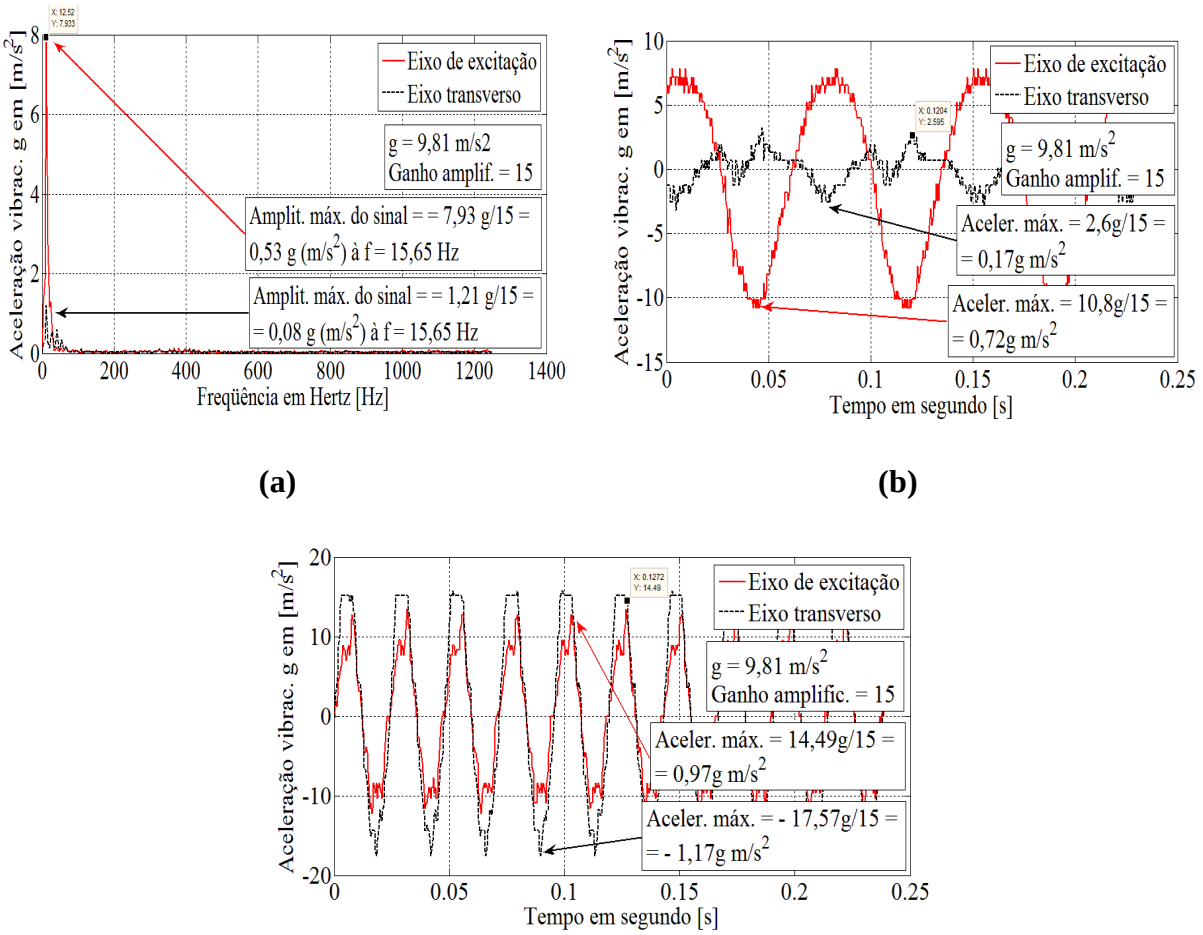


Figura 3.61 Espectro de freqüências e sinal de aceleração no tempo obtido através de sensor de aceleração (ETM_8) na posição DIR_{XY1}: a) Espectro de freqüências a proximadamente 14 Hz de excitação; b) Sinal de amplitude de aceleração no tempo à 14 Hz; c) Sinal de amplitude de aceleração no tempo à 47 Hz.

Freqüências operacionais foram controladas de acordo com o gráfico da Figura 3.34, item 3.3, Cap. 3. Abasteceu-se a cuba de água, de acordo com o volume de trabalho, para reproduzir condições operacionais. Realizou-se este ensaio para determinação do espectro de

harmônicas (freqüência e amplitude) apropriadas ao ensaio e avaliação de desempenho do sistema. A energia contida no movimento oscilatório deve produzir pertubação do conteúdo fluídico (efluente) adequada ao processo em estudo, de acordo com o disposto no ítem, 3.2.7.

As figuras anteriores, Figura 3.61 (a), (b) e (c), dão o diagnóstico de movimento da mesa vibratória. Frequências acima de 20 Hz auto-excitam o sitema. Obteve-se o valor do amortecimento estrutural equivalente viscoso pelo método do decremento logarítimo (Rao, 2009). Analiticamente pode ser calculado através de princípios de mecânica de corpos deformáveis (Morley, 1943) ou através de ensaios de deflexão estática do sistema, corrigido o problema da rigidez finita de apoios desenvolvido por (Crede, 1972).

Amplitudes de 2,4 mm e 2.39 mm, consideradas amplitude translacional de oscilação no ponto de tangência da trajetória circular (Figura 3.51), são aproximações que consideram o raio de curvatura da trajetória grande, se comparado ao deslocamento considerado de 2,4 mm. Um tratamento analítico mais rigoroso, do ponto de vista matemático, consideraria trajetórias de Legendre-Lissajous descritas em (Church, 1963). A Figura 3.61 (b) e Figura 3.61 (c) diagnosticam mudança de movimento de aproximadamente retilinear para rotacional.

Questões de instabilidade elástica do sistema (Morley, 1963) não se consideraram. Se constatou que o peso total do sistema em suspensão (P_G = 46,11 N) está abaixo da carga critica de flambagem da suspensão de acordo com a Equação (49).

O valor da freqüência de regime permanente (Figura 3.61 (a)) que se obteve através da Tranformada Rápida de Fourier (FFT), do sinal coletado via acelerômetro, é de 15,65 Hz, contra 14 Hz impartidos pela fonte controladora (ETM_4). A cuja curva de calibração se mostra através da Figura 3.35 (Item 3.3, Cap. 3). Comparando-se as figuras, Figura 3.61 (b) e (c), depreende-se que, a relativamente baixas freqüências, o sistema apresenta aceleração pequena na direção transversal à força de excitação (Figura 3.61 (b)), se comparado ao comportamento da mesa a freqüência de 47 Hz (Figura 3.61 (c)). A ordem de grandeza das componentes de aceleração, por conseguinte, de força, a 47 Hz, segundo a direção da força de excitação (curva em vermelho) é praticamente de mesma intensidade se comparada à componente transversal à mesa (Curva em preto). Isto sugere movimento da mesa dominantemente circular, quase circular ou curvo em circuito fechado.

Foram realizados exames com sensor de aceleração na posição (DIR_{XY2}). As figuras, Figura 3.62 (a), (b) e (c) mostram resultados que, juntamente com anteriores (Figura 3.61 (a), (b) e (c)), diagnosticaram necessidade de deslocar a coluna de tratamento do centro da mesa vibratória para a periferia do círculo de 75 mm, mostrado através das figuras, Figura 3.49 e

Figura 3.51, item 3.4. A finalidade é se lograr maior amplitude de deslocamento e espectro diversificado de comportamento do fluído em perturbação harmônica.

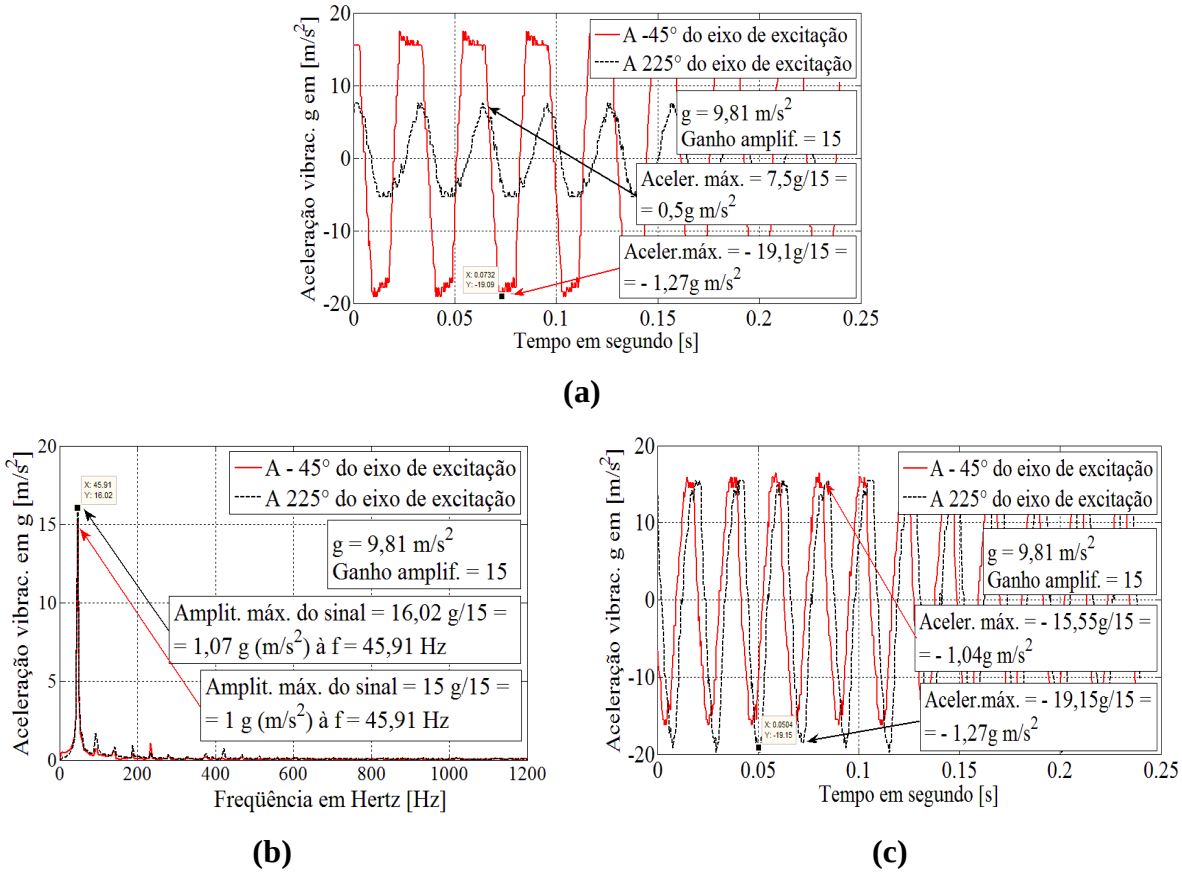
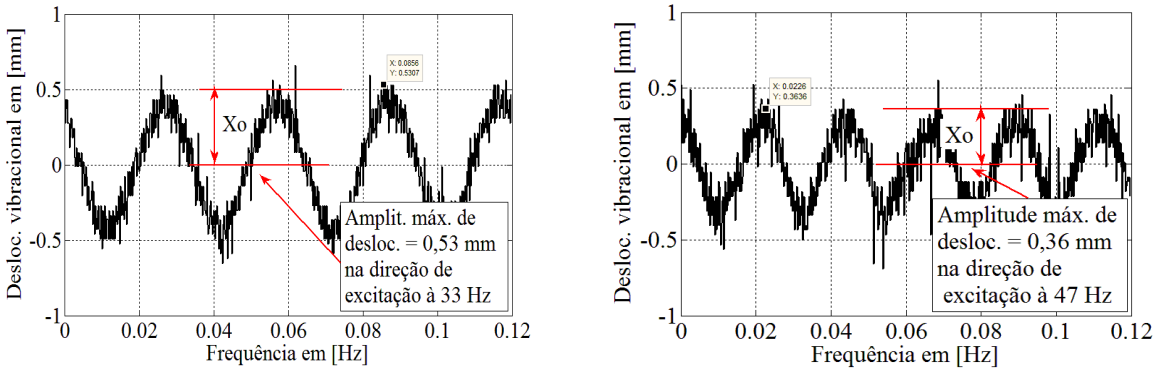


Figura 3.62 Espectro de freqüências e sinal de aceleração no tempo obtido através de sensor de aceleração (ETM_8) na posição DIR_{XY2}: a) Sinal de amplitude de aceleração no tempo à 33 Hz; b) Espectro de freqüências à excitação de 47 Hz aproximadamente; c) Sinal de amplitude de aceleração no tempo à 47 Hz.

Acelerômetros não captam sinais de deslocamento, mas, força e movimento da mesa vibratória em translação. A posição DIR_{XY2} que se ilustra, é referencial que tem por base a linha diagonal da mesa. Embora não se tenha realizado sistematicamente, é possível, com auxílio de estroboscópio, identificar o polo em torno do qual a mesa rotaciona ou translaciona. Com base em observações desse tipo determinou-se o raio de 75 mm traçado sobre a mesa e fixado ao centróide. Não constitui necessariamente, polo de rotação ou translação, exceto para freqüências em torno de 33 Hz quando o modo de vibrar é quase torcional puro. Através da Figura 3.62 (a) observa-se relativamente menor intensidade da aceleração no sentido diagonal (Curva em cor preta), embora não se possa afirmar que inexiste.

Observando-se a direção perpendicular à diagonal da mesa, pode-se depreender que o movimento é predominantemente torcional. A frequências mais elevadas, 47 Hz por exemplo,

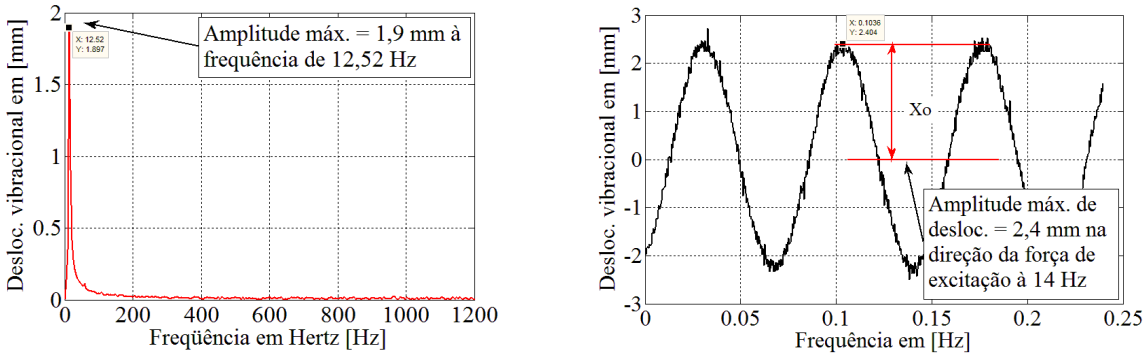
se pode ver, através da Figura 3.62 (c), que componentes de aceleração de mesma intensidade, indicam predominância do modo translacional de vibração. À luz estroboscópica, a trajetória da mesa torna-se visivelmente circular translacional e pode-se obtê-la analiticamente, como conjunção de trajetos harmônicos ortogonais (Church, 1963) ou figura de Legendre-Lissajous.



(a) **(b)**

Figura 3.63 Sinal de deslocamento obtido com LVDT (ETM_6) na posição DIR_{XY1}: a) Sinal de amplitude no tempo à 33 Hz; b) Sinal de amplitude no tempo à 47 Hz.

As figuras, Figura 3.63 (a) e (b), são sinais de deslocamento obtidos com LVDT na posição DIR_{XY1}. Observa-se amplitudes de 0,5 mm máximo para ambas freqüências de 33 Hz e 47 Hz. Isto mostra pouca tendência de movimento translacional em ambas freqüência. Com esta premissa se pode admitir dinâmica média de oscilação em trajetória quase circular com amplitude de deslocamento periférico dado pela Figura 3.64, Figura 3.65 e Figura 3.66. As fi-

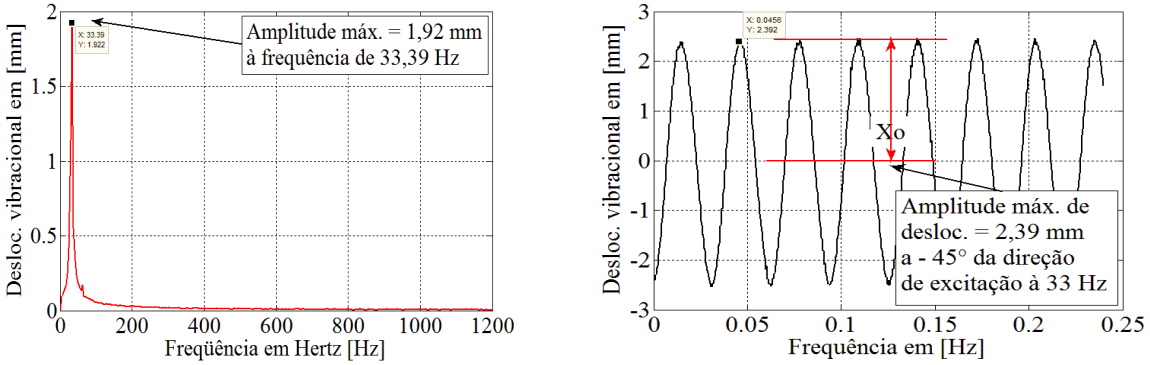


(a) **(b)**

3.64 Amplitude de deslocamento obtida com LVDT na posição DIR_{XY1} à 14 Hz: a) Espectro de freqüências da resposta; b) Sinal de deslocamento no tempo à 14 Hz.

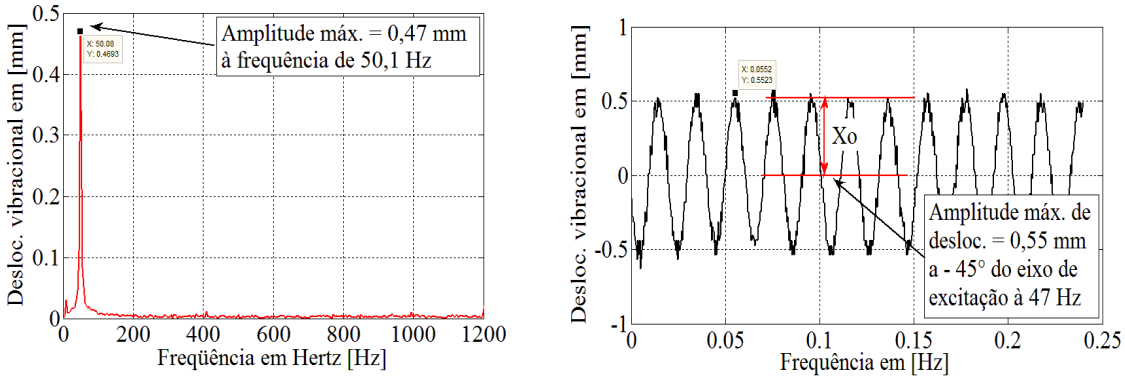
guras, Figura 3.64 (a) e (b), mostram, respectivamente, espectro de freqüências de regime permanente e sinal de deslocamento, de amplitude 2,4 mm aproximadamente, com LVDT na posição DIR_{XY1}.

À freqüência relativamente baixa mostrou-se anteriormente, de acordo com as figuras, Figura 3.61 (a), (b) e (c) e Figura 3.62 (a), (b) e (c), que auto-excitação é irrelevante. Sinais captados com acelerômetro nessa faixa de frequência contraria o que se constata a mais elevadas frequências. O movimento a frequência abaixo de 20 Hz permanece prioritariamente retilinear oscilatório, de negligível perturbação transversal.



(a) **(b)**

3.65 Amplitude de deslocamento obtida com LVDT na posição DIR_{XY2} à 33 Hz: a) Espectro de freqüências da resposta; b) Sinal de deslocamento no tempo à 33 Hz.



(a) **(b)**

3.66 Amplitude de deslocamento obtida com LVDT na posição DIR_{XY2} à 47 Hz: a) Espectro de freqüências da resposta permanente; b) Sinal de deslocamento à 47 Hz.

Admitiu-se, portanto, a posição DIR_{XY2} ideal para se obter sinal de deslocamento a freqüências de 33 e 44 Hz, e a posição $DIR_{XY1,}$ para 14 Hz. Serão amplitudes de referência

para cálculo analítico de velocidade de partículas dispersas no efluente, segundo Blekhman (2003) e Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005). As figuras, Figura 3.65 (a) e (b) e Figura 3.66 (a) e (b) mostram o espectro de frequências e sinais de deslocamento a 33 e 47 Hz.

Cabe ressaltar que a amplitude de harmônicas de estado permanente do espectro surgem menor, de forma quase sistemática, em todas as tranformações lineares processadas com auxílio da *(FFT – Fast Fourier Transform*). Isto provavelmente se deve a erro associado à implementação computacional, aquisição de sinais ou determinação de escala de aquisição e exibição de sinais com auxílio de osciloscópio. Contudo deslocamentos orbitam tais valores com aceitável aproximação.

3.5 Velocidade admitida para partículas dispersas nos processos analisados

No item 3.3 mostra-se na íntegra, a metodologia que se empregou para concepção do sistema, sob o signo da conformação mecânica, geométrica e de relações com o fenomeno de ondulação fluídica superficial. No ítem 3.4 mostrou-se o monitoramento necessário, como parte integrante da metodologia para especificação técnica do sistema, essencial à análise de desempenho e compreensão da fenomenologia investigada.

Procurou-se mensurar o fenomeno fluídico superficial ondulatório em perturbação. Realizou-se controle com auxílio de estroboscópio para evidenciar parâmetros característicos de ondas que tem lugar, propagadas por perturbação de freqüência conhecida. Com auxílio da Figura 3.4, item 3.2.3, é possível admitir-se um comprimento médio de onda à correspondente freqüência por padronização da imagem através de *software* captor e analizador de imagem. Adicionalmente se pode confrontar dados obtidos da cotagem geométrica da cuba do sistema (Figura 3.22 e Figura 3.23, item 3.2.6), onde se aloja o volume fluídico efluente.

Através da literatura recorrente, especializada, em que autores preocupam-se com a plenitude fisica e matemática da descrição de fenomenos que direta ou indiretamente guardam correlação, procurou-se absorver a natureza quantitativa da descrição analítica realizada por estes autores. A exemplo cita-se o estudo sobre desintegração de elemento disperso realizado por Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005), estudo sobre eclosão de bolha de ar de Duchemin *et al*., (2002) e estudo da velocidade de ascensão de uma bolha de ar de Goldman (2009) e Clift; Grace; Weber (1978). Por fim, realizaram-se ensaios de dinâmica vibracional com vista à caracterização do movimento oscilatório do sistema e identificação de deslocamento quando

se empreende dadas e determinadas freqüências de excitação. Dados foram captados na forma de sinal digital com sensores de aceleração (Acelerômetro) e de deslocamento (LVDT).

A seguir sumariza-se parâmetros importantes para análise de desempenho da técnica investigada. Adicionalmente ilustra-se, de forma esquemática adiante, Figura 3.67, página 135, processo e aparato experimental desenvolvidos. Até aqui estabeleceram-se parâmetros de análise à exemplo de vazão, freqüência e amplitude correspondente. Tais parâmetrosforam obtidos através de ensaio do sistema com água, condição operacional bastante aproximada, com imprescindível auxílio de sensores dinâmicos apropriados em se tratando de frequência e amplitude. Os seguintes parâmetros, vazão, velocidade de partículas dispersas e amplitude de vibração são médios e, por extensão, considerados para a dispersão (Efluente):

- Deslocamentos e freqüência correspondente: 2,4 mm (14 Hz); 2,39 mm (33 Hz) e 0,55 mm (47 Hz) de acordo com o item 3.4 Cap.3.
- Vazão de efluente: 3,5 mℓ/s, 7,5 mℓ/s e 10 mℓ/s de acordo com o item 3.3.
- Parâmetros de onda superficial, de acordo com o item 3.2.3 e 3.2.7, Cap.3, Figura 3.4 e Figura 3.28, respectivamente: 14 Hz ($H = 0{,}012\ m,\ \lambda = 0{,}054\ m$), 33 Hz ($H = 0{,}0075\ m,\ \lambda = 0{,}033\ m$) e 47 Hz ($H = 0{,}00175\ m,\ \lambda = 0{,}0071$).
- Velocidade de propagação admitida para o fluído e por extensão, à partículas dispersas de acordo com o item 3.2.7, considerados, ($\phi_b = 50\ \mu m = 5x10^{-5}\ m$) diâmetro médio de partícula, ($\phi_a = 1000\ \mu m = 1x10^{-3}\ m$) diâmetro médio de bolhas de ar conforme item 3.2.7, Figura 3.28, Cap.3, ($\mu_{v\ água} = 10^{-3}\ N/s.m^2$) viscosidade da água por aproximação com a viscosidade do efluente, ($V_g = \pi\phi_g^3/6 = 6{,}545x10^{-11}\ m^3$) volume de uma gota de óleo, ($M_g = 5{,}66x10^{-8}\ kg$) massa média de uma gota de óleo, ($\rho_{óleo} = 865\ kg/m^3$) e ($A_{ads} = 0{,}0026\ m^2$) área do plano-médio adsorvente de acordo com o item 3.2.6, Cap.3, Figura 3.23.

Cabe ressaltar que admitir-se-á como uma das componentes da velocidade de choque entre partícula e labirinto adsorvente, a velocidade de elevação da interface fluídica, ilustrada através da Figura 2.37, item 2.5.3, Cap.2. Segundo Krogstad & Arntsen (2000) a velocidade vertical da paríticula pode ser obtida através da Tabela 2.3, item 2.5, Cap.2, considerando-se a coordenada (z = 0). Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005), item 2.5.2, Cap.2, propõem a Equação (39) e Equação (41) para obtenção da velocidade da parícula dispersa. Neste último caso cabe importante ressalva de natureza física; observando-se a expressão dos autores (Equação (41)), a amplitude da partícula (X_g) guarda relação de magnitude com a amplitude de oscilação do

fluído dependendo de características físicas do elemento disperso. Pode-se escrever a referida expressão de outra forma:

$$\frac{X_g}{X_0} = \frac{X_0^*}{\sqrt{1+X_0^{*2}}} \text{ , com } X_0^* = 3\pi\mu\phi_g/m\omega \qquad \text{Repetida (41)}$$

Atribuindo-se ao segundo membro da Equação (41 – Repetida) o nome, fator de amplitude relativa entre disperso e dispersante, e, X_o*, a capacidade da partícula de reagir a oscilações do meio, os autores reportam relações para o fator de amplitude, quando a partícula sólida pesar mais que o fluído (X_g/X_0) > 4; do contrário, (X_g/X_0) < 4. Como exemplo cita-se o carvão ($\rho_{carvão}$ = 1350 kg/m^3) e óleo ($\rho_{óleo}$ = 865 kg/m^3); quando o diâmetro-médio é abaixo de 60 μm, à frequência abaixo de 100 Hz, é impossível desagregarem-se. Isto é importante como garantia de que na faixa de frequência em estudo a emulsão não recrudescerá por vibração. Além do mais se garante que na faixa de frequência em estudo, gotículas de óleo provavelmente oscilarão em fase com o fluído uma vez que, ($X^*_{0\,carvão}$ = 1,04/f e $X^*_{0\,óleo}$ = 1,34/f), ou seja, em qualquer das frequências utilizadas ter-se-á (X_0^* < 4).

Portanto, sob quaisquer princípios citados como referência, ou através da Tabela 2.3, ou da Equação (39) e Equação (41), é razoável se tomar a velocidade da partícula por: $\dot{Y}g = 4\pi f Y_0$, com $Y_0 = H$ fornecidos anteriormente. Isto está de acordo com Blekhman (2003). Então:

$$\dot{Y}g_{14} = 4\pi \times 14 \times 0{,}012 \quad \dot{Y}g_{14} = 2{,}10 \text{ m/s}$$
$$\dot{Y}g_{33} = 4\pi \times 33 \times 0{,}0075 \quad \dot{Y}g_{33} = 3{,}12 \text{ m/s}$$
$$\dot{Y}g_{47} = 4\pi \times 47 \times 0{,}00175 \quad \dot{Y}g_{47} = 1{,}04 \text{ m/s}.$$

A velocidade máxima da interface cabe destacar, ocorre no ponto de equilíbrio do movimento oscilatório (Figura 2.37, item 2.5.2, Cap. 2). A interface cruza-o duas vezes por ciclo. Admite-se, portanto, em deorrência, que partículas de óleo desenvolvam igual movimento em ciclo fluídico orbital (Figura 2.32 (a), item 2.5.1, Cap. 2). Cabe lembrar tratar-se de aproximação de velocidade para um sistema naturalmente caótico (Figura 3.27 e 3.30 (b)) cuja tendência acredita-se ser ainda maior que a admitida. Isto se explica com base no adsorvente metálico operar como obstáculo submerso, demonstrado por Acheson (1990), Figura 2.31, item 2.5.1, Cap. 2. Depreende-se que a intererência não se dá no sentido de diminuir a velocidade de fase e igualá-la a velocidade de grupo, mas, no sentido de aumentar a relação entre o comprimento de onda (λ) e dimensão da cavidade movida pelo sistema vibratório.

Outras componentes de velocidade que se somam às já discutidas são a velocidade de ascensão das bolhas por impuxo e correnteza e avanço da interface devido à eclosão de bolhas de ar, sobretudo quando se chocam com o adosrvente. A esse respeito pode-se considerar:

- Velocidade vertical da partícula segundo Lamb (1932) à frequência de 61 Hz em vibração horizontal para fim de comparação: $\dot{Y}g_{61} = 0,3$ *m/s.*
- Velocidade devido à eclosão de bolhas de ar conforme Figura 3.31, item 3.2.7, Cap.3. Segundo Duchemin *et al.*, (2002), $\dot{Y}g = 1,44$ *m/s*; segundo Zeff *et al.*, (2000), $\dot{Y}g = 2,72$ *m/s*, conquanto afirmam que nas condições de ensaio, velocidades podem atingir valores mais elevados. Utilizar-se-á o valor mediano ($\dot{Y}g = 2,0$ *m/s*). Deve-se esclarecer que a singularidade superficial oriunda da emboscada de uma bolha de ar para eclodir e ejetar gota foi obtida por geração de onda de Faraday em vibração vertical.
- Velocidade de carreação por ascensão de bolhas de ar devido ao empuxo de Arquimedes, quando há geração de microbolhas. Neste caso considerar-se-á, de acordo com Clift; Grace; Weber (1978) e Goldman (2006), Equação (44), item 2.5.2, a velocidade terminal de ascensão da bolha de ar. Para tal se despreza o efeito de pulsação de Minnaert (1933) e arrasto vibracional de Björkness (1909), Equação (42), item 2.5.1, Cap.2:

$$\dot{Y}_g = \frac{2}{3}\sqrt{\frac{g\phi_b}{2}} = 0,05 \text{ m/s}$$

Então, $\dot{Y}_g = 0,05$ *m/s, para* $\phi_b = 10^{-3}$ *m e* $\dot{Y}_g = 0,07$ *m/s para* $\phi_b = 2x10^{-3}$ *m.*

- Velocidade devido à correnteza da vazão, considerando-se estricção de 3% proporcionada pela presença do adsorvente. Nos ensaios a flotação natural (*Auto-flotação*) a estricção é de 1,5% devido à utilização de metade da carga de adsorvente (5,5g em média). Portanto:

$\dot{Y}g = 10^{-6}.Q_{ef}\,(m\ell/s)/A_{ads}.0,970 \qquad \dot{Y}g = 3,97x10^{-4}.Q_{ef}\,(m\ell/s)$

$\dot{Y}g = 10^{-6}.Q_{ef}\,(m\ell/s)/A_{ads}.0,985 \qquad \dot{Y}g = 3,9x10^{-4}.Q_{ef}\,(m\ell/s)$

onde Q_{ef} se mede experimentalmente ao término de ensaios.

O conjunto de parâmetros definidos teórica e experimentalmente com base no que foi exposto nesta discussão pode ser sumarizado através das expressões a seguir, para cada modalidade de ensaio a ser executada, através da Equação (48), item 3.2.7, Cap.3. Em suma, frequência de excitação e velocidade admitida para gotículas de óleo em função da vazão efetiva são agrupadas abaixo; a metodologia de ensaio se delineará no próximo tópico. Com base na equação geral para velocidade (Equação (48)) pode-se escrever a forma generalizada do modelo de velocidade admitida para partículas dispersas:

$$<\dot{Y}g> = [\dot{X}g]_{inércia} + [\dot{Y}g]_{vazão} + [\dot{Y}g]_{eclosão} + [\dot{Y}g]_{empuxo} \qquad \text{Repetida (48)}$$

Com base nas três modalidades de ensaios que integram o procedimento experimental pode-se elencar diversos modelos médios de velocidade com base no modelo da Equação Repetida (48), em função da frequência de excitação e vazão efetiva a ser medida ao término de cada ensaio:

- Ensaio com vibração e flotação induzida (*Vibra-flot*):
  $<\dot{Y}g> = [\dot{X}g]_{inércia} + [\dot{Y}g]_{vazão} + [\dot{Y}g]_{eclosão} + [\dot{Y}g]_{empuxo}$

  14 Hz: $<\dot{Y}g> = 4{,}15\ m/s + 3{,}97x10^{-}4.Qef\ (m\ell/s)$ (50)

  33 Hz: $<\dot{Y}g> = 5{,}17\ m/s + 3{,}97x10^{-}4.Qef\ (m\ell/s)$ (51)

  47 Hz: $<\dot{Y}g> = 3{,}09\ m/s + 3{,}97x10^{-4}.Q_{ef}\ (m\ell/s)$ (52)

- Ensaio com vibração sem flotação (*Vibra*):
  $<\dot{Y}g> = [\dot{X}g]_{inércia} + [\dot{Y}g]_{vazão}$

  14 Hz: $<\dot{Y}g> = 2{,}10\ m/s + 3{,}97x10^{-4}.Q_{ef}\ (m\ell/s)$ (53)

  33 Hz: $<\dot{Y}g> = 3{,}12\ m/s + 3{,}97x10^{-4}.Q_{ef}\ (m\ell/s)$ (54)

  47 Hz: $<\dot{Y}g> = 1{,}04\ m/s + 3{,}97x10^{-4}.Q_{ef}\ (m\ell/s)$ (55)

- Vibração com flotação natural ou, *autoflotação* (*Vibrauto-flot*):
  $<\dot{Y}g> = [\dot{X}g]_{inércia} + [\dot{Y}g]_{vazão} + [\dot{Y}g]_{eclosão} + [\dot{Y}g]_{empuxo}$

$$14\ Hz: \quad \langle \dot{Y}g \rangle = 4{,}14\ m/s + 3{,}9x10^{-4}.Q_{ef}\ (m\ell/s) \tag{56}$$

$$33\ Hz: \quad \langle \dot{Y}g \rangle = 5{,}17\ m/s + 3{,}9x10^{-4}.Q_{ef}\ (m\ell/s) \tag{57}$$

$$47\ Hz: \quad \langle \dot{Y}g \rangle = 3{,}09\ m/s + 3{,}9x10^{-4}.Q_{ef}\ (m\ell/s) \tag{58}$$

Por fim, através da Figura 3.67 a seguir, pode-se observar processo e aparato experimental de forma esquemática, do estudo desenvolvido.

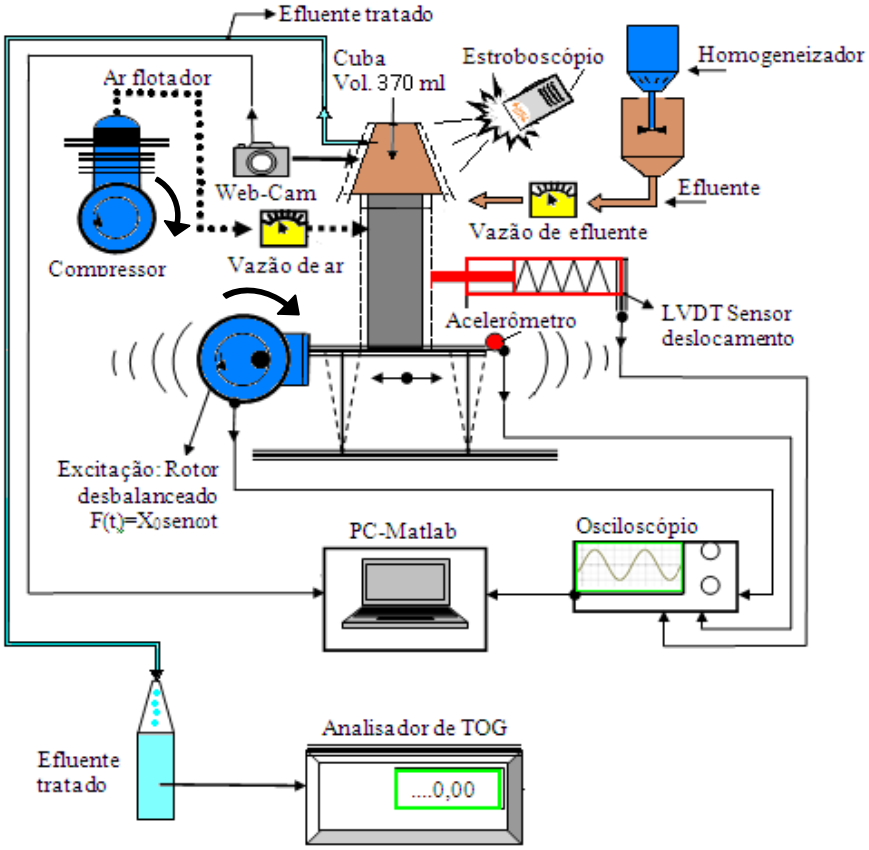


Figura 3.67 Representação esquemática do sistema e processo desenvolvidos.

3.6 Metodologia de ensaio do sistema

Neste tópico descreve-se a metodologia de ensaio que se empregou para avaliação de desempenho do sistema. Mostra-se adicionalmente, diligência necessária ao processo de medição e o registro lógico de dados aquistados. Para obtenção do conjunto de dados foram utilizados métodos de medição direta, analógica e digital, a exemplo de vazão de ar e de efluente, pesagem de adsorventes, frequência, voltagem, amperagem, pH e tempo de fluxo. São parâ-

metros de medição direta importantes para avaliação do dispêndio energético, das vazões operacionais efetivas, do tempo de retenção do efluente, do nível de impregnação de óleo no adsorvente e da concentração média de óleo do efluente, antes e após o tratamento.

Medições não menos importantes, não incluídas dentre as que se citou anteriormente, dizem respeito à concentração de óleo inicial e final (TOG) e gravimetria de óleo impregnado em equimentos do sistema. Em verdade esta última constitui parte do processo de medição do teor de óleo e graxa, realizado via combinação do método de absorção no infravermelho, com equipamento Horiba – 350 (Extrator: clorofórmio) com gravimetria-média de impregnação de óleo em componentes do sistema. O processo depende da inferência quantitativa média de óleo semeado na preparação da emulsão sintética. Também foram realizadas análises através do método de Soxhlet, para fins de confronto de resultados de estimação de teor de óleo e graxa final (TOG_f) quando valores do teor situavam-se acima de 10 mg/ℓ. O conjunto experimental construído mostra-se integralmente a seguir, através da Figura 3.68.

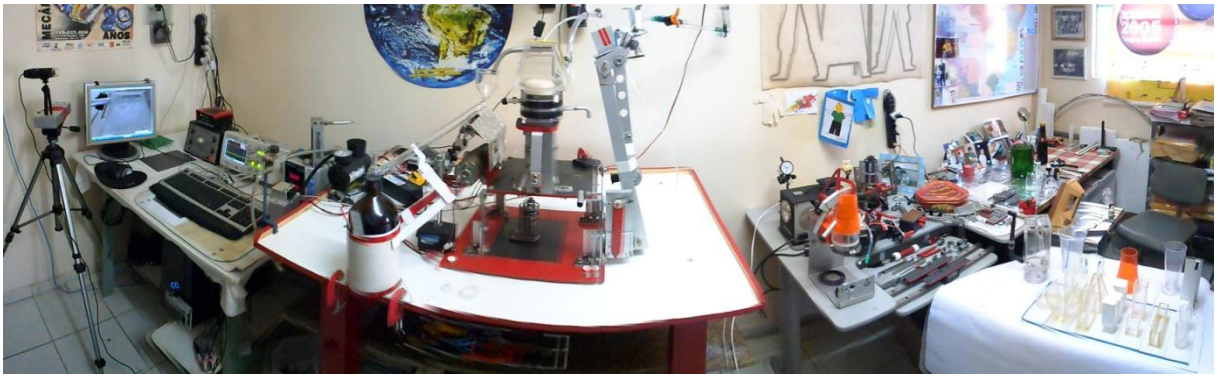


Figura 3.68 Imagem angular do conjunto experimental.

Criou-se fluxograma ilustrativo do processo, mostrado a seguir, de acordo com (Maribondo, 2000). Através do fluxograma (Figura 3.69) mostra-se, esquematicamente, fluxo e monitoramento de operações, da preparação do efluente sintético à coleta de efluente tratado.

Modalidades de tratamento empregadas foram definidas de forma a se obter o mais amplo conjunto de dados que permita criteriosa avaliação do processo. Foram definidas três modalidades operacionais com uso de vibração, flotação e *autoflotação* (Flotação natural):

- Tratamento em vibração com flotação induzida desigado, *Viba-flot* (FRV)
- Tratamento em vibração sem flotação designado, *Vibra* (SF)
- Tratamento em vibração com *autoflotação* designado, *Vibrauto-flot* (AUT)

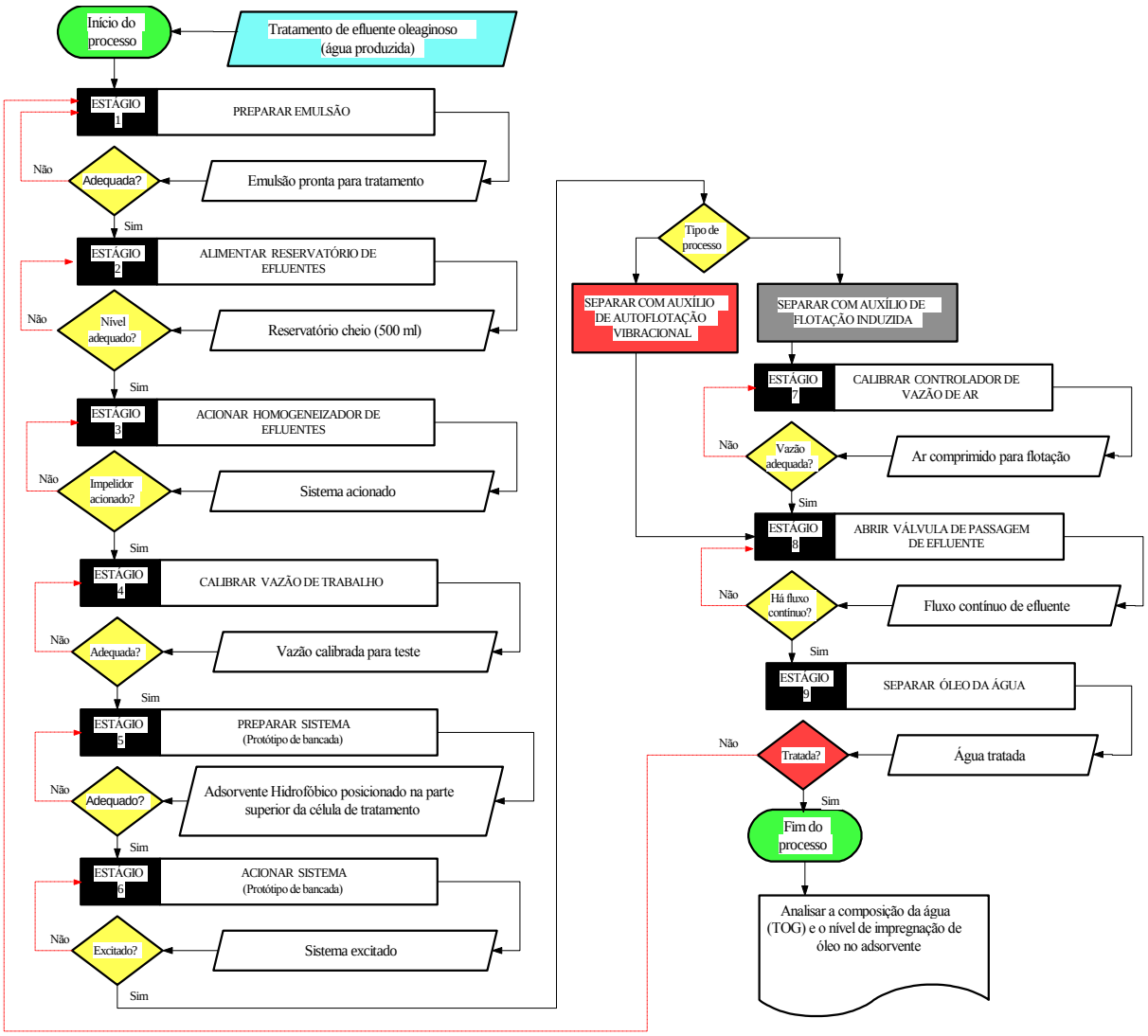


Figura 3.69 Fluxograma de operações empregadas na metodologia de ensaio do sistema segundo Maribondo (2000).

Utilizam-se três modalidades operacionais com objetivo de estabelecer parâmetros de referência que permitam discernir sobre o desempenho do processo vibracional. Noutras palavras, se deve investigar, sobretudo, até que ponto vibração, flotação ou conjunção de ambas, influencía resultados do processo de separação, óleo de água. Neste sentido passa-se a considerar fator operacional utilização ou não de vibração e de flotação, induzida ou natural. Essas modalidades operacionais são ensaiadas em variações de amplitude frequência de excitação e vazão de efluente.

A metodologia utilizada para aferição de desempenho do processo dentre outros fatores relacionados, constitui-se de medições (Precisão de 0,1 mg), com auxílio de balança digi-

tal (ETM_{14}), da variação de peso de unidades metálicas adsorventes, com relação ao peso inicial, correspondente à intensidade de impregnação de óleo. Valores de TOG foram obtidos para auxiliar a estimativa do nível de impregnação de óleo e eficiência propriamente dita. Para tal se mediu o TOG do efluente sintético à entrada da cuba de tratamento, em quatro operações. Mediu-se também o TOG do efluente tratado, em dez ensaios selecionados divididos em grupos de um, dois, três e quatro ensaios sequenciais. Objetiva-se, dentre outros aspectos, inferir impregnação de óleo em equipamentos e a influência do número de ensaios sequenciais, neste estudo, limitado a quatro. Falou-se no início que o número elevado de medições de TOG em condições normais, aumentaria significativamente o custo experimental.

De acordo com o fluxograma da Figura 3.69, enumera-se e se descreve o processo metodológico de ensaio em passos: 1. Preparação da emulsão sintética; 2. Preparação, acondicionamento de adsorventes e instalação; 3. Abastecimento do homogeneizador e seleção de parâmetros operacionais (Vazão e frequência); 4. Execução do tratamento; 5. Finalização do tratamento, leitura e registro de parâmetros obtidos (Tempo, TOG, volume efetivo, voltagem e corrente); 6. Remoção de adsorventes para secagem e esvaziamento da cuba; 7. Agrupamento lógico de resultados de ensaio; 8. Medição de impregnação de óleo no equipamento, estimativa do TOG inicial e limpeza.

3.6.1 Preparação de emulsão sintética

Verteu-se água produzida cuidadosamente para evitar adição de sedimentos de petróleo e areia aglomerados, decantados ao fundo, facilmente emergíveis à agitação mínima. Volumes de 1.300 mℓ de emulsão sintética foram preparados para cada ensaio realizado. O volume efetivo da cuba é 370 mℓ. Esta corresponde à quantidade retida na cuba ao final de cada experimento devido à alimentação gravitacional, e descarga de efluente tratado, ser realizada por ducto instalado na parte superior da cuba.

O conjunto de análises para exame de desempenho da técnica foi definido segundo três modalidades básicas de tratamento citadas anteriormente. Para tornar a emulsão mais próxima de emulsões reais, foi utilizada água produzida de baixo TOG (1,5 a 2,5 mg/ℓ) como meio dispersante, oriunda da extração de tratamento, Petrobrás-Guamaré – RN. O valor do TOG obteve-se pelo método de absorção no infravermelho com extrator à base de clorofórmio em duas medições. Como poluente disperso em emulsão utilizou-se óleo para diferencial automotivo de antigos caminhões-carreta, de relativamente alta viscosidade ($\mu_{óleo} \approx 5.723 \pm 25$

cP). O valor da viscosidade obteve-se da média de sete medições efetuadas a 25°C, com viscosímetro (ETM_{23}). As figuras, Figura 3.70 e Figura 3.71, mostram, respectivamente, amostra de óleo utilizado, em processo de medição de viscosidade com viscosímetro (ETM_{23} – Brookfield), e sais surfactantes segregados da água produzida após evaporação natural.

Surfactantes existentes em água produzida atuam como fortes estabilizadores de emulsão óleo/água, dificultando a separação. O pH dos volumes de emulsão foi devidamente monitorado a cada ensaio, antes de ser processada conservação das amostras com ácido. Observou-se que valores de pH situaram-se entre 8,0 e 9,3 durante todos os ensaios. Os valores encontram-se nas tabelas de resultados (Tabela 2.4, Tabela 2.5 e Tabela 2.6).

Um dos princípios da técnica em estudo é a obtenção de efluente tratado sem adição de coagulantes, floculantes ou soluções ácidas e isso se atesta através de valores de pH medidos a cada ensaio. Sabe-se que acidificação atua como coadjuvante de tratamento e favorece a desestabilização de emulsões. O agravante é serem não menos poluentes que o disperso, além de deixarem resíduo prejudicial à água tratada e ao óleo recuperado.

Figura 3.70 Medição de viscosidade do óleo com viscosímetro Brookfield.

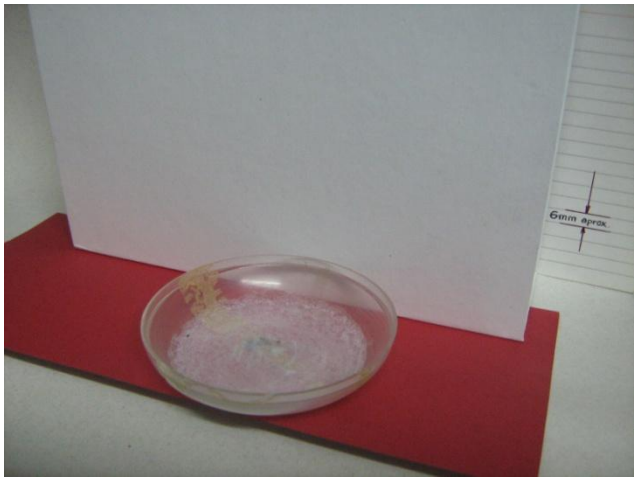


Figura 3.71 Sais surfactantes da água produzida utilizada como dispersante.

A emulsão óleo em água produzida foi realizada através da semeadura de gotas de massa calibrada por pipetas (ETM_{24} e ETM_{25}), conforme Figura 3.72 (b) na próxima página. A média sobre dez pesagens sucessivas resultou aproximadamente, 200 mg (Figura 3.72 (c)), pressionando-se o bulbo de borracha (ETM_{24}) e, 50 mg (Figura 3.72 (a)), por desprendimento gravitacional para os respectivos tipos. A Figura 3.72 (a) e Figura 3.72 (c) mostram óleo gote-

jado segundo o padrão de calibragem definido. Para obter emulsão com concentração de óleo entre 400 mg/ℓ e 500 mg/ℓ foram abandonadas duas gotas de 200 mg, e duas gotas de 50 mg, aproximadamente, sobre a superfície líquida. Realizaram-se medições prévias de impregnação realizadas para determinação média da massa da gota a ser semeada para obtenção de emulsão sintética com concentração inicial 450 mg/ℓ. Isto é objeto de discussão em tópicos adiante.

Após o gotejamento, deixou-se o óleo repousar por alguns minutos para que se processasse drenagem fluídica natural por água salobre. O intuito é regularizar a camada sobrenadante de óleo e diminuir a incidência de impregnação no eixo do impelente misturador.

(a) **(b)** **(c)**

Figura 3.72 Elementos de semeadura de gotas de óleo para análise: a) Gota de 50 mg médios; b) Padrões de pipeta utilizados; c) Gotas de 200 mg médios.

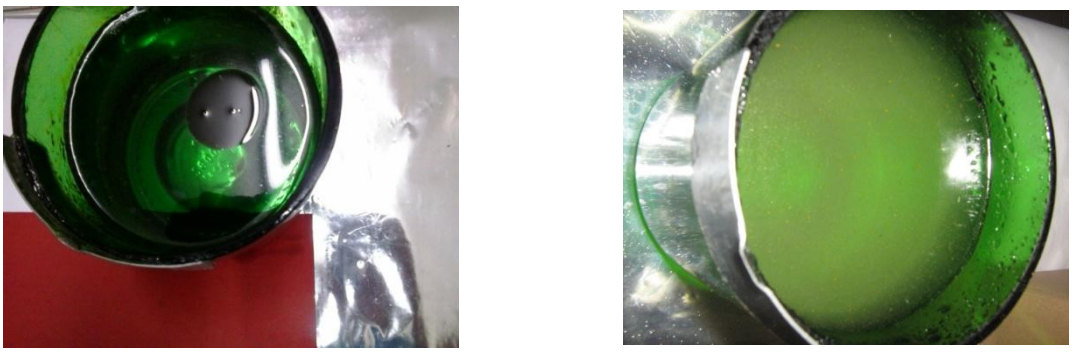
Para processamento da mistura utilizou-se batedeira doméstica (Fabricante Arno) de 830 rpm, medidos com estroboscópio (ETM_{17}). Impelentes da batedeira foram adaptdos com lâminas convexas (Concavidade voltada para fora) para facilitar escoamento de óleo por ação centrífuga e atenuar o problema de impregnação. Se construiram e se testaram, vários impelentes sendo este modelo, o que menor incidência de impregnação de óleo apresentou. A Figura 3.73, (a) à página seguinte, mostra impelentes testados dos quais, ao centro, se mostram impelentes de lâminas convexas.

À extremidade esquerda da mesma figura, mostram-se impelente de facas e, à direita, impelente *Stirrer* a conta-fluxo. Através da Figura 3.73 (b) mostra-se um preparador industrial de emulsões (SIEHE™ Mechanical & Electrical, 2013) capaz de fragmentar gotas de óleo em emulsão em valores abaixo de 10 μm. Através da Figura 3.73 (c), demonstra-se a preparação de um volume de 1.300 mℓ de emulsão sintética para ensaio cujo valor se estabeleceu com base no volume da cuba de tratamento e no volume morto que resta após o abastecimento gravitacional.

(a) **(b)** **(c)**

Figura 3.73 Preparação de emulsão de teste: a) Três modelos de impelentes construídos ou adaptados para preparação de emulsão; b) Modelo de impelente laboratorial SIE-He^{TM} industrial; c) Demonstração de preparação durante ensaios realizados.

O reservatório utilizado para preparação de emulsões se fez em vidro com 1.550 mℓ de capacidade. Durante a geração de emulsão óleo em água, movimento oscilatório ascendente e descendente da batedeira foi realizado para evitar acúmulo superficial de óleo. A Figura 3.74 (a) mostra, em vista superior, reservatório, água e gota de óleo semeado em processo de drenagem. A Figura 3.74 (b) mostra a emulsão sintética após ação cisalhante do impelidor.



(a) **(b)**

Figura 3.74 Semeadura de óleo sobre água produzida para preparação de emulsão: a) Antes do cisalhamento mecânico; b) Emulsão formada e pronta para teste.

Realizou-se microscopia de amostras de emulsão para avaliação do tamanho médio de gotas de óleo com auxílio de equipamento eletrônico (ETM_{16}). Através da Figura 3.75 mostra-se a o resultado da microscopia realizada. No item 2.2.2, Cap.2, foram apresentados aspectos

relevantes do estudo de emulsões e coloides. Sabe-se que diligente caracterização de emulsão requer determinação estatística da distribuição de tamanho de gotas (NDTG).

Na literatura recomendada, Rodrigues & Rubio[b] (2003) e Moruzzi (2007) propõem métodos elaborados de caracterização de emulsão. Observou-se o tamanho médio de gota característico de emulsão semelhante, ou representativa, de situações usuais em produção de petróleo. Rodrigues & Rubio[a] (2003) desenvolveram e investigaram a eficiência de uma unidade de flotação a gás dissolvido. Utilizaram emulsão com diâmetro médio de gota entre 10 e 70 μm. Com base na Figura 3.75, o valor médio de 50 μm foi admitido como diâmtero de gota.

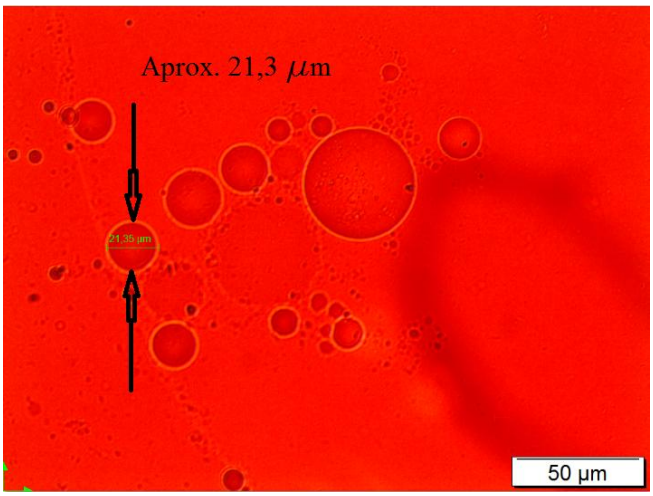


Figura 3.75 Micrografia de amostra de emulsão preparada para ensaio.

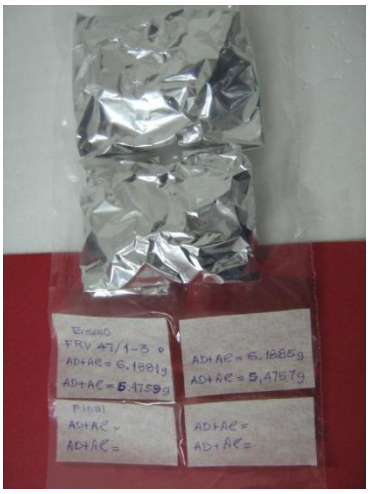
3.6.2 Preparação, acondicionamento de adsorventes e instalação

Seccionou-se o novelo adsorvente aproximadamente à metade, em porções de mais ou menos 5,5g e 6,0g, com pequena diferença. A diferença auxilia se identificar troca durante a secagem (Figura 3.76 (a)). Pesou-se cada unidade do par com precisão 0,1mg (ETM_{14}) como se mostra através da Figura 3.76 (b) na página seguinte, e se acondicionou em papel alumínio quadrado (120 mm x 120 mm) pesando em média, 0,7283g.

O peso médio de cortes de papel alumínio é abatido para efeito de estimativa da área superficial de cada par adsorvente de acordo com a Tabela 1 do Apêndice. Um par adsorvente metálico preenche a parte superior da cuba cuja cavidade é definida como célula adsorvente, de acordo com a Figura 3.23, item 3.2.6, Cap. 3. O par adsorvente após acondicionamento e pesagem foi embalado em bolsa plástica etiquetada, mostrado através da Figura 3.76 (c).

(a)

(b)



(c)

3.76 Preparação de pares adsorventes: a) Seção; b) Pesagem e etiquetagem; c) Embalagem de pares adsorventes acondicionados prontos para ensaio.

Ao início de cada ensaio desembala-se e instala-se o adsorvente para composição da célula adsorvente, como se mostra na página seguinte através da Figura 3.77. A montagem aplica-se a ensaios de tratamento em vibração com flotação induzida (FRV), e ensaios de tratamento em vibração sem flotação (SF). Ensaios de tratamento em vibração com flotação natural (AUT – *Vibraut-Flot*) recebem um adsorvente apenas, apoiado sobre nervuras da cuba. A disposição se fez em forma de lençol plano, com espaço livre acima, à entrada do tubo de descarga, para que se não bloqueie a entrada de ar da cuba, necessário à flotação natural.

Quando se instala o adsorvente conforme a Figura 3.77 a célula é completamente inundada. Entrada de ar somente se verificará por indução com compressor de ar e isto possibilita realizar tratamentos, *Vibra-flot* e *Vibra*.

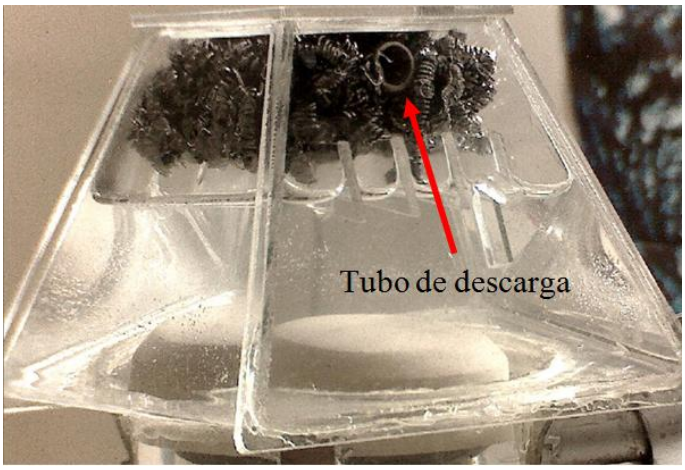


Figura 3.77 Cuba de tratamento pronta para ensaio (FRV e SF).

3.6.3 Abastecimento do homogeneizador

Finalizada a preparação da emulsão e adsorventes, e a instalação de adsorventes na célula de tratamento, procedeu-se o abastecimento da cuba e postura do sistema em operação tantas vezes quanto foram os ensaios. Selecionou-se a vazão definida para ensaio segundo o gráfico, Figura 3.44, item 3.3, cujos valores de abscissa determinam a vazão operacional selecionada através do mostrador da válvula controladora. A Figura 3.42, item 3.3, ilustra a válvula reguladora de vazão de efluente.

Através da Figura 3.78 na página seguinte mostra-se o recipiente homogeneizador abastecido com emulsão pronta para análise. Após o abastecimento inicial, uma vez que para obtenção de 930 mℓ de volume vertido se precisa reabastecê-lo, o impelente homogneizador é acionado por poucos minutos, suficiente para gerar fluxo uniforme e rotacional da massa fluídica enquanto escoa. O valor, 350 mℓ, realçado pela marca preta determina, como foi dito no item 3.3, o nível mínimo de efluente no reservatório que se deve conservar de forma a garantir manutenção da vazão com variação abaixo de 4%. Isto se observou durante todo o ensaio. A marca vermelha acima determina o intervalo de variação de volume de 350 mℓ, entre as duas marcas, e o valor 490 mℓ, o volume total, da marca vermelha à válvula controladora de vazão.

No passo seguinte fixou-se a vazão de ar, 0,184 m^3/h à pressão, 1,41 atm, com auxílio da válvula controladora. Isto se faz para todos os ensaios com flotação induzida a ar comprimido, conforme Figura 3.47, item 3.3, Cap. 3. Finalmente selecionou-se a frequência de excitação, mostrado através da Figura 3.35, item 3.3, Cap. 3, e pôs-se o tratamento em marcha.

Figura 3.78 Reservatório homogeneizador em operação, com impelente acionado, abastecido com efluente sintético.

3.6.4 Execução do tratamento

Realizados procedimentos anteriormente descritos, verteu-se em iguais condições de análise, volumes de efluente sintéticos. À entrada da cuba de tratamento se recolheu, aproximadamente, uma amostra de 400 mℓ para medição de TOG com aparelho Horiba-350. Fez-se em três ensaios diferentes com flotação natural. Uma quarta amostra foi obtida com mistura de alíquotas de 100 mℓ das três prmeiras, para obtenção da média química. Os resultados são mostrados através da Tabela 3.4, item 3.5.6 e integra o estudo de impregnação de óleo em elementos do sistema discutido adiante. As figuras, Figura 3.79 (a) e (b) na próxima página ilustram o processo.

No percurso que leva à entrada da cuba o efluente sintético circula em contacto com vários elementos do sistema a exemplo do reservatório de preparação de emulsão e impelentes, reservatório de homogeneização e impelente, ductos, registro geral de passagem e válvula controladora de vazão. Quantificou-se o nível de impregnação nesses elementos para determinação do TOG inicial do efluente sintético e auxiliar a estimativa do TOG final com base no

nível de impregnação de óleo nos adsorventes. Dos Santos *et al*., (2007) estudaram processo de tratamento de água produzida por eletroflotação e constataram valores de impregnação de óleo no sistema da ordem de 160 mg/ℓ, ou seja, 44% do valor inicial do TOG.

(a) **(b)**

Figura 3.79 Processo de coleta de efluente sintético relizado à entrada da cuba de tratamento: a) Enchimento de um dos frascos âmbar na primeira coleta; b) Conjunto coletado antes do encaminhamento à medição de TOG, em vasilhames âmbar de 500 mℓ. Em segundo plano, vasilhames de 275 mℓ utilizados para exame visual e ilustração.

3.6.5 Finalização do tratamento, leitura e registro de parâmetros obtidos (Tempo, TOG, volume efetivo, voltagem e corrente)

Com o prévio abastecimento do homogeneizador de efluente, devidamente preparado e uniformizado, abriu-se o registro geral de passagem de efluente para imediato início ao tratamento. Calibrou-se a válvula controladora de vazão através da manopla. O tempo de tratamento mediu-se com cronômetro digital (ETM_1), do instante de abertura da válvula ao enchimento da cuba, e ao tempo final de tratamento. Com a diferença dos tempos calcularam-se parâmetros efetivos de tratamento como vazão efetiva e potência consumida. A potência consumida se obteve através do produto da voltagem pela corrente de trabalho, exibidas na fonte de tensão (ETM_4). Através das figuras, Figura 3.80 (a) e (b), mostram-se fases do processo.

Pôs-se o motor de propulsão vibratória à freqüência correspondente de tratamento, antes da abertura do registro geral de passagem de efluente. O intervalo de tempo para início de

monitoramento se manteve superior a cinco segundos. Assim permite-se ao sistema atingir regime permanente de trabalho livre de transientes dinâmicos, de acordo com a resposta temporal ao impulso, que se mostra através da Figura 3.60 (a) e Figura 3.60 (b), item 3.4, Cap. 3.

(a) **(b)**

Figura 3.80 Finalização de tratamento: a) Sistema coletor de efluente tratado; b) Amostras de efluente tratado em vibração e flotação natural (*Vibrauto-flot*) à faixa de freqüência, 14 Hz, 33 Hz e 47 Hz, respectivamente, da esquerda à direita. À direita, à extremidade, amostra do efluente sintético obtido à entrada da cuba de tramento.

Finalizaram-se tratamentos delineados no início do item com a leitura da cronometragem final e do volume de efluente efetivamente escoado e tratado. Procedimentos se realizaram segundo simbologia, (FRV), (SF) e (AUT), consoante metodologia definida para ensaios no início do item 3.6. O volume efetivo de efluente tratado mediu-se através de escala afixada aos recipientes de vidro âmbar de 1.000 mℓ, conforme Figura 3.48, mostrada ao final do item 3.3, Cap. 3. Através das figuras, Figura 3.80 (a) e (b), mostra-se, respectivamente, o sistema de coleta composto do tubo de descarga, que se mostra através da Figura 3.77, canalizador em vidro (ETV_{15}) e amostras de efluente obtidas antes e após o tratamento.

3.6.6 Remoção de adsorventes para secagem e esvaziamento da cuba

Encerraram-se tratamentos através do fechamento do registro geral, desligamento do motor de propulsão vibratória e compressor de ar, quando se realizou ensaio com flotação induzida. Removeu-se cuidadosamente o par adsorvente com pinça laboratorial metálica, escorrendo-se o excesso de efluente embebido, e se lhe acondicionou nos papéis alumínios em que foram embalados no início e em bolsas plásticas etiquetadas.

A Figura 3.81 (a) e Figura 3.81 (b) ilustram a etapa final de ensaio em que se realiza secagem de adosrventes para medição de alteração de peso por impregnação de óleo adsorvido. A Figura 3.82 (a) e figura 3.82 (b) à página seguinte, mostram, respectivamente, uma unidade adsorvente metálica em estado limpo, antes da operação, e outra bastante impregnada de óleo após a operação. Através da Figura 3.82 (b) mostram-se marcas de impregnação séssil de óleo, visíveis. O caráter séssil se nota através da deposição de óleo pouco corrugada e de fina espessura.

Para pesagem do óleo removido por adsorção, levaram-se pares adsorventes à secagem por 80 minutos a 105° C, em estufa (ETM_{20}) e pesou-se por fim, em balança de precisão (0,1 mg) de acordo com o item 3.6.2. A diferença entre pesagens antes e após o tratamento fornece a massa de óleo removida. Abriram-se frechas nos envólucros de adsorventes para auxiliar a secagem por recirculação de ar como se mostra através da Figura 3.81 (a).

(a) **(b)**

Figura 3.81 Processo de secagem de adsorventes: a) Abertura de embalagens; b) Colocação no forno de secagem.

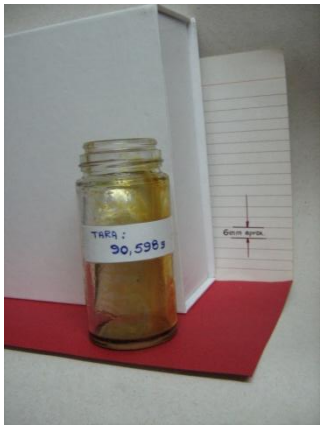
(a) **(b)**

Figura 3.82 Ilustração da impregnação de óleo no adsorvente: a) Antes do tratamento; b) Após o tratamento.

3.6.7 Medição de impregnação de óleo, estimativa do TOG inicial (TOG_i) e limpeza

Finalizaram-se grupos selecionados de ensaios com medição da impregnação de óleo do sistema. Afirmou-se no embasamento teórico do trabalho, item 2.2.2, Cap. 2, que segundo Bennet (1988) apud Rego (2008), entre 70 e 75% do óleo de efluentes oleosos se encontra na forma livre, - factível de sofrer impregnação por onde circular -. Reservatórios de preparação e homogeneização da emulsão sintética, e impelentes, realizam primeiros contactos com a emulsão e, obviamente se impregna da maior parte do óleo, sobretudo óleo livre. As figuras, Figura 3.83 (a), (b) e (c), Figura 3.84 (a), (b) e (b) e Figura 3.85 (a) e (b) à página seguinte, ilustram a seqüência de medição da impregnação e técnica empregada.

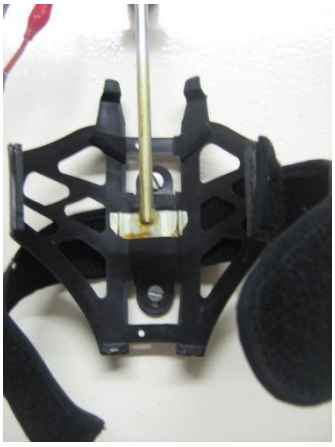
O processo utilizado para medição de impregnação compreendeu, raspagem, e pesagem do conteúdo maior de óleo impregnado; extração do óleo remanente com éter de petróleo, com auxílio de conta-gotas; recolhimento, evaporação natural do éter de petróleo e pesagem do extrato em reservatório tarado (Figura 3.83 (c)). Exceção se fez para impelidores: Se lhes pesou diretamente, limpo e, após operação, em balança de precisão, 1,0 mg (ETM_{19}). Expressaram-se valores na Tabela 3.1 adiante, à página 153, em termos de massa por unidade de volume operado [mg/ℓ].



(a) **(b)** **(c)**

Figura 3.83 Impregnação em equipamentos de preparação de efluente sintético: a) Reservatório de preparação de efluente sintético e impelidores; b) Raspagem com espátula e depósito tarado para pesagem; c) O óleo que remanesce à parede extraiu-se com éter de petróleo para posterior evaporação natural.

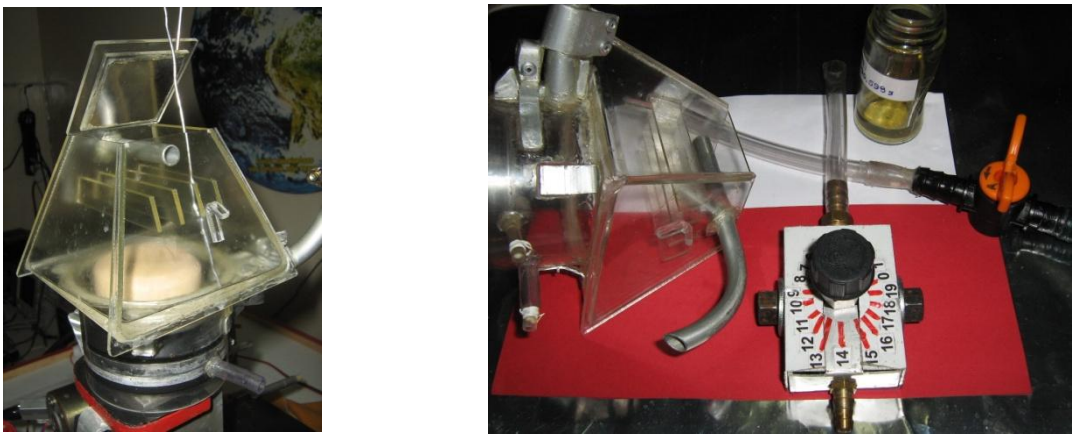
Através das figuras, Figura 3.84 (a) e (b), mostra-se o reservatório homogeneizador de alimentação gravitacional antes e pós-desimpregnação. A Figura 3.84 (c) mostra o pouco nível de impregnação no impelidor do reservatório homogeneizador.



(a) **(b)** **(c)**

Figura 3.84 Impregnação no reservatório homogeneizador: a) Reservatório e espátula de raspagem; b) Extrato pronto para evaporação e pesagem; c) Impelente do homogeneizador impregnado.

Através da Figura 3.85 (a) mostra-se a relativamente menor impregnação de óleo na cuba, por decorrência, em ductos e válvulas. Ao lado, através da Figura 3.85 (b), mostra-se a cuba pós-desimpregnação e o recipiente de coleta do óleo extraído com éter de petróleo. O mais baixo nível de impregnação nesses elementos se deve, provavelmente, ao efluente, no estágio final em que circula, conter menor quantidade de óleo livre.



(a) **(b)**

Figura 3.85 Impregnação de óleo na cuba, ductos e válvulas: a) Cuba impregnada; b) Conjunto limpo e extrato pronto para evaporação e pesagem.

A tabela, Tabela 3.1 adiante, à página 153, mostra resultados do ensaio de impregnação de óleo, expressos em [mg/ℓ], para obtenção de estimativa aproximada de TOG do efluente sintético que ingressa na cuba de tratamento do sistema. Quatro valores de TOG constantes na linha (5) da referida tabela, coluna (M), foram medidos com aparelho HORIBA-350, com extrator à base de clorofórmio. Coletaram-se para tal, amostras de efluente à entrada da cuba.

Medidas de TOG dependem, sobretudo, da composição de hidrocarbonetos voláteis existentes na amostra e pode variar de uma técnica a outra, segundo reporta, Queirós *et al*., (2005). Os pesquisadores estudaram diversas técnicas de medição de TOG, correlação de resultados e importância de custos de medição, se forem consideradas operações de rotina em estações petrolíferas. Para tal foi utilizado solvente de água salobra (Salinidade, 55.000 ppm), gotejada com óleo bruto, com auxílio de seringa, e mesclados por Ultra-Turrax (15.000 rpm).

Valores estimados foram, portanto, admitidos como concentração inicial de óleo do efluente a partir de ensaio de medição de impregnação descrito a seguir. Medidas de impreg-

nação foram obtidas de ensaios criteriosamente selecionados. Realizaram-se coleta e pesagem de óleo impregnado em diversos componentes do aparato experimental. Prepararam-se volumes de efluente de 1.300 mℓ por ensaio. Introduziram-se (400mg - 500mg) de óleo em gotas, abandonadas de uma pipeta de diâmetro interno, 4,0 mm, munida de bulbo de borracha (Figura 3.72 (b) item 3.5.1) para obtenção de concentração de óleo à entrada da cuba acima de 100 mg/ℓ de óleo.

Ao final de cada ensaio restam 370 mℓ de efluente na cuba (29% do volume preparado) devido à alimentação gravitacional e tomada de descarga na parte superior da cuba. Descarta-se este volume, sendo, portanto, o volume efetivo tratado limitado a 930 mℓ.

A concentração efetiva esperada, de acordo com o procedimento adotado (Tabela 3.1) para o efluente sintético, orbita 110 e 130 mg/ℓ/ensaio, com concentração média de emulsões vertidas, 450 mg/ℓ/ensaio. O valor esperado aproximado do TOG inicial (TOG_i) e TOG final (TOG_f), obtém-se fazendo-se:

$$TOG_i \approx 450 - (A + B + C) \quad [mg/\ell] \tag{59}$$

$$\text{e,} \qquad TOG_f \approx TOG_i - G - D_{médio} \quad [mg/\ell] \tag{60}$$

O desvio-padrão médio do valor estimado obteve-se da média entre os desvios:

- Desvio entre quatro valores de TOG medidos na entrada da cuba (2) com aparelho HORIBA-350 e extrator de clorofórmio, sendo que o quarto valor foi obtido de uma mescla realizada entre porções igualmente extraídas de cada coleta (σ = 5,85 mg/ℓ);
- Desvio da média de TOG's iniciais (TOG_i) inferidos por gravimetria de impregnação no sistema (σ = 7,66 mg/ℓ).
- Desvio da média de TOG iniciais inferidos por gravimetria de impregnação com relação à média de medições de TOG realizadas com HORIBA-350 (σ = 9,38 mg/ℓ).

Com base na média de valores medidos de TOG, o desvio padrão admitido é: 9,38 mg/ℓ. Portanto os valores de TOG_i e TOG_f estimados, levando-se em conta que 16,08 mg/ℓ em média impregnam-se na cuba (Coluna D, Tab. 3.1), obtiveram-se com base na expressão:

$$TOG_f = TOG_i - D_{média} - Imp_{ads} \tag{61}$$

$$TOG_f = 105{,}45 - Imp_{ads} \tag{62}$$

Tabela 3.1 Tabela da gravimetria de impregnação de óleo no sistema. A coluna grupo de ensaios se refere ao número e modalidade de ensaios sequenciais. Valores da tabela A, B, C e D são concentração de óleo em equipamentos em [mg/ℓ], recuperado por extração e raspagem.

Quant.	Grupo de ensaios		A Reserv. de mistura	B Impelidor 02 unid.	C Alimentador homogeneiz. e impelidor	D Cuba Tub/válv.	E I^{E}_{mp} Afora a cuba	F I^{E}_{mp} Incluindo a cuba	G M_{adso}	H M_{adso} Média	J TOG_i Estim.	L TOG_f Estim.	M TOG_i Medido
4	FRV 14/3,5-1R FRV 33/3,5-1 FRV 33/7,5-2 FRV 33/10-3	Rasp. Extr.	56,73 83,73	------ 76,2	40,38 78,4	------ 17,19	335,44	352,63	69,21 54,8 101,78 104,81	82,65	114,56	14,72	------ ------ ------ ------
3	AUT 14/10-1 AUT 33/10-2 AUT 47/10-3 ------	Rasp. Extr.	57,36 77,95	------ 64,7	52,1 73,77	------ 14,03	325,88	339,91	101,21 110,38 90,26 ------	101,1	124,12	8,99	------ ------ ------ ------
2	SF1 33/3,5 SF2 47/3,5 ------ ------	Rasp. Extr.	54,46 72,85	------ 72,7	40,77 77,46	------ 23,46	318,24	341,7	97,73 106,59 ------ ------	102,2	131,76	6,1	------ ------ ------ ------
1	FRV 33/7,5 ------ ------ ------	Rasp. Extr.	73 65	------ 73,7	42 72,2	------ 16,4	325,9	342,3	------ ------ ------ ------	------	124,1	------	------ ------ ------ ------
0	Efluente coletado à entrada da cuba	Rasp. Extr.	69,81 79,62	------ 62,5	44,92 80,06	------ 9,38	336,91	346,29	------ ------ ------ ------	------	113,09	------	120 110 123 114

Legenda: A (Reservatório de preparação de emulsão); B (Impelidores para formação de emulsão); C (Reservatório homogeneizador e impelidor); D (Cuba de tratamento, ductos e válvulas); E, F (Impregnação média total com e sem levar em conta a cuba).

3.6.8 Considerações finais

Nos itens anteriores, precisamente, 3.2, 3.3 e 3.4, descreveram-se, concepção, construção, aferição e padronização operacional de sistemas periféricos auxiliares de controle, e caracterização dinâmica do sistema, respectivamente. Trata-se da evolução de processos necessários à especificação técnica do sistema e definição de parâmetros operacionais de ensaio, considerados imprescindíveis à avaliação de desempenho da operação unitária em apreço.

Em seu conjunto especificaram-se parâmetros de natureza geométrica e operacional. Parâmetros geométricos constituem dimensões gerais do sistema mecânico, dimensões empregadas na construção da cuba ou, reservatório de tratamento vibracional, e dimensões do elemento adsorvente. Parâmetros operacionais constituem vazão de efluente e de ar comprimido, e parâmetros de natureza dinâmica como frequência de oscilação e amplitude decorrentes. Através da frequência e amplitude determinou-se e exprimiu-se, velocidade média de partículas por inércia de oscilação. Através da vazão efetiva, calculou-se a velocidade gerada por correnteza de vazões de operação.

Outros parâmetros obtiveram-se através de dados numéricos e experimentais existentes na literatura recomendada. Precisamente se referem à velocidade média de óleo em ascensão, carreado por bolhas de ar, ao empuxo de Arquimedes, e velocidade adicional admitida no processo de eclosão de bolhas de ar quando se chocam com o adsorvente e, subsequentemente, formam de jato por cavitação. Tais grandezas influenciam diretamente a energia de choque entre partículas dispersas, e de partículas com o adsorvente, princípio operacional do processo por antonomásia.

Um modelo para obtenção de velocidades médias sumariza-se no final do item 3.5. Adicionalmente se apresentou ilustração esquemática do processo e sistema em estudo, através da figura, Figura 3.67.

Através do item 3.6 se apresentaram metodologia de ensaio empregada e equipamentos necessários. Demonstraram-se de forma ilustrada, passos experimentais, da preparação da emulsão sintética ao abastecimento e coleta de efluente tratado. Finalizou-se cada ensaio e foi demonstrado, com acondicionamento e medição de volume de efluente tratado, tempo decorrente e análise química, seagem do adsorvente metálico impregnado de óleo, exame de impregnação para estimação de concentração inicial de óleo e graxa do efluente (TOG).

Capítulo 4

Resultados e discussões

4. Resultados e discussões

4.1 Considerações iniciais

Para obter-se discernimento do desempenho da técnica de tratamento proposta na pesquisa e, sobretudo, procurar entender mecanismos físico-químicos desencadeados no processo e a fluidodinâmica envolvida, se estabeleceu modalidades operacionais do sistema com intuito de evidenciar o domínio e atuação no processo de um ou outro fator característico de cada modalidade. Consideram-se basicamente três fatores operacionais característicos estabelecidos anteriormente: Utilização de flotação a ar induzido por compressor de ar (*Vibra-flot*); utilização de flotação natural obtida por vibração, veículo chave do processo (*Vibrauto-flot*), e tratamento em total isenção flotação (*Vibra*). A terceira se emprega para assegurar que somente vibração atuará como fomentador do processo de separação mediante choque e adsorção contra o adsorvente metálico espiral.

Para obtenção de flotação natural, foi necessário reduzir a quantidade de adsorvente à metade com propósito de desobstruir a entrada de ar que se verifica pelo ducto de descarga da cuba de tratamento no curso da operação (Figura 3.77, item 3.6.2, Cap. 3). Isto se disse e mostrou-se através das figuras, Figura 3.26, Figura 3.27, item 3.2.5, e Figura 3.77, item 3.6.2, Cap. 3. Ao excesso de adsorvente na célula de tratamento juntam-se efluente e bolhas de ar fluindo permeio, a relativamente alta tensão interfacial água/ar, formando barreira gasosa de bloqueio à entrada de ar.

Os mecanismos que se adotaram, ou seja, preencher excessivamente a célula adsorvente com adsorvente espiral metálico nos ensaios a flotação induzida (*Vibra-flot*) e sem flotação (*Vibra*), e preenchê-la parcialmente (50%), nos ensaios a flotação natural (*Vibrauto-flot*) permitiram efetuar-se três modalidades de tratamento utilizando-se a mesma cuba. Por outro lado, remete-se o tratamento a flotação natural à situação mais desfavorável, qual seja efetuar separação de óleo a reduzida superfície relativa de adsorção (50% menor).

Ressalta-se exceção feita ao tratamento *Vibra-flot* realizado em três frequências de excitação (14 Hz, 33 Hz e 47 Hz) e três faixas de fluxo (3,5 mℓ/s, 7,5 mℓ/s e 10 mℓ/s). Com este procedimento se objetivou ter um espectro largo de resultados de referência para poder-se selecionar a faixa de parâmetros operacionais relativamente mais desfavoráveis e utilizá-la

nos tratamentos *Vibra* e *Vibrauto-flot*, objeto principal de estudo. Neste sentido, realizaram-se ensaios sem flotação e a flotação natural em três frequências de excitação e a apenas uma taxa de fluxo (10 mℓ/s), considerada mais desfavorável do ponto de vista operacional ao mais baixo tempo de residência ou sejá, tempo em que se expõem gotas de óleo ao choque com o adsorvente metálico.

Resumidamente, no contexto da eficiência de um modo geral, procurou-se comparar processos nas modalidades supracitadas segundo o consumo energético, insumo de relativa importância do ponto de vista industrial, segundo a vazão específica de tratamento e tempo de residência ou retenção fluídica. Estes últimos constituem-se fator determinante para viabilidade industrial diante do grande volume de água efluente de produção petrolífera. Cabe ao processo estudado revelar perspectivas iniciais em termos de eficiência de redução de TOG através da impregnação de óleo no adsorvente metálico. Eis que em seu conjunto, estes resultados podem quantificar o poder de separação operante do processo.

Em favor da hierarquia de apresentação de resultados procurou-se, inicialmente, fornecer o agrupamento lógico de resultados obtidos, dispostos em tabelas autoexplicativas. Para facilitar a visualização e interpretação de dados, procurou-se dispô-los em sistema de coordenadas gráficas, em pares ordenados, interligados por linhas que não necessariamente indicam relação funcional. Portanto, se lhes toma como tendência aproximada de comportamento em meio a uma dispersão de resultados.

4.2 Grupamento lógico de resultados de ensaio

As tabelas seguintes, Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3 mostram resultados obtidos segundo modalidades de ensaio às quais se referem como, (FRV-*Vibra-flot*), (SF-*Vibra*) e (AUT-*Vibrauto-flot*), respectivamente. O registro de dados e resultados em seu conjunto cabe ressaltar, encontrarem-se no Apêndice deste trabalho através dos quais, adicionalmente, podem-se consultar valores de impregnação de óleo verificada em unidades do par adsorvente.

Sobre as referidas tabelas de resultados, as que se mostra adiante, se deve lembrar que adsorventes foram acondicionados em papel alumínio de massa-média ($m_{a\ell}$ *= 0,0007283 kg*) e ensaios decodificados em simbologia: FR [Freqüência em Hz], *V* [Vazão em mℓ/s], *Xo* [Amplitude em mm], SF (Ensaio sem flotação induzida), SV/F (Ensaio com flotação induzida e sem vibração, a título de referência) e AUT (Ensaios em vibração com *autoflotação* ou flo-

tação natural). Após o ensaio secaram-se elementos adsorventes em estufa (EMT_{19}) a 105°C, por aproximados 80 minutos. O desvio padrão médio obtido encontra-se no rodapé das respectivas tabelas. A área superficial estimada é dada por, ($A_s = m.A_e$), e a superfície específica, ($A_e = 15{,}056\ m^2/kg$).

Através das tabelas, Apêndice Tabela 1 e Apêndice Tabela 2 mostram-se pesagens de pares adsorventes em [kg] antes e pós-ensaio e estatística da gravimetria. Para cada par adsorvente a ser utilizado em ensaios realizou-se estimativa das respectivas áreas superficiais (A_s), em [m^2] com auxílio da expressão do parágrafo anterior. Obtiveram-se dimensões médias com auxílio de microscópio (ETM_{16}) cuja microscopia mostra-se através das figuras, Figura 3.18, Figura 3.19, Figura 3.20 e Figura 3.21, item 3.2.6, Cap. 3.

A tabela, Tabela 4.1, a seguir, mostra estimativas de TOG inicial e final, em [mg/ℓ] (TOG_i *e* TOG_f), queda percentual (%ΔTOG), impregnação de óleo no adsorvente espiral metálico (I_{mp}) em [kg], e em [mg/ℓ], e volume de efluente efetivamente vertido (V_v) em [mℓ]. A aquisição de dados para esta tabela se fez com o sistema operando em vibração e flotação induzida por compressor de ar (FRV). Estimaram-se valores de TOG a partir de da média de medições de TOG realizadas com amostras do efluente colhidas à entrada da cuba. Medida de impregnação média no sistema realizou-se conforme desenvolvimento matemático ao final do Capítulo 3, à página 152, e tabela de medição de impregnação (Tabela 3.1.) apresentada à página 153. O valor, ($TOG_i = 105{,}45\ mg/\ell$) que se expressa como TOG do efluente sintético medido antes do ensaio, à entrada da cuba de tratamento, é estimativa de desvio padrão, ($\sigma = 9{,}38\ mg/\ell$), discutido no final do item 3.6.7.

São mostradas pesagens do adsorvente metálico em [kg], com precisão de 0,1 mg, antes (A) e depois (D) do tratamento, a distintas freqüências (*f*) em [Hz] e amplitudes características (X_0) em [mm]. Parâmetros operacionais específicos a exemplo de vazão de flotação de ar, {Q_{ar} = 0,184 m^3/h (6,5 ft^3/h) a 138,274 kPa (Aprox. 1,41 atm)}, volume efetivo da cuba, ($V_{cub} = 370\ m\ell$), área do plano-médio adsorvente, ($A_{ads} = 0{,}0026\ m^2$) e área específica do adsorvente, ($A_e = 15{,}056\ m^2/kg$) foram considerados.

Adicionalmente apontaram-se tempo total e tempo efetivo de tratamento para possibilitar obtenção da vazão efetivamente praticada e cálculo da potência consumida no processo. Na última linha da tabela apontaram-se todos os valores monitorados de pH do efluente, a a cada processo, como forma de assegurar o caráter natural da emulsão, livre de adição ácida ou congênere que pudesse simplificar o processo através de quebra da emulsão sintética.

Tabela 4.1 Resultados de ensaio do tratamento em vibração com flotação a ar induzido (FRV *Vibra-flot*).

Ordem	Fase	fn = 14 Hz Amplit Xo = 2,4 mm Compressor ddp = 10,63 V; i = 3,13 A			fn = 33 Hz Amplit Xo = 2,39 mm Compressor ddp = 10,63 V; i = 3,13 A			fn = 47 Hz Amplit Xo = 0,55 mm Compressor ddp = 10,63 V; i = 3,13 A		
		Q_n = 3,5 mℓ/s	Q_n = 7,5 mℓ/s	Q_n = 10 mℓ/s	Q_n = 3,5 mℓ/s	Q_n = 7,5 mℓ/s	Q_n = 10 mℓ/s	Q_n = 3,5 mℓ/s	Q_n = 7,5 mℓ/s	Q_n = 10 mℓ/s
1º elem. M_{ads} [kg]	A	5,8865E-03	5,3920E-03	5,5699E-03	5,6035E-03	5,5349E-03	6,2671E-03	6,1883E-03	5,6752E-03	5,3802E-03
	D	5,9455E-03	5,4874E-03	5,6208E-03	6,6780E-03	5,5482E-03	6,3393E-03	6,2134E-03	5,7311E-03	5,4454E-03
2º elem. M_{ads} [kg]	A	5,2019E-03	5,6016E-03	6,2019E-03	6,6519E-03	6,1647E-03	5,3959E-03	5,4758E-03	5,4697E-03	5,6303E-03
	D	5,2000E-03	5,5847E-03	6,2440E-03	5,6254E-03	6,2430E-03	5,4207E-03	5,5321E-03	5,5097E-03	5,6600E-03
M_{ads} total	A	1,1088E-02	1,0994E-02	1,1772E-02	1,2255E-02	1,1700E-02	1,1663E-02	1,1664E-02	1,1145E-02	1,1011E-02
	D	1,1146E-02	1,1072E-02	1,1865E-02	1,2303E-02	1,1791E-02	1,1760E-02	1,1746E-02	1,1241E-02	1,1105E-02
M_{adso} (I_{mp}) [kg]		5,7100E-05	7,8550E-05	9,3000E-05	4,7950E-05	9,1600E-05	9,6950E-05	8,1400E-05	9,5900E-05	9,4900E-05
I_{mp} [mg/ℓ]		6,9212E+01	8,7300E+01	1,0054E+02	5,4800E+01	1,0178E+02	1,0481E+02	9,3029E+01	1,0368E+02	1,0544E+02
TOG médio	A	1,05E+02	1,05E+02	1,05E+02	1,05E+02	1,05E+02	1,05E+02	1,05E+02	1,05E+02	1,05E+02
	D	3,62E+01	1,82E+01	4,91E+00	5,07E+01	3,67E+00	6,39E-01	1,24E+01	1,77E+00	5,56E-03
%ΔTOG		6,56E+01	8,28E+01	9,53E+01	5,20E+01	9,65E+01	9,94E+01	8,82E+01	9,83E+01	10,0E+01
V_v [mℓ]		8,25E+02	9,00E+02	9,25E+02	8,75E+02	9,00E+02	9,25E+02	8,75E+02	9,25E+02	9,00E+02
t_o [s]		2,60E+02	9,50E+01	6,00E+01	3,00E+02	9,00E+01	5,50E+01	2,60E+02	9,00E+01	4,80E+01
t_f [s]		1,10E+03	4,00E+02	2,82E+02	1,19E+03	3,20E+02	2,02E+02	1,09E+03	3,23E+02	2,02E+02
t_{ef} [s]		8,40E+02	3,05E+02	2,22E+02	8,91E+02	2,30E+02	1,47E+02	8,28E+02	2,33E+02	1,54E+02
Q_{ef} [mℓ/s]		9,82E-01	2,95E+00	4,17E+00	9,82E-01	3,91E+00	6,29E+00	1,06E+00	3,97E+00	5,84E+00
Q_{efa} [mℓ/s.m^2]		3,78E+02	1,13E+03	1,60E+03	3,78E+02	1,51E+03	2,42E+03	4,06E+02	1,53E+03	2,25E+03
i [A]		3,10E-01	2,60E-01	2,80E-01	3,10E-01	5,60E-01	2,50E-01	4,60E-01	3,80E-01	3,10E-01
ddp [V]		7,30E+00	7,20E+00	7,10E+00	1,53E+01	1,51E+01	1,63E+01	2,17E+01	2,20E+01	2,11E+01
P_w [kWh]		2,98E+01	1,07E+01	7,83E+00	3,39E+01	9,60E+00	5,49E+00	3,58E+01	9,70E+00	6,13E+00
t_R [s/m^2]		3,77E+02	1,25E+02	8,88E+01	3,77E+02	9,46E+01	5,88E+01	3,50E+02	9,82E+01	6,33E+01
A_s [m^2]		1,67E-01	1,66E-01	1,77E-01	1,85E-01	1,76E-01	1,76E-01	1,76E-01	1,68E-01	1,66E-01
pH		9,20E+00	8,72E+00	9,25E+00	9,11E+00	9,24E+00	9,31E+00	9,20E+00	9,35E+00	9,18E+00

Para avaliação da potência consumida monitoraram-se parâmetros operacionais como, voltagem *ddp*, em [Volt] e corrente contínua *i*, em [A]. Adicionalmente, outros parâmetros para avaliação de desempenho foram monitorados a exemplo de volume efetivamente vertido (V_v) em [mℓ], tempo de fluxo (t_f), em [s], tempo de enchimento da cuba (t_o), em [s], vazão de efluente (Q_{ef}), em [mℓ/s], potência consumida (P_w), em [kWh], tempo de residência específico (t_{re}), em [s/m^2], área superficial (A_s), em [m^2], vazão efetiva específica da célula (Q_{efa}), em [mℓ/s.m^2] e pH do efluente. O pH alcalino assegura isenção de aditivos e acidulantes que favorecem floculação.

A Tabela 4.2, a seguir, mostra resultados obtidos no ensaio em vibração sem flotação a ar induzido (SF). As condições de ensaio empregadas são idênticas às que se empregou na obtenção de resultados da Tabela 4.1.

Tabela 4.2 Resultados de ensaio do tratamento em vibração sem flotação (SF Vibra).

Pesagem	Fase	Q_n = 3,5 mℓ/s		Q_n = 10 mℓ/s		
		f = 33 Hz	f = 47 Hz	f = 14 Hz	f = 33 Hz	f = 47 Hz
1º elem. M_{ads} [kg]	A	5,3296E-03	4,6992E-03	5,8477E-03	5,7225E-03	5,2043E-03
	D	5,3795E-03	4,7800E-03	5,8746E-03	5,7522E-03	5,2405E-03
2º elem. M_{ads} [kg]	A	5,6028E-03	5,4056E-03	5,4134E-03	5,4945E-03	5,2774E-03
	D	5,6433E-03	5,4194E-03	5,4422E-03	5,5607E-03	5,3360E-03
M_{ads} total	A	1,0932E-02	1,0105E-02	1,1261E-02	1,1217E-02	1,0482E-02
	D	1,1023E-02	1,0199E-02	1,1317E-02	1,1313E-02	1,0577E-02
$M_{adso}(I_{mp})$ [kg]		9,0400E-05	9,4600E-05	5,5750E-05	9,5950E-05	9,4850E-05
I_{mp} [mg/ℓ]		9,7730E+01	1,0227E+02	6,0270E+01	1,0373E+02	1,0254E+02
TOG médio	A	1,0545E+02	1,0545E+02	1,0545E+02	1,0545E+02	1,0545E+02
	D	7,7203E+00	3,1797E+00	4,5180E+01	1,7203E+00	2,9095E+00
%ΔTOG		9,2679E+01	9,6985E+01	5,7155E+01	9,8369E+01	9,7241E+01
V_v [mℓ]		9,2500E+02	9,2500E+02	9,2500E+02	9,2500E+02	9,2500E+02
t_o [s]		1,4500E+02	1,4500E+02	5,7000E+01	5,2000E+01	5,3000E+01
t_f [s]		7,4300E+02	6,6900E+02	2,3000E+02	1,9800E+02	1,9900E+02
t_{ef} [s]		5,9800E+02	5,2400E+02	1,7300E+02	1,4600E+02	1,4600E+02
Q_{ef} [mℓ/s]		1,5468E+00	1,7653E+00	5,3468E+00	6,3356E+00	6,3356E+00
Q_{efa} [mℓ/s.m^2]		5,9493E+02	6,7895E+02	2,0565E+03	2,4368E+03	2,4368E+03
t_R [s/m^2]		2,3920E+02	2,0960E+02	6,9200E+01	5,8400E+01	5,2000E+01
A_s [m^2]		1,6460E-01	1,5214E-01	1,6955E-01	1,6888E-01	1,5781E-01
i [A]		2,9000E-01	3,5000E-01	1,3000E-01	3,1000E-01	3,6000E-01
ddp [V]		1,6800E+01	2,1600E+01	7,2000E+00	1,5900E+01	2,1400E+01
Pw [kWh]		2,9135E+00	3,9614E+00	1,6193E-01	7,1963E-01	1,0015E+00
pH		9,3000E+00	9,3000E+00	9,3300E+00	9,2800E+00	9,1600E+00

De forma similar se monitorou volumes vertidos (V_v), em [mℓ], vazão efetiva, (Q_{ef}), em [mℓ/s], vazão específica, (Q_{efa}), em [mℓ/s.m^2], tempo de residência específico, (t_R), em [s/m^2], *pH*, (*ddp*), em [V], corrente, (*i*), em [A] e potência consumida, (P_W), em [kWh]. A Tabela 4.3 traz resultados obtidos para ensaio com flotação natural (*Vibrauto-flot*) e com flotação unicamente, sem vibração.

Tabela 4.3 Resultados de ensaio do tratamento em vibração com flotação natural (AUT *Vibrauto-flot*).

Pesagem	Fase	Q_n = 3,5 mℓ/s	Q_n = 10 mℓ/s	(*Autoflotação*) Qn = 10 mℓ/s		
		f = 0 Hz	f = 0 Hz	f = 14 Hz	f = 33 Hz	f = 47 Hz
1º elem.	A	5,4103E-03	6,4851E-03	5,5813E-03	5,6631E-03	5,0338E-03
M_{ads} [kg]	D	5,4373E-03	6,5397E-03	5,6444E-03	5,7319E-03	5,0852E-03
2º elem.	A	6,1102E-03	5,1992E-03	-----	-----	-----
M_{ads} [kg]	D	6,1423E-03	5,2355E-03	-----	-----	-----
M_{ads} total	A	1,1521E-02	1,1684E-02	5,5813E-03	5,6631E-03	5,0338E-03
	D	1,1580E-02	1,1775E-02	5,6444E-03	5,7319E-03	5,0852E-03
$M_{adso}(I_{mp})$ [kg]		5,9100E-05	9,0900E-05	6,3100E-05	6,8850E-05	5,1450E-05
I_{mp} [mg/ℓ]		6,9529E-02	9,8270E-02	9,5606E-02	1,0432E-01	9,0263E-02
TOG	A	1,0545E+02	1,0545E+02	1,0545E+02	1,0545E+02	1,0545E+02
médio	D	1,0538E+02	1,0535E+02	1,0535E+02	1,0535E+02	1,0536E+02
%ΔTOG		6,5936E-02	9,3191E-02	9,0665E-02	9,8927E-02	8,5598E-02
V_v [mℓ]		8,5000E+02	9,2500E+02	6,6000E+02	6,6000E+02	5,7000E+02
t_o [s]		1,4800E+02	5,3000E+01	5,2000E+01	5,4000E+01	5,4000E+01
t_f [s]		5,9000E+02	1,9200E+02	1,5300E+02	1,4300E+02	1,1900E+02
t_{ef} [s]		4,4200E+02	1,3900E+02	1,0100E+02	8,9000E+01	6,5000E+01
Q_{ef} [mℓ/s]		1,9231E+00	6,6547E+00	6,5347E+00	7,4157E+00	8,7692E+00
Q_{efa} [mℓ/s.m^2]		7,3964E+02	2,5595E+03	2,5133E+03	2,8522E+03	3,3728E+03
t_R [s/m^2]		1,9240E+02	5,5600E+01	5,6621E+01	4,9894E+01	4,2193E+01
A_s [m^2]		1,7345E-01	1,7592E-01	8,4032E-02	8,5263E-02	7,5788E-02
i [A]		3,1300E+00	3,1300E+00	2,3000E-01	5,2000E-01	4,2000E-01
ddp [V]		1,0630E+01	1,0630E+01	7,2000E+00	1,5100E+01	2,2700E+01
Pw [kWh]		1,4706E+01	4,6248E+00	1,6726E-01	6,9883E-01	6,1971E-01
pH		9,2000E+00	8,3100E+00	7,9700E+00	7,9400E+00	7,8300E+00

4.3 Análise de resultados

4.3.1 Análise de consumo energético despendido em três modalidades operacionais: Vibração com flotação a ar induzido (*Vibra-flot*); vibração sem flotação (*Vibra*) e vibração com flotação natural (*Vibrauto-flot*)

Através das figuras, Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3, mostra-se o desempenho do sistema nas condições de ensaio onde se focaliza a demanda energética observada. Moveu-se o sistema à corrente contínua com voltagem máxima limitada a 12 Volts. Não se está considerando o consumo energético de acionamento do homogeneizador (ETV_7), tampouco do misturador (ETV_{16}), por constituírem sistemas auxiliares de ensaio e não integrarem o conjunto de equipamentos de um sistema real.

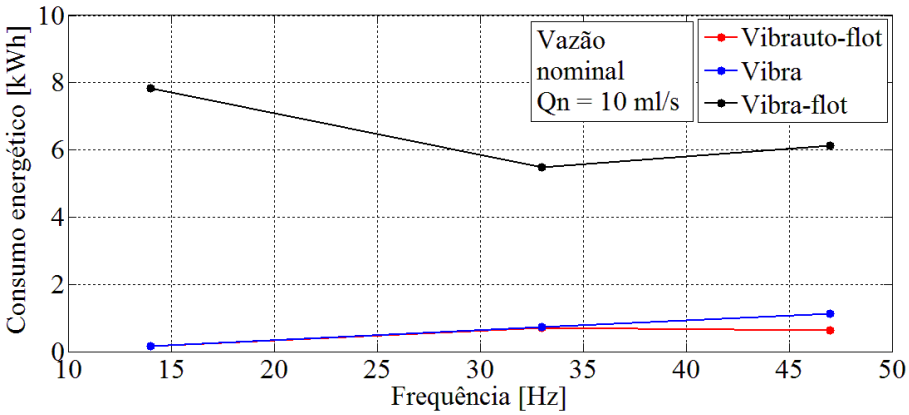


Figura 4.1 Comparação das potências de consumo entre processos (*Vibra-flot, Vibra e Vibrauto-flot*) e o comportamento em função da frequência de excitação. Os pontos indicam faixas de frequência de ensaio (14 Hz, 33 Hz e 47 Hz).

O consumo energético mostrou-se ligeiramente decrescente com aumento da frequência de excitação em tratamento realizado com flotação a ar induzido. Contudo se observou ser cerca de quatro vezes mais elevado se comparado aos processos que prescindem indução de ar como o *Vibra* e *Vibrauto-flot*. Processos em que não se utilizou flotação a ar nduzido apresentaram elevação de consumo energético, à medida que se aumenta a frequência de excitação. O ligeiro aumento de demanda energética se deve ao aumento de rotação requerida

pelo motor para elevar a frequência de perturbação. Em todo caso, apresentaram consumo energético cerca de 80% menor, nas condições de ensaio, que o processo, *Vibra-flot*.

A Figura 4.2 mostra o consumo energético do sistema *Vibra-flot* relacionado ao tempo de residência, em três faixas de frequência de excitação. O tempo de residência, ou retenção, relaciona-se diretamente à vazão de efluente em curso. Maiores tempos de residência podem significar maior eficácia de remoção de óleo por submeter o efluente a tempo mais prolongado de exposição à vibração. No entanto, podem proporcionar perda significativa de rendimento em vazão e maior custo energético.

Pode-se observar menor consumo energético, naturalmente, com aumento de vazão por resultar menores tempos de residência, quando se orbita 50 e 100 segundos. Em todo caso maiores faixas de frequência resultaram menores taxas de consumo energético e menores tempos de residência. Isto se pode observar através dos pontos (3) das curvas de maiores frequências. O efeito vibratório parece atuar no sentido de aumentar a eficiência do tratamento nos limites de excitação e condições de ensaio.

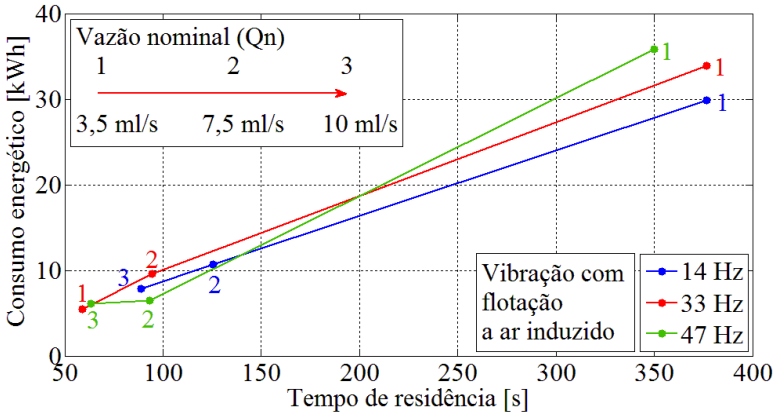


Figura 4.2. Potência consumida na operação com flotação a ar induzido em função do tempo de residência. Três curvas mostram o desempenho em diferentes faixas de frequência e pontos indicam vazão efetiva com relação a vazões nominais.

A Figura 4.3, mostra, de forma comparativa, o desempenho das três técnicas no que respeita o consumo energético e eficiência de fluxo. A supremacia da técnica *Vibrauto-flot* parece dominar. Cabe destacar que maiores vazões neste caso, se devem relativamente ao menor volume de adsorvente utilizado (50%), o que proporciona maior permeabilidade. Contudo

isto se constitui, situação desfavorável no que à separação de óleo se refere e discutir-se-á adiante.

A linha vertical na Figura 4.3 determina o tempo nominal de residência obtido em fluxo aberto, sem a perda hidráulica de carga proporcionada pela turbulência imposta na célula adsorvente e efeitos de capilaridade de bolhas de ar permeio. A potência consumida nos processos *Vibra* e *Vibrauto-flot* é substancialmente menor por prescindirem compressão de ar para flotação. No entanto, ao se observar o ponto (2) em todas as curvas, se percebe ligeira tendência de queda de consumo ou pelo menos estagnação, considerando-se a escala de baixos consumos que se verifica com aumento da frequência de excitação nos processos, *Vibra* e *Vibrauto-flot*.

O relativo alto consumo que se verifica ao ser utilizada a técnica *Vibra-flot*, se deve à demanda energética constante para realização de compressão de ar de flotação. A demanda decresce à medida que se aumenta a frequência de excitação avizinhando-se de faixas ressonantes, caracterizadas, do ponto de vista do consumo energético, como de baixo nível de carga. Isto quer dizer que o motor em desbalanceamento rotativo assume regime tecnicamente referido como, "operação em vazio". Portanto, se observa tendência convergente no ponto (2) para todas as técnicas, subtraído o nível constante de consumo do compressor para o processo *Vibra-flot*. Tal convergência se pode associar à aproximação de outra região de frequência, provavelmente ressoante, particular do sistema em estudo. Está-se referindo ao modo vibracional à torcedura, assumido pelo sistema quando o nível de excitação se eleva a partir de 20 Hz, devido à distribuição geométrica irregular de massa do sistema.

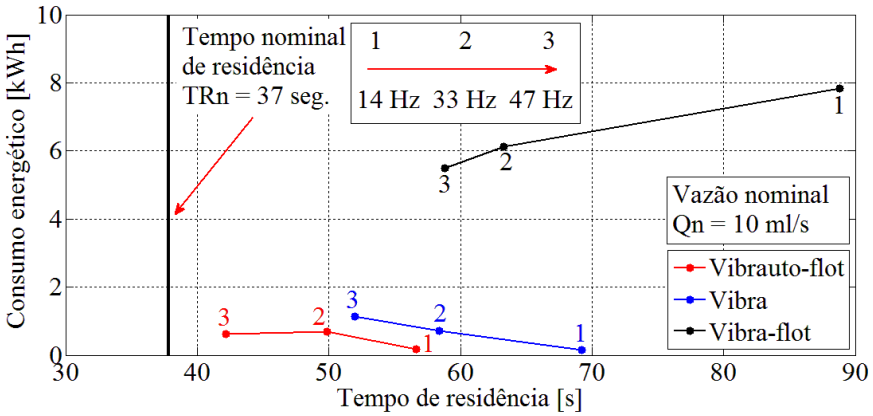


Figura 4.3 Potência consumida em função do tempo de residência para as três modalidades de tratamento a vazão efetiva correspondente à vazão nominal (Q_n = 10 mℓ/s). Pontos indicam faixas de frequência de análise.

Este comportamento se discutiu no item 3.4, Cap. 3. Através das figuras, Figura 3.61 (b) e (c) e Figura 3.62 (a) e (c), se percebe a anomalia, sujeita à forte atividade inercial cuja origem é a distribuição irregular de massa. Constitui-se, portanto, preocupação futura da pesquisa, contemplar processo de concepção de sistemas vibracionais com ênfase, não somente ao desempenho, na primordial função de tratar efluente, mas, de se permitir descrição unificada de padrões de controle dinâmico. O controle dinâmico, sobretudo, diz respeito a parâmetros diretamente relacionados com promoção de choque de gotas de óleo em fluxo oscilante, e a relação entre amplitude e frequência de oscilação é determinante da eficiência. Isto se discutiu na abordagem teórica (Capítulo 2) e está relacionado com conteúdo inercial e energético.

A análise mais apurada do conteúdo energético envolvido nos choques interpartículas requer condições diversificadas de operação, sobretudo, a maiores taxas de fluxo e utilização de corrente alternada. Segundo reportou da Rosa (2002) de sua pesquisa, revelou-se dispêndio energético inferior se forem contabilizados 0,326 kWh/m^3 a US \$0,106/kWh, comparando-se a valores que se podem inferir e observar neste ensaio. A pesquisa foi realizada através de um protótipo para tratamento de flotação com capacidade de fluxo muito maior (Entre 400 mℓ/s e 600 mℓ/s), comparada à que se utilizou neste trabalho (3,5 a 10 mℓ/s).

O sistema de tratamento empregado por da Rosa (2002), referenciado por acrograma (FF), trata-se de um floculador-flotador em linha, discutido previamente na revisão teórica do trabalho, submetido, dentre muitos aspectos que se pode ressaltar, à variação de fluxo de ar de flotação (0 a 120 mℓ/s). Segundo o pesquisador, acima de 330 mℓ/s satura-se o poder de remoção de oleaginosos do efluente, ainda que seja variada a concentração de floculante adicionável. Comparativamente, o sistema em estudo utiliza em média, 51 mℓ/s e isto, em termos relativos à taxa de fluxo, corresponde a maiores vazões de ar. Adicionalmente, da Rosa (2002) realizou adição de agente floculante a distintas vazões, mecanismo não empregado neste trabalho por questões anteriormente discutidas.

O tempo de residência, segundo reportou, oscilou entre 42 e 126 segundos, compatível com a faixa de tempo de residência obtida neste estudo. O resultado é discutido nos próximos tópicos. Análises mais aprofundadas envolvendo volume de ar, considerando-se o contexto discutido, remeter-se-ão a futuros trabalhos com o aprofundamento da pesquisa. Os trabalho de Deane & Stokes (2002) e Bird (2010) podem fornecer excelente subsídio para determinação da taxa de fluxo de ar que se pode gerar em flotação natural (*Vibrauto-flot*), levando-se em conta a frequência de quebra de ondas, o volume de ar total envolvido e a estimativa da quantidade de bolhas de ar eventualmente geradas.

4.3.2 Eficiência de fluxo, tempo de residência e relação com efeitos vibratórios

Segundo Iassonov & Beresnev (2003), através de estudo realizado sobre reologia vibracional de fluídos em meios porosos, vibração aumenta o efeito de capilaridade fluídica por desobstrução e ruptura de interfaces e favorece a permeabilidade. Si se admite a célula adsorvente da cuba de tratamento como meio poroso, ainda que de elevada porosidade (97% a 98,5%), resultados mostrados através da Figura 4.4 parecem confirmar a tendência. Constatou-se que o efeito em si é benéfico ao desempenho do método de tratamento em estudo por proporcionar maior fluxo efetivo, consequentemente melhor desempenho.

De acordo com a Figura 4.4, a substancial elevação da vazão efetiva verificada através da técnica, *Vibrauto-flot*, se deve à redução em 50% da massa adsorvente metálica utilizada, o que resulta, proporcionalmente, menor estricção à passagem de efluente. A menor permeabilidade verificada no processo *Vibra-flot*, excetuando-se, faixas próximas de 33 Hz, se deve à retenção de bolhas de ar no leito adsorvente que, embora apresenta vantagem de operar como eficiente peneira ou barreira gasosa, na remoção de óleo do efluente, em leitos relativamente mais densos obstruem o fluxo e reduzem a taxa de escoamento.

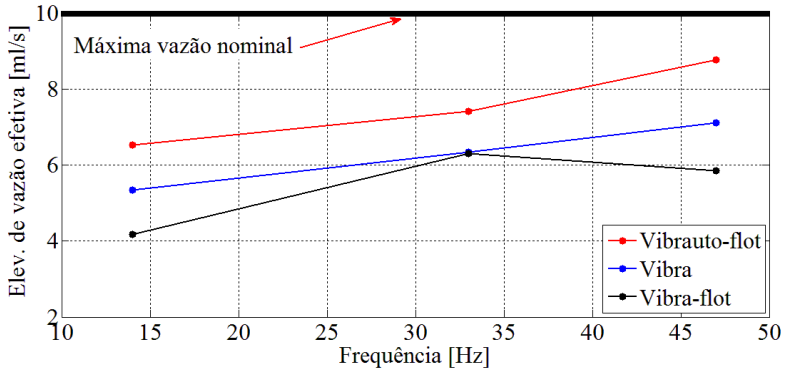


Figura 4.4 Comparação de elevação do rendimento efetivo em fluxo entre processos, *Vibrauto-flot, Vibra e Vibra-flot,* em função da frequência de excitação.

Neste sentido, observa-se através da Figura 4.5, que o processo *Vibra-flot* mantém a vazão efetiva sempre abaixo de 60% da vazão nominal de referência, e a sensibilidade ao efeito vibratório somente se mostrou significativa, acima de 30 Hz. Eis uma tendência favorável do fundamento básico da técnica vibratória, qual seja, o de atuar no sentido de aumentar a

fluidez, consequentemente o desempenho e permeabilidade como um todo, essencial à viabilização operacional de máquinas de fluxo.

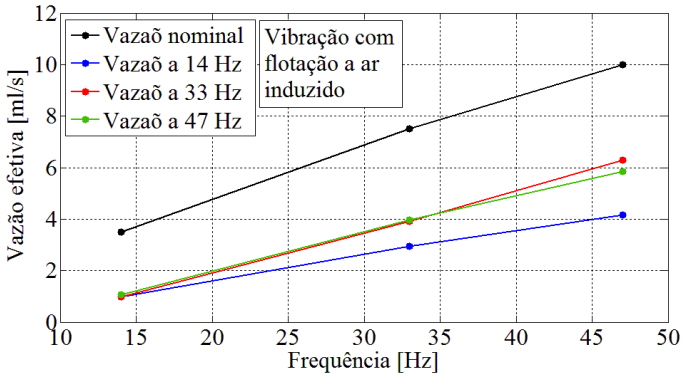


Figura 4.5 Influência da frequência de excitação na vazão específica comparada à vazão nominal em fluxo aberto (Sem adsorvente), em operação com flotação a ar induzido.

4.3.3 Influência do efeito vibratório sobre o tempo de residência

A Figura 4.6 mostra o efeito da vibração sobre o tempo de residência. Em verdade se trata da imagem virtual do esboço gráfico mostrado através da Figura 4.4 uma vez que vazão e tempo de residência diferem a menos de uma constante multiplicativa equivalente ao volume de 370 mℓ da cuba de tratamento. Um aspecto do comportamento que se pode destacar diz respeito à inversão da monotonia decrescente do tempo de residência que se verifica no processo *Vibra-flot* a frequências superiores a 33 Hz. Acima desse valor, provavelmente, o sistema ao afastar-se da região ressonante correspondente ao modo de vibrar, decresce drasticamente em amplitude de oscilação como se mostra através da Figura 3.65 (b) e Figura 3.66 (b), item 3.4, Cap. 3.

Ainda que se imprima vibração a elevadas faixas de frequência com vista à maior agitação, baixa amplitude sempre se associa a alta frequência em sistemas elásticos. Por outro lado, baixas amplitudes significam redução de energia vibratória ou vigor de excitação, necessária à ruptura de interfaces de bolhas da barreira gaseificada a que se fez referência anteriormente. Como resultado se tem maior ação resistiva ao fluxo de efluente, consequentemente maior tempo de residência. Este efeito, associado a aumento de capilaridade por ação vibracional, parece exercer marcada influência na vazão efetiva.

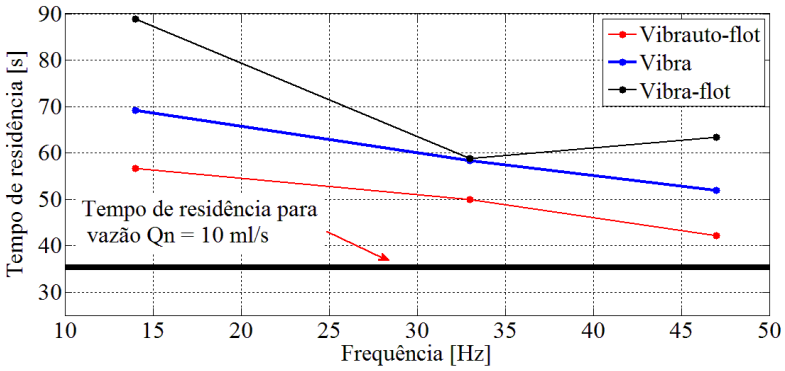


Figura 4.6 Diminuição do tempo de residência em função da frequência no processo (*Vibrauto-flot*).

O comportamento de bolhas de ar em meio rico em surfactante, a exemplo de água produzida, cuja característica dominante se expressa por salinidade e poluição, pode ser bastante influenciado por esses dispersos. Pode-se afirmar, e consta da literatura geral sobre o assunto emulsão, previamente tratado no Capítulo 2, serem responsáveis pela estabilidade da emulsão. Segundo Fujasová-Zedniková *et al*., (2010), diminui a velocidade terminal das bolhas de ar e aumenta a retenção no fluído. Isto se deve à adsorção de surfactantes na interface e desaceleração da velocidade superficial, por conseguinte, deslizamento da bolha dispersa.

A rigor, o efeito se deve tornar menos influente no processo *Vibra* por não existirem bolhas de ar em flotação, se comparado aos processos, *Vibra-flot* e *Vibrauto-flot*, mostrados através da Figura 4.6. Exceto em domínios de mais alta energia, como a frequência de 33 Hz e amplitude de 2,39 mm, o efeito parece agir em menor proporção no sistema a ar induzido, *Vibra-flot*. Por não se observar neste sentido, diferença aguda entre processos, excetuando-se o processo *Vibra*, que se isenta da presença de bolhas de ar, credita-se aos mais elevados tempos-médios de retenção, observados no processo *Vibra-flot*, se deverem ao excesso, provavelmente, de bolhas de ar, uma vez que não se mediu e vazão de geração de bolhas de ar no processo a flotação natural ou, *Vibrauto-flot*.

4.4 Influência do efeito vibracional na separação de óleo (Queda de TOG) e desempenho do processo

Resultados mostrados através da Figura 4.7 revela relativamente, melhor desempenho de remoção de óleo em operações realizadas às mais altas faixas de frequência do espec-

tro de ensaio, em todos os casos. À frequência de 14 Hz o processo *Vibra* não apresentou rendimento satisfatório nas condições de ensaio.

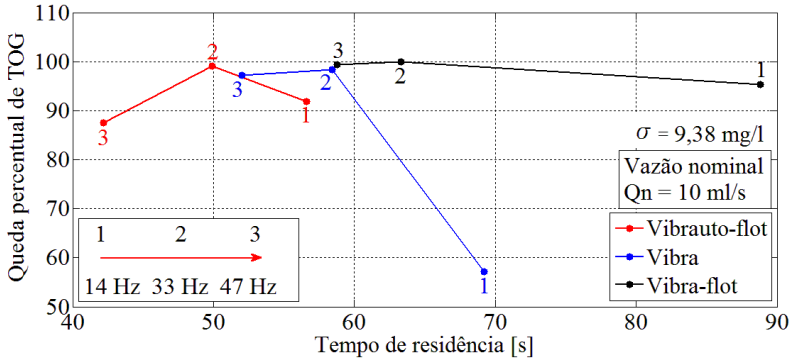


Figura 4.7 Queda percentual de TOG em função do tempo de residência para três faixas de frequência de excitação com o controlador de fluxo calibrado para máxima vazão de ensaio.

Em faixas de frequência mais elevadas, 33 Hz e 47 Hz, o rendimento do processo *Vibra* eleva-se substancialmente, provavelmente por aumento da velocidade de fluxo efetivo, constatada através de queda no tempo de residência, de acordo com a Figura 4.6 e Figura 4.7. Com isto provavelmente impele-se gotículas de óleo contra o adsorvente e se pode aumentar o rendimento de extração de óleo. A Figura 4.8, a seguir, mostra o efeito em termos da vazão efetiva específica e se pode visualizar mais apropriadamente.

A remoção de óleo por impregnação de gotículas junto à ação vibracional parece relacionar-se não só com velocidade de fluxo, mas com retenção de gotículas de óleo no leito adsorvente que se podem estar impregnando por renitência da ação vibracional. A renitência torna-se mais eficiente à frequência mais elevada, naturalmente. Nesta última hipótese, a velocidade de fluxo tenderia decair consideravelmente como se pode constatar através da Figura 4.7, ponto (1), processo *Vibra-flot* através do correspondente tempo de residência.

A ação impeditiva de bolhas de ar ao fluxo, cujo efeito retentor pode ser responsável pelo que se observa através da curva concernente ao processo *Vibra-flot*, ponto (1), Figura 4.7, isto é, elevada retenção e queda de TOG, pode reforçar a prerrogativa anterior. O resultado é a maior exposição de gotículas à adsorção, porém ao custo do déficit de desempenho devido ao baixo fluxo. Em contrapartida, o processo *Vibrauto-flot* mantém níveis aproximados de desempenho, no que respeita à queda de TOG, sem sacrificar o desempenho de fluxo.

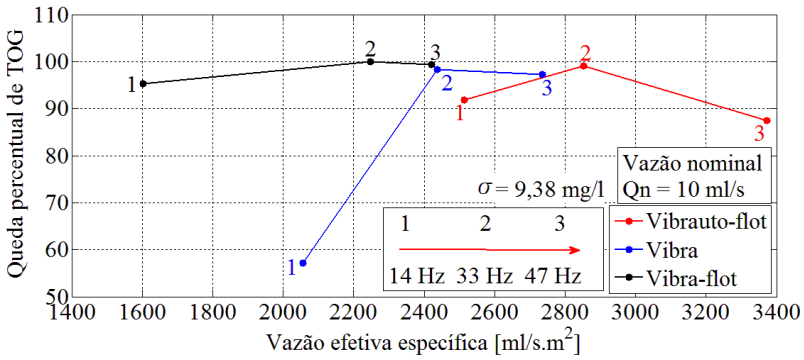


Figura 4.8 Queda percentual de TOG em função da vazão efetiva específica para três faixas de frequência de excitação com o controlador de fluxo calibrado para máxima vazão de ensaio.

Cabe recordar que a porosidade da célula adsorvente (Espaço nominal livre de resto entre o volume do tronco de pirâmide da cuba (V_{cel} = *48,33 mℓ*) e o volume de efluente deslocado pelo adsorvente (V_{ads} = *1,4 mℓ*) de 46,93 mℓ, item 3.2.6, Cap. 3) é tão só 1,5% maior no processo *Vibrauto-flot* se comparado aos demais. O critério de compactação do adsorvente na cuba se limitou à facilidade de inseri-lo, removê-lo e de preencher totalmente o espaço livre da parte superior da célula, acima das nervuras, com relativamente pequena pressão (Vide Figura 3.77, item 3.6.2, Cap. 3). Para tal foi necessária massa de 11g para o processo *Vibra* e *Vibra-flot* e 5,5g para o processo *Vibrauto-flot*, aproximadamente. A redução de 50% em massa de adsorvente no processo *Vibrauto-flot* corresponde a um aumento de 1,5% na porosidade. Isto se coloca como boa perspectiva da inovadora técnica de separação líquido/líquido ainda em estudo. No caso particular de separação óleo/água, demonstra-se relativa manutenção de desempenho sem necessidade de aumentar superfície de adsorção. Isto tem como consequência diminuição da seção de passagem de fluxo, dificilmente exequível em processos de adsorção por membranas, peneiras moleculares, areias, etc.

Falou-se em renitência do efeito vibratório no que concerne ao choque de gotículas de óleo entre si, e com o adsorvente. Questões de natureza teórico-experimental são discutidas na literatura recomendada (Orme, 1997) com o propósito de explicar prováveis mecanismos que podem contribuir para adsorção de gotículas de óleo, sobretudo quando submetidas à determinada pressão (Lagubeau, 2012). A fenomenologia dinâmica média envolve interação fluído-estrutura e elasto-hidrodinâmica, porque gotas chocam-se, aderem, resvalam ou se fragmentam em gotas menores. Adicionalmente se deve considerar o aporte vibracional energético transferido ao efluente pelo sistema mecânico. Particularmente, a hipótese menos provável

é da fragmentação de gotas, por sua reduzida dimensão média o que lhes confere características de um quase sólido, reportado na discussão básica do trabalho.

Intuitivamente o domínio que parece prevalecer é o de mecanismos de fluidodinâmica vibracional que operam no sentido de aproximar gotículas de óleo das paredes adsorventes da célula de tratamento, impulsionadas, sobretudo, pela intensidade do fluxo de efluente. Admitiu-se, no item 3.5 Cap. 3, velocidade da partícula dispersa como fator dominante no processo de impregnação/queda de TOG. A cuja componente de velocidade, referente à eclosão de bolhas de ar e o subsequente movimento da interface, como integrante de maior intensidade e, portanto, responsável direta pelo desempenho do sistema. A despeito da velocidade admitida via pesquisa correlacionada, ou seja, 2,0 m/s em média, resultados mostrados através das figuras, Figura 4.7 e Figura 4.8, para operação sem flotação (*Vibra*) a faixa de frequência acima de 33 Hz, são relativamente satisfatórios. Acrescenta-se serem levemente decrescentes quando valores mais elevados de frequência têm lugar.

Depreende-se disto, que velocidade de fluxo de efluente em meio à vibração parece ser suficiente para prover choque e adsorção de partículas, independentemente do fator eclosão de bolhas, exclusivo de processos com flotação. Não se sabe, todavia, se o processo *Vibra* mantém o desempenho a valores mais elevados de vazão, a exemplo dos que se verificam no processo *Vibrauto-flot*. Em todo caso, se percebe haver tendência de melhor desempenho a 33 Hz. Acredita-se que o efeito vibracional condiciona a aproximação de partículas dispersas às paredes adsorventes, mas requer fluxo ou translação de alguma forma.

Hassan *et al*., (2006) e Hassan & Kawaji (2007) investigaram o fenômeno de outra forma, utilizando uma esfera de aço relativamente grande (12,7 mm) em microgravidade, na proximidade da parede do reservatório. Reportaram deslocamentos da ordem de 10 μm a 100 μm instantaneamente em direção à parede, em faixas de frequência da ordem de 25 Hz e 1.0 mm de amplitude. Partículas de 1.0 mm levaram 2 minutos para deslocarem-se de 4,5 mm. O resultado parece confirmar a importância da existência de fluxo discutida anteriormente.

Cabe um parêntese com referência ao que foi apresentado no item 3.2.5, Figura 3.12, sobre o tratamento a batelada, vantagens e desvantagens. A necessidade de se prover alguma forma de fluxo, nessa modalidade de tratamento é teoricamente impedida. Convecções fluídicas vibracionais de relativa intensidade reportadas por Lakiza (2005), em seu estudo sobre formas geométricas e sua interelação com o mecanismo vibracional de fluído gaseificado, podem produzir o necessário fluxo de forma a viabilizar o tratamento vibratório. A investigação dessa classe de tratamento se remete a futura pesquisa.

Do ponto de vista da atração de partículas dispersas por paredes submersas do adsorvente, Saadatmand & Kawaji (2010) estudaram o efeito da vibração entre partículas próximas, e entre partículas e paredes próximas. Quando o fluído é *invíscido,* a exemplo do efluente que se utilizou, se pode considerar o desenvolvimento de forças de atração; quando é viscoso, de repulsão crescente com amplitude de vibração. Outra premissa a se considerar é a existência de fluxo no entorno da parede de elementos imersos acima da camada não deslizante de Stokes (Fox & McDonald, 1988). A velocidade aumenta com o produto cinético ($\omega.Xo$) reportado por Ivanova; Kozlov; Evesque (2001), produzindo queda de pressão a medida em que a partícula aproxima-se de outra ou de paredes submersas. O fenômeno é conhecido como efeito Bernoulli (Fox & McDonald, 1988) e tem como resultado, queda de pressão hidrodinâmica e consequente surgimento de força atrativa.

Fraco desempenho do processo *Vibra* verifica-se através das figuras, Figura 4.7 e Figura 4.8, ponto (1), a 14 Hz. Isto pode estar relacionado a baixas velocidades de fluxo oscilatório e baixa intensidade de forças de atração parede/partícula dispersa, além de ausência de ar de flotação. Tal efeito, a priori, embasa o princípio físico da utilização de vibração como promissora técnica de separação óleo/água fundada na cinética de fluídos. Os resultados apontam provável concordância da premissa fundamental do trabalho com a tendência, verificada através de curvas mostradas anteriormente nas referidas figuras.

Não raro instâncias de investigação científica se pode fundar em similaridade fenomenológica com intuito de explicar uma ocorrência física, físico-química ou de natureza afim. Nesse caso, aceitável padrão de concordância, e até proporcionalidade, entre variáveis de estado, físico ou químico, deve ser respeitado. Estudos envolvendo choque entre gotas de água ou óleo, entre si ou com superfície sólida ou maleável, relatados na literatura, raramente não se realizam ao ar. Isto se deve, provavelmente, à demanda de processos industriais à base de tais princípios dos quais se podem citar, jato de tinta, óleo, aspersão, jatos para extinção de incêndio, jatos para combustão, lubrificação, etc. A atmosfera que compõe a interface é sempre aérea ou de outro tipo de gás. A bibliografia sobre choques submersos é ainda escassa.

Cabe ressaltar que o princípio básico de processos investigados neste trabalho envolve ruptura da gota dispersa através da interface óleo/água com consequente aderência séssil de óleo no adsorvente hidrofílico. Tendo-se em conta esses aspectos, o ambiente submerso parece favorável à impregnação uma vez que o coeficiente interfacial óleo/água é menor que o óleo/ar ou o água/ar (aprox. 24 mN/m, contra 35 mN/m e 72 mN/m respectivamente) e isto em parte justifica o resultado que se observa através das figuras, Figura 4.7 e Figura 4.8.

Uma questão que se coloca é sobre pressão hidrostática sobre a gota. Observa-se que o processo se verifica ao quase nível subsuperficial e, no caso de processamento *Vibra-flot* ou *Vibrauto-flot* com bolhas de ar permeando o adsorvente, a taxa de vazio pode aproximar ainda mais a pressão hidrostática da pressão ambiental atmosférica. O que se busca deixar patente, no sentido da semelhança supracitada, é possibilidade de se utilizar resultados de investigações de fenômenos que se verificam ao ar, para procurar entender e avaliar o desempenho operacional dos processos em estudo, em face da escassez bibliográfica. Sobre esse aspecto, Stevens (2009) realizou experiência com impacto ao ar de gotas de óleo de silicone contra vidro, submetidas a pressões ambientais de 1,0 atm, e de 0,373 atm. Velocidades acima de 2,0 m/s foram utilizadas. O pesquisador reportou que a baixas pressões sobre a gota, 0,373 atm, não ocorrem salpicos (*splash*) a velocidades acima da crítica (2,8 m/s), ou seja, a aderência é sempre séssil, e cresce com a viscosidade do óleo. Isto que dizer que, ruptura da interface e ocorrência de salpico pode depender do balanço de pressão sobre a gota, com resistência interfacial dominando a questão.

A conclusão a que se pode chegar é a de que salpicos, teoricamente podem recrudescer a emulsão, mas é pouco provável que ocorra em ambiente submerso. A queda de desempenho, nesse caso, poderia se verificar por resvalamentos da gota de óleo ao chocar-se com o adsorvente, quando a dimensão é reduzida, e posterior ré-emulsificação. Como dimensões médias de gotas da emulsão foi admitido ser da ordem de 50 μm (Figura 3.75, item 3.6.1 Cap. 3), por conseguinte, muito abaixo do comprimento de capilaridade do óleo (L_{cap} = 1,6 mm), energia cinética suficiente deve ser requerida para evitar resvalamentos (*Bounce* em inglês).

Através da Figura 4.9 mostra-se resultados de ensaios quanto à influência da vazão e frequência na queda de TOG para o tratamento *Vibra-flot*. Deve ser lembrado que valores de TOG iniciais e finais foram tomados por estimativa, com base na Tabela 3.1, item 3.6.7 Cap. 3, a partir de exame gravimétrico de impregnação e medições de TOG.

Assegura-se que por princípio exposto no início do trabalho, nenhum floculante, ou desemulsificante, ou qualquer técnica que favoreça acidificar o efluente, consequentemente, facilitar remoção de óleo do efluente, foi realizada. Destarte, dá-se assentimento ao pH do efluente manter-se intacto com relação ao valor inicial, entre 8,2 e 9,3 médios, durante todo o ensaio. Assim aproxima-se o efluente sintético em salinidade de águas de produção de petróleo, na busca por condição mais realística do ponto de vista industrial corrente.

Trabalhos realçados na literatura recomendada apresentam valores de pH sempre abaixo de 6,5 condicionado por acidificação. O setor do quadrante de coordenadas gráficas

destacado por linha pontilhada nas figuras seguintes, refere-se ao conjunto de valores percentuais de remoção de óleo que resultam em concentração final de óleo (TOG_f) legalmente permitida pelo CONAMA, órgão do SISNAMA responsável pelo controle de despejos industriais e qualidade ambiental.

Barras de intervalo traçadas no gráfico da Figura 4.9, expressam o intervalo entre a menor e maior medição da grandeza do grupo. Segundo tal orientação, valores de queda de TOG obtidos a 47 Hz de excitação refletem tendência de manutenção de desempenho, a despeito da vazão, com repetitividade e desvios-médios, entre uma frequência e outra, menores. A 14 Hz de excitação resultados se mostraram satisfatórios no que concerne à queda de TOG a maiores vazões efetivas. Se deve lembrar que no sistema elevam-se por ação vibracional.

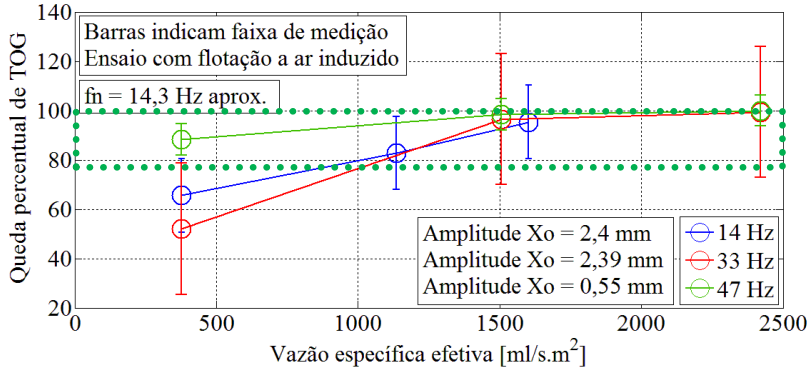


Figura 4.9 Queda percentual de TOG em função da vazão efetiva específica em três faixas de frequência de excitação, e respectivas amplitudes de deslocamento, com varredura em vazão específica nominal no intervalo de ensaio (3,5 mℓ/s – 1.346 mℓ/s.m²; 7,5 mℓ/s – 2.885 mℓ/s.m²; 10 mℓ/s – 3.850 mℓ/s.m²). Barras adicionais indicam intervalo de medição de ensaio e linhas pontilhadas, região de enquadramento do CONAMA. (*Vibra-flot*)

A máxima vazão efetiva específica atingida ficou abaixo de 2.500 mℓ/s.m², muito abaixo da vazão nominal de ensaio, 3.850 mℓ/s.m². Neste sentido o desempenho global do processo *Vibra-flot* (Figura 4.9) no que concerne à taxa de fluxo, mostrou-se abaixo dos demais, *Vibra* e *Vibrauto-flot*. Eventualmente podem-se lograr maiores vazões com este método, nas mesmas condições, através da diminuição de massa adsorvente, a exemplo do que se fez no processamento, *Vibrauto-flot*, ou buscando-se adequado valor de vazão de ar de flotação. Em todos os casos o desempenho global se mostra satisfatório em faixas de frequência acima de 33 Hz, porém a maiores vazões.

A elevação da frequência unicamente, não parece melhorar o rendimento sem que haja aumento de fluxo. Às mais baixas vazões nominais (3,5 mℓ/s – 1.346 mℓ/s.m^2), vazões efetivas somente atingiram pouco mais de 25% da correspondente vazão nominal, mesmo operando-se a frequência relativamente alta, de 33 Hz. Como não se investigou o comportamento do sistema em função da vazão de ar, taxas excessivas eventualmente podem saturar a célula adsorvente e provocar bloqueio à passagem de efluente.

Da Rosa (2002) desenvolveu notável trabalho de construção e análise de um sistema de floculação-flotação em linha (FF) o qual foi submetido a variadas condições de tratamento. No que concerne à vazão de ar, avaliou o sistema a intervalo de vazão de 0 a 120 ℓ/min (2.000 mℓ/s) e reportou melhor desempenho a valores de 80 ℓ/min (1.333 mℓ/s) e taxa de fluxo de efluente (Q_{ef} = 416,7 mℓ/s). À vazão de ar nula a eficiência do sistema segundo o pesquisador, caiu sensivelmente.

Neste trabalho foram realizados testes com vazão de flotação nula, cujos resultados se mostram através das figuras, Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.10. Às maiores taxas de vazão e faixas de frequência o sistema vibracional parece não sofrer influência da ausência de ar de flotação, como se mostra através de resultados do processo *Vibra* na Figura 4.10. Isto suscita boa perspectiva da técnica em estudo, se comparada às convencionais.

A ausência de agentes de floculação, segundo da Rosa (2002), proporciona resultado medíocre. Confirma a dependência direta do uso de coadjuvantes que podem produzir resíduo

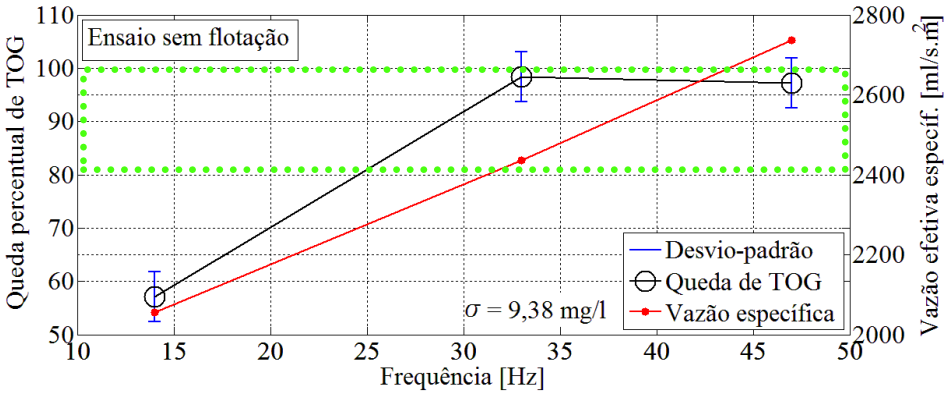


Figura 4.10 Queda percentual de TOG e aumento de vazão efetiva específica em função da frequência de excitação com varredura em vazão específica nominal no intervalo de ensaio (3,5 mℓ/s – 1.346 mℓ/s.m^2; 7,5 mℓ/s – 2.885 mℓ/s.m^2; 10 mℓ/s – 3.850 mℓ/s.m^2). Barras adicionais indicam desvio-padrão de medições de ensaio e linha pontilhada verde, faixa de enquadramento legal do CONAMA. (*Vibra*)

no óleo recuperado e na água tratada. O tempo de residência do processo (FF) orbitou entre 42 e 126 segundos, contra 40 e 90 segundos observados na técnica vibracional, mostrados através da Figura 4.6.

Neste trabalho utilizou-se vazão constante de ar de 51 mℓ/s a 1,41 atm, e taxa máxima de fluxo de efluente, 10 mℓ/s. Em maior frequência, a partir de 33 Hz, o sistema se mostrou eficiente com aumento substancial da vazão efetiva, embora 30% abaixo da vazão nominal máxima. O resultado não descarta a necessária flotação uma vez que não se conhece o comportamento a maiores vazões com reduzida massa adsorvente.

Rodrigues & Rubio[a] (2003) desenvolveram excelente trabalho de inovação precisamente, um sistema de flotação a ar dissolvido à pressão de saturação, 3 a 4 atm. O sistema foi operado, alternativamente, a gás metano (CH_4) dissolvido (FGD – Flotação a gás dissolvido) à pressão de saturação de 11 atm, aproximadamente. Vantagens e desvantagens se constataram. Como desvantagem se teve resultados pouco eficientes de remoção de óleo; como vantagem, aproveitamento do gás naturalmente dissolvido na água produzida com o que se logra redução de custo com compressão de ar e demais sistemas integrantes do processo.

Rodrigues & Rubio[a] (2003) também testaram o sistema a ar dissolvido (FAD) e constataram queda de TOG da ordem de 90% a vazões de 7 a 12 $m^3/h.m^2$ (1.944 $m\ell/s.m^2$ a 3.333 $m\ell/s.m^2$). Observa-se que a vazão específica encontra-se dentro do intervalo de vazãoes específicas utilizadas neste trabalho, afora quetões de extrapolação de escala do sistema, tendo em vista que o protótipo utilizado por Rodrigues & Rubio[a] (2003) foi de muito maior dimensão que o sistema em apreço neste trabalho. O intervalo de taxa de fluxo de ar para flotação foi de 111,1 mℓ/s a 555 mℓ/s, e o efluente sintético, salinizado com TOG inicial de 250 mg/ℓ a 695 mg/ℓ. São parâmetros qualitativamente próximos aos que foram utilizados neste trabalho exceto a vazão efetiva de efluente. Segundo Rodrigues & Rubio[a] (2003) na ausência de floculante a capacidade de remoção de óleo limitou-se a 57%, ao tempo de residência de 20 minutos. Isto mostra clara dependência operacional de adjuntos químicos de tratamento.

Comparativamente ao sistema a flotação natural (*Vibrauto-flot*), cujos resultados se mostram através da Figura 4.11, independentemente da utilização de agentes químicos para quebra de emulsão e floculação, se obteve resultados animadores nas condições de teste. Observa-se a 33 Hz, a vazão efetiva atingir 70%, aproximadamente, da vazão nominal, e a 47 Hz, 88%. Ambos os resultados garantem enquadramento legal do efluente tratado, nos limites de teste, demarcado por linhas pontilhadas em verde. A flotação natural gerada no processo é

provavelmente a responsável por maior desempenho, inclusive si se lhe compara com processos, *Vibra* e *Vibra-flot.*

Acima de 33 Hz o sistema *Vibrauto-flot* perde rendimento provavelmente por desprendimento de óleo adsorvido ou vazão efetiva acima de limites adequados de operação. Isto pressupõe existência de limite de transferência de energia cinética ($\omega.Xo$) acima do qual o desempenho decai. A 47 Hz a amplitude de vibração medida foi 0,55 mm (Vide Figura 3.63 e Figura 3.66, item 3.4, Cap. 3). Nada se pode afirmar sobre o que ocorreria caso fosse mantida faixa de frequência a maiore amplitude de vibração ou maior nível de energia vibracional.

Naturalmente, projetos distintos de suspensão elástica seriam necessários à obtenção de combinações apropriadas de amplitude e frequência, salvo quando se utiliza sistemas articulados. A energia cinética transferida às gotículas de óleo a maiores amplitudes é um assunto relevante, remetido a futuros trabalhos de investigação. Com esta preocupação e para tal, se contruiu o sistema articulado mostrado através da Figura 3.13, item 3.2.5 Cap. 3.

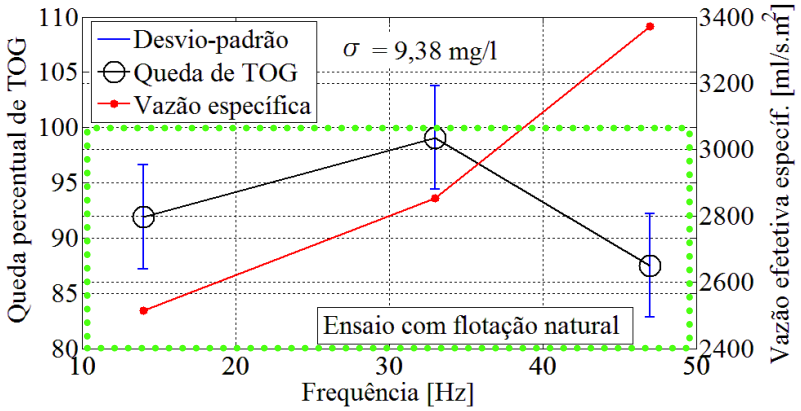


Figura 4.11 Queda percentual de TOG e elevação de vazão efetiva específica, em função da frequência de excitação com varredura em vazão específica nominal no intervalo de ensaio (3,5 mℓ/s – 1.346 mℓ/s.m^2; 7,5 mℓ/s – 2.885 mℓ/s.m^2; 10 mℓ/s – 3.850 mℓ/s.m^2). Barras adicionais indicam desvio-padrão de medição de ensaio e linha pontilhada verde, região de enquadramento legal do CONAMA. (*Vibrauto-flot*)

Resultados qualitativamente semelhantes foram apresentados por Santander; Rodrigues; Rubio (2011). Segundo os pesquisadores, o sistema FAD se mostrou problemático ao operar vazões da ordem de 1.944 mℓ/s.m^2. Uma criativa variante da conhecida e convencional, técnica de flotação a jato, Jameson (CJC – *Conventional Jameson Cell*), foi apresentada

com denominação, (MJC – *Modified Jameson Cell*). Segundo reportaram, o novo projeto se adequou bem ao teste piloto em plataforma marinha com boa capacidade de enquadramento de efluente a elevadas taxas de fluxo, em oposição à flotação convencional a jato (CJC). A alta taxa de retenção de ar ou, *hold-up*, que se traduz por boa capacidade de captura de gotas de óleo, a baixo tempo de retenção (Elevadas taxas de separação), o MJC surge com boa perspectiva de aplicação industrial.

A retenção de ar (*Hold-up*) é dos mais importantes parâmetros de referência utilizados em processos de transferência de massa em sistemas gaseificados, sobretudo, reatores químicos. Pode-se estimar *hold-up* através da relação entre velocidade superficial da bolha de ar e velocidade terminal de ascensão da bolha (Equação 44, item 2.5.3 Cap. 3). Outra forma é através da relação entre área efetiva do fluxo de gás e área geométrica da coluna, representada pela expressão seguinte, Equação 63, ou ainda, entre volume da coluna de fluxo de ar ou gás, e volume da célula. Relações diversas para obtenção de *hold-up* podem ser observadas em (Chisti & Moo-Yuong, 1988).

$$[A]_{coluna\ de\ gás}\ x\ [\dot{Y}_b]_{veloc.\ terminal} = [A]_{seção\ transversal\ da\ coluna}\ x\ [\dot{Y}_b]_{veloc.\ superficial} \qquad (63)$$

A despeito de bons resultados obtidos com o MJC, o desempenho também está associado à adição de floculante (10 mg/ℓ de PVA) para quebra de emulsão e formação prévia de flocos aerados. Ambos os processos diferenciam-se por prévia penetração de efluente na estrutura-pacote do MJC (Figura 2.13, item 2.2.3.3, Cap. 2). A função é similar à que desempenha estruturas monolíticas de reatores (Waghmare, 2008) em favorecer abundante contacto em fluxo turbulento, a exemplo do que ocorre na célula de flotação do *Vibrauto-flot*. Resumidamente, resultados apresentados pela técnica MJC com efluente a pH = 6,5, correspondem a 70% – 81% de queda de TOG (TOG_f entre 20 e 30 mg/ℓ) à vazão efetiva de 360 mℓ/s e tempo de retenção de 96 segundos.

Testes em plataforma marítima, à vazão de 1.389 mℓ/s (Equivalente à vazão específica, 7.611 mℓ/s.m^2, para fins de comparação com vazões utilizadas neste trabalho) revelou tempo de retenção abaixo de 180 segundos, segundo reportaram. O sistema *Vibrauto-flot*, guardando-se proporções de escala, sobretudo de vazão, operou com máxima vazão efetiva de aproximados, 3.400 mℓ/s.m^2, e obteve resultados relativamente superiores. Vazões de ar de

flotação para o sistema MJC variaram no intervalo de 50 mℓ/s a 333 mℓ/s, contra 51 mℓ/s utilizada no sistema *Vibra-flot* e 0 mℓ/s nos sistemas, *Vibra* e *Vibrauto-flot*.

Ao se observar as figuras, Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, depreende-se, comparativamente, bons resultados no que à queda de TOG se refere. Isto se verifica em faixas de frequência de 33 Hz, para processos *Vibra* e *Vibrauto-flot*, e em faixas de 47 Hz para o processo *Vibra-flot*. No que concerne à vazão efetiva específica, como diretriz de desempenho o processo *Vibrauto-flot* mostrou-se viável nas condições de ensaio, uma vez que foi empregado somente 50% de área superficial adsorvente, sem perda apreciável de remoção de óleo.

Sob a ótica da energia ou ação vibracional, caracterizada pela *supercriticalidade* vibracional (Tabela 2.2, segunda linha, item 2.3 Cap. 2), e sua relação com taxas de transferência de massa em misturas gaseificadas, Waghmare (2008) analisou o desempenho de um reator monolítico a pistão oscilante (POMR) submetido à vibração vertical. Krishna & Ellenberger (2003) analisaram o desempenho de uma coluna de gaseificação para dissolução de oxigênio em água e sua relação com ação vibracional vertical no que concerne à redução do tamanho de bolhas de oxigênio e níveis de dissolução do gás. No primeiro caso, o pesquisador Waghmare investigou um processo inovador (POMR - Trifásico) operando em dois modos com auxílio de catalisador monolítico à base de paládio e alumina Pd/Al_2O_3. Resultados apontaram superioridade da ação vibracional sobre agitação convencional na hidrogenação de alfa-metil-estireno a cumeno, e hidrogenação de óleo de soja.

A técnica de usar vibrações para melhorar o desempenho de reações químicas se revelou em 1938 através dos primeiros trabalhos de Martinelli e Boelter (Baird (1966) apud Waghmare (2008)) que reportaram aumentar a taxa de transferência de calor em 400% com convecção natural. À frequência de 17,5 Hz elevou-se a atividade sobre alfa-metil-estireno em 84% e sobre óleo de soja, em 112%, segundo o pesquisador. Isto se deve basicamente à maior uniformização do tamanho e distribuição de bolhas de ar e à taxa de difusão que, segundo reportou, aumentou em quatro vezes para ensaios realizados em coluna vertical de 538 mm de altura.

Embora estar-se diante de distinto modo de vibrar, isto é, vibração vertical, pouco se diferencia no que diz respeito ao efeito global, exceto por maior retardamento que pode provocar na ascensão de bolhas de ar (Item 2.5.2 Cap. 2). Segundo reportou Waghmare (2008) constatou-se aumento de 180% na retenção de ar (*hold-up*) e 325% na taxa de transferência de massa, se comparados ao processo realizado em agitação convencional operando-se na faixa de 20 Hz, 1,36 mm de amplitude de deslocamento e vazão de 30,4 mℓ/s. A vazão é, portanto,

três vezes maior que a máxima vazão utilizada neste trabalho. À vazão de 20 mℓ/s a elevação do coeficiente de transferência de massa foi menor, em torno de 165%. Reduzindo-se a amplitude a 0,51 mm e mantendo-se a vazão a 30 mℓ/s, a elevação de retenção de ar caiu para 50% e o coeficiente de transferência de massa, para 100%.

Observam-se efeitos de relativa semelhança com efeitos discutidos neste trabalho, particularmente no que diz respeito à influência da energia vibracional como produto da frequência pela amplitude. Ao referido efeito atribuiu-se a referência, *supercriticalidade* vibracional. No sistema POMR a *supercriticalidade* é sensivelmente diminuída à amplitude de 0,51 mm, quando se mantém a frequência. Como resultado Waghmare (2008) reporta clara obtenção de influência negativa sobre o desempenho. Melhores desempenhos do sistema *Vibrauto-flot* foram obtidos à frequência de 33 Hz e amplitude de 2,4 mm.

À influência de efeito relativamente semelhante, Krishna & Ellenberger (2003) reportaram que à frequência de 40 Hz e amplitude de 0,5 mm a retenção de ar aumentou 180% e o coeficiente de transferência de massa em quase 400%, quando se injeta oxigênio para dissolução em meio aquoso em processo vibratório. No que à redução do tamanho de bolha de ar se refere tanto o sistema POMR quanto a coluna de dissolução de oxigênio de Krishna & Ellenberger (2003) produziram redução de 100% no tamanho de bolhas e ar ou gás. No segundo caso, reportaram que vibração a amplitudes de 1,0 mm e frequência de 17 Hz, geram-se ondas que perdem estabilidade e quebram-se com consequente geração de microbolhas de ar. Isto corresponde e corrobora o fenômeno autoflotação, objeto desta pesquisa.

4.5 Análise da potencialidade do sistema em impregnar óleo disperso no adsorvente metálico

Reitera-se que o sistema caracteriza-se por princípio básico operacional de tratamento, pela capacidade de impregnar óleo no adsorvente metálico. Através deste tópico procura-se estruturar física e matematicamente resultados de ensaio do sistema nas modalidades operacionais de praxe às quais se referem como, *Vibra-flot*, *Vibra* e *Vibrauto-flot*. Na discussão teórico-básica do trabalho, apresentada no Capítulo 2, se enfocou o Teorema dos Π de Buckingham, ou seja, análise adimensional e sua importância não estritamente no campo da fluidodinâmica, mas doutras ciências básicas de engenharia.

Neste tópico procura-se, basicamente, investigar impregnação de óleo no adsorvente, medida por simples gravimetria, conforme descrição expressa nos itens 3.6.2 e 3.6.9 Cap. 3, e por fatores operacionais que eventualmente estejam relacionados. Para tal emprega-se o Número de Weber Vibracional (W_e*) segundo Ivanova; Kozlov; Evesque (2001) e intensidade vibracional ou, *supercriticalidade* (W_v*) segundo Ellenberger & Krishna (2007), interpretada como segunda potência do Número de Froude (F_r^2). Para confronto de parâmetros adimensionais criou-se o conceito, *Índice de impregnação*. Precisamente perfazem o conjunto de índices: (I^*_{mpv}), índice vibracional de impregnação e (I^*_{mpve}), índice energético de impregnação. Fatores constituintes desses índices são: (t_{Rv}*) tempo vibracional de residência e, (IW_v*), intensidade volumétrica vibracional.

A importância do *Índice de impregnação* consiste em descrever quão eficiente é a adesão de gotículas de óleo ao adsorvente, a relação com energia vibracional transferida à dispersão e fatores de ordem geométrica que eventualmente possam representar requisitos de área útil. Adverte-se que muito maior e mais variado conjunto de ensaios será necessário para obtenção de discernimento aprofundado do problema.

Supõe-se inicialmente que uma medida indicial adimensional de impregnação possa ser relacionada através da massa de óleo adsorvida ($I_{mp} = M_{adso}$), e massa de adsorvente (M_{ads}) empregada através da razão:

$$I^*_{mpv} \alpha \frac{M_{adso}}{M_{ads}} \tag{64}$$

Neste caso se pode admitir igualdade a menos de um termo constante na forma:

$$I^*_{mpv} = \frac{M_{adso}}{M_{ads}} CONST \tag{65}$$

Fazendo-se o termo constante (CONST = IW^*_V), deve-se contemplar o conteúdo geométrico e cinético do problema. Se lhes tomando em termos de volume e intensidade vibracional, independentes, se pode redefinir a Equação (65), da seguinte forma:

$$I^*_{mpve} = \frac{M_{adso}}{M_{ads}} \frac{V_{ef}}{V_{cub}} W^*_V \quad com \quad IW^*_V = \frac{V_{ef}}{V_{cub}} W^*_V \tag{66}$$

A Equação (66) se pode agrupar nos termos, rendimento – geometria – energia, respectivamente, e representa, portanto, o índice ou número energético vibracional de impregnação. Este índice traduz a capacidade do sistema de promover impregnação de partículas fluídas dispersas levando em conta relação entre, volume vertido de efluente, volume da cuba de tratamento e energia vibracional imposta para promoção de choque entre gotículas de óleo e adsorvente.

Segundo Malysa; Krasowska; Krzan (2005) e Krzan & Malysa (2012) a rugosidade ou acabamento superficial é determinante nos instantes que se sucedem ao primeiro contacto entre gotícula e superfície. Superfícies rugosas são menos sujeitas ao resvalamento de gotículas após o choque, propiciado pela resistência interfacial entre fluídos. Luz; Ribeiro; Pandolfelli (2008) examinaram a influência positiva da rugosidade sobre a molhabilidade de líquidos sobre sólido com vista à corrosão de refretários. No que concerne à natureza da superfície, superfícies hidrofóbicas, segundo reportaram, propiciou pouco ou nenhum resvalamento de gotas em experimento realizado com orgânicos e superfícies orgânicas. O contrário se revelou com superfícies hidrofílicas. O efeito constitui provável causa relacionada com viabilidade e rendimento, uma vez que a pretensa recuperação de óleo adsorvido pode estar relacionada com o caráter hidrofílico ou hidrofóbico da superfície. A abordagem, entretanto, não se considera neste trabalho; se lhe remete a pesquisas futuras voltadas unicamente ao desempenho.

Por outro lado, sobre a presença de surfactantes, Fujasovȧ-Zedniková (2010) analisando o comportamento de bolhas de ar em processo de flotação, reportaram diminuir a intensidade de resvalamento independentemente da plasticidade da interface. Esses aspectos parecem dominar a questão de impregnação de óleo no adsorvente embora muito ainda há-de se investigar.

A razão volumétrica da Equação (66), pode ser expressa por:

$$\frac{V_{ef}}{V_{cub}} = \frac{Q_{ef}\,.t_{ef}}{V_{cub}} = \frac{t_{ef}}{t_R} \tag{67}$$

Cabe notar que ($t_R = V_{cub} / Q_{ef}$) e ($t_{ef} > t_R$), com ($V_{cub} = H.A$). Os termos representam, portanto, o contexto geométrico de influência na medida de impregnação. O termo (V_{cub}) empregado pode ser substituído por (V_{efcel}) isto é, volume efetivo da célula adsorvente, que constitui o tronco de pirâmide recheado com labirinto adsorvente metálico (Figura 3.22 e 3.23, item 3.2.6 Cap. 3). É uma fração, portanto, ainda menor de (V_{cub}), mas que não representa mu-

dança substancial de conceito. Neste caso cabe expressar-se o tempo de residência em termos do tempo efetivo de residência da gota no labirinto adsorvente dado por, ($t_{Ref} = V_{efcel} / Q_{ef}$).

Para o sistema em apreço se tem (item 3.2.6 Cap. 3) partindo-se da Equação (47):

$$V_{efcel} = V_{cel} - V_{ads} \tag{68}$$

onde, ($V_{cel} = 48{,}33\ m\ell$) e ($V_{ads} = A_{seção}.L_{ads}$) ou ($V_{ads} = M_{ads} / \rho_{aço} = M_{ads} / 7{,}85\ kg/\ell$).

Portanto, tomando-se M_{ads} em [kg], pod-se obter V_{efcel} fazendo-se:

$$V_{efcel} = 48{,}33 - (1.000M_{ads}/7{,}85) \quad ou \quad V_{efcel} = 48{,}33 - 127{,}39.M_{ads} \tag{69}$$

com (V_{efcel}) em [mℓ].

Substituindo-se o resultado da Equação (69) na Equação (66) ter-se-á:

$$I^*_{mpve} = \frac{M_{adso}}{M_{ads}} \frac{V_{ef}}{V_{efcel}} W^*_V \quad com \quad IW^*_V = \frac{V_{ef}}{V_{efcel}} W^*_V \tag{70}$$

se constituindo outra versão da Equação (66) obtida anteriormente.

Para análise de impregnação propõe-se também utilizar a forma axiomática do índice de impregnação mostrada através da Equação (71). Resultados se mostram adiante, através das figuras, Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14. Neste caso emprega-se a Equação (71) como Equação (66) modificada, do índice energético vibracional de impregnação, dada por:

$$I^*_{mpv} = \frac{M_{adso}}{M_{ads}} \frac{1}{t^*_{R_V}} \tag{71}$$

O termo adimensional, ($t_{Rv}* = f.t_R$) da Equação (71) interpreta-se como tempo vibracional de residência ou, renitência do processo de impregnação de gotículas de óleo dispersas. A diferença do índice representado pela Equação (66), está no fato de se não levar em conta a amplitude de vibração cujo produto, ($2\pi f X_0$), interpreta-se como energia cinética transferida ao fluído, referenciada anteriormente, implícita no termo ($W*_v$). Observe-se através das equações, Equação (66) e Equação (71), que ($I*_{mpv}$ e $I*_{mpve}$) aumentam com (t_{Rv}) decrescente.

A Tabela 4.4 à página seguinte representa a coleta experimental extraída de tabelas anteriores e acrescida do cômputo dos respectivos índices definidos para análise. Deve-se

considerar o comprimento caracterísitico (L_c) como altura do labirinto adsorvente dentro da célula e, portanto, se adotam dois valores: L_c = 10 mm para processos Vobrauto-flot e Vibra, e L_c = 5 mm para o processo Vibrauto-flot. A tensão interfacial que se adotou ($(\sigma_s)_{a/o}$) para o cálculo do Número de Weber (W_e) refere-se à interface água/óleo e vale 24 μN/m.

Tabela 4.4 Tabela de parâmetros adimensionais de vibração e impregnação.

Parâmetros de tratamento Q_n = 10 [mℓ/s]	Tratamento em vibração com flotação (FRV)			Tratamento em vibração sem flotação (SF)			Tratamento em vibração com autoflotação (AUT)		
Freqüência (f) [Hz]	14	33	47	14	33	47	14	33	47
Amplitude (X_o) [m]	2,40E-03	2,39E-03	5,50E-04	2,40E-03	2,39E-03	5,50E-04	2,40E-03	2,39E-03	5,50E-04
Q_{ef} [mℓ/s]	4,17E+00	6,29E+00	5,84E+00	5,35E+00	6,34E+00	7,12E+00	6,53E+00	7,42E+00	8,77E+00
$\dot{Y}_g$ [m/s]	4,15E+00	5,17E+00	3,09E+00	2,10E+00	3,12E+00	1,04E+00	4,15E+00	5,17E+00	3,09E+00
$W_e^* = \frac{\rho_o \dot{Y}_g^2 \emptyset_b}{(\sigma_s)_{a/o}}$	3,07E+01	4,77E+01	1,71E+01	7,88E+00	1,74E+01	1,94E+00	3,08E+01	4,77E+01	1,71E+01
$W_v^* = \frac{4(fX_0)^2}{L_c}$	4,52E-01	2,49E+00	2,67E-01	4,52E-01	2,49E+00	2,67E-01	9,03E-01	4,98E+00	5,35E-01
M_{adso} [kg]	9,30E-05	9,70E-05	9,49E-05	5,58E-05	9,60E-05	9,48E-05	6,31E-05	6,89E-05	5,14E-05
M_{ads} [kg]	1,03E-02	1,02E-02	9,55E-03	9,80E-03	9,76E-03	9,03E-03	4,85E-03	4,93E-03	4,31E-03
t_{ef} [s]	2,22E+02	1,47E+02	1,54E+02	1,73E+02	1,46E+02	1,30E+02	1,01E+02	8,90E+01	6,50E+01
t_R [s]	8,88E+01	5,88E+01	6,33E+01	6,92E+01	5,84E+01	5,20E+01	5,66E+01	4,99E+01	4,22E+01
$I_{mpv}^* = \frac{M_{adso} t_{ef}}{M_{ads} t_R}$	1,78E+02	8,21E+01	9,68E+01	6,81E+01	8,38E+01	7,10E+01	7,44E+01	6,20E+01	3,28E+01
$I_{mpve}^* = \frac{M_{adso} t_{ef}}{M_{ads} t_R} W_v^*$	8,03E+01	2,04E+02	2,59E+01	3,07E+01	2,09E+02	1,90E+01	6,72E+01	3,08E+02	1,75E+01

Através da Figura 4.12 à página seguinte, mostram valores do índice de impregnação em função do Número de Weber para três faixas de frequência considerando-se o diâmetro-médio de gotas (ϕ_g = 50 μm). Interligaram-se pontos do gráfico por retas para fins de visualização do conjunto de resultados e não se cogita qualquer tendência funcional ou relação entre parâmetros analisados.

Pode-se interpretar o Número de Weber vibracional (W_e*) como razão entre força inercial e força de capilaridade. O domínio de força inercial se verifica quando (W_e* > 1) sendo, portanto, um parâmetro adimensional adequado à análise de choque entre gotas de fluído ou com superfícies sólidas ou não. Em todas as faixas de frequência (W_e* < 50). Embora não parece provável que bolhas resvalem por eventuais regimes supercríticos (W_e* > 57,7), acre-

dita-se que queda de rendimento possa ocorrer devido à dessorção provocada por vigor do processo oscilatório.

O processo *Vibrauto-flot* revelou ligeira queda de rendimento na faixa de 47 Hz de excitação a vazão mais elevada que a operada no processo *Vibra* e *Vibra-flot*, mostrado através da Figura 4.11 e, em presença de menor superfície adsorvente (50% a menos). Isto sugere a possibilidade de existirem combinações, vazão – frequência, determinantes do rendimento limítrofe, e a velocidade da partícula o parâmetro dominante cuja intensidade parece orbitar faixas ($10 > We^* < 20$). Segundo Orme (1997), vide Figura 2.39 item 2.5.3 Cap. 2, ($5 > We < 23$) parece condição hidrodinâmica favorável ao regime de coalescência permanente revelado para impacto entre gotas de óleo ao ar. Ressalta-se que a tensão interfacial óleo/ar é mais elevada que a tensão óleo/água e o processo de adsorção se revela submerso.

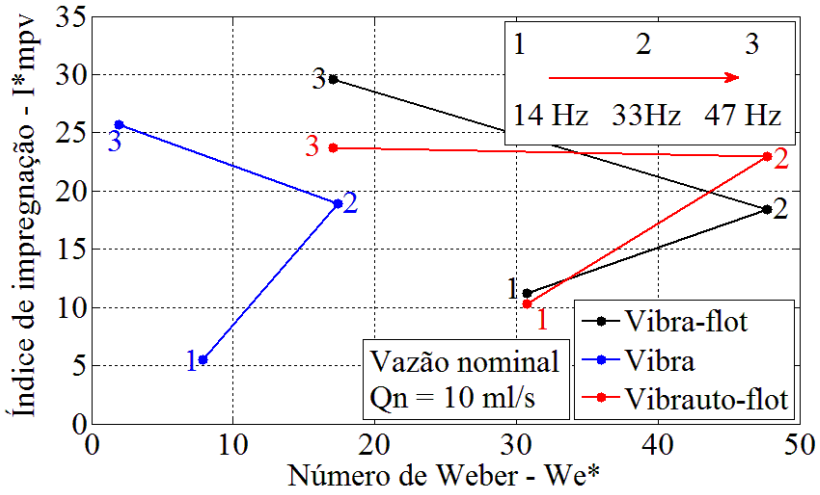


Figura 4.12 Índice de impregnação de óleo no adsorvente metálico em função do Número de Weber (We^*) vibracional.

O desempenho global da operação de tratamento do efluente não se limita à taxa de impregnação como mecanismo de remoção de óleo do sistema, emulsão óleo/água. Adicionalmente, a operação deve ser garantida a altas taxas de fluxo em face do volume efluente em concurso industrial. Quando se associa tamanho reduzido de bolhas de óleo em macroemulsão ($\phi_g < 50$ μm) e os finos filmes fluídicos entre bolhas e superfícies a serem drenados aos instantes que precedem o contacto e subsequente adsorção, fica patente a necessidade de se criar mecanismos dinâmicos que favoreçam choque. Choques devem ser renitentes, em suficiente estado e energia, capaz de deformarem substancialmente a gota.

Tensão interfacial óleo/água em meio tensoativo a exemplo de água produzida, é muito mais baixa que a que se verifica ao ar, por conseguinte, a possibilidade de adesão de óleo ao adsorvente é maior. Em meio ao processo oscilatório e estado energeticamente elevado, reiterados choques de gotículas entre si, parecem favorecer a criação de um estado disperso ($\phi_g > 50$ μm). Gotas de dimensões maiores podem ser mais facilmente adsorvidas em zonas de baixa pressão de entorno fluído do adsorvente. Isto se deve ao movimento relativo entre adsorvente metálico e fluído por criar fluxo em vórtice na vizinhança das paredes.

Associativamente, segundo Ur'ev; Kuchin; Naumenko (2005), partículas de dimensão entre 50 e 100 μm, comuns em emulsões da classe, vibram em fase com o volume fluído e partículas maiores, adiantadas. Talvez se tenha ái a justificativa plausível para a impregnação intensa mostrada através da Figura 3.82 (b), item 3.6.6 Cap. 3. Ashgriz & Poo (2012) realizaram estudo numérico tridimensional para avaliação do choque entre gotas de três fluídos dentre os quais, tetradecano de tensão interfacial (σ = 37 mN/m). Reportaram que a separação após o choque pressupõe valor crítico do Número de Weber, abaixo do qual, gotas não se apartam. Para Número de Reinolds ($R_e \approx 1.000$) o Número crítico de Weber segundo Ashgriz & Poo (2012) foi ($W_e = 34$).

A faixa de valores do Número de Weber em todos os experimentos, conforme Figura 4.12 e por este prisma, parecem favorecer coalescência e adesão séssil (Por espalhamento no caso de gotas maiores). A capacidade de recolhimento da gota após o choque fornece boa medida da possibilidade de aderência séssil ou não e, segundo Kim & Chun (2001) que observaram o recolhimento de gotas de óleo sobre policarbonato e sobre óxido de silicone. Reportaram que vigor de recolhimento parece associar-se a Número de Ohnsorgue (O_h) decrescente e Número de Weber crescente, para líquidos de baixa viscosidade; no caso de líquidos viscosos, o recolhimento é pouco, e lento.

Estudo do impacto de gotas de óleo em superfície maleável, emersa, recoberta pelo mesmo fluído que constitui a gota, foi realizado por Farrall; Hibberd; Simmons (2006). Objetivou-se investigar o resvalamento de gotículas de óleo em mancais hidrodinâmicos pressionados, a alta rotação, com aplicação a aviação de alto desempenho. Constatou-se que gotículas flutuantes não dissipam calor; procurou-se, no entanto, avaliar faixas de Número de Weber necessárias à adesão séssil. A Figura 2.38, item 2.5.3 Cap. 3, aponta a faixa ($10 > W_e^* < 57,7$) como propícia à adesão sem resvalamentos. Observando-se a Figura 4.12, considerando-se razoáveis níveis de impregnação de óleo no adsorvente, parece haver relativa tendência à adesão séssil de gotas de óleo na faixa de valores de Número de Weber apontada pelos pesquisa-

dores. Isto se justifica em face da razoável concordância com valores calculados neste estudo e noutras aplicações afins relatadas na literatura recomendada.

O limite (W_e > 57,7) se recomenda como condição para resvalamento de gotas, e se conhece como Critério de Mundo (Mundo; Sommerfeld; Tropea, 1995). O objeto deste estudo aproxima-se da condição, - choque de gotículas em superfície maleável-, em face do caráter hidrofílico do adsorvente. Ainda que valores do Número de Weber, mostrados através da Figura 4.12, ultrapassassem a barreira (W_e = 57,7), não constituiria condição ou justificativa atribuída a eventual queda de rendimento seja por desprendimento de gotas ou resvalamento. Chen (2005) reportou que quando superfícies de impacto são maleáveis, o Critério de Mundo não se aplica. Depreende-se de experiências com fluídos de alta e baixa viscosidade, a distintos Coeficientes de Laplace, que não se verificou resvalamento a valores bem acima de 57,7.

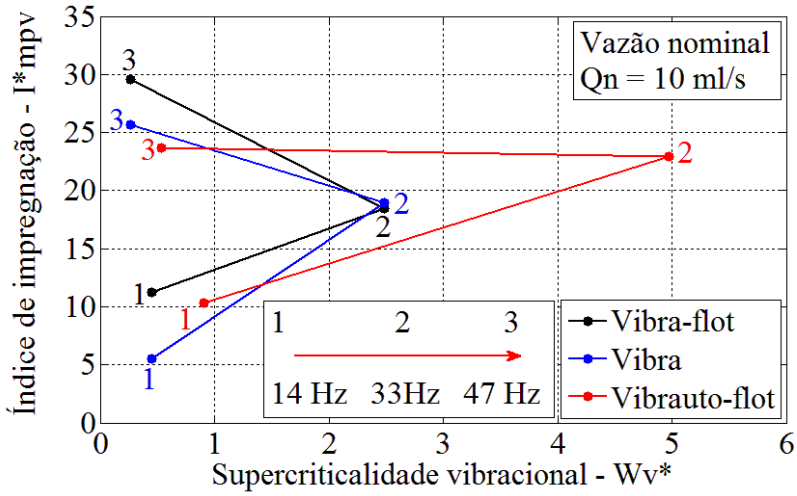


Figura 4.13 Índice de impregnação de óleo no adsorvente metálico em função da *supercriticalidade* vibracional (W_v*).

A Figura 4.13 mostra variações do índice de impregnação adimensional com a intensidade de vibração ou, supercriticalidade. Cabe destacar que se diferencia o comprimento característico (L_c) para o processo Vibrauto-flot. Se lhe tomou em valor 50% menor que para os demais processos pela menor altura atingida pelo labirinto metálico na célula de tratamento, com a massa reduzida à metade (2ª linha, Tabela 2.2, item 2.3 Cap. 2). O menor comprimento característico (L_c = *5 mm*) tomado para o processo *Vibrauto-flot*, contra (L_c = *10 mm*) para os demais, mede-se da base do novelo adsorvente, à altura das nervuras, ao nível de descarga da

cuba de tratamento (Figura 3.23, item 3.2.6 Cap. 3). Tal consideração se fez com base no estudo realizado por Ivanova; Kozlov; Evesque (2001).

Impregnação foi observada a relativamente baixa criticalidade ($0 < W_V^* < 2{,}5$), não obstante, maiores taxas de fluxo só foram observadas a ($4 < W_V^* < 5$). Pode-se ver através da Figura 4.11, item 4.4 Cap. 4, ressalvado menor densidade da célula adsorvente. A premissa operacional do processo concernente à velocidade da gota (frequência de excitação, vazão e eclosão de bolhas de ar) associa-se à amplitude de deslocamento vibracional da massa fluídica, determinante do conteúdo energético de agitação, e parece válida como perspectiva operacional e viabilidade de processo. Calcularem-se os mais prováveis valores de criticalidade, ainda é objeto de estudo em face do caótico comportamento fluídico e adsorvente permeio.

Um procedimento que se pode empregar para análise criteriosa do problema requer câmera de alta resolução e iluminação a lazer. Com o aparato pode-se investigar *in loco* o mecanismo de impregnação. Provavelmente zonas de baixa pressão na linha de arrasto das tiras metálicas adsorventes, auxiliadas por campo vibracional, provavelmente aproxima gotas das paredes adsorventes, impulsionadas por sucessivas eclosões de bolhas de ar a dada vazão. Acredita-se que este mecanismo domina o processo de impregnação.

O processo superficial ondulatório, embora a interferência imposta por obstáculos submersos (Acheson, 1990), parece transpassar o labirinto adsorvente mantendo a propagação média da onda. Hassan *et al*., (2006) asseguram que fios de espessura inferior a 150 μm, não interferem consideravelmente no fluxo oscilatório. Todavia nada afirmam sobre densidade do novelo de fios. O adsorvente utilizado apresenta espessura média muito abaixo (15 μm), e largura bem acima, (513 μm). O estado de empacotamento do novelo provavelmente exerce forte influência na velocidade de fase e grupo de ondas geradas. Abbas (2012) estudou a influência de vibrações torcionais em meio poro-elástico, utilizando cilindro de seção anular. Concluiu que a queda do número característico de onda, ($K = 2\pi/\lambda$), no meio-poroso provoca diminuição da velocidade de fase e, quando o raio anular diminui, a amplitude da onda parece aumentar. Neste caso, maiores frequências tendem aumentar a velocidade do fluído no meio-poroso, consequentemente a velocidade de gotículas dispersas. Isto, em parte, se tem constatado através de maiores índices de impregnação verificados a frequências mais elevadas, nas condições de ensaio. Associadamente observa-se monotônico aumento de vazão provavelmente devido à maior ação capilar provocada pela vibração em meio-poroso, asseverado por Iassonov & Beresnev (2003).

Por fim criaram-se dois índices de impregnação, descritos no início deste tópico, onde se busca auxiliar a avaliação de desempenho operacional dos sistemas em estudo. As figuras, Figura 4.14 e Figura 4.15, mostram resultados de taxas de impregnação em modalidades distintas de cálculo. Respectivamente, a primeira ressalta o desempenho do sistema em termos do tempo vibracional de residência ou, renitência de choque, onde se expressa processo de impregnação desconsiderando-se amplitudes de vibração correspondentes. Este índice se presta bem à análise de sistemas articulados. Trata-se de sistemas sem característica dinâmica intrínseca, onde combinações de amplitude e frequência se podem estabelecer mediante simples seleção da excentricidade do pivô da polia motora. Isto é válido também para outros métodos similares de geração de oscilaçõs mecânicas.

Em ambos os casos (Figura 4.14) se pode inferir a derivada da tendência linearizada:

$$d/d\ t_{Rv}^{*}\ [I^{*}_{mpv}\ (t_{Rv}^{*})] = CONST \quad \text{ou} \quad d/dIW_{v}^{*}\ [I^{*}_{mpve}\ (IW_{v}^{*})] = CONST \qquad (72)$$

Conceitualmente equivale ao quociente entre massa de adsorvato (Óleo impregnado) e massa de adsorvente (Labirinto metálico espiral) dado por, (M_{adso}/M_{ads}). Pode-se admitir o quociente resultante como taxa ou índice de impregnação de óleo no adsorvente.

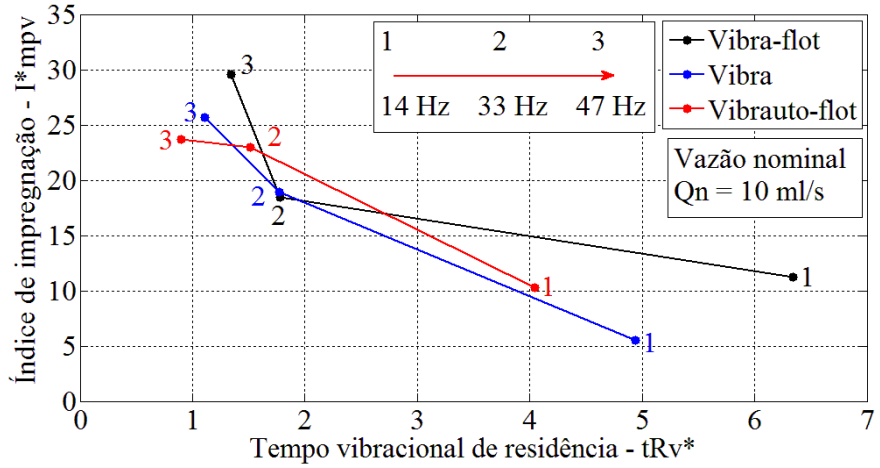


Figura 4.14 Índice de impregnação de óleo no adsorvente metálico em função do tempo vibracional de residência (t_{Rv}*).

Resultados mostram crescente tendência de aumento de desempenho da técnica a tempos de residência decrescentes, - promissores, se comparados aos valores verificados noutras técnicas convencionais de tratamento citadas no trabalho -. Ressalta-se que, em ambos os

casos, a técnica *Vibrauto-flot* mostrou-se robusta nas condições de ensaio, mantendo o nível de desempenho, independentemente de operar em situação desfavorável, se comparada às outras. Entende-se por situação desfavorável, operação com menor área superficial global, reduzida a 50%. Em todas as situações a combinação, frequência e amplitude, correspondente a 33 Hz e 2,4 mm, respectivamente, resultou melhor desempenho global si se considerar impregnação e vazão efetiva como coeficientes de desempenho.

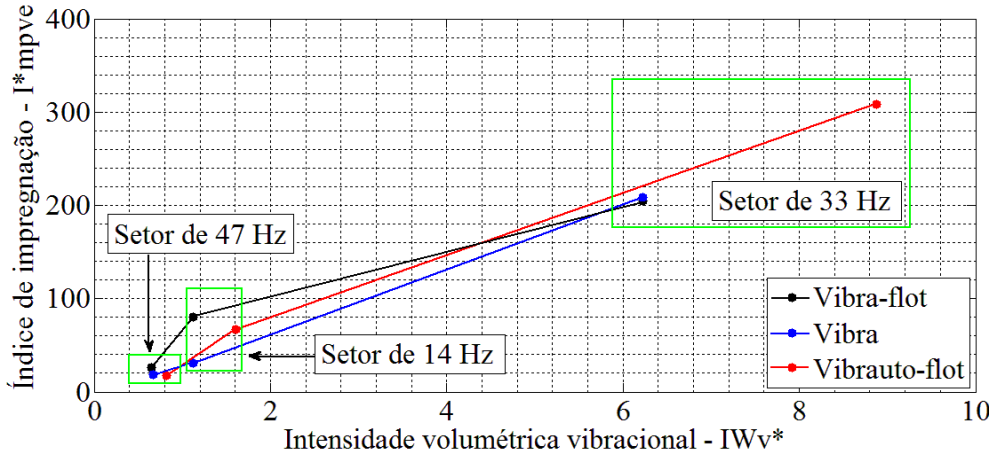


Figura 4.15 Índice de impregnação de óleo no adsorvente metálico em função da intensidade volumétrica vibracional (IW_v*).

Plausível hipótese de se admitir sobre o mecanismo básico de impregnação de óleo verificada no processo vibratório empregado corresponde à coalescência de gotas de óleo por impacto entre si e com paredes do adsorvente. A hipótese funda-se em princípios teóricos e experimentais. Bremond; Thiam; Bibette (2008) reportaram que o fenômeno de coalescência se dá por separação, muito mais que por choque. Asseguram que isto se comprova a partir de estudo realizado sobre mecanismo de coalescência de óleo e água. O aparato utilizado constou de um dispositivo microfluídico de 4 mm de diâmetro, dotado de microcanais de 50 μm de diâmetro mínimo com lances de seção variável que aceleram e desaceleram o movimento de microgotas, No conseginte processo de separação entre gotas, forças eletrostáticas, ainda que cerca de dez vezes menos intensas que forças de Van der Waals (de Oliveira, 2010), são suficientes para formar mamilos de ligação, fortes concentradores de tensão, suficiente para ruptura de interfaces e subsequente coalescência.

A constatação do fenômeno por Bremond; Thiam; Bibette (2008), através de seu engenhoso aparato, procede no sentido de que, ao contrário, ao choque, se verifica achatamento

da superfície da bolha com consequente aumento de área projetada. Como consequência obtém-se maior distribuição de tensões de contacto e atenuação de tensão de ruptura interfacial.

No processo em estudo, a sucessão de choques que tem lugar entre gotas, e entre gotas e paredes adsorventes, assevera o fenômeno sugerido por Nicolas Bremond precisamente ao resvalamento de gotas. Não obstante pode-se acrescentar nessa conta, choques diretos, transversos e tangenciais entre gotas. Ao potencializarem-se a determinados níveis de energia cinética, tornam-se capazes de romper interfaces e provocar coalescência.

A proposta de descrição teórico-experimental do fenomeno faz-se mediante avaliação do Número de Weber (W_e) em conjunção com índices de impregnação (I^*_{mpv} e I^*_{mpve}), descritos anteriormente os quais se mostra através da Figura 4,12. O mecanismo se explica por energia cinética transferida ao volume de efluente oleoso em dispersão, energia cinética de fluxo e eclosão de bolhas de ar em processos revelados por flotação natural ou induzida.

No entanto, nada se pode afirmar sobre existência de coalescência contínua em função do tempo de retenção. Seria intuitivo supor, uma vez que ao se observar a Figura 4.14, o mais baixo índice de impregnação mediante processo *Vibrauto-flot* foi praticamente igual ao que se verifica com processo *Vibra-flot*. Diferencia-se, no entanto, pelo fato de o primeiro requerer pouco mais da metade do tempo de retenção para um mesmo desempenho. Este estudo permite concluir, ainda que em estágio latente, que o mecanismo idealizado ora em apreço, reúne perspectivas animadoras de aplicabilidade industrial. A prudência científica recomenda utilização de aparelhamento de maior conteúdo tecnológico de investigação, como micoscópio e câmeras de alta resolução com iluminação a *laser*. Isto faculta obtenção de informações precisas no que concerne à dinâmica do sistema no que concerne aos choques de gotículas de óleo entre si e com o adsorvente.

4.6 Considerações finais

Procurou-se neste tópico apresentar resultados experimentais do sistema e técnica de tratamento propostos, bem como procurar entender o mecanismo segundo o qual se dá a remoção de óleo disperso por impregnação no adsorvente metálico. Devido à escassa literatura especializada no assunto, procurou-se analisar fenomenologia similar, sobretudo em princípio mecânico e fisicoquímico.

Embora limitações de escala proíbam conjecturas abrangentes no que respeita desempenho funcional, procurou-se avaliar o sistema em três modalidades funcionais: *Vibra-flot*, *Vibra* e *Vibauto-flot.* Para este fim tomaram-se três valores de parâmetros funcionais precisamente, frequência de excitação (14 Hz, 33 Hz e 47 Hz), e respectivas amplitudes de deslocamento vibracional (2,4 mm, 2,39 mm e 0,55 mm), a taxas de fluxo nominais de (3,5 mℓ/s, 7,5 mℓ/s e 10 mℓ/s). A seleção das frequências se deveu, sobretudo, às características elastodinâmicas do sistema e questões relacionadas à autoexcitação corrente a frequências mais elevadas que a frequência natural, devido à má distribuição de massa do equipamento. Pares conjugados, frequência/amplitude, foram selecionados consagrando-se o nível de energia fornecido representado pelo produto de ambos, a iniciar pela frequência natural próxima de 14 Hz.

Deu-se ênfase à capacidade de remoção de óleo segundo a demanda energética, tempo de retenção e vazão efetiva, em três faixas distintas de energia vibratória. Realizou-se análise adimensional de impacto fluídico para procurar entender o mecanismo de separação adsorvente empregado. Tabelas autoexplicativas munidas de resultadosexperimentais foram fornecidas para compreensão do método analítico. Constataram-se bons resultados de remoção de óleo nas condições de ensaio.

Por fim definiu-se e deduziu-se um critério matemático para avaliação da técnica de separação. Trata-se do índice de impregnação de óleo na estrutura adsorvente metálica onde se procurou contemplar a capacidade volumétrica nominal do equipamento e sua relação com dinâmica vibratória. Empregaram-se dois índices distintos: Índice de impregnação vibracional e índice de ipregnação vibracional energético, (I^*_{mpv} e I^*_{mpve}). Este último contempla amplitude de deslocamento do sistema. O objeto primordial de decrição implícito no índice trata-se da possibilidade de se associar um número ao mecanismo de impregnação considerando-se a massa adsorvida e a massa adsorvente empregada.

Capítulo 5

Conclusão geral e sugestões para futuros trabalhos

5. Conclusão geral e sugestões para futuros trabalhos

5.1 Conclusão geral

Um modelo físico em escala de bancada para tratamento vibracional de água produzida com petróleo e emulsões congênere foi concebido, testado e avaliado. Dotou-se o protótipo de mecanismos que facultam avaliar modalidades operacionais distintas de tratamento denominadas, *Vibra-flot*, *Vibra* e *Vibrauto-flot*, onde se alude à operação realizada em vibração e flotação a ar induzido, em vibração unicamente, e em vibração e flotação natural, respectivamente. Reivindicaram-se patentes de processo e de equipamentos, e realizou-se publicação internacional dos primeiros resultados.

Resultados apresentados consideram-se promissores nas condições empregadas de fabricação do protótipo laboratorial, monitoramento e teste. Cumpre e ressalta-se estar fora do escopo do trabalho, em fase inicial de pesquisa, gerar subsídio teórico-experimental ou conjectura sobre extrapolação de escala extensiva à dimensão industrial e volumes envolvidos. Tampouco se buscou tratamento rigorosamente analítico ou descrição matemática unificada e inequívoca da fenomenologia envolvida, uma vez que muito maior e mais elaborado arcabouço experimental entende-se ser necessário para tal. Nada obsta, no entnato, apontar perspectivas científicas e tecnológicas que se vislumbram neste sentido. Assim, se procurou construir, monitorar e testar o protótipo no limite do rigor necessário à plenitude mais realista do processo, comparativamente ao que se verifica em situações reais.

No contexto em que se insere o trabalho, através do Capítulo 2, procurou-se delinear princípios teórico-experimentais e resultados analíticos que embasam cientificamente o problema, sob a égide da multidisciplinaridade peculiar do estudo de ainda escassa bibliografia. Foram abordados e discutidos aspectos correlatos da mecânica vibracional, da ciência do movimento ondulatório superficial de fluídos e um pouco da dinâmica intrínseca. Noções físico-químicas da ciência da interface, princípios de adsorção e tecnologia corrente foram discutidos e a relação com o estudo, focalizada. Procurou-se apresentar a base científica do estudo sempre se buscando enfocar o sistema objeto sem de fato, em peculiaridades, introduzi-lo antes da apresentação formal ensejada no Capítulo 3. Realizou-se levantamento bibliográfico da atualidade industrial no que concerne ao tratamento de efluentes, com ênfase ao setor petrolífero, sobretudo, em plataformas marinhas.

No Capítulo 3 apresentaram-se métodos e técnicas que conduziram à concepção e projeto do sistema físico, sem perder de vista o aspecto realístico, industrial do problema, e limites de escala do projeto. Demonstraram-se e discutiram-se aspectos técnicos e teórico-experimentais no que concerne ao estabelecimento de condições de teste do sistema em apreço. Mediram-se grandezas importantes para análise do comportamento dinâmico operacional, direta ou indiretamente, e apresentou-se a metodologia empregada para obtenção de resultados que municiaram análises. Expressaram-se dados obtidos, em seu conjunto, através das tabelas, Tabela (3.1), (4.1), (4.2) (4.3) e (4.4). Subsidia-se, em primeira-mão, a partir de resultados obtidos, juízo necessário de desempenho e perspectiva da inovadora técnica de tratamento, que se funda em princípios de sustentabilidade ambiental.

Obtiveram-se resultados experimentais satisfatórios, mostrados através do Capítulo 4, no que se referem ao desempenho do sistema nas condições de ensaio. Ressalta-se total isenção de aditivação química para aumento de desempenho, sobretudo no que concerne a floculadores e demulsificadores. Monitorou-se o pH a cada exame como atestado da completa isenção de técnicas de acidificação do efluente. A prática constitui ponto clave de processos convencionais ou inovadores. Alguns métodos recentes discutidos no embasamento teórico mostram clara dependência de técnicas de aidificação. Processo assim tende para a inviabilidade prática quando se lhe estende a volumes gigantescos da iniciativa petroleira de base, em parte, pelo custo e tempo de acidificação ao pH ótimo e, sobretudo, por ácidos serem não menos poluentes.

A diligência com que se trata a questão ambiental e de susentabilidade como diretrizes do trabalho se espelha na lógica de objetividade química cobrar preço ambiental elevado, por serem não menos poluentes que constituintes do efluente. A dependência química exibida por consagrados processos da ciência da operação unitária precisa ser reavaliada. A busca por técnicas de menor impacto ambiental deve ser incentivada.

Através de gráficos de resultados exibidos no tópico 4.1, se depreende o desempenho do sistema segundo o consumo energético e tempo de residência. Comparam-se modalidades operacionais tendo-se por base a técnica de flotação natural. Em termos comparativos, requereu-se menos de 25% da demanda energética, verificada por flotação induzida nas condições de ensaio, tendo em vista a última, utilizar compressores de indução de ar.

Através do tópico 4.2 se mostra a influência do efeito vibracional na vazão em meio-poroso, e encontra-se em boa concordância com resultados verificados por outros pesquisadores, sobretudo, de direção de aplicação distinta. Constatou-se relativo aumento de vazão em

praticamente todos os casos, como se havia discutido previamente. Em decorrência, no item 4.3 foram apresentados e discutidos resultados do processo vibracional com relação ao tempo de residência, fator diretamente relacionado com vazão e capacidade volumétrica do equipamento. A perpectiva de se operar a tempos de residência próximos de valores operados por sistemas convencionais, aponta real possibilidade de redução da área de instalação.

No cômputo geral de pesquisas apresentadas no concurso deste tema, tempos de residência verificados estiveram dentro da margem consignada em prática corrente. Em muitas instâncias o tempo de residência medido apresentou-se menor que os que se verificam através de técnicas convencionais de flotação, (Flotação a ar induzido - FAI), ou inovadoras (Flotação a ar dissolvido - FAD e Flotação a gás dissolvido - FGD). Tempos de residência obtidos foram aproximadamente iguais aos que se verificam quando se operam técnicas inovadoras como (Flotação-floculação em linha – FF) e a jato (Modified Jameson Cell – MJC) pesquisada por Santander; Rodrigues; Rubio (2011). Tipificam-se essas técnicas como aceleradoras de processo convencional de flotação.

Comparativamente ao que se observa em tratamentos via hidrociclones cujo tempo de residência orbita 4,0 a 5,0 segundos em média (Filgueiras (2005) e Rego (2008)), o tempo de residência se manteve muito acima e denota-se consagrada vantagem de ciclones nesse pormenor. Por outro lado apontaram-se limitações do processo de ciclonagem quando gotas de óleo medem menos de 50 μm e o fato de raramente se conseguir enquadramento legal com uma única passagem. O sistema em estudo, grosso modo, não se mostra com clara dependência do tamanho de gotas de óleo, consideradas condições de escala do protótipo. Ressalta-se imprescindível avaliação de protótipos de maior dimensão, sobretudo a montagem de várias unidades em bateria, a exemplo de baterias de hidrociclones, com enfoque à dicotomia, taxa de fluxo versus área de instalação.

Pôde constatar-se, através do tópico 4.4, relativa capacidade do protótipo de abaixar o TOG de efluentes oleosos, sobretudo em faixas de operação de 33 Hz e amplitude de 2,39 mm. Isto se verificou em todas as modalidades operacionais, com destaque para a técnica *Vibrauto-flot* ao operar com 50% em massa de adsorvente metálico. Nota-se, não obstante, que esta técnica parece apresentar limite de desempenho quanto à transferência de energia vibracional ao volume de efluente. Entende-se por energia vibracional, e já se lhe definiu, o estado de perturbação que se caracteriza por um par instantâneo, frequência e amplitude de deslocamento. O desempenho no que respeita a remoção de óleo parece não se manter, uma vez que se observa queda no poder de redução de TOG em faixa de frequência de 47 Hz. A baixa am-

plitude de deslocamento correspondente a esta faixa de frequência, isto é, 0,55 mm, pode ser fator limitante da transferência energética. Todavia mais investigação deve ser realizada, sobretudo, com varredura em amplitude para que se faça juízo adequado a esse respeito.

Por fim, através do item 4.5, procurou-se delinear o método matemático que se definiu para avaliar o processo de impregnação de óleo no adsorvente. Criou-se e denominou-se, índice de impregnação, o parâmetro adimensional com que se busca evidenciar taxas em que se processa o fenômeno de impregnação de óleo em função do tempo de renitência de choques e da energia cinética vibratória transferida.

À primeira vista, si se observar com devida diligência, o índice de impregnação não parece guardar correlação *sine qua non* com área superficial disponível ao choque, representada pela carga de adsorvente metálico. Isto se explica pelo comportamento gráfico dos índices onde se constata que o processo *Vibrauto-flot* manteve, em média, o mesmo índice de demais processo operando com a metade da carga. Intuitivamente, aumento de carga ou massa de adsorvente em si, provavelmente não influencia o rendimento, senão o aumento de superfície específica ou área disponível o choque. Mas, estas e outras questões se remetem a futuros trabalhos com o andamento da pesquisa, onde se pode investigar desempenho em função da superfície específica.

A inovadora técnica vibracional, objeto de estudo deste trabalho, através dos resultados apresentados, ressalvadas condições de escala, constitui alternante perspectiva de operação unitária para tratamento de efluentes oleosos. Cabe ressaltar, o orbe de aplicação estende-se da escala reduzida de âmbito comercial, à alta escala da produção industrial de base, à que se inclui mineraoras também. O foco de importância concentra-se na busca por soluções mais aproximadas de processos naturais, sem deliberada intervenção de agentes químicos. Afinalde contas, a natureza, em sua interface costeira e biodiversidade, através de processos vitais de intercâmbio de massa e energia, dá autêntico exemplo de restauração da ordem ecológica. Eis a fonte de inspiração do princípio operacional, *Vibrauto-flot*, bem compreendido, si se tomar como exemplo, notável pesquisa desenvolvida por Deane & Stokes (2002) e Bird *et al*., (2010) consagradas nesta obra.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

Ao final da pesquisa e relevante caráter multidisciplinar, de abrangência científica e tecnológica permeio, se pode vislumbrar e propor vasto campo de investigação a se trilhar:

- Utilizar câmera de alta resolução (12.000 *frames*/s) para *in loco* e em tempo real, investigar a ação vibracional sobre gotas de óleo dispersas e a interação submersa com o adsorvente metálico. Pode-se, com relativa precisão, medir a velocidade de impacto de gotas de óleo, exergar o mecanismo fluídico em concurso e a interrelação com faixas de freqüência e amplitude de deslocamento vibratório. É importante poder-se, com mais propriedade, avaliar a influência da perturbação imposta à partícula de óleo dispersa na célula adsorvente. Credita-se à ação vibracional possível abstração do errático movimento de gotas de óleo em favor do movimento direcional ao mútuo choque, ao choque com o adsorvente, e à presumível relação com a capacidade de romoção de óleo por adsorção. Ressalta-se imprescindível análise microscópica, utilização de colorantes geradores de contrastes e sistema de iluminação a *laser*. Isto contribuirá com adequada análise do fenômeno e estimativa apropriada da velocidade média adquirida por partículas, fator determinante do tipo de aderência.

- Investigar o desempenho da técnica em vibração de torcedura com cuba similar de estrias longitudinais e transversais, e com cuba cônica, de nervuras radiais. A cuja ênfase dá-se ao direcionamento de fluxo e à interferência construtiva de ondas.

- Utilizar o sistema articulado (Figura 3.13, item 3.2.5, Cap. 3) para investigar o desempenho da técnica, no que concerne à impregnação de óleo no adsorvente e TOG final, realizando-se varredura em frequência e amplitude. Resultados significativos poderão auxiliar na identificação de parâmetros dinâmicos de projeto de um sistema elástico que reproduz o mesmo desempenho.

- Utilizar produtos de rejeito regional a exemplo de borracha, papel, raspa de PVC, raspa de madeira, sisal e fibra de coco. Trata-se de elementos de abundante rejeito regional que se podem empregar como adsorvente ou absorvente.

- Adicionalmente, se pode investigar sustentabilidade e alternativas de reuso do rejeito impregnado de óleo. Prévia compactação pode aumentar o poder calorífico (Rodrigues *et al*., 2002) para uso como combustível em substitiuição à madeira nativa.

Para fragmentação do papel, por exemplo, utilizou-se máquina forrageira industrial, Laboremus FS Júnior - 1,5 cv, com telas de 3,25 mm, 6,23 mm e 12,7 mm (1/8", 1/4" e 1/2" respectivamente). Obteve-se finos fragmentos com ajuste de navalhas e batedor. A granulometria resultante adéqua-se ao sistema em apreço. Através das ilustrações abaixo se veem elementos de rejeito regional de distintas naturezas e granulometrias, passíveis de utiização no sistema, sobretudo, papel de jornal:

Borracha de pneumático em flocos

Raspas de madeira

Fibra de sisal em novelo

Papel de jornal em flocos

Tiras de papel fragmentadas em máquina, Cadence Mod. S500S

Raspas de PVC

Figura 5.1 Ilustração de rejeitos regionais.

- Utilizar o sistema de tratamento em batel (Figura 3.12, item 3.2.5, Cap. 3) com cuba cilindrocônica para avaliar o desempenho segundo vazão, tempo de retenção e modo de descarga para o rejeito impregnado a combinações de frequência e amplitude. Segundo Lakiza (2005) a forma cônica em vibração produz fluxo de maior intensidade e maior pressão dinâmica sobre bolhas de ar ao fundo, se comparada à forma esférica.

- Determinar o limite máximo de saturação do adsorvente por impregnação de óleo e investigar o desempenho do sistema a elevados valores de TOG inicial (Acima de 1.500 mg/ℓ). Nesse caso, o excesso de óleo pode demover gotas adsorvidas da condição séssil e passá-las à condição, pendente, o que possibilita ré-dissolução de óleo no efluente em vibração. Kim (2004) investigou remoção de gota pendente condensada em teto metálico de sistemas de ventilação e refrigeração, utilizando vibração mecânica. Reportou que frequências ressonantes da gota provocam sua queda à amplitude consideravelmente mais baixa que amplitude de vibração de contorno, inclusive com maior repidez. Cabe, portanto, investigar níveis de saturação em função do tempo de operação e concentração inicial de óleo (TOG_i), e adotar adsorvente em forma esteira com avanço à velocidade controlada. Assim se pode conter a saturação e possibilitar operação de limpeza do adsorvente, fora do sistema de tratamento, utilizando-se a própria energia vibratória. Solventes, dentre os quais, éter de petróleo a preço de varejo US $10/ℓ, pode ser utilizado como extrator. Dos Reis (1982) investigou recuperar e regenerar óleo lubrificante por extração com solventes diversificados.

- Estudar a influência da dimensão e estado superficial do adsorvente metálico em processo. Malysa; Krasowska; Krzan (2005), Luz; Ribeiro; Pandolfelli (2008) e Krzan & Malysa (2012) estudaram a influência da espécie e qualidade superficial do adsorvente quanto à influência no processo de adsorção.

- Na operação em *autoflotação* (*Vibrauto-flot*) se pode investigar, qual volume de bolhas de ar por unidade de tempo seria ideal para flotação sem risco de bolquear fluxo e a frequência de vibração necessária à captação de correspondente volume de ar. Viu-se e se discutiu, quebra de ondas superficiais, captação de ar e fragmentação na forma de bolhas e microbolhas necessárias ao processo natural de restabelecimento boquímico do ecossistema. Deane & Stokes (2002) investigaram estatisticamente a produção de bolhas de ar e aerossol em processo vital de troca físico-química de calor e massa, vivificado à superfície marinha. Cabe ressaltar a necessidade de se reformar o

sistema de descarga da cuba de *autoflotação*. A configuração do sistema utilizada se presta aos três modos operacionais discutidos. O mecanismo constitui-se de elevação, ou não, do nível de efluente na célula de tratamento para bloquear ou não, entrada de ar. Isto foi propositalmente empregado para avaliação universal de técnicas com única cuba. No caso de se bolquear entrada de ar, o sistema parece adequado. Não obstante, o processo *Vibrauto-flot* pode requerer entrada abundante de ar, tal qual se dispusesse de um sistema aberto. Nesse caso, se deve aumentar em várias vezes a área do tubo de descarga, sobretudo, utilizando-se seção transversal retangular.

- Investigar a relação entre comprimento de onda (λ) e dimensão do plano médio adsorvente (A_{ads}) para análise de desempenho e perspectiva de extrapolar a escala ao âmbito industrial. No item 3.2.3, Cap. 3, foi realizada análise em que se verificou correlação entre, processo em *autoflotação*, dimensões da cuba e faixas de frequência de excitação no que ao comprimento e amplitude de onda se referem mostrado através das figuras, Figura 3.4 (a) e (b) e Figura 3.28.

- Por fim, no âmbito da indústria de petróleo, processos de incrustação, corrosão e bloqueio de ductos por parafinas, resinas e asfaltenos (frações pesadas) são problemas correntes que afetam profundamente a produção. Mormente respondem por elevação de custo, perda de rendimento e interrupção de processo. A utilização de sistemas vibratórios e mecanismos que impactam controlada e repetidamente componentes metálicos obstruídos, a exemplo de ductos, podem contribuir para desincrustar e desobstruir ductos por meio de operações realizadas em linha. Isto constitui vasto e adicional campo de aplicação e pesquisa às técnicas de manutenção e reestabelecimento operacional existente. Destaca-se que a técnica vibracional não se limita à indústria petroleira simplesmente. Aplicações em operações unitárias constitui um vasto campo, sobretudo da indústria mineralúrgica em geral, nos processos de extração e separação sólido/sólido e sólido/líquido.

Capítulo 6

Referências bibliográficas

6. Referências bibliográficas

Referências bibliográficas – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023/2000: informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação. Rio de Janeiro, 2000.

Citações bibliográficas – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB-896/1990: informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação. Rio de Janeiro, 1990.

6.1 Trabalhos publicados

1. DE LACERDA JÚNIOR[1], J. A.; DA SILVA, D. R.[2]; MARIBONDO[3], J. F.; SOUTO[4], C. R.; DINIZ[5], D. D. S. Innovative adsorption and self-flotation hybrid operation for crude oil water emulsion processing. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, v.14, n. 1, p. 142-150, 2014.

6.2 Patentes

6.2.1 Patentes de invento

6.2.1.1 Depositante inventor e titular: Jônatas Araújo de Lacerda Júnior

Domicílio: Av. Eng. José Celino Filho, 380 apto. 304, Residencial Colinas do Mirante, Bairro do Mirante, Campina Grande – PB, CEP 58.407-664

Título: **Separador-flotador-vibroreológico a adsorção, absorção ou ambas, de acionamento eletromecânico, aplicável a água doce ou salobra, poluída com petróleo, derivados oleicos ou ambos, contnedo ou não só-**

lidos dispersos, caracterizado por ser dotado de cuba vertical (4) contendo fundo móvel na forma de êmbolo (6), ducto de descarga (17), ducto para descarga ou alimentação (18), montada sobre coluna vertical (16), dotada de sistema de acionamento (3), (10), (19) e (20), além de tomada para flotação (13), e calha de descarga (7), montada sobre mesa vibratória (2) para movimentação linear e angular.

Processo: PI BR 10 2012 023580 3, reivindicado em 04/Setembro/2012.

6.2.1.2 Depositante inventor e titular: Jônatas Araújo de Lacerda Júnior

Domicílio: Av. Eng. José Celino Filho, 380 apto. 304, Residencial Colinas do Mirante, Bairro do Mirante, Campina Grande – PB, CEP 58.407-664

Título: Processo de separação líquido/líquido (óleo/água) usando efeitos vibratórios e reológicos, flotação e auxiliares de adsorção/absorção aplicável a água poluída com petróleo ou derivados oleicos, contendo ou não sólidos dispersos, por realizar a limentação do sistema com água poluída, pô-la a vibrar até atingir a frequência adequada e fluxo regular, adcionar adsorventes/absorventes orgânicos/inorgânicos naturais/sintéticos e ou materiais solúveis em óleo, finamente pulverizados sobre a superfície da água poluída, manter sobre certo tempo para que se processe adsorção/absorção e expulsar a massa sobrenadante impregnada de óleo ao nível da água limpa mediante fluxo fluídico superficial controlado por vibração.

Processo: PI BR 10 2012 023580 3, reivindicado em 04/Setembro/2012.

6.2.1.3 Depositante inventor e titular: Jônatas Araújo de Lacerda Júnior

Domicílio: Av. Eng. José Celino Filho, 380 apto. 304, Residencial Colinas do Mirante, Bairro do Mirante, Campina Grande – PB, CEP 58.407-664

Título: Separador-vibroreológico-autoflotador a adsorção, absorção ou ambas, de acionamento eletromecânico para emulsão ou dispersão sólido-líquido, líquido-líquido e líquido-gás, de água doce ou salobra, ou outro fluído, contendo petróleo, derivados ou ambos, e sólidos dispersos poluentes ou não, conforme a Figura 1 e a Figura 2 Auxiliar (a), (b) e (c)

caracterizado por ser dotado de célula ou cuba de tratamento piramidal de base quadrada (1) mas que pode ser de outra forma geométrica, conforme o item "Da constituição e operação pág. (3/4), alimentada de forma contínua ou em batel pela tomada (8), capaz de vibrar conforme modos descritos na Figura (2) Auxiliar (a), (b), (c), com acionamento nas paredes, por dispositivos de imersão ou eletromecânicos acoplados nas tomadas de excitação (12, 13 e 14) e que pode utilizar elementos adjuntos de adsorção laváveis ou não (3), em malha, lâmina, tela, filme ou chapa, ou depositados na interface fluída como flocos, raspas, limalhas, fios, tiras, espirais ou esponjas.

Processo: PI BR 10 2013 024672 7, reivindicado em 12/Setembro/2013.

6.2.1.4 Depositante inventor e titular: Jônatas Araújo de Lacerda Júnior

Domicílio: Av. Eng. José Celino Filho, 380 apto. 304, Residencial Colinas do Mirante, Bairro do Mirante, Campina Grande – PB, CEP 58.407-664

Título: Processo de auto-flotação ou flotação natural com consequente eclosão de bolhas de ar ou outro gás, a depender da atmosfera, e respingos de fluídos contra superfície adsorvente ou absorvente, hidrofóbica ou não, gerado por vibração controlada oriunda de agente externo ao fluído ou submerso, segundo modos de vibrar mostrados na Figura 2 Auxiliar (a), (b), (c), por promover inédita técnica de separação sólido/líquido ou líquido/líquido, de apelo ecológico, sem necessidade de flotação convencional ou coadjuvante químico, utilizando apenas adsorventes ou absorventes orgânicos, naturais ou sintéticos, metálicos ou não-metálicos, para dispersões de água doce ou salobra, efluente ou não, de indústria petroquímica e derivada ou outra, contendo ou não sólidos dispersos, cuja ilustração se mostra na Figura 1, operável de forma contínua ou em batel e permissível à recuperação de adsorventes e conteúdo separado.

Processo: PI BR 10 2013 024672 7, reivindicado em 12/Setembro/2013.

6.2.2 Registro de marca

6.2.2.1 Depositante inventor e titular: Jônatas Araújo de Lacerda Júnior

Domicílio: Av. Eng. José Celino Filho, 380 apto. 304, Residencial Colinas do Mirante, Bairro do Mirante, Campina Grande – PB, CEP 58.407-664

Apresentação: Mista.

Natureza: Produto.

Elemento nominativo: *VIBRAUTO-FLOT*

A imagem original da marca mede 80 mm x 80 mm:

Processo: Pedido de Registro de Marca de Produto (Mista) N° 907094856.

6.3 Documentos eletrônicos

6.3.1 Documentos resgatados da internet

ÁGUA PRODUZIDA. Derivados de resíduos de gás natural, 2012. Disponível em: <https://www.google.com.br/search?sourceid=navclient&aq=&oq=fotos+de+%C3%A1gua+produzida&hl=pt-BR&ie=UTF-8&rlz=1T4SKPB_pt-BR___BR503&q=fotos+de+%C3%A1gua+produzida&gs_l=hp....0.0.1.231948.....0.qw9Y7ROoI9A>. Acesso em: 14 dezembro 2013.

ALLEN, J S. Capillary-Driven Flow in Liquid Filaments**,** National Center for Microgravity Research, NASA Glenn Research Center, 2003. Disponível em:

<http://www.birs.ca/workshops/2003/03w5039/contrib/Allen.pdf>. Acesso em: 12 dezembro 2013.

ASCENDINO REIS, E. E, 2.ª Feira de Informática (FIAR), 2001. Disponível em:

<http://ww2.unime.it/weblab/awardarchivio/ondulatoria/ondas.htm >. Acesso em: 19 outubro 2013.

AYELLO, F.; ROBBINS, W.; RICHTER, S.; NEŠIĆ, S. Crude oil chemistry effects on inhibition of corrosion and phase wetting**,** Institute for Corrosion and Multiphase Technology, Ohio University, USA, (s/d). Disponível em:

<https://www.google.com.br/search?sourceid=navclient&aq=&oq=CRUDE+OIL+CHEMISTRY+EFFECTS+ON+INHIBITION+OF+CORROSION+AND+PHASE+WETTING&hl=pt-BR&ie=UTF-8&rlz=1T4SKPB_pt-BR___BR503&q=CRUDE+OIL+CHEMISTRY+EFFECTS+ON+INHIBITION+OF+CORROSION+AND+PHASE+WETTING&gs_l=hp....0.0.0.3596.....0>. Acesso em: 16 dezembro 2013.

STEVENS, C. S. Dynamics of viscous drop impact: Role of surrounding air. *James Franck Institute and Department of Physics*. The University of Chicago, 2009. Disponível em:

<http://www.ibrarian.net/navon/paper/Experimental_Physics_Requirement_Dynamics_of_Visc.pdf?paperid=15015984>. Acesso em: 12 janeiro 2014.

LAUTRUP, B. Physics of Continuous Matter, chapter 5, 2010. Disponível em:

<http://www.cns.gatech.edu/~predrag/courses/PHYS-4421-10/Lautrup/surface.pdf>. Acesso em: 14 outubro 2013.

GOETSCH, V. Colloidal silver an analytical investigative report and theoretical overview. Synergenesis Inc. Wishgranted.com, 2006. Disponível em:

<https://www.google.com.br/search?q=stern+layer&hl=pt-BR&qscrl=1&rlz=1T4SKPB_pt-BR___BR503&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=Ac2vUo3iKMnfsASapYKYBg&ved=0CC4QsAQ&biw=1280&bih=610>. Acesso em: 16 dezembro 2013.

HSU, T. CPO Sciense: Foundations of physics, unit 5, chapter 14, (s/d). Disponível em: <http://www.cposcience.com/home/CPOProducts/TeachingLearningSystemsTLS/FoundationsofPhysics/tabid/244/Default.aspx>. Acesso em: 17 agosto 2013.

VAN DER ZANDE, M. J. Break-up of oil droplets in the production system. Delft University of Technology. Faculty of Applied Earth Sciences, (s/d). Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.40.5917&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 17 dezembro 2013.

ISI ENGENHARIA. Aspectos ambientais de uma refinaria de petróleo e formas de controle, 08/2010. Disponível em: <http://www.isiengenharia.com.br/wordpress/wp-content/uploads/2010/08/Aspectos_Ambientais_de_uma_refinaria_Helber.ppt>. Acesso em: 12 agosto 2013.

ISSENMANN, B.; FALCON, E. Gravity wave turbulence revealed by horizontal vibrations of the container, Physical Review to be published as a Rapid Communication, 01/2012. Disponível em: <http://hal.archives-ouvertes.fr> . Acesso em: 16 janeiro 2014.

MARATHON OIL CORPORATION, (s/d). Disponível em: <http://www.marathonoil.com/Technology/Technology/Oil_Sands/ >. Acesso em: 07 dezembro 2013.

MONTEIRO, J. P.; MAGRINI, A.; SZKLO, A. S.; NUNES, R. T. S. Título: Gerenciamento de Água na Indústria de Refino de Petróleo e as Perspectivas de Reuso, (s/d). Disponível em: <http://www.tratamentodeagua.com.br/r10/Lib/Image/art_305013499_gerenciamento_refino.pdf>. Acesso em: 14 outubro 2010.

McKINLEY, G. H.; RENARDY, M. Wolfgang von Ohnesorge. Department of Mechanical Engineering of Massachusetts Institute of Technology Cambridge and Department of Mathematics Virginia Tech., 2011. Disponível em: <http://web.mit.edu/nnf/publications/GHM171.pdf >. Acesso em: 18 julho 2013.

NONLINEAR LIQUID SLOSHING, (s/d). Disponível em:

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/dynamics/dynamics/research/pdf/sloshing.pdf>. Acesso em: 07 julho 2013.

OCEANOGRAPHY II, (s/d). Disponível em:

<http://geology.csupomona.edu/drjessey/class/Gsc101/OceanographyII.html > Acesso em: 10 janeiro 2014.

SIEHE™ MECHANICAL & ELECTRICAL, (s/d). Disponível em:

<http://www.sieheindustry.com/en/Fluid-Machinery/Emulsifiers/Emulsifiers1.html?gclid=CPuOyMr9q7oCFc-Y4Aodfh4AvQ >

Acesso em: 22 outubro 2013.

SILVA, C. R. R. Água produzida na extração de petróleo**.** Monografia para o Curso de especialização em gerenciamento e tecnologias ambientais na indústria. Escola Politécnica. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Salvador BA, 2000. Disponível em:

<http://intranet/monografias/petroleo/completa.htm>. Acesso em: 11 novembro 2013.

SMS - 491**:** Physical solutions of everyday problems in aquatic sciences. Lecture 6: Surface gravity waves, 2003. Disponível em:

<http://misclab.umeoce.maine.edu/boss/classes/SMS_491_2003/Week_6.htm>. Acesso em: 27 dezembro 2013.

TROLINGER, J.; L'ESPERANCE, D.; RANGEL, R. R.; COIMBRA, C.; WITHEROW, W.; ROGERS, J,; LAL, R. Small particle response to fluid motion using tethered particles to simulate microgravity. NASA Marshall Space Flight Center, (s/d). Disponível em:

<https://www.google.com.br/search?sourceid=navclient&aq=hts&oq=ntrs.nasa.gov%2F...%2F20030060580_2003069300.pdf%E2%80%8E&hl=pt-BR&ie=UTF-8&rlz=1T4SKPB_pt-BR___BR503&q=ntrs.nasa.gov%2F...%2F20030060580_2003069300.pdf%E2%80%8E&gs_l=hp....0.0.2.145378.....0.ygMgw5nyI3M>. Acesso em: 12 novembro 2013.

WESTFALL. US Patent No. 5,839,828, (s/d). Disponível em:
<http://westfallmfg.com/2800_gas_diffuser/ >. Acessado em: 19 dezembro 2013.

6.3.2 Vídeos

JATO DE WORTHINTON[a], (s/d). Disponível em:

< http://www.youtube.com/watch?v=w4D6mFScKfc >. Acesso em: 10 novembro 2013.

JATO DE WORTHINTON[b], (s/d). Disponível em:

<http://www.youtube.com/watch?v=6swY05e2iT4&feature=endscreen>. Acesso em: 10 julho 2013.

WAVE: Grand Valley State University: Department of Geology Allendale, Michigan 49401, (s/d). Disponível em: <http://faculty.gvsu.edu/videticp/waves.htm>. Acesso em: 27 dezembro 2013.

6.4 Bibliografia consultada

ABBAS, I. A. Torsional wave propagation in a poroelastic hollow circular cylinder. *Journal of physics*, v. 1, n. 3, p. 4 – 8, 2012.

ABREU, J. M., *Estudo da fluidodinâmica de leito vibro-fluidizado horizontal*. 2007. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ACHESON, D. J. *Elementary fluid dynamics*. Oxford: Clarendon Press, 1990.

ARDAKANI, H. A.; BRIDGES, T. J. Dynamic coupling between shallow-water sloshing and horizontal vehicle motion. *European Journal of Applied Mathematics*, v.21, n.6, p.479 – 517, 2010.

ASEKA, E. H. *Sistemas concentrados e distribuídos com amortecimento visco-elástico, utilizando a base gerada pela resposta impulso*. 2008. 129f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ASHGRIZ, N.; POO, J. Y. Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops. *Journal of Fluid Mechanics*, v221, p.183-204, 1990.

ASHLEY, J. J.; MARC, K. S.; ARI, G. Vibration-induced drop atomization and the numerical simulation of low-frequency single-droplet ejection. *Journal of Fluid Mechanics*, v.476, p. 29-62, 2003.

BAIRD, M. H. I.; GARSTANG, J. H. Gas absorption in a pulsed bubble column. *Chemical Engineering Science*, v.27, n.4, p.823-833, 1972.

BENVINDO DA LUZ, A.; CAMPOS, A. R.; CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L. C. Comunicação técnica (*CT 2005-116-00*) elaborada para o livro*: Rochas & minerais industriais:* usos e especificações, Rio de Janeiro: CETEM – MCT, 2005. v.2, Cap. 11, p.231–262.

BLEKHMAN, I. I., *Vibrational mechanics*: Non linear dynamic effects, general approach, applications. Singapore**:** Wolrd Cientific Publishing Co. Pte. Ltd. Translated by Mina Perelman, 2003.

BLEKHMAN, I. I., *Vibrational mechanics and vibrational tecnology*: What vibration can do? Moscow: Nauka Press, 1988.

BLEKHMAN I.I.; VAISBERG, L. A. Vibrational technologies and machines for the processing of mineral and technogeneous raw materials: theory, new ideas, new constructions. In: IFToMM WORLD CONGRESS, 12, 2007, Besançon (France), *Artigo*, p.18-21.

BIRD, J. C.; RUITER, R.; COURBIN, L.; STONE, H. A. Daughter bubble cascades produced by folding of ruptured thin films. *Nature*, v.465, p.759-762, 2010.

BJÖRKNESS, V**.** *Die kraftfelder*. Braunschweig, Friedrich Vieweg and Sohn, 1909.

BREMOND, N.; THIAM, A. R.; BIBETTE, J. Decompressing emulsion droplets favors coalescence. *Physical Review Letters*, PRL 100, p.024501-1-024501-4, 2008.

CAVACO, P. C. C.; BODSTEIN DE BARROS, A. Gestão de efluentes e recursos hídricos em campos de produção de petróleo terrestres. In: II SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA – SEGET'2005, 2, 2005, Rio de Janeiro. Artigo, p.575-588.

CAVACO, P. C. M. *Gestão de tratamento de efluentes e recursos hídricos em instalações de produção de petróleo terrestre, com enfoque em novas* tecnologias. 2004. 387f. Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão) - Sistema de Gestão da Universidade Federal Fluminense, Niterói.

CHEN, J-H. Characteristics of drop impact on elastic and compliant surfaces. *Journal of Marine Science and Technology*, v.13, n.2, p.156-161, 2005.

CHISTI, M. Y.; MOO-YUONG, M. Gas hold-up in pneumatic reactors. *The Chemical Engineering Journal*, v.38, p.149 – 152, 1988.

CHOPRA, A. K. *Dynamics of structures*: theory and applications to earthquakes engineering. New Jersey**,** Prentice Hall, 1995.

CHURCH, A. H. *Mechanical vibrations*. 2. ed. London: John Wiley & Sons, Inc., 1963.

CLIFT**,** R.; GRACE, J. R.; WEBER, M. E**.** *Bubbles, drops, and particles.* London: Academic Press, 1978.

CORRÊA JÚNIOR, C. A. *Desenvolvimento de modelo computacional de previsão de quebra de gotas em simulador de separação de óleo e água em um hidrociclone.* 2008. 99f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Instituto Politécnico da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Nova Friburgo.

CREDE, C. E. *Choque e vibração nos projetos de engenharia*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1972.

CUNHA, R. E. P.; *Modelagem matemática da separação gravitacional de emulsões de petróleo*. 2007. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes, Aracajú.

DA ROSA, J. J. *Tratamento de efluentes oleosos por floculação pneumática em linha e separação por flotação* – Processo FF. 2002. 145f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DA SILVA, A. L. F.; SOUZA FILHO, J. E.; SILVA RAMALHO, J. B. V.; MELO, M. V.; LEITE, M. M.; ÍNDIO DO BRASIL, N.; PEREIRA JUNIOR, O. A.; OLIVEIRA, R. C. G.; ALVES, R. P.; DALLA COSTA, R. F.; KUNERT, R.; GOMES, W. *Processamento primário de petróleo*. 2007. 54f. Apostila - Escola de Ciências e Tecnologias E&P, Universidade Petrobras, Rio de Janeiro.

DEANE, G. B.; STOKES, M. D. Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves. *Nature*, v. 418, p.839-844, 2002.

DE OLIVEIRA, A. G. *Caracterização da distribuição do tamanho de gotas em emulsões água e óleo utilizando diferentes técnicas de medição*. 2010. 144f. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecãnica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

DOS REIS, M. J. C. A. *Regeneração de óleos lubrificantes usados por extracção/floculação*. 1982. 352f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Instituto Nacional de Investigação Científica, Conselho Científico da Faculdade de Engenharia do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

DOS SANTOS, R. G.; MOHAMED, R. S.; BANNWART, A. C.; LOH, W. Contact angle measurements and wetting behavior of inner surfaces of pipelines exposed to heavy crude oil and water. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.51, p.9 – 16, 2006.

DOS SANTOS, A. C.; DA CRUZ, S. M.; SOLETTI, J. I.; DE CARVALHO, S. H.; TONHOLO, J.; ZANTA, C. L. P. S.; MIRAPALHETA, A. Tratamento de efluentes sintéticos da indústria de petróleo utilizando o método da eletroflotação. In: 4° PDPETRO, 4, 2007. *Artigo*. Campinas: ABPG, p6.2.0319-1-1 – 6.2.0319-1-6.

DUCHEMIN, L.; POPINET, S.; JOSSERAND, C.; ZALESKI, S. Jet formation in bubles bursting at a free surface. *Physics of Fluids*, v.14, n.9, p.3000-3008, 2002.

ELLENBERGER, J.; KRISHNA, R. Improving mass transfer in gas–liquid dispersions by vibration excitement. *Chemical Engineering Science*, v. 57, p.4809 – 4815, 2002.

ELLENBERGER, J.; VAN BATEN, J. M.; KRISHNA, R. Intensification of bubble columns by vibration excitement. *Catalysis Today***,** v.79, p.181-188, 2003.

ERNEST, A. N.; BONNER, J. S.; AUTENRIETH, R. L. Determination of particle collision efficiencies for flocculent transport models. *Journal of Environmental Engineering*, v.121, n.4, p.320-329, 1995.

FARADAY, M. On the forms and states assumed by fluids in contact with vibrating elastic surfaces. *Phil. Trans. R. Soc. London*, v. 52, p. 319 – 340, 1831.

FARRALL, M.; HIBBERD, S.; SIMMONS, K. A numerical model for oil film flow in an aero-engine bearing chamber and comparison with experimental data. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v.128, p.111-117, 2006.

FERNANDES JÚNIOR, W. E. *Projeto e operação em escala semi-industrial de um equipamento para tratamento de águas produzidas na indústria do petróleo utilizando nova tecnologia:* misturador-decantador a inversão de fases (mdif). 2006. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

FILGUEIRAS, N. G. T. *Modelagem, análise e controle de um processo de separação óleo/água*. 2005. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FONSECA, A. *Vibrações*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1964.

FORTUNY, M.; RAMOS, A. L. D.; DARIVA, C.; EGUES, S. M. S.; SANTOS, A. F.; NELE, M.; COUTINHO, R. C. C**.** Principais aplicações das micro-ondas na produção e refino de petróleo. *Química Nova*, v.31, n.6, p.1553-1561, 2008.

FOX, R. W.; MCDONALD, A T. *Introdução à mecânica dos fluídos*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1988.

FITZPATRICK, R. *Oscilation and waves*: an introduction. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 1963.

FUJASOVÀ-ZEDNIKOVÀ, M.; VOBECKÀ, L.; VEJRAZKA, J.; RUZICKA, M. C.; DRAHOŠ, J. Effect of liquid properties and solid material on bubble-wall attachment. In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW ICMF 2010.7, 2010, Tampa. *Artigo*. Tampa: p.1-8.

GÄOTZENDORFER**,** A. *Vibrated granular matter*: transport, fuidization, and patterns. 2007. 87f. These (Doktors der Naturwissenschaften) - Universitäat Bayreuth, Bayreuth.

GOLDMAN, S. Generalizations of the young–laplace equation for the pressure of a mechanically stable gas bubble in a soft elastic material. *The Journal of Chemical Physics*, v.131, p.184502-1-184502-8, 2009.

GOMES, E. A. *Tratamento combinado da água produzida de petróleo por eletroflotação e processo fenton*. 2009. 96f. Dissertação (Mestrado em Engnharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes, Aracajú.

GOODRIDGE, C. L.; HENTSCHEL, H. G. E.; LATHROP, D. P. Breaking faraday waves: critical slowing of droplet ejection rates. *Physical Review Letters*, v.82, n.15, p.3062-3065, 1999.

HAN, S. Measuring displacement signal with an accelerometer. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 24, n.6, p.1329-1335, 2010.

HARIF**,** T. *Electroflocculation of a model colloidal suspension:* coagulation/flocculation mechanisms and their impact on flux in membrane ultrafiltration. 2006. 170f. Thesis (Doctor of Philosophy) - The Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food and Environment, The Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem.

HASSAN, S.; KAWAJI, M. Vibration-induced particle drift in a fluid cell under microgravity. *Microgravity Sciense and Technology*, v.19, n.3-4, p.109-112, 2007.

HASSAN, S.; LYUBIMOVA, T. P.; LYUBIMOV, D. V.; KAWAJI, M. Effects of vibrations on particle motion near a wall: Existence of attraction force. *International Journal of Multiphase Flow*, v.32, p.1037–1054, 2006.

HEDESTRAND, G. On the influence of thin surface films on the evaporation of water. *Journal of Physico Chemical*, v.28, n.12, p.1245–1252, 1924.

HIBBELER[a], R. C. *Estática*: Mecânica para engenharia. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HIBBELER[b], R. C. *Dinâmica***:** Mecânica para engenharia. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HOADLEY, R. *Understanding wood.* Newtown: The Tauton Press, 2000.

IASSONOV, P. P.; BERESNEV, I. A. A model for enhanced fluid percolation in porous media by application of low-frequency elastic waves. *Journal of Geophysical Research*, v.108, n.B3, p.2138 (ESE 2-1 – ESE 2-9), 2003.

IVANOVA, A. A.; KOZLOV, V. G.; EVESQUE, P. Interface dynamics of immiscible fluids under horizontal vibration. *Fluid Dynamics*, v.36, n.3, p.362–368, 2001.

IVANOVA, A. A.; KOZLOV, V. G. Vibrational convection in nontranslationally oscillating cavity: Isothermal case. *Fluid Dynamics*, v.38, n.2, p.186–192, 2002.

JAMES, A. J.; VUKASINOVIC, B.; SMITH, MARC K.; GLEZER, A. Vibration-induced drop atomization and bursting. *J. Fluid Mech*., v.476, p.1-28, 2003.

PODEŠVA, J.; POLÁK, J. The instable parametric oscillation during the rope track transport (*Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské*). *Technické Univerzity*, číslo1, ročník LIV, řada strojní, článek č. 1606, Ostrava, rok 2008.

JOHN, Z.; LU, J. Z.; WU, Q. Surface and interfacial characterization of wood-pvc composite: imaging morphology and wetting behavior. *Society of Wood Science and Technology*, v.37, n.1, p.95–111, 2005.

ELLENBERGER, J.; KRISHNA, R. Levitation of air bubbles in liquid under low frequency vibration excitement. *Chemical Engineering Science*, v.62, p.5669 – 5673, 2007.

KAPULSKIS, T. A.; DE JESUS, R. C.; MEI, L. H. I. Modificação química de fibras de coco e de sisal visando melhorar suas interações interfaciais com matrizes poliméricas biodegradáveis. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6, 2005, São Paulo. Unicamp, v.1, p.1-6, 2005.

KIM, H-Y. Drop fall-off from the vibrating ceiling. *Physics of Fluids*, v.16, n.2, p.474-477, 2004.

KIM, H.-Y.; CHUN, J. H. The recoiling of liquid droplets upon collision with solid surfaces. *Physics of fluids*, v.13, n.3, p643-659, 2001.

KOKAL, S. Crude oil emulsion: A state-of-art review. *Society of Petroleum Engineers*, n. SPE77497, 2002.

KRESS, T. S. *Mass transfer between small bubbles and liquids in cocurrent turbulent pipe-line flow.* 1972. 188f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Graduate Council of The University of Tennessee, Tennessee.

KRISHNA, R.; ELLENBERGER, J. Influence of low-frequency vibrations on bubble and drop sizes formed at a single orifice. *Chemical Engineering and Processing*, v.42, n.1, p.15-21, 2003.

KRISHNA, R.; ELLENBERGER, J.; URSEANU, M. I.; KEIL, F. J. Utilisation of bubble resonance phenomena to improve gas–liquid contact. *Naturwissenschaften*, v.87, p.455–459, 2000.

KROGSTAD, H. E.; ARNTSEN, Ø. A**.** Linear wave theory regular waves. In: Norwegian University of Science and Technology. Trondheim: 2000, p.1-37.

KRZAN, M.; MALYSA, K. Influence of electrolyte presence on bubble motion in solutions of sodium n-alkylsulfates. *Physicochem. Probl. Miner. Process*, v.48, n.1, p. 49–62, 2012.

LAGUBEAU, G.; FONTELOS, M. A.; JOSSERAND, C.; MAUREL, A.; PAGNEUX, V.; PETITJEANS, P. Spreading dynamics of drop impacts. *J. Fluid Mech.*, v.713, p.50-60, 2012.

LAKIZA, V. D. Features of the motion of a gas-liquid medium in a compound shell: Sphere end truncated cone subject to vibration. *Intern. Applied Mechanics*, v.41, n.1, p85-89, 2005.

LAMB, H. *Hydrodynamics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1932.

LANDAU, D. L.; LIFSHITZ, E. M. *Fluids mechanics*: Course of Theoretical Physics. London, Pergamon Press, 1982, V.6.

LI, C.; RICHTER, S.; NESIC, S. How do inhibitors mitigate corrosion in oil-water two phase flow beyond lowering the corrosion rate? In: CORROSION CONFERENCE & EXPO, 1, 2013, Athens. *Artigo*. *NACE International*, n.2391, p.1-14.

LOSKUTOVA, Y. V.; PROZOROVA, I. V.; YUDINA, N. V.; RIKKONEN, S. V.; DANEKER, V. A. Change in the rheological properties of high-paraffin petroleums under the action of vibrojet magnetic activation. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, v.77, n.5, p1034-1039, 2004.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. Artigo revisão: Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários. *Cerâmica*, v.54, p.174-183, 2008.

MALYSA, K., KRASOWSKA, M., KRZAN, M. Influence of surface active substances on bubble motion and collision with various interfaces, *Adv Colloid Interface Sci*., v.205, n.25, p.114-115, 2005.

MARIBONDO. J.F. *Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares*. 2000. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MATTOS, R.L.G.; VALENÇA, A.C.V.; GONÇALVES, R.M.; CHAGAS, F.B. Papel de imprensa e sua utilização pelos jornais. *BNDES Setorial Rio de Janeiro*, n.23, p.3-26, 2006.

MAYOR, P. *Fluid and glassy phases of vibrated granular matter studied with a torsion oscillator*. 2005. 184f. Thesis (Doctor Philosophique) - Institut de Physique de la Matière Complexe, L'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

McGILLIVRAY, J. D.; MATA, J. P.; WHITE, J. W.; ZANK, J. Nano-and microstructure of air/oil/water interfaces. *Journal Langmuir*, v.25, p.4065-4069, 2009.

MELO, M. V. *Tratamento de águas oleosas por flotação*. 2002. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MENDONÇA, E. T. R.; FERREIRA, J. M.; SOBRINHO, M. A. M. Tratamento da água de produção de petróleo através de processos combinados. *Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v.6, n.1, p.89 – 99, 2013.

MILEVA, E. Impact of adsorption layers on thin liquid films, *Elsevier Journal, Current Opinion in Colloid & Interface Science*, v.15, p.315–323, 2010.

MINNAERT, M. On musical air-bubbles and the sound of running water. *Philosophical Magazine*, v.16, n.104, p.235–248, 1933.

MORLEY, A. *Resistencia de materiales*. 3. ed. Barcelona-Madrid: Ed. Labor S.A., 1943.

MORUZZI, R.B. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando análise de imagem digital. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.12, n.3, p.273-283, 2007.

MUNDO, C.H.R.; SOMMERFELD, M.; TROPEA, C. Droplet-wall collision: Experimental studies of the deformation and breakup process. *Int. J. Multiphasic Flow,* v.21, n.2, p.151-173, 1995.

NIKOLA SMARDZIJA, W. DEL. Patente. *U.S.A. PN 4,853,507, 1989/08, aplic. n.187,667, Institution of Electrical Engineers – Tittle: Industrial Microwave heating*. A. C. Metaxas & R. J. Meredith, p.225-226, 1989.

NISHI, L.; MADRONA, G. S.; VIEIRA, A. M. S.; BASSETTI, F. J.; SILVA, G. F., BERGAMASCO, R. Coagulação/floculação com sementes de moringa oleifera LAM para remoção de cistos de giardia SPP e oocistos de cryptosporidium SPP da água. In: 3rd INTERNATIONAL WORKSHOP - ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 3, 2011, São Paulo. *Artigo*. São Paulo, p.1-9, 2011.

ORME, M. Experiments on droplets collisions, bounce, coalescence and disruption, *Elsevier Sciense, Prog. Energy Combust. Sciense*, v.23, p.65-79, 1997.

PAGLIUSO, M.R.; RODRIGUES, J.; FERREIRA, O.P; NETO, S.C. Aproveitamento da borracha de pneus inseríveis na produção de componentes para produção de componentes para construção: Ciclo de conferência sobre política e gestão ambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTETÁVEL & NISAM 2004, 1, 2004, Florianópolis. *Artigo*. Florianópolis, ICTR, v. único, p.25, 2004.

PARFITT, D. G. Fundamental aspects of dispersion: With special reference to pigments. In: PARFITT, D. G. DISPERSION OF SOLIDS IN LIQUIDS, 1, 1969, Amsterdam. *Artigo*. Amsterdam: Elsevier, 1969, cap.3, p.81-121, 1969.

PASANDIDEH-FARD, M.; QIAO, Y. M.; CHANDRA, S.; MOSTAGHIMI, J. Capillary effects during droplet impact on a solid surface. *Phys. Fluids*, v.8, n.3, p.650-659, 1996.

PORTER, J.; TINAO, I.; LAVER´ON-SIMAVILLA, A.; LOPEZ, C. A. Pattern selection in a horizontally vibrated container. *Fluid Dyn. Research*, v.44, p.1-31, 2012.

PUTHENVE ETTIL, B. A.; HOPFINGER, E. J. Evolution and breaking of parametrically forced capillary waves in a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, v.633, p355-379, 2009.

QUEIRÓS, Y. G. C.; CLARISSE, M. D.; OLIVEIRA R. S.; REIS, B. D.; TRAVALLONI, A. M. L.; LUCAS, E. F. Determinação e correlação do teor total de óleos e graxas por meio de diferentes técnicas espectroscópicas e gravimétricas. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3, 2005, Salvador. *Artigo*. Salvador: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 2005, p.1-6.

RAO, S. *Vibrações mecânicas*. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

REGO, F. C. A. *Estudo do hidrociclone cilíndrico de uma unidade de flotação centrífuga com auxílio de fluidodinâmica computacional*. 2008. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro RJ.

REIS, R.P.B. *Aplicação de ligas com memória de forma para controle de vibração em máquinas e estruturas*. 2007. 57f. Relatório Técnico (Relatório Técnico Final de Atividades – Projeto FINATEC, cód. 02850). Centro de Ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

RODRIGUES, L. D.; SILVA, I. T.; SILVA, I. M. O.; ROCHA, B. R. P. Uso de briquetes compostos para produção de energia no estado do Pará. In: Procedings of the 4th ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4, 2002, Campinas.

RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J^{a}. Inovação tecnológica no tratamento de águas oleosas de plataformas marítimas. In: CNPq XIX PRÊMIO JOVEM CIENTISTA – 2003 - Água fonte de vida, 19, 2003, Brasília. *Artigo*. P.1-45.

RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J^{b}. New basis for measuring the size distribution of bubbles, *Minerals Engineering*, v.16, p.757–765, 2003.

RUTHVEN, D. M. *Principles of adsorption and adsorption processes*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1984.

SAADATMAND, M. *A study on vibration-induced particle motion under microgravity*. 2012, 295f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Graduate Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Toronto.

SAADATMAND, M.; KAWAJI, M. Effect of viscosity on vibration-induced motion of a spherical particle suspended in a fluid cell. *Microgravity Sci. Technol*., v.22, p.433–440, 2010.

SANTANDER, M.; RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. Modified jet flotation in oil (petroleum) emulsion/water separations. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Eng. Aspects*, v.375, p.237–244, 2011.

SOARES, A. C.; OLIVEIRA, R. M.; BRISOLARI, A.; SALES, A.; GONÇALVES, D. Molhabilidade em amostras de araucaria angustifolia e pinus elliottii após tratamento térmico e envelhecimento. *Scientia Florestalis - Sci. For*., v.39, n.92, p.447-456, 2011.

SPIVAKOVSKI, A. O.; DYACHKOV, V. K. *Conveing machines*. Moscow: Mir Publishers, 1985. Vs. I, II.

TANG, X.; RICHTER, S.; NESIC, S. Study of wettability of different mild steel surfaces. *NACE International*, n.3109, p.1-18, 2009.

TAYLER, A. B. *Experimental characterisation of bubbly flow using* MRI. 2011. 253f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Chemical Engineering and Biotechnology, University of Cambridge, Cambridge.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. 2. ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

THOMSON, W. T. *Theory of vibration with applications*. New Jersey: Prent.-Hall Inc, 1972.
UGURAL, A. C., *Mecânica dos materiais*. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

UR'EV, N. B.; KUCHIN, I. V.; NAUMENKO, E. A. Influence of inertial effects on the disintegration of the structure of disperse systems of the solid-phase–liquid-medium type. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, v.78, n.5, p.1006-1011, 2005.

VARAS, F.; VEGA, J. M. Modulated surface waves in large-aspect-ratio horizontally vibrated containers, *Journal of Fluid Mechanics*, v.5, n.579, p.271 – 304, 2007.

WAGHMARE, Y. G. *Vibrations for improving multiphase contact*. 2008. 283f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Engineering Chemical, Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Baton Rouge.

WAN SULAIMAN, W. R.; PARK, S. K.; LEE, E. S. Potential of polysorbate20 surfactant for enhanced oil recovery. *The Open Petroleum Engineering Journal*, v.5, p.63-68, 2012.

WUNSCH, D. *Theoretical and numerical study of collision and coalescence - statistical modeling approaches in gas-droplet turbulent flows*. 2009. 270f. Thèse (Doctorat au Dinamique des Fluides) – Institut National Polytechnique de Toulouse, Institut de Mécanique de Toulouse, L'Université de Toulouse, Toulouse.

ZEFF, B. W.; KLEBER, B.; FINEBERG, J.; LATHROP, D. P. Singularity dynamics in curvature collapse and jet eruption on a fluid surface. *Nature*, v.403, p.401-404, 2000.

ZOUESHTIAGH, F.; CAPS, H.; LEGENDRE, M.; VANDEWALLE, N.; PETITJEANS, P.; KUROWSKI, P. Air bubbles under vertical vibrations. *The European Physical Journal*, v.20, p.317-325, 2006.

Apêndice

APÊNDICE Tabela 1 Pesagem de adsorventes em quilograma antes do ensaio, área superficial e estatística.

Ord.	Código do ensaio	1º Elemento do par adsorvente			2º Elemento do par adsorvente			Massa total	Superfície
		1ª	2ª	M_{ads}	1ª	2ª	M_{ads}	M_{ads}*	As
1	FRV 14/3,5-1	5,1533E-03	5,1534E-03	5,1534E-03	6,0036E-03	6,0036E-03	6,0036E-03	9,7004E-03	1,4605E-01
1R	FRV 14/3,5-1R	5,8866E-03	5,8863E-03	5,8865E-03	5,2018E-03	5,2020E-03	5,2019E-03	9,6318E-03	1,4502E-01
2	FRV 14/7,5-2	5,3920E-03	5,3920E-03	5,3920E-03	5,6018E-03	5,6013E-03	5,6016E-03	9,5370E-03	1,4359E-01
3	FRV 14/10-3	5,5699E-03	5,5699E-03	5,5699E-03	6,2020E-03	6,2018E-03	6,2019E-03	1,0315E-02	1,5531E-01
4	FRV 33/3,5-1	5,6034E-03	5,6035E-03	5,6035E-03	6,6519E-03	6,6519E-03	6,6519E-03	1,0799E-02	1,6259E-01
5	FRV 33/7,5-2	5,5348E-03	5,5350E-03	5,5349E-03	6,1647E-03	6,1647E-03	6,1647E-03	1,0243E-02	1,5422E-01
6	FRV 33/10-3	6,2672E-03	6,2670E-03	6,2671E-03	5,3961E-03	5,3957E-03	5,3959E-03	1,0206E-02	1,5367E-01
7	FRV 47/3,5-1	6,1881E-03	6,1885E-03	6,1883E-03	5,4759E-03	5,4757E-03	5,4758E-03	1,0208E-02	1,5368E-01
8	FRV 47/7,5-2	4,8362E-03	4,8366E-03	4,8364E-03	6,4527E-03	6,4525E-03	6,4526E-03	9,8324E-03	1,4804E-01
8R	FRV 47/7,5-2R	5,6751E-03	5,6753E-03	5,6752E-03	5,4697E-03	5,4696E-03	5,4697E-03	9,6883E-03	1,4587E-01
9	FRV 47/10-3	5,3803E-03	5,3801E-03	5,3802E-03	5,6304E-03	5,6302E-03	5,6303E-03	9,5539E-03	1,4384E-01
10	FRV 14/10-SF1	5,8477E-03	5,8477E-03	5,8477E-03	5,4133E-03	5,4134E-03	5,4134E-03	9,8045E-03	1,4762E-01
11	FRV 33/10-SF2	5,7226E-03	5,7224E-03	5,7225E-03	5,4945E-03	5,4944E-03	5,4945E-03	9,7604E-03	1,4695E-01
12	FRV 47/10-SF3	5,2042E-03	5,2044E-03	5,2043E-03	5,2774E-03	5,2773E-03	5,2774E-03	9,0251E-03	1,3588E-01
13	FRV 33/3,5-SF1	5,3297E-03	5,3295E-03	5,3296E-03	5,6030E-03	5,6026E-03	5,6028E-03	9,4758E-03	1,4267E-01
14	FRV 47/3,5-SF2	4,6992E-03	4,6991E-03	4,6992E-03	5,4274E-03	5,4274E-03	5,4274E-03	8,6700E-03	1,3053E-01
15	V3,5 - SV/F 1	5,4103E-03	5,4103E-03	5,4103E-03	6,1100E-03	6,1103E-03	6,1102E-03	1,0064E-02	1,5152E-01
16	V10 - SV/F 2	6,4853E-03	6,4849E-03	6,4851E-03	5,1991E-03	5,1992E-03	5,1992E-03	1,0228E-02	1,5399E-01
							m =	9,9640E-03	
								As =	1,5002E-01
17*	FRV 14/10 AUT	5,5814E-03	5,5812E-03	5,5813E-03	xxxxx	xxxxx	xxxxx	4,8530E-03	7,3067E-02
18*	FRV 33/10 AUT	5,6630E-03	5,6631E-03	5,6631E-03	xxxxx	xxxxx	xxxxx	4,9348E-03	7,4298E-02
19*	FRV 47/10 AUT	5,0337E-03	5,0338E-03	5,0338E-03	xxxxx	xxxxx	xxxxx	4,3055E-03	6,4823E-02
(M_{ads}*) = M_{ads} (total) - 2mal							**m =**	4,5792E-03	
		Desvio-padrão (1º Elemento) σ1 = √ Σ(e^2)/17 = 1,1376E-07 kg						**As =**	6,8945E-02
		Desvio-padrão (2º Elemento) σ2 = √ Σ(e^2)/17 = 1,2127E-04 kg					σ total = σ1 + σ2 = 1,2138E-04 kg		

APÊNDICE Tabela 2 Pesagem de adsorventes em quilograma [kg] após ensaio, área superficial e estatística.

Ord.	Código do ensaio	1º Elemento do par adsorvente			2º Elemento do par adsorvente			Massa total	Superfície
		1ª	2ª	M_{ads}	1ª	2ª	M_{ads}	M_{ads}*	As
1	FRV 14/3,5-1	5,1656E-03	5,1654E-03	5,1655E-03	6,0149E-03	6,0149E-03	6,0149E-03	9,7238E-03	1,4640E-01
1R	FRV 14/3,5-1R	5,9456E-03	5,9454E-03	5,9455E-03	5,2000E-03	5,2000E-03	5,2000E-03	9,6889E-03	1,4588E-01
2	FRV 14/7,5-2	5,4872E-03	5,4876E-03	5,4874E-03	5,5849E-03	5,5845E-03	5,5847E-03	9,6155E-03	1,4477E-01
3	FRV 14/10-3	5,6207E-03	5,6209E-03	5,6208E-03	6,2439E-03	6,2441E-03	6,2440E-03	1,0408E-02	1,5671E-01
4	FRV 33/3,5-1	6,6777E-03	6,6782E-03	6,6780E-03	5,6254E-03	5,6253E-03	5,6254E-03	1,0847E-02	1,6331E-01
5	FRV 33/7,5-2	5,5482E-03	5,5482E-03	5,5482E-03	6,2420E-03	6,2440E-03	6,2430E-03	1,0335E-02	1,5560E-01
6	FRV 33/10-3	6,3392E-03	6,3393E-03	6,3393E-03	5,4208E-03	5,4206E-03	5,4207E-03	1,0303E-02	1,5513E-01
7	FRV 47/3,5-1	6,2134E-03	6,2134E-03	6,2134E-03	5,5321E-03	5,5321E-03	5,5321E-03	1,0289E-02	1,5491E-01
8	FRV 47/7,5-2	4,8818E-03	4,8817E-03	4,8818E-03	6,5111E-03	6,5110E-03	6,5111E-03	9,9362E-03	1,4960E-01
8R	FRV 47/7.5-2R	5,7312E-03	5,7310E-03	5,7311E-03	5,5098E-03	5,5096E-03	5,5097E-03	9,7842E-03	1,4731E-01
9	FRV 47/10-3	5,4454E-03	5,4454E-03	5,4454E-03	5,6601E-03	5,6599E-03	5,6600E-03	9,6488E-03	1,4527E-01
10	FRV 14/10-SF1	5,8746E-03	5,8745E-03	5,8746E-03	5,4422E-03	5,4422E-03	5,4422E-03	9,8602E-03	1,4845E-01
11	FRV 33/10-SF2	5,7521E-03	5,7523E-03	5,7522E-03	5,5608E-03	5,5606E-03	5,5607E-03	9,8563E-03	1,4840E-01
12	FRV 47/10-SF3	5,2404E-03	5,2406E-03	5,2405E-03	5,3361E-03	5,3359E-03	5,3360E-03	9,1199E-03	1,3731E-01
13	FRV 33/3,5-SF1	5,3796E-03	5,3794E-03	5,3795E-03	5,6432E-03	5,6434E-03	5,6433E-03	9,5662E-03	1,4403E-01
14	FRV 47/3,5-SF2	4,7799E-03	4,7801E-03	4,7800E-03	5,4194E-03	5,4194E-03	5,4194E-03	8,7428E-03	1,3163E-01
15	V3,5 - SV/F 1	5,4373E-03	5,4373E-03	5,4373E-03	6,1421E-03	6,1425E-03	6,1423E-03	1,0123E-02	1,5241E-01
16	V10 - SV/F 2	6,5396E-03	6,5398E-03	6,5397E-03	5,2353E-03	5,2357E-03	5,2355E-03	1,0319E-02	1,5536E-01
							m =	1,0021E-02	
								As =	1,5088E-01
17	FRV 14/10 AUT	5,6443E-03	5,6445E-03	5,6444E-03	xxxxx	xxxxx	xxxxx	4,9161E-03	7,4017E-02
18	FRV 33/10 AUT	5,7320E-03	5,7318E-03	5,7319E-03	xxxxx	xxxxx	xxxxx	5,0036E-03	7,5334E-02
19	FRV 47/10 AUT	5,0852E-03	5,0852E-03	5,0852E-03	xxxxx	xxxxx	xxxxx	4,3569E-03	6,5597E-02
(M_{ads}*) = M_{ads} (total) - 2mal							**m =**	4,6365E-03	
		Desvio-padrão (1º Elemento) σ1 = √ Σ(e^2)/17 = 2,3764E-07 kg						**As =**	6,1434E-02
		Desvio-padrão (2º Elemento) σ2 = √ Σ(e^2)/17 = 2,1282E-07 kg				σ total = σ1 + σ2 = 4,5046E-07 kg			

APÊNDICE Tabela 3

Tabela de graduação da válvula de controle de vazão de ar aferida com rotâmetro (ETM_{11}) à pressão de 1,41 atm.

Grad.	Vazão	|e|
1	57,13	5,91
2	96,53	1,97
3	108,35	1,97
4	110,32	0
5	112,29	1,97
6	114,26	3,94
7	118,2	3,94
8	124,11	1,97
9	128,05	1,97
10	130,02	0
11	136,96	3
12	137,11	0,79
13	137,95	0,05
14	139,92	1,92
15	141,84	0
16	141,84	0
17	143,81	1,97
18	143,81	1,97
19	145,78	0
20	147,75	1,97
21	147,75	1,97
22	151,69	1,97

Obs.: Adotou-se a vazão de ar de trabalho, à pressão de 1,41 atm, Q = 0,184 m^3/h (51 mℓ/s). O desvio-médio padrão é, σ = 2,37 mℓ/s.

APÊNDICE Tabela 4

Tabela de calibragem frequência em função da voltagem com auxílio de osciloscópio (ETM_3).

Ord.	Freqüência	Voltagem
1	0	0
2	2,25	1
3	3,42	1,5
4	4,55	2
5	5,68	2,5
6	6,94	3
7	7,99	3,5
8	9,06	4
9	10,2	4,5
10	11,4	5
11	12,2	5,5
12	13,3	6
13	14,5	6,5
14	15,9	7
15	17,2	7,5
16	18,1	8
17	19,2	8,5
18	20,6	9
19	21,6	9,5
20	22,7	10
21	23,6	10,5
22	24,5	11
23	25,8	11,5
24	26,7	12
25	28,2	12,5
26	29,1	13
27	30,3	13,5
28	31,6	14
29	32,5	14,5
30	33,8	15
31	34,7	15,5
32	35,8	16
33	37	16,5
34	38,4	17
35	39,8	17,5
36	41,2	18
37	42,6	18,5
38	44	19
39	45,4	19,5
40	47	20

APÊNDICE Tabela 5 Graduação do regulador de vazão em função da altura manométrica em termos de volume de referência em mililitros [mℓ], e tempo de escoamento em segundos [s]. Obs.: Desvio $e = Q_n \times [1 - (\text{tempo-médio} / t_1 \text{ ou } t_2)]$ e Desvio-padrão = $\sigma = \sqrt{\Sigma(e^2)/n-1}$.

Altura manométrica representada em termos de volume vertido por ensaio												
Grad.	250 mℓ e tempo t [s]						300 mℓ e tempo t [s]					
	t1	t2	Média	Qn / 250 mℓ	|e|	|ē|^2	t1	t2	Média	Qn / 300 mℓ	|e|	|ē|^2
1	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	244	222	233	1,07E+00	5,32E-02	2,83E-03	305	270	287,5	1,04E+00	6,76E-02	4,57E-03
4	131	139	135	1,85E+00	5,33E-02	2,84E-03	161	168	164,5	1,82E+00	3,80E-02	1,44E-03
5	99	103	101	2,48E+00	4,81E-02	2,31E-03	121	126	123,5	2,43E+00	4,82E-02	2,32E-03
6	75	74	74,5	3,36E+00	2,27E-02	5,14E-04	91	90	90,5	3,31E+00	1,84E-02	3,39E-04
7	64	65	64,5	3,88E+00	2,98E-02	8,89E-04	78	80	79	3,80E+00	4,75E-02	2,25E-03
8	57	60	58,5	4,27E+00	1,07E-01	1,14E-02	69	73	71	4,23E+00	1,16E-01	1,34E-02
9	53	50	51,5	4,85E+00	1,46E-01	2,12E-02	65	60	62,5	4,80E+00	2,00E-01	4,00E-02
10	45	47	46	5,43E+00	1,16E-01	1,34E-02	55	57	56	5,36E+00	9,40E-02	8,83E-03
11	39	39	39	6,41E+00	0,00E+00	0,00E+00	48	48	48	6,25E+00	0,00E+00	0,00E+00
12	38	37	37,5	6,67E+00	9,01E-02	8,12E-03	46	45	45,5	6,59E+00	7,33E-02	5,37E-03
13	36	37	36,5	6,85E+00	9,26E-02	8,57E-03	44	45	44,5	6,74E+00	7,49E-02	5,61E-03
14	33	34	33,5	7,46E+00	1,10E-01	1,20E-02	40	41	40,5	7,41E+00	9,03E-02	8,16E-03
15	31	31	31	8,06E+00	0,00E+00	0,00E+00	37	38	37,5	8,00E+00	1,05E-01	1,11E-02
16	30	30	30	8,33E+00	0,00E+00	0,00E+00	37	37	37	8,11E+00	0,00E+00	0,00E+00
17	31	31	31	8,06E+00	0,00E+00	0,00E+00	37	38	37,5	8,00E+00	1,05E-01	1,11E-02
18	30	29	29,5	8,47E+00	1,46E-01	2,13E-02	36	35	35,5	8,45E+00	1,21E-01	1,46E-02
19	27	27	27	9,26E+00	0,00E+00	0,00E+00	33	33	33	9,09E+00	0,00E+00	0,00E+00
20	25	27	26	9,62E+00	3,56E-01	1,27E-01	30	32	31	9,68E+00	3,02E-01	9,15E-02
21	25	26	25,5	9,80E+00	1,89E-01	3,55E-02	30	31	30,5	9,84E+00	1,59E-01	2,52E-02
22	25	25	25	1,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	31	30	30,5	9,84E+00	1,64E-01	2,69E-02
23	25	25	25	1,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	32	30	31	9,68E+00	3,23E-01	1,04E-01
24	24	24	24	1,04E+01	0,00E+00	0,00E+00	29	29	29	1,03E+01	0,00E+00	0,00E+00
				Desvio-médio ē = 6,49E-02		mℓ/s				Desvio-médio ē = 8,94E-02		mℓ/s
				Desvio-padrão σ = 1,08E-01		mℓ/s				Desvio-padrão σ = 1,28E-01		mℓ/s

APÊNDICE Tabela 6 Graduação do regulador de vazão em função da altura manométrica em termos de volume de referência em mililitros [mℓ], e tempo de escoamento em segundos [s]. Obs.: Desvio $e = Q_n \times (1 - (\text{tempo-médio} / t_1 \text{ ou } t_2))$ e Desvio-padrão = $\sigma = \sqrt{\Sigma(e^2)/n-1}$.

Altura manométrica representada em termos de volume vertido												
Grad.	350 mℓ e tempo t [s]						400 mℓ e tempo t [s]					
	t1	t2	Média	Qn / 350 mℓ	|e|	|ē|^2	t1	t2	Média	Qn / 400 mℓ	|e|	|ē|^2
1	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	368	330	349	1,00E+00	5,77E-02	3,33E-03	432	390	411	9,73E-01	5,24E-02	2,75E-03
4	191	198	194,5	1,80E+00	3,18E-02	1,01E-03	222	234	228	1,75E+00	4,50E-02	2,02E-03
5	143	149	146	2,40E+00	4,83E-02	2,33E-03	168	174	171	2,34E+00	4,03E-02	1,63E-03
6	109	107	108	3,24E+00	3,03E-02	9,17E-04	125	124	124,5	3,21E+00	1,30E-02	1,68E-04
7	93	94	93,5	3,74E+00	1,99E-02	3,96E-04	107	110	108,5	3,69E+00	5,03E-02	2,53E-03
8	82	87	84,5	4,14E+00	1,19E-01	1,42E-02	94	100	97	4,12E+00	1,24E-01	1,53E-02
9	76	72	74	4,73E+00	1,31E-01	1,73E-02	89	82	85,5	4,68E+00	2,00E-01	3,99E-02
10	65	67	66	5,30E+00	7,91E-02	6,26E-03	75	78	76,5	5,23E+00	1,01E-01	1,01E-02
11	56	57	56,5	6,19E+00	5,43E-02	2,95E-03	65	65	65	6,15E+00	0,00E+00	0,00E+00
12	55	54	54,5	6,42E+00	5,95E-02	3,54E-03	63	62	62,5	6,40E+00	5,16E-02	2,66E-03
13	52	53	52,5	6,67E+00	6,29E-02	3,96E-03	60	62	61	6,56E+00	1,06E-01	1,12E-02
14	47	48	47,5	7,37E+00	7,68E-02	5,89E-03	54	56	55	7,27E+00	1,30E-01	1,69E-02
15	44	45	44,5	7,87E+00	8,74E-02	7,64E-03	51	53	52	7,69E+00	1,45E-01	2,11E-02
16	44	43	43,5	8,05E+00	9,36E-02	8,75E-03	52	50	51	7,84E+00	1,57E-01	2,46E-02
17	44	45	44,5	7,87E+00	8,74E-02	7,64E-03	51	52	51,5	7,77E+00	7,47E-02	5,58E-03
18	43	42	42,5	8,24E+00	9,80E-02	9,61E-03	50	48	49	8,16E+00	1,70E-01	2,89E-02
19	40	39	39,5	8,86E+00	1,14E-01	1,29E-02	45	45	45	8,89E+00	0,00E+00	0,00E+00
20	36	38	37	9,46E+00	2,49E-01	6,20E-02	41	44	42,5	9,41E+00	3,21E-01	1,03E-01
21	36	37	36,5	9,59E+00	1,30E-01	1,68E-02	42	43	42,5	9,41E+00	1,09E-01	1,20E-02
22	36	36	36	9,72E+00	0,00E+00	0,00E+00	42	42	42	9,52E+00	0,00E+00	0,00E+00
23	36	35	35,5	9,86E+00	1,41E-01	1,98E-02	42	41	41,5	9,64E+00	1,18E-01	1,38E-02
24	35	35	35	1,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	40	40	40	1,00E+01	0,00E+00	0,00E+00
	Desvio-médio ē = 7,38E-02 mℓ/s						Desvio-médio ē = 8,36E-02 mℓ/s					
	Desvio-padrão σ = 9,49E-02 mℓ/s						Desvio-padrão σ = 1,17E-01 mℓ/s					

APÊNDICE Tabela 7 Graduação do regulador de vazão em função da altura manométrica em termos de volume de referência em mililitros [mℓ], e tempo de escoamento em segundos [s]. Obs.: Desvio e = Q_n x (1 - (tempo-médio / t_1 ou t_2)) e Desvio-padrão = $\sigma = \sqrt{\Sigma(e^2)/n-1}$.

Altura manométrica representada em termos de volume vertido												
Grad.	450 mℓ e tempo t [s]						470 mℓ e tempo t [s]					
	t1	t2	Média	Qn / 450 mℓ	|e|	|ē|^2	t1	t2	Média	Qn / 470 mℓ	|ē|	|ē|^2
1	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	510	459	484,5	9,29E-01	5,16E-02	2,66E-03	637	635	636	7,39E-01	1,16E-03	1,35E-06
4	262	275	268,5	1,68E+00	3,96E-02	1,57E-03	319	354	336,5	1,40E+00	6,90E-02	4,77E-03
5	196	205	200,5	2,24E+00	4,93E-02	2,43E-03	246	259	252,5	1,86E+00	4,67E-02	2,18E-03
6	146	145	145,5	3,09E+00	1,07E-02	1,14E-04	182	180	181	2,60E+00	1,44E-02	2,08E-04
7	126	129	127,5	3,53E+00	4,10E-02	1,68E-03	155	158	156,5	3,00E+00	2,85E-02	8,13E-04
8	109	115	112	4,02E+00	1,05E-01	1,10E-02	139	147	143	3,29E+00	8,94E-02	8,00E-03
9	102	96	99	4,55E+00	1,42E-01	2,02E-02	127	119	123	3,82E+00	1,28E-01	1,65E-02
10	87	91	89	5,06E+00	1,11E-01	1,23E-02	109	114	111,5	4,22E+00	9,24E-02	8,55E-03
11	76	77	76,5	5,88E+00	3,82E-02	1,46E-03	96	96	96	4,90E+00	0,00E+00	0,00E+00
12	74	73	73,5	6,12E+00	4,19E-02	1,76E-03	93	93	93	5,05E+00	0,00E+00	0,00E+00
13	71	72	71,5	6,29E+00	4,37E-02	1,91E-03	91	92	91,5	5,14E+00	2,79E-02	7,79E-04
14	64	66	65	6,92E+00	1,05E-01	1,10E-02	81	82	81,5	5,77E+00	3,52E-02	1,24E-03
15	59	61	60	7,50E+00	1,23E-01	1,51E-02	76	78	77	6,10E+00	7,83E-02	6,12E-03
16	59	58	58,5	7,69E+00	6,63E-02	4,40E-03	76	77	76,5	6,14E+00	3,99E-02	1,59E-03
17	58	59	58,5	7,69E+00	6,52E-02	4,25E-03	77	80	78,5	5,99E+00	1,12E-01	1,26E-02
18	59	58	58,5	7,69E+00	6,63E-02	4,40E-03	73	72	72,5	6,48E+00	4,50E-02	2,03E-03
19	55	56	55,5	8,11E+00	7,24E-02	5,24E-03	68	68	68	6,91E+00	0,00E+00	0,00E+00
20	49	54	51,5	8,74E+00	4,05E-01	1,64E-01	60	63	61,5	7,64E+00	1,82E-01	3,31E-02
21	50	51	50,5	8,91E+00	8,74E-02	7,63E-03	61	65	63	7,46E+00	2,30E-01	5,27E-02
22	50	49	49,5	9,09E+00	9,28E-02	8,61E-03	60	62	61	7,70E+00	1,24E-01	1,54E-02
23	49	49	49	9,18E+00	0,00E+00	0,00E+00	65	58	61,5	7,64E+00	4,61E-01	2,13E-01
24	48	47	47,5	9,47E+00	1,01E-01	1,02E-02	62	59	60,5	7,77E+00	1,98E-01	3,90E-02
				Desvio-médio ē = 7,74E-02		mℓ/s				Desvio-médio ē = 8,35E-02		mℓ/s
				Desvio-padrão σ = 1,13E-01		mℓ/s				Desvio-padrão σ = 1,35E-01		mℓ/s