

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Eder dos Santos
Galdiano E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 22/01/2010
Leonardo Goldstein
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Contribuição ao Estudo de um Medidor Não- Invasivo da Espessura da Camada de Água em um Escoamento Anular Óleo-Água

Autor: **Éder dos Santos Galdiano**
Orientador: **Prof. Leonardo Goldstein Júnior**
Co-orientador: **Prof. Emerson dos Reis**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUÍDOS**

Contribuição ao Estudo de um Medidor Não- Invasivo da Espessura da Camada de Água em um Escoamento Anular Óleo–Água

**Autor: Éder dos Santos Galdiano
Orientador: Prof. Leonardo Goldstein Júnior
Co-orientador: Prof. Emerson dos Reis**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Térmica e Fluídos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2010
SP – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

G131c Galdiano, Eder dos Santos
Contribuição ao estudo de um medidor não-invasivo da espessura da camada de água em um escoamento anular óleo-água / Eder dos Santos Galdiano. -- Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientadores: Leonardo Goldstein Junior, Emerson dos Reis.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Detectores. 2. Escoamento bifásico. 3. Capacitores. 4. Petróleos pesados. 5. Sondas (Instrumentos eletrônicos). I. Goldstein Junior, Leonardo. II. Reis, Emerson dos. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Título em Inglês: Contribution to the study of a non-invasive probe for measuring the water thickness in a core-annular flow

Palavras-chave em Inglês: Detectors, Two-phase flow, Capacitors, Heavy oil, Probes (Electronic instruments)

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Eugênio Spanó Rosa, Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez

Data da defesa: 22/01/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUÍDOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Contribuição ao Estudo de um Medidor Não- Invasivo da Espessura da Camada de Água em um escoamento Anular Óleo-Água

Autor: **Éder dos Santos Galdiano**
Orientador: **Prof. Leonardo Goldstein Júnior**
Co-orientador: **Prof. Emerson dos Reis**

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr., Presidente
Instituição UNICAMP – FEM/DETF



Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa
Instituição UNICAMP – FEM/DE



Prof. Dr. Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez
Instituição USP – EESC/SEM

Campinas, 22 de janeiro de 2010.

Dedicatória

Dedico esta dissertação aos meus pais, Lázaro e Maria Lúcia, aos meus irmãos Fernanda e Igor e à minha querida Isabela.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Leonardo Goldstein e ao Prof. Emerson dos Reis pela oportunidade, pela atenção e pelas ajudas com essa dissertação.

Aos meus pais, por me darem a vida e por sempre terem me ajudado. Aos meus irmãos, que sempre se dispuseram em me ajudar e por serem exemplares em dedicação e seriedade.

À minha querida Isabela pelo nosso amor, nossa amizade e pelo nosso companheirismo.

Aos meus amigos Jorge Biazussi e Alexandre Buenos, pela grande amizade e pelas ajudas com o mestrado.

À Petrobras por fomentar o projeto que inclui essa dissertação.

*“Quem na fraqueza sabe ser bem
mais forte...”*

Zé Ramalho

Resumo

GALDIANO, Éder dos Santos, *Contribuição ao Estudo de um Medidor Não-Invasivo da Espessura da Camada de Água em um escoamento Anular Óleo-Água*, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010. 142 p. Dissertação (Mestrado).

Esse trabalho é uma contribuição ao estudo de uma sonda não-intrusiva para medição da espessura da camada anular de escoamentos bifásicos óleo-água – *core-flow*. É discutida a construção do sensor capacitivo da sonda. Dela são avaliados o desempenho estático, numa bancada construída para este fim, e o dinâmico na presença de escoamento numa bancada existente no Laboratório de Petróleo (LabPetro). Através dos testes estáticos, foram obtidas informações sobre a resposta da sonda: formato da curva de resposta, sensibilidade, faixa de medição, e estudou-se o efeito da condutividade da água. Os dados experimentais foram comparados com resultados de simulação numérica obtidos por outro autor. Nos testes dinâmicos, foi utilizada uma técnica de medição da espessura da camada de água através de imagens de filmagens registradas do escoamento, sendo que estes dados foram comparados com os obtidos com a sonda capacitiva, assim permitindo a avaliação do seu desempenho no escoamento. Os resultados demonstram potencial do sistema proposto, mas também apontam para a necessidade de novos estudos e aperfeiçoamentos.

Palavras Chave

- Sensor Capacitivo, Escoamento Anular Óleo-Água, Espessura da Camada de Água.

Abstract

GALDIANO, Eder dos Santos, *Contribution to the Study of a Non-Invasive Probe for Measuring the Water Thickness in a Core-annular Flow*, 2010. 142 p. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering): Faculty of Mechanical Engineering, State University of Campinas, Campinas.

This work is a contribution to the study of a non-intrusive probe for measurement of the thickness of the water layer of a core-annular flow. A capacitive probe was built and its static performance was evaluated from tests executed in a specially designed bench-scale apparatus. In addition, evaluation of the dynamic performance was made possible from fluid-flow tests in a multiphase flow loop. From the static tests information was obtained about the probe output: shape of the produced response, sensitivity, range and the water electrical conductivity effect. The experimental data were compared with results of a numerical simulation available from a different author. In the dynamic tests the measurement technique used to obtain the thickness of the annular water layer consisted of a sequence of photographic images from a fast camera. The results were compared with those from the capacitive probe, allowing the evaluation of its performance in the presence of fluid flow. The results demonstrate the potential of the considered system, but they also point out to the necessity of new studies and development.

Key words

- Capacitive Probe, Core-Annular Flow, Water Thickness.

Índice

Introdução	1
1.1 Motivação à Pesquisa	1
1.2 Revisão da Literatura	3
1.2.1 Parâmetros diretos e indiretos do escoamento óleo – água em tubulações	3
1.2.2 Técnicas com potencial de aplicação para medição direta no escoamento anular	5
1.2.3 Medidores capacitivos	11
1.3 Objetivos	19
Medidor Capacitivo	20
2.1 Sonda Capacitiva da Espessura da Camada Anular de Água do Escoamento Óleo – Água	21
2.1.1 Sensor capacitivo	23
2.1.2 Transdutor de capacitância	27
2.1.3 <i>Core-Flow</i> na bancada estática	29
2.1.4 Determinação da incerteza da medida da espessura da camada anular	32
Bancadas de Testes Experimentais	34
3.1 Bancada para Testes Estáticos	34
3.1.1 Componentes da bancada	36
3.1.2 Avaliação dos efeitos axiais do sensor capacitivo	38
3.1.3 Instrumentação	39
3.2 Bancada para Testes Dinâmicos	42
3.2.1 Fluxograma do processo	42
3.2.2 Instrumentação	45
3.2.3 Técnica ótica	47
3.2.4 Medição da espessura da camada de água através de imagens dos escoamentos	48
3.3 Sistemas de Condicionamento de Sinais e Aquisição de Dados	49
Procedimento Experimental e de Redução de Dados	51

4.1 Procedimentos de Operação da Bancada de Testes Estáticos	51
4.1.1 Partida da instalação	51
4.1.2 Avaliação do sensor capacitivo com o transdutor	52
4.1.3 Avaliação do sensor capacitivo com o Agilent LCR	52
4.1.4 Avaliação dos efeitos axiais	53
4.2 Procedimentos de Operação da Bancada de Testes Dinâmicos	54
4.2.1 Partida da instalação	54
4.2.2 Sequência dos procedimentos de testes	54
4.2.3 Calibração e instalação da câmera	56
4.3 Análise dos Sinais e Redução dos Dados Experimentais	58
4.3.1 Bancada estática	58
4.3.2 Para a bancada dinâmica	59
4.3.3 Função de conversão das imagens em uma espessura	63
4.3.4 Caracterização do escoamento nos testes dinâmicos	63
Apresentação e Discussão dos Resultados	66
5.1 Introdução	66
5.2 Resultados dos Testes Estáticos	67
5.2.1 Resposta da sonda em função da espessura da camada anular de água	68
5.2.2 Efeitos da distribuição axial da camada anular	78
5.3 Resultados dos Testes Dinâmicos	80
5.3.1 Resposta da sonda em função da espessura da camada de água das imagens	81
5.3.2 Utilização da resposta estática como método de calibração	82
Conclusões e Sugestões	90
Anexos	99
1 Programa para Determinação das Espessuras da Camada Anular	99
2 Incerteza de Medição dos Tubos de Vidro e Cilindros	106
Apêndice A	109
Medição de Permissividade Relativa Complexa e Suas Componentes em Emulsões de Água em Óleo – A/O	109
Apêndice B	131
Medição da Permissividade Relativa e do Fator de Dissipação de Materiais Sólidos	131

Lista de figuras

Fig. 1.1 Escoamento anular Óleo - Água (JOSEPH, 2000)	2
Fig. 1.2 Medição através de técnica fotográfica (RODRIGUEZ; BANNWART, 2006).	8
Fig. 1.3 Medidor de espessura de filme de água em escoamento anular (BELT, 2007).	10
Fig. 1.4 Medidor de espessura de filme líquido (DAMSOHN; PRASSER, 2009).	11
Fig. 1.5 Capacitor com guardas (HAMMER, 2000).	13
Fig. 1.6 Escoamento vertical pistonado(esquerda) e anular (direita) (VERBERK <i>et al.</i> , 2000).	13
Fig. 1.7 Sensor capacitivo de espessura de filme em escoamento anular (MARSHALL; TIDERMAN, 1972).	14
Fig. 1.8 Medidor capacitivo de espessura de filme em escoamento pistonado (MUSTAFA <i>et al.</i> , 1972).	15
Fig. 1.9 Ponte de corrente alternada (MARSHALL; TIEDERMAN, 1972).	16
Fig. 1.10 Circuito tipicamente imune à capacitâncias parasitas (HUANG <i>et al.</i> , 1988).	18
Fig. 1.11 Detector de corrente.	18
Fig. 2.1 Efeitos da distorção do campo (SERWAY; JEWETT, 2006).	20
Fig. 2.2 Unidade de suporte – Corte. Dim.: mm.	22
Fig. 2.3 Uma sonda capacitiva.	23
Fig. 2.4 Disposição do sensor no tubo.	24
Fig. 2.5 Corte nos eletrodos sensor e fonte.	25
Fig. 2.6 Eletrodos no tubo com respectiva fiação.	26
Fig. 2.7 Circuito eletrônico do transdutor (DOS REIS, 2003).	28
Fig. 3.1 Bancada de testes estáticos. Corte na sonda, tarugo e ponteiras.	36
Fig. 3.2 Tarugo montado entre as ponteiras dentro do tubo de vidro.	37
Fig. 3.3 Anel para avaliação do efeito axial.	38
Fig. 3.4 Anel para avaliação dos efeitos axiais na medição montado no tarugo dentro do vidro.	39
Fig. 3.5 Medidor LCR.	40
Fig. 3.6 Sequência de imagens.	42
Fig. 3.7 Bancada de testes dinâmicos.	43
Fig. 3.8 Bocal injetor (GRANZOTTO, 2008).	44
Fig. 3.9 Foto do bocal injetor.	45
Fig. 3.10 Termopar para medição da temperatura do fluido.	46
Fig. 3.11 Foto do medidor de espessura (da direita) capacitivo instalado com suportes.	47
Fig. 3.12 Foto da seção de medição com técnica fotográfica.	48

Fig. 3.13 Placa de aquisição de dados.	49
Fig. 3.14 Circuito para medição de corrente (DOS REIS, 2003).	50
Fig. 4.1 Motor e redutor para elevar o anel.	53
Fig. 4.2 Imagem com régua e pontos selecionados a cada milímetro.	57
Fig. 4.3 Linearização dos pontos para calibração de uma imagem.	58
Fig. 4.4 Histograma para escolha da saturação.	61
Fig. 4.5 Tratamento de uma sequência de imagens.	62
Fig. 5.1 Comparação entre o transdutor e o Agilent LCR.	67
Fig. 5.2 Resposta da sonda em função da espessura da camada anular de água.	68
Fig. 5.3 Sensibilidade da sonda para ambos os tipos de água.	69
Fig. 5.4 Refração do campo elétrico através da interface entre dois meios com diferentes permissividades dielétricas (HAYT JR; BUCK, 2001).	71
Fig. 5.5 Resultados de simulação e experimentais com água destilada.	75
Fig. 5.6 Resultados de simulação com permissividade dielétrica dos materiais igual a zero.	76
Fig. 5.7 Tensão transduzida no eletrodo sensor em vermelho (no desenho acima) em função da posição do anel com água destilada.	79
Fig. 5.8 Tensão de saída média por espessura média da camada anular.	81
Fig. 5.9 Tensão média adimensional por espessura média da camada anular.	83
Fig. 5.10 Espessura pela tensão adimensional.	84
Fig. 5.11 Espessura média a partir da sonda pela espessura média das imagens para cada teste.	86
Fig. 5.13 Espessura obtida com a sonda em comparação com a obtida das imagens no teste 3 do dia 3.	87
Fig. 5.14 Espectros de potência - comparação com a obtida das imagens e com a sonda no teste 3 do dia 3.	87
Fig. A.1 Medidor LCR.	110
Fig. A.2 DTF.	110
Fig. A.3 Termohigrômetro.	111
Fig. A.4 DTF.	112
Fig. A.5 DTF pronto para injeção do fluido.	113
Fig. A.6 Circuito equivalente ao do DTF.	115
Fig. A.7 Permissividade relativa complexa. Fonte: AGILENT (2008).	116
Fig. A.8 Campo elétrico entre placas paralelas. Fonte: ASTM (2004b).	118
Fig. A.9 Diagrama de defasagem. Fonte: ASTM (2004a).	121
Fig. A.10 Incerteza do DTF	123
Fig. A.11 Permissividade relativa vs. porcentual de água em óleo	128
Fig. B.1 Agilent LCR.	132
Fig. B.2 Dispositivo Testador de Dieletrico.	132
Fig. B.3 Placa A	133
Fig. B.4 Placa B	133
Fig. B.5 Termohigrômetro.	134
Fig. B.6 Micrômetro.	134
Fig. B.7 Amostras	135
Fig. B.8 Posição do DTD.	138
Fig. B.9 Circuito equivalente ao do DTD.	139
Fig. B.10 Diagrama de defasagem. Fonte: ASTM (2004a).	140
Fig. B.11 Capacitor com eletrodo de guarda	142

Lista de tabelas

Tabela 2.1 Espessuras da camada e diâmetros dos tarugos.	32
Tabela 4.1 Caracterização do escoamento.	64
Tabela 5.1 Propriedades dielétricas dos materiais ($j = -1$).	72
Tabela 5.2 Informações dos dados de espessura da camada de água obtidos com a câmera.	88
Tabela 5.3 Informações dos dados de espessura da camada de água obtidos com a sonda.	88
Tabela 2.1 Medição diâmetro interno dos tubos e externo dos tarugos.	107
Tabela A.1 Materiais amostrados.	111
Tabela A.2 Valores aplicados.	121
Tabela A.3 Capacitâncias e resistências para condição do DTF.	126
Tabela A.4 Incertezas relativas em Capacitância e Resistência paralelas.	127
Tabela A.5 Resultados em permissividades.	127
Tabela B.1 Valores aplicados.	144
Tabela B.2 Capacitâncias e resistências e incerteza do Medidor.	149
Tabela B.3 Espessuras das amostras e incertezas.	149
Tabela B.4 Permissividade, dissipação dielétrica e respectivas incertezas.	151

Nomenclatura

Letras Latinas

a – dimensão característica de um obstáculo	[m]
A – área	[m ²]
A_s – área do sensor	[m ²]
B – susceptância	[S]
C – capacitância	[F]
d – distância entre os eletrodos fonte e sensor	[m]
D – densidade fluxo elétrico ou fator de dissipação	[F] ou [-]
D_b – diâmetro da blindagem eletroestática	[m]
D_e – diâmetro externo do tubo	[m]
D_i – diâmetro interno do tubo	[m]
D_t – diâmetro do tarugo	[m]
E – campo elétrico	[N/C]
f – frequência	[Hz]
e – ângulo de separação dos eletrodos relação ao eixo	[°]
G – condutância	[S]
h – razão de escorregamento	[-]
H – fração de volume ou área de uma fase num volume ou ar do tubo	[-]
I – corrente	[A]
j – unidade imaginária	[-]
P – pressão estática	[Pa]
q – densidade de carga superficial	[C/m ²]
Q – vazão	[m ³ /s]
R – resistência	[Ω]
S – espessura da camada anular	[mm]
t – coeficiente de <i>Student</i>	[-]
u – velocidade média	[m/s]
U – incerteza do ajuste	[mm]
V – tensão	[V]
V_s – tensão da fonte	[V]
x – grau de emulsão	[%]
X – reatância capacitiva	[Ω]
X_c – reatância capacitiva capacitor de comparação	[Ω]

Y – admitância	[S]
z – erro relativo médio	[%]
Z – impedância	[Ω]

Letras Gregas

Γ – sensibilidade	[V/mm]
$\Delta\tau_{xy}$ – raiz da variância num ajuste de uma curva para espessura	[m]
ϵ – permissividade dielétrica	[F/m]
ϵ_r – permissividade dielétrica relativa	[-]
ζ – tensão adimensional	[-]
θ – capacitância adimensional	[-]
λ – comprimento de onda	[m]
σ – condutividade elétrica	[S/m]
ϕ – potencial elétrico	[V]
Φ – ângulo de envolvimento do eletrodo	[°]
ω – velocidade angular	[rad/s]

Superescritos

‘ – parte real
“– parte imaginária
*– complexo

Subscritos

0 – vácuo
a – água
b – blindagem ou básica
c – calibração ou capacitivo
e – externo ou experimental
f – realimentação (<i>feedback</i>)
i – interno
im – imagens
in – <i>input</i> (entrada)
m – média, medida ou medição
max – máxima
o – óleo, <i>output</i> (saída) ou open
p – paralelo
r – relativo
s – sensor, saída, <i>short</i> (curto) ou série

son – sonda
t – tarugo, testador ou temperatura
T – transversal
x – medido

Abreviações

CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CCS – Correlação Cruzada de Sinais
ddp – diferença de potencial
DTD – Dispositivo Testador de Dielétrico
DTF – Dispositivo Testador de Fluido
ECT - *Electrical Capacitance Tomography*
EIT - *Electrical Impedance Tomography*
INOX – inoxidável
LCR – Indutância, Capacitância e Resistência
PVC – Cloreto de Polivinil
PSD – *Power Spectrum Density*
PTFE - Politetrafluoretileno
rms – *root mean square*
RSS – *Root Sum of Squares*
USB – *Universal Serial Bus*

Siglas

CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
CT – Centro de Tecnologia
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
LabPetro – Laboratório de Petróleo
PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

Capítulo 1

Introdução

Este trabalho visa o desenvolvimento de um sensor capacitivo e de um transdutor de sinal para medição da espessura da camada anular de água em um escoamento de óleo viscoso com água no padrão anular (*core-annular flow*). Ele envolve o desenvolvimento do sensor através da sua operação em testes estáticos, nos quais não há o escoamento efetivo dos fluidos, mas é mantido o padrão anular óleo – água na seção de teste.

O trabalho faz parte de um projeto suportado por um convênio do Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) e da Financiadora de Projetos e Estudos (FINEP) com a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Outros membros da equipe avaliaram o comportamento dinâmico do sensor para a situação de escoamento, e ainda simularam, numericamente, o comportamento do sensor.

1.1 Motivação à Pesquisa

As reservas de óleo pesado no mundo são estimadas em 4,6 trilhões de barris e sua importância tende a crescer à medida que o óleo leve é consumido (BRIGGS *et al.*, 1998 *apud* RODRIGUEZ; BANNWART, 2008).

Existe, todavia, uma dificuldade em escoar óleos pesados através de tubulações, que são as perdas de carga elevadas associadas ao escoamento, que crescem com a distância do transporte e com a vazão requerida. Uma instalação dimensionada para operar com tais diferenças de pressão pode ser inviável do ponto de vista econômico. É considerado óleo pesado o que possui

viscosidade próxima de 100 mPa s, ou acima. Uma tecnologia para extrair e fazer escoar esse óleo pesado consiste na mistura de água com o óleo de modo que a água na tubulação se mantenha nas regiões de maior cisalhamento, ou seja, próxima da parede interna do tubo.

Segundo Joseph (2000), para o caso estudado por ele, a perda de carga nesse padrão de escoamento é cerca de 100 vezes menor que a perda de carga caso se estivesse escoando o mesmo volume de óleo por unidade de tempo.

Uma vez conhecidas a vazão de óleo e a de água na entrada e o diâmetro do tubo, pode-se prever os possíveis padrões de escoamento na tubulação. Joseph *et al.*(1997) apresentaram detalhadamente os padrões obtidos em um escoamento óleo – água, tanto na vertical quanto na horizontal.

A Fig. 1.1 apresenta uma foto de um escoamento anular óleo – água em uma tubulação de vidro, com vazões de $1,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ de óleo (16,2 gal/min) para $6,31 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ de água (1 gal/min), ou seja, uma razão de 16,2 de óleo para um de água.

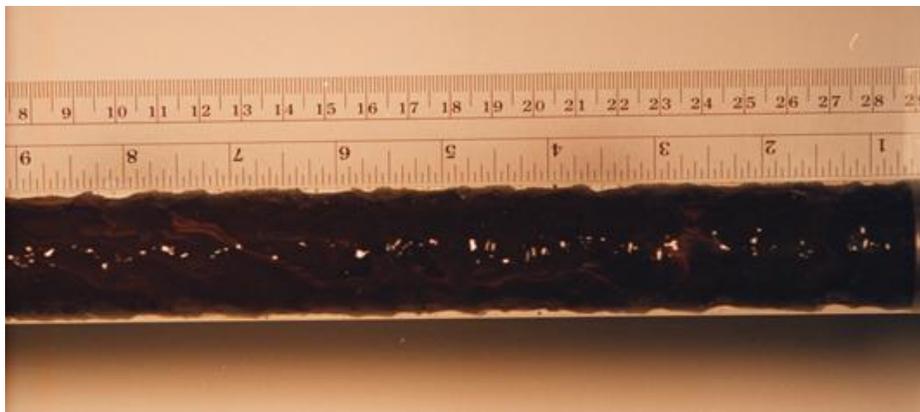


Fig. 1.1 Escoamento anular Óleo - Água (JOSEPH, 2000)

As instalações para esse tipo de escoamento devem ser monitoradas e controladas, uma vez que podem acontecer variações de perda de carga pela aderência de óleo à tubulação, bem como variações da velocidade das fases e, portanto, das vazões. O conhecimento das vazões é usado no ajuste do bombeamento de óleo e água para garantir a formação do anel de água envolvente.

Um parâmetro de interesse nesse escoamento é a espessura da camada anular de água. Pois, a partir dela, e de considerações de sua concentricidade, pode-se medir a fração de óleo no tubo. E ainda, se forem utilizados dois sensores deslocados ao longo do eixo do tubo, é possível correlacionar seus sinais e medir a velocidade média da interface de óleo e, com considerações do perfil de velocidade, determinar a vazão de óleo.

Dentre esses fins, o presente trabalho tem como contribuição a participação no desenvolvimento de um sensor capacitivo não-invasivo para medição direta de uma espessura da camada de água no escoamento anular óleo – água.

1.2 Revisão da Literatura

A revisão da literatura compreende: (i) os trabalhos em que foram realizadas medições diretas de parâmetros do escoamento anular de óleo pesado e água, (ii) as técnicas com potencial de aplicação para medir a espessura da camada de água desse escoamento, e (iii) os sensores capacitivos para medição de espessura da camada de água em tubos.

1.2.1 Parâmetros diretos e indiretos do escoamento óleo – água em tubulações

É comum a utilização de técnicas baseadas na medida da vazão de entrada de cada fase e análise visual do escoamento para obter parâmetros de escoamentos bifásicos. Dessas técnicas, podem ser feitos mapas de padrões característicos de cada escoamento. Os mapas são apresentados contendo, tanto na abscissa quanto na ordenada, a vazão ou a velocidade superficial de cada fase (definida como a razão da vazão pela área da seção transversal do tubo), sendo que, regiões caracterizadas por diferentes regimes do escoamento, são delimitadas por diferentes linhas de transição.

Os regimes de escoamento são caracterizados em função do arranjo espacial das fases no interior da tubulação, sendo que o próprio regime, como o anular, é um dos parâmetros do escoamento que não é medido, mas identificado por observações a olho nu ou com filmadora ou máquina fotográfica.

Os parâmetros de escoamentos bifásicos podem ser caracterizados em diretos e indiretos. Os indiretos são aqueles calculados a partir de grandezas medidas previamente, por exemplo: a partir das vazões ou das velocidades superficiais das fases separadas, são feitas estimativas da fração volumétrica de cada fase no tubo, suas velocidades médias, perda de carga, etc. Joseph *et al.* (1997), por exemplo, propuseram modelos, para cálculo da perda de carga e da fração das fases num trecho de tubulação, baseados nas velocidades superficiais delas e na viscosidade do óleo para o escoamento anular óleo-água.

Por outro lado, parâmetros medidos diretamente, ou seja, por técnicas que não dependem da medição prévia das vazões ou qualquer outro parâmetro do escoamento e cujos instrumentos medem numa seção da tubulação com escoamento, são interessantes em termos industriais, pois não é necessário que as vazões de cada fase sejam medidas separadamente, ou que sejam separadas para isso. Por exemplo, quando é inviável a instalação de medidores de vazão das fases separadas num poço de extração de petróleo. Também, para condições onde o escoamento não pode ser interrompido para a medição de uma vazão ou qualquer outro parâmetro, até porque isso comprometeria a estabilidade do escoamento; e quando, por razões fiscais, há interesse na medida da vazão de óleo sendo extraído de um poço.

Para fins de controle do escoamento, os parâmetros medidos diretamente também são de maior interesse industrial.

Em ordem cronológica, são apresentados os trabalhos que mediram diretamente parâmetros do escoamento anular óleo-água. Vale ressaltar que não foram encontrados trabalhos que mediram diretamente a espessura da camada.

Hasson *et al.* (1970) utilizaram uma câmera filmadora analógica a uma taxa de 1250 a 2300 quadros/s e uma caixa de visualização para medir a excentricidade do núcleo de óleo de escoamentos anulares horizontais tendo como parâmetro a razão de densidades dos líquidos imiscíveis. Verificaram que a caixa de visualização contendo Percloroetileno, que é um líquido com índice de refração da luz próximo do do vidro, eliminou as distorções causadas pelo vidro na luz.

Bannwart (1998) mediu a velocidade da interface do escoamento e um diâmetro do núcleo de óleo utilizando uma câmera de alta velocidade. Comparou a velocidade média do óleo obtida a partir da vazão de entrada e do diâmetro do núcleo de óleo com a medida diretamente pela câmera.

Rodriguez e Bannwart (2006) mediram a velocidade da interface de óleo e a fração de óleo no tubo, ou *holdup* de óleo, em um escoamento anular óleo-água usando uma câmera filmadora de alta resolução temporal (1000 quadros/s). Foi desenvolvido um modelo para, a partir das variáveis da medição, calcular o *holdup* de óleo.

Rodriguez e Oliemans (2006) mediram a fração de óleo no tubo em um escoamento óleo-água utilizando dois densitômetros de raios gama. A medida da fração de óleo num volume do escoamento através desse instrumento é linear, o que permite calibrá-lo para as condições limites e obter as frações intermediárias. As incertezas máximas na medição foram de ± 1 % do valor da medida. Foram, também, considerados escoamentos com a tubulação inclinada de -5 a 5° com a horizontal.

1.2.2 Técnicas com potencial de aplicação para medição direta no escoamento anular

As técnicas a serem consideradas para a medição direta de parâmetros do escoamento anular óleo-água devem ser, em princípio, não-invasivas – não entram em contato com o fluido –, ou, pelo menos, não-intrusivas, ou seja, entram em contato com o fluido, mas não alteram as linhas de corrente. Isso porque interferências na seção do escoamento o perturbariam.

Respeitando-se a condição de não-intrusividade no escoamento, podem ser utilizados sinais provenientes de sensores baseados em microondas, impedância, óptica, ultra-som, raios X e raios Gama.

Microondas

Leblond e Stepowski (1994) e Nyfors (2000) mostraram que podem ser desenvolvidos tomógrafos não-intrusivos com a tecnologia de microondas, utilizando um método de ressonância das ondas eletromagnéticas confinadas numa cavidade.

Um tomógrafo é um conjunto de emissores e receptores que podem ser combinados entre si, cujos sinais elétricos medidos são utilizados para formação de uma imagem. Também, um único sensor pode ser utilizado para medição da espessura local de um filme de água.

Hammer (2006b) esclareceu que, no sensor baseado na ressonância, uma onda eletromagnética é emitida por uma antena (emissor) inserida numa cavidade metálica (blindagem eletrostática) que envolve o tubo (dielétrico) do escoamento. Essa onda se propaga pela cavidade e tem frequência de oscilação predominante relativa ao tamanho da cavidade e à propriedade dielétrica do material dentro do tubo. O circuito elétrico para medir com esse sensor deve, assim, reconhecer a frequência de ressonância do sinal nesse sistema.

Segundo Leblond e Stepowski (1994), deve-se dimensionar a cavidade para alcançar uma impedância de propagação da onda eletromagnética que seja compatível com a capacidade do circuito de medição. Segundo os autores, a medida de uma cavidade pode ter uma incerteza de até $\pm 6\%$.

Para Nyfors (2000), a incerteza de medição depende do fator de qualidade, que corresponde à razão da energia armazenada pela energia dissipada na cavidade em um ciclo, e dos materiais utilizados. Obteve, entretanto, incertezas devidas a erros aleatórios de até $\pm 1\%$ do valor medido.

Densitometria de raios gama e X

Segundo Johansen (2006), a atenuação de um feixe mono-energético estreito e paralelo de fótons de raios gama ou X é baseada na atenuação de decaimento exponencial de Lambert e Beer.

Para condições de baixa energia, os fótons irradiados para um material são majoritariamente absorvidos. Já para condições de média energia, eles são principalmente espalhados conforme a teoria de Compton e, para alta energia, formam pares.

Com uma fonte do isótopo 137 do Césio, a radiação gama emitida é da ordem de 662 keV, onde um eV (elétron Volt) é a energia ($\approx 1.6022 \cdot 10^{-19}$ J) requerida para mover um elétron através de um potencial de 1V, e se enquadra para numa condição de média energia onde os fótons são espalhados.

A técnica é chamada de densitometria porque a atenuação dos raios é de acordo com a densidade do material. No caso de um escoamento anular óleo-água, de modo geral, o óleo tem densidade próxima da da água. Isso pode fazer com que as incertezas na medição sejam grandes, devido à mínima diferença de densidades, inviabilizando a utilização dessa técnica.

Pelo fato da maioria dos detectores operar em um modo de pulso, onde os fótons interagem com o meio de detecção que os mede em períodos, deve existir, então, um tempo mínimo de exposição do material à radiação. Isso faz com que o sistema faça uma média temporal da densidade detectada do escoamento e, num caso onde as frações das fases no tubo se alteram no tempo, deve se levar em conta no projeto do medidor o período de detecção.

Ópticos

A medição com dispositivos ópticos, tais como câmeras fotográficas, pode ser feita quando as fases escoando apresentem diferentes índices de refração da luz. O sistema de medição fica, todavia, sujeito à manutenção periódica para se fazer a limpeza da seção de visão.

Hurlburt e Newell (1995) realizaram medições de espessura da camada de água em um escoamento anular gás-líquido. Para medir a espessura, utilizaram uma câmera e uma fonte de luz adjacente, tal que à medida que a interface das fases se afasta do tubo a posição do feixe de luz registrada na imagem da câmera se desloca linearmente.

Eles utilizaram dois pares de fotodiodos emissor e sensor, deslocados no eixo do escoamento, para medição da velocidade das fases. Obtiveram incerteza de medição da espessura

de até $\pm 3\%$, e observaram que a medida pode variar não linearmente com o ângulo da interface em relação ao eixo do tubo. Para variações desse ângulo até 5° a incerteza de medição seria de até $\pm 20\%$.

Rodriguez e Bannwart (2006) mediram a fração de óleo no tubo através de técnica fotográfica. Consideraram que a distância da linha central do tubo à interface, num plano vertical (da imagem) representasse o diâmetro transversal de óleo (hipótese de axisimetria). Mediram, também, a velocidade da fase óleo considerando o deslocamento das ondas entre os instantes fotografados. Algumas imagens são apresentadas na Fig. 1.2.

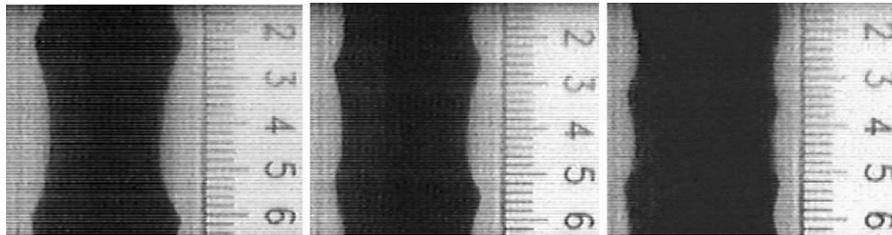


Fig. 1.2 Medição através de técnica fotográfica (RODRIGUEZ; BANNWART, 2006).

Ultrassom

Segundo Dyakowski (2006), as técnicas de ultrassom são baseadas na propagação acústica de ondas mecânicas nos meios envolvidos. Deve-se escolher a frequência de vibração de acordo com a dimensão característica do obstáculo (fase do escoamento) e da razão de impedâncias de propagação acústica de cada meio.

Quando uma onda encontra um obstáculo, ela reflete e refrata espalhando em todas as direções. As novas ondas (refletida e refratada) se encontram com as que não encontraram obstáculo distorcendo-as e nelas interferindo.

Se o tamanho do obstáculo for muito maior que o comprimento de onda (λ), ou seja, $ka \gg 1$, onde $k = 2\pi/\lambda$ e a é a dimensão característica do obstáculo, então metade das ondas

serão espalhadas e outra metade se destrói por interferência, quando refletem e encontram as que foram emitidas.

Para o caso em que o comprimento de onda é bem maior que o obstáculo, $ka \ll 1$, a maior parte das ondas será refletida, segundo Morse e Ingard (1968) *apud* Dyakowski (2006), apenas 1/8 das ondas chega ao lado contrario de onde são emitidas, tomando-se como plano de simetria um que passe pelo eixo do tubo e seja normal à fonte de emissão das ondas .

Impedância elétrica

Esse tipo de medidor é, obrigatoriamente, invasivo. Um sinal em tensão senoidal é aplicado em um eletrodo (fonte) em contato com o fluido em escoamento, o que faz com que sejam induzidas e, também, conduzidas correntes pelo fluido e detectadas em outro eletrodo (sensor) .

Segundo Cullivan e Williams (2006), para sinais de frequências maiores que 1 kHz a influência da permissividade dielétrica é diminuta e negligenciável, isso porque os eletrodos não estão isolados da condução de *elétrons*. Dessa forma, um medidor de corrente sem detecção de fase mediria majoritariamente condutividade.

O limite da frequência do sinal aplicado, entretanto, é quando começam a predominar efeitos eletromagnéticos.

George *et al.* (2000) utilizaram a técnica *EIT* (*Electrical Impedance Tomography*) para medição de fluidos multifásicos com sinal senoidal em uma frequência de 100kHz. Além da frequência do sinal, a geometria dos eletrodos e as propriedades dielétricas do meio também influenciam no módulo das componentes resistiva e reativa.

a) Condutivo

A técnica de medição condutiva é baseada na medida da corrente elétrica conduzida pelo fluido quando sujeito a uma diferença de potencial elétrico. Esta técnica é invasiva e não-intrusiva, pois o eletrodo tem que estar em contato com o fluido.

Belt (2007) desenvolveu um medidor, mostrado na Fig. 1.3, da espessura de filme de água com eletrodos condutivos, para um escoamento anular água-ar. A precisão de medição desse instrumento foi de até 12% da medida na faixa de 0 a 0,8 mm, para um diâmetro de tubulação de 50 mm.

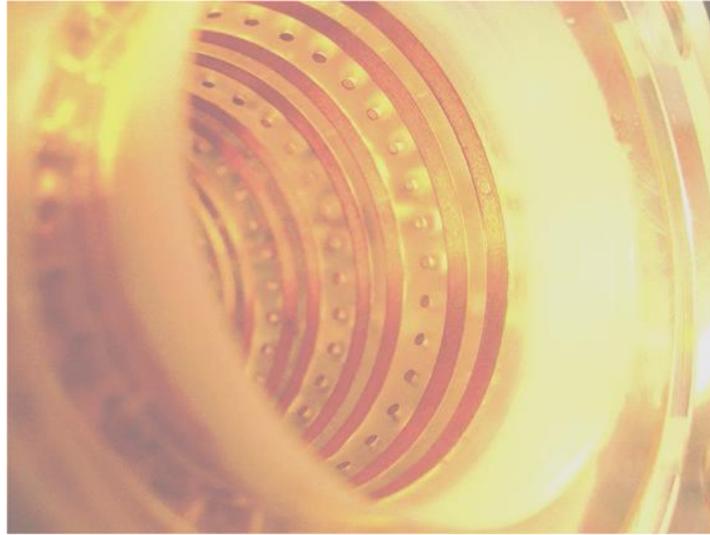


Fig. 1.3 Medidor de espessura de filme de água em escoamento anular (BELT, 2007).

No medidor da Fig. 1.3, existem 32 eletrodos sensores (igualmente espaçados num perímetro transversal do tubo) e um eletrodo fonte em forma de anel à montante dos sensores (considerando que os fluidos do escoamento saem do tubo na figura). Têm-se, então, vários conjuntos de fonte e sensor, que são eletricamente isolados de seus vizinhos por anéis aterrados. Para a transdução do sinal de cada sensor, o autor utilizou a mesma técnica de detecção de corrente utilizada nesse trabalho.

Damsohn e Prasser (2009) desenvolveram um medidor de espessura de filme líquido, do tipo condutivo, de alta resolução espacial. O medidor, apresentado na Fig. 1.4, mede espessuras de até 0,8 mm e tem precisão de até 6,25% do valor da medida.

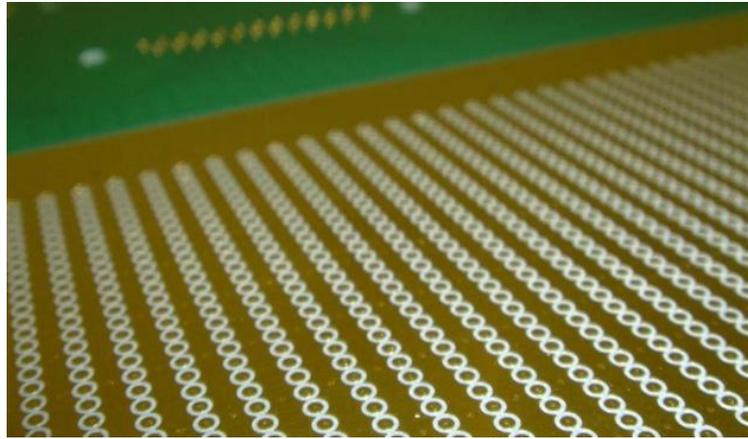


Fig. 1.4 Medidor de espessura de filme líquido (DAMSOHN; PRASSER, 2009).

Na Fig. 1.4, cada eletrodo é um círculo metálico envolto por um circunferência isolante branca. A parte externa às circunferência é metálica e permanece eletricamente aterrada. Os autores combinaram os eletrodos entre si, formando pares de fontes e sensores, medindo espessuras menores e maiores, escolhendo-se um par mais próximo ou um mais distante.

Eles utilizaram transdutores do tipo corrente alternada (mesmo esquema de transdução utilizado nesse trabalho), que serão revisados nesse capítulo.

b) Capacitiva

Essa técnica é o objeto de estudo desse trabalho e é apresentada, com mais detalhes, no próximo subitem.

1.2.3 Medidores capacitivos

A medição com capacitores se baseia na carga que se acumula entre dois eletrodos ao longo de um período em que exista variação da diferença de potencial entre eles. Se os dielétricos, ou seja, os meios por onde esse potencial se distribui, forem também as fases de um escoamento, então a carga acumulada deverá ser proporcional à permissividade dielétrica dos meios, que é a propriedade do meio de se polarizar quando sujeito a uma diferença de potencial.

Para que se utilize um medidor capacitivo para um escoamento bifásico, por exemplo, é necessário que as fases desse escoamento tenham permissividades dielétricas diferentes.

Os elementos desses medidores podem ser definidos da seguinte forma: i) eletrodo fonte ou emissor é o eletrodo que porta o sinal em tensão, o eletrodo sensor é aquele que detecta o sinal; ii) esses dois eletrodos mais os de guarda, que, de certa forma, influenciam na medida conforme explicado no Capítulo 2, formam um sensor; iii) o transdutor é composto do sistema de geração do sinal para o eletrodo fonte e o sistema de detecção de corrente de polarização no eletrodo sensor; iv) e o medidor é o sensor junto com seu transdutor.

A capacitância de duas placas paralelas obtida pode ser equacionada da seguinte forma:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A_s / d \tag{1.1}$$

onde ϵ_r é a permissividade relativa do meio e ϵ_0 é a constante dielétrica ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) no vácuo, A_s é a área do sensor e d é a distância entre os eletrodos fonte e sensor. A equação acima é válida quando as linhas de campo elétrico, que são perpendiculares às linhas de potencial, têm a forma como ilustrado na Fig. 1.5 entre o eletrodo fonte e o sensor.

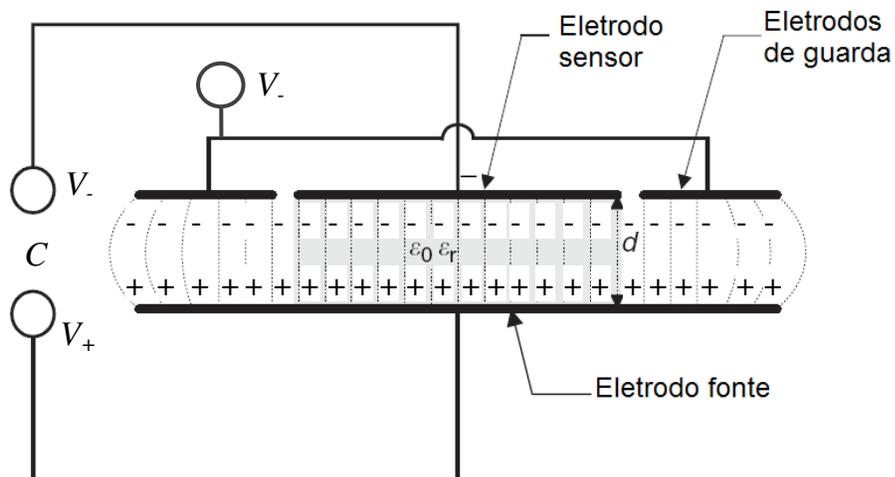


Fig. 1.5 Capacitor com guardas (HAMMER, 2000).

Como as linhas de campo saem normais à superfície dos eletrodos, nas bordas, elas se apresentam de forma não linear, como na Fig. 1.5. Para que esse efeito não seja contabilizado na capacitância medida no eletrodo sensor, é usual que se monte eletrodos de guarda de forma a deixar as linhas de campo elétrico no sensor colimadas. Assim, confina-se a região de medição para uma condição mais favorável à medição.

a) Sensores capacitivos para medição de uma espessura de camada anular

Não foram encontrados na literatura precedentes na utilização de medidores capacitivos para a medição de parâmetros no escoamento anular óleo – água. Porém, alguns pesquisadores utilizaram essa técnica para medição da espessura de filme líquido em escoamentos gás – líquido vertical nos padrões pistonado e anular, como mostrado na Fig. 1.6.

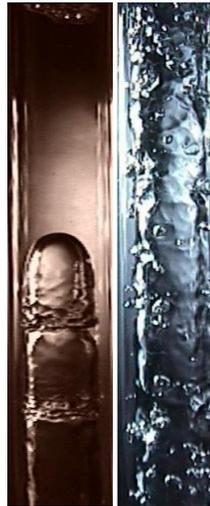


Fig. 1.6 Escoamento vertical pistonado(esquerda) e anular (direita)
(VERBERK *et al.*, 2000).

Num escoamento gás-líquido, a partir de uma certa vazão de gás, formam-se bolhas alongadas de gás que, com o aumento da vazão, transformam-se numa fase contínua, de tal maneira que o líquido e o gás escoam paralelamente, de forma parecida com o escoamento anular óleo-água.

Em termos de capacitância o óleo e o ar são parecidos, pois têm permissividades relativas de 2,6 e 1,005, respectivamente, sendo que a da água é 80. A permissividade relativa é a razão entre a permissividade do meio e a do vácuo.

Segue a revisão dos sensores para a espessura do filme de líquido no escoamento anular gás-líquido.

Marshall e Tiederman (1972) realizaram medições experimentais de espessura de filme líquido com um sensor capacitivo, mostrado na Fig. 1.7, em um escoamento gás – líquido anular com a fase gasosa escoando a velocidades supersônicas.

Utilizaram um transdutor do tipo ponte de corrente alternada operando em frequência de 100 kHz com resolução de até 0,1 fF. Reportaram que o sensor pôde medir respostas em frequência de até 3 kHz, porém com incerteza de medição de até $\pm 25\%$.

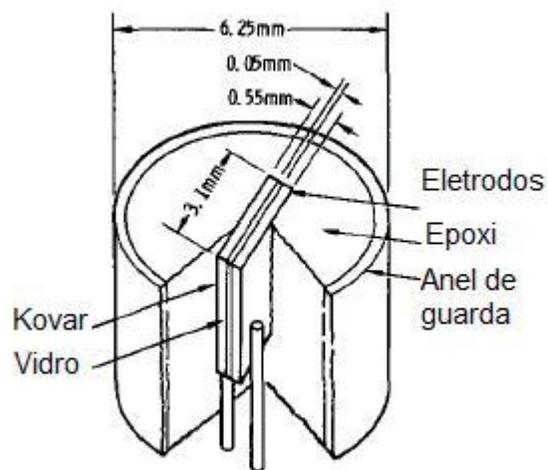


Fig. 1.7 Sensor capacitivo de espessura de filme em escoamento anular
(MARSHALL; TIDERMAN, 1972).

A superfície superior do sensor ficou na superfície interna do tubo, de forma não-intrusiva no escoamento. Os eletrodos foram isolados do fluido em escoamento (água) por uma fina camada de resina, para que não houvesse corrente elétrica do eletrodo fonte para o sensor ou para

as partes aterradas. Foi utilizada uma liga ferrosa de níquel e cobalto (Kovar) que tem o mesmo coeficiente de expansão térmica do vidro borossilicato (ESPI, 2009).

Para calibrar esse sensor, o autor utilizou um micrômetro que mediu o nível de líquido no tubo na horizontal numa bancada nivelada.

Mustafa *et al.* (1973) desenvolveram um sensor capacitivo, mostrado na Fig. 1.8, para medir espessura de filme líquido em um escoamento pistonado vertical. O transdutor utilizado foi uma ponte de corrente alternada operando em frequência de 1 MHz, faixa de medição de 1 a 1000 pF. Não foi apresentada a incerteza de medição.

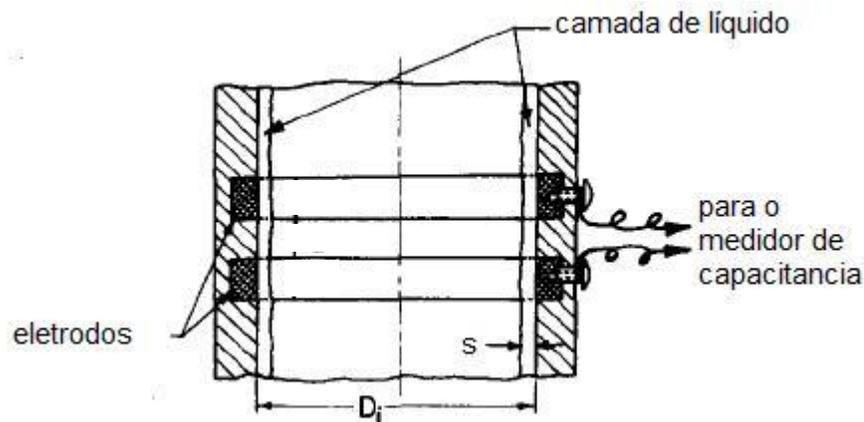


Fig. 1.8 Medidor capacitivo de espessura de filme em escoamento pistonado
(MUSTAFA *et al.*, 1972).

Eles utilizaram, também, uma fina camada de resina para isolar da condução o líquido dos eletrodos.

Para avaliação da capacidade de medição do sensor, compararam seus resultados com os obtidos com uma câmera filmadora. Compararam, ainda, esses resultados com os de um outro sensor com a mesma geometria dos eletrodos da Fig. 1.8, entretanto dispostos num plano horizontal. Calibraram esse último variando-se a espessura da camada de água e medindo-a com um micrômetro. Obtiveram resultados satisfatórios.

b) Transdutores de capacitância numa seção do escoamento

Os circuitos de medida de capacitância podem ser classificados de acordo com o sinal aplicado ao capacitor:

Corrente Contínua (CC) - nesse tipo de sinal mede-se ou compara-se a carga do capacitor, devendo-se garantir a frequência de carga e descarga.

Corrente Alternada (CA) - nesse tipo de sinal mede-se ou compara-se a corrente ou a tensão no capacitor de medição, devendo-se controlar ou garantir a frequência do sinal emitido e a fase do sinal medido;

Huang *et al.* (1988) fizeram uma revisão detalhada dos métodos para medir capacitância, dividindo-os em: ressonância, oscilação, carga/descarga, ponte de corrente alternada e eletrodos flutuantes. Segundo ele, o método da ponte de corrente alternada é o mais utilizado e ainda o mais preciso.

Marshall e Tiederman (1972) foram os autores de um dos primeiros trabalhos experimentais utilizando capacitores para a medição de escoamentos. Eles empregaram o método da ponte de corrente alternada para transduzir a capacitância em tensão. Como mostrado na Fig. 1.9, um transformador aplica um potencial elétrico alternante entre as extremidades do par de capacitores em série. Cada capacitor é responsável pelo balanço da ponte: o sensor, cuja reatância capacitiva é X_s , e o de comparação, cuja reatância capacitiva é X_c e é constante.

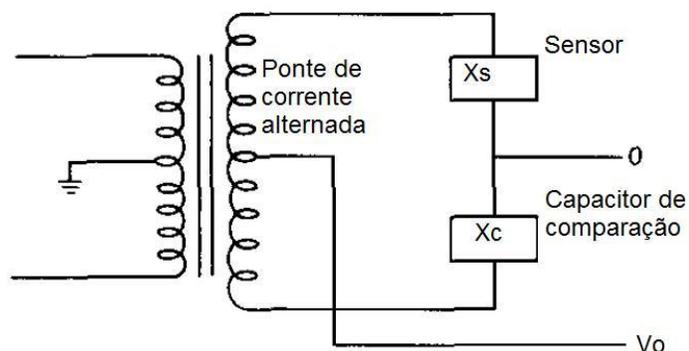


Fig. 1.9 Ponte de corrente alternada (MARSHALL; TIEDERMAN, 1972).

Se existir uma diferença de reatâncias entre os capacitores comparados, ocorrerá um desequilíbrio na ponte, e então, a tensão de saída (V_o) será proporcional à diferença de capacitância.

Esses pesquisadores utilizaram frequência de oscilação do transformador de 100 kHz e relataram que circuito foi capaz de medir respostas em frequências de até 500 Hz com resolução de 0,1 fF.

Uma outra configuração de transdutor, apresentada na Fig. 1.10, é a de eletrodos flutuantes, onde o eletrodo fonte e o sensor têm potenciais flutuantes. Essa configuração é mais sensível, porém menos estável que a da apresentada na Fig. 1.9.

Nesse transdutor, um sinal de excitação (V_s) é aplicado ao eletrodo fonte do capacitor de medição (C_x). No mesmo terminal, tem-se o capacitor C_{s2} que é a soma de todas as capacitâncias formadas entre as partes metálicas em contato elétrico com esse terminal e aquelas conectadas eletricamente ao potencial de terra: cabo de ligação, blindagem e eletrodos de guarda (se houver). Da mesma forma que C_{s2} , C_{s1} é a soma das capacitâncias entre as partes em contato elétrico com o eletrodo sensor e as partes conectadas eletricamente ao potencial de terra.

A condição de terra virtual, como mostrado na Fig. 1.10, evita que parte da corrente I seja drenada para a terra através de C_{s1} , alterando a corrente na entrada do detector. Assim, sem o efeito de C_{s1} , o eletrodo sensor está eletricamente conectado ao detector de corrente, cuja impedância de entrada permite que toda I seja convertida numa tensão de saída V_o .

No caso do eletrodo fonte, a capacitância C_{s2} não altera a medida de C_x , já que a fonte de sinal de excitação (V_s) é de baixa impedância.

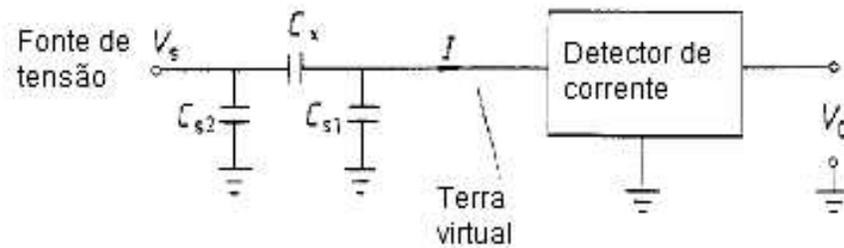


Fig. 1.10 Circuito tipicamente imune à capacitâncias parasitas (HUANG *et al.*, 1988).

A Figura 1.11 esquematiza um circuito para detecção de corrente. A corrente I que passa através da resistência de realimentação (*feedback*) (R_f) tende a causar um desequilíbrio de tensão na entrada inversora (-) do amplificador em relação à entrada não inversora (+), porém, devido ao elevado ganho do amplificador operacional, o potencial tende a zero pelo fato da entrada não inversora estar conectada diretamente ao potencial de terra, isso gera uma tensão V_0 na saída.

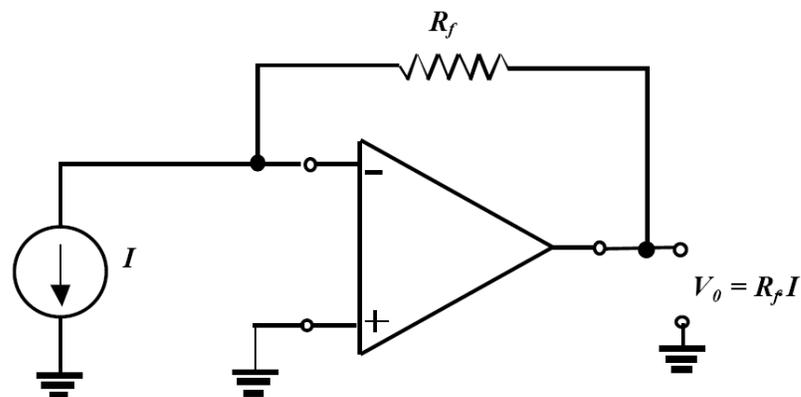


Fig. 1.11 Detector de corrente.

O Cap. 2 traz outros detalhes do transdutor construído especificamente para o capacitor de medição desenvolvido nesse trabalho.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi concorrer para o desenvolvimento de um dispositivo de medição da espessura da camada de água no escoamento anular óleo-água horizontal usando um sensor capacitivo e um transdutor do sinal.

Ele envolveu o desenvolvimento do medidor através de sua operação em testes estáticos e dinâmicos. Nos estáticos, não há escoamento efetivo dos fluidos, mas foi mantido um arranjo espacial das fases que se assemelhou ao do escoamento anular.

Uma nova técnica fotográfica foi utilizada, nos testes dinâmicos, para medir diretamente a espessura da película anular de água. Esses resultados são comparados entre si.

Capítulo 2

Medidor Capacitivo

Deve se ter em mente, quando se propõe medir com um capacitor, que o meio ao redor dos eletrodos participará da medição. Deve se buscar, portanto, uma geometria para os eletrodos tal que seu plano de simetria coincida com um plano de simetria da variável medida, de modo a obter a forma mais simples.

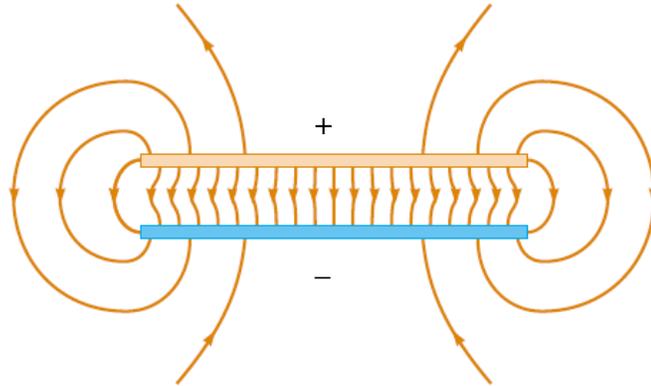


Fig. 2.1 Efeitos da distorção do campo (SERWAY; JEWETT, 2006).

Mesmo com uma configuração geométrica conveniente dos eletrodos para a variável medida, existem efeitos de borda (distorção do campo nas bordas, mostrados na Fig. 2.1) que fazem com que o capacitor meça numa região distante da região de interesse entre os eletrodos fonte e sensor.

O que acontece é que na borda do eletrodo, as cargas, devido à menor curvatura, segundo Serway e Jewett (2006), se distribuem com maior densidade de carga e o campo elétrico segue a tendência, sendo diretamente proporcional:

$$\vec{E} = \vec{q}/\epsilon_0 \quad 2.1$$

onde q , em C/m^2 , é a densidade de carga superficial, ou seja, quanto de carga se tem em cada área infinitesimal da superfície do eletrodo (SERWAY; JEWETT, 2006). E [N/C] é a intensidade do campo elétrico quando seu vetor é perpendicular a superfície do condutor e ϵ_0 [F/m] é a constante dielétrica.

2.1 Sonda Capacitiva da Espessura da Camada Anular de Água do Escoamento Óleo – Água

Não somente a geometria do que está sendo medido e as características de medição do sensor devem condicionar o projeto do sensor, mas também o sistema de geração e interpretação do sinal, ou seja, o transdutor.

No caso de um transdutor que não diferencia a parte reativa (relativa à capacitância) da parte resistiva (condução de elétrons pelo meio), deve se isolar o sensor do fluido para que não ocorra a condução de elétrons. Isso pode ser feito deixando-se o sensor na parte externa de um tubo dielétrico com alta resistência elétrica. Nesse trabalho, o sensor é instalado na parte externa do tubo devido às limitações do transdutor explicadas no subitem 2.1.2. Isso, o torna um sensor não-invasivo, pois não entra em contato com o fluido medido.

Para simplificação, o conjunto sensor e transdutor pode ser chamado de sonda, até porque não poderiam operar separadamente na medição da espessura da camada anular e também para que se possa considerá-los um sistema único, caracterizado por entradas e saídas.

Para a instalação do sensor num tubo dielétrico e de uma blindagem eletroestática, foi desenvolvida uma unidade de suporte.

A unidade de suporte é composta de dois flanges que acoplam na tubulação do escoamento, dois que fixam tirantes para não haver esforços no vidro, o tubo de vidro que é o dielétrico em cuja superfície são montados os eletrodos do sensor, e uma blindagem eletrostática que o isola eletromagneticamente. Matos (2008), membro da equipe e participante do trabalho, foi o autor do projeto dessa unidade de suporte.

O tubo que suporta os sensores capacitivos é de material dielétrico, para isolar os sensor do fluido, e deve suportar a pressão do escoamento, e ser não-molhável ao óleo, i.e., o óleo não tende a aderir ao tubo.

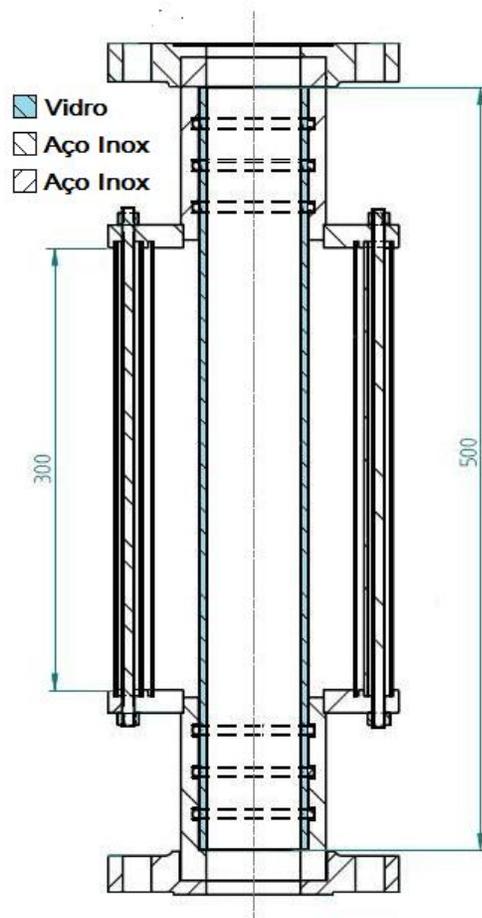


Fig. 2.2 Unidade de suporte – Corte. Dim.: mm.

O material mais recomendado é o vidro borossilicato, que recebe uma película de metassilicato de sódio, através da adsorção do sal (em solução) pelo vidro, para reduzir a

molhabilidade ao óleo (SILVA, 2003). As partes metálicas foram fabricadas em aço INOX AISI 304, pois os fluidos do escoamento, i.e., água e óleo, podem causar corrosão. Os flanges de cada unidade foram padronizados seguindo a norma para tubulações com escoamento de óleo, API-5L-W.

A Fig. 2.2 traz um esquema da unidade de suporte utilizada nesse trabalho. Seis anéis de borracha centralizam o tubo pelas pontas e vedam a unidade de suporte de vazamentos.

Na Fig. 2.3 é apresentada uma foto de uma sonda construída e montada.



Fig. 2.3 Uma sonda capacitiva.

2.1.1 Sensor capacitivo

Conforme foi visto no início do Capítulo, os sensores capacitivos medem numa região e devem ser projetados de forma que um plano de simetria dos eletrodos seja, também, um plano de simetria do escoamento.

Como uma medida de interesse é a espessura da camada anular na parte superior do tubo, um plano de simetria do escoamento que pode ser escolhido é o vertical ao longo do eixo do tubo. Assim, como mostrado na Fig. 2.4, o sensor pode medir a espessura da camada anular no topo da tubulação.

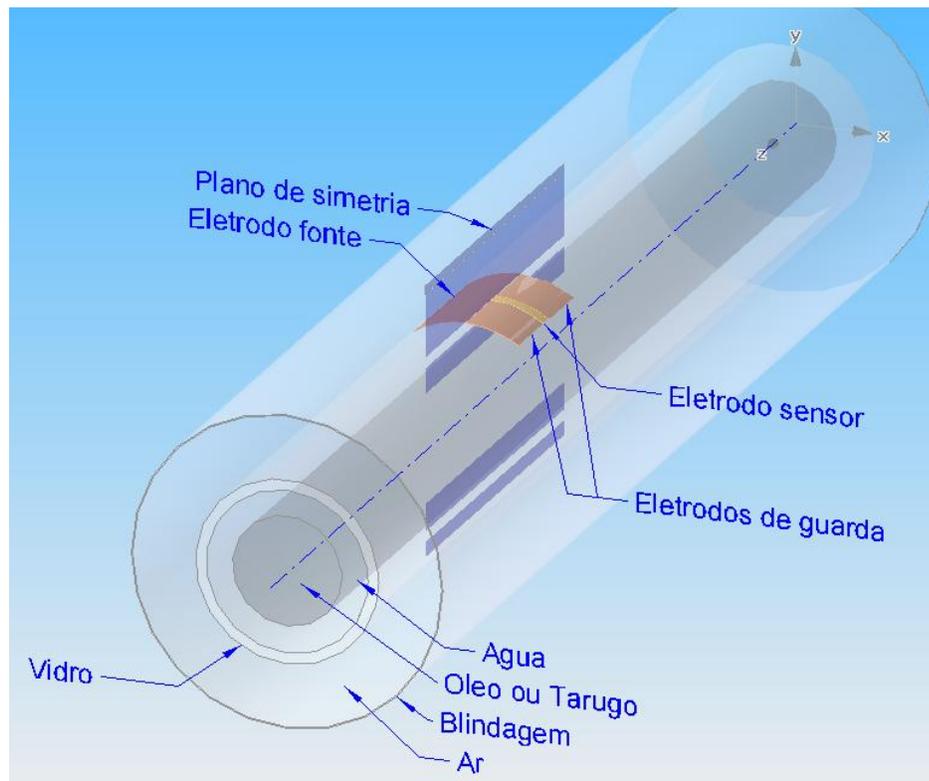


Fig. 2.4 Disposição do sensor no tubo.

Além disso, a Fig. 2.4 mostra como são dispostos os eletrodos de guarda de modo a tornar as linhas de campo no eletrodo sensor paralelas no plano transversal. Assim, a medição da espessura da camada anular passa a ser relativa a uma fatia transversal do escoamento no tubo. Simplifica-se, com isso, dois processos: a) o de determinação da geometria dos eletrodos no plano transversal ao tubo; b) e o de dimensionamento do transdutor para a capacitância a ser medida.

Para determinação da geometria transversal dos eletrodos, podem ser utilizadas simulações numéricas bidimensionais que contemplam o campo elétrico num plano de corte transversal nos eletrodos sensor e fonte (mostrado na Fig. 2.5).

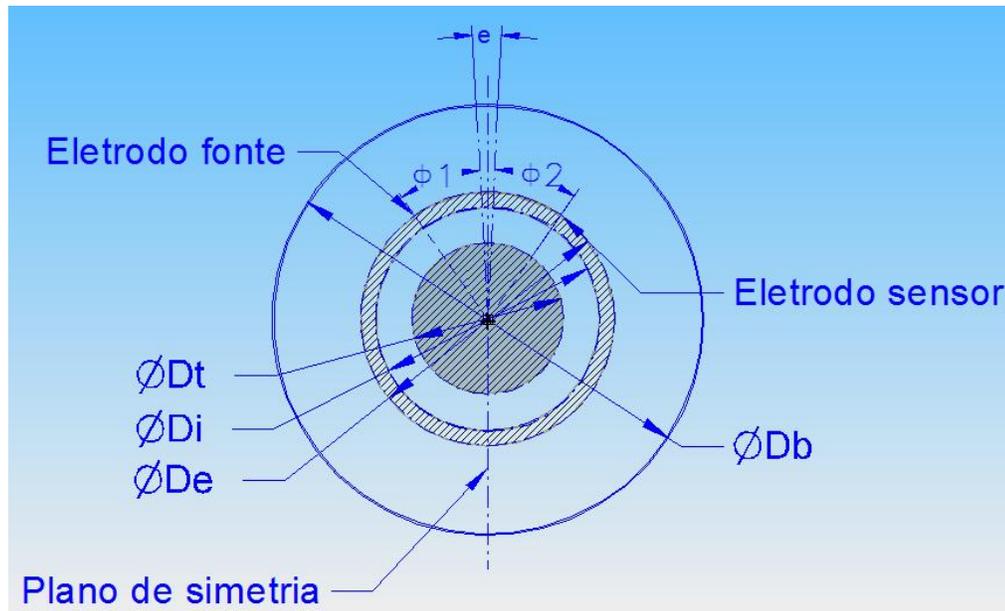


Fig. 2.5 Corte nos eletrodos sensor e fonte.

Dos Reis *et al.* (2008) realizaram simulações numéricas bidimensionais utilizando um método dos elementos finitos (FEM) com uma configuração de eletrodos semelhante à mostrada na Fig. 2.5. Consideraram que não havia fluxo elétrico no sentido axial do tubo e, então, obtiveram os resultados de capacitância por metro, unidade dimensional de comprimento do eletrodo ao longo do eixo do tubo.

Eles simularam capacitores concêntricos ao eixo do tubo sobre a tubulação de vidro, variando-se os parâmetros ϕ_1 e ϕ_2 , que são os ângulos de envolvimento no tubo, e , que é o ângulo de separação dos eletrodos, D_i , D_e , D_b e D_t , que são, respectivamente, os diâmetros interno, externo, da blindagem e do tarugo. A espessura da camada anular (S) varia conforme D_t , pela equação:

$$S = (D_i - D_t)/2 \quad 2.1$$

Os valores utilizados na simulação foram: permissividade relativa da água 80, do óleo 2,8, do vidro 3 e do ar 1. O diâmetro interno do tubo (D_i) foi de 60 mm, o externo (D_e) de 70 mm e o da blindagem (D_b) de 132 mm.

A partir dos resultados de Dos Reis *et al.* (2008), escolheu-se uma configuração de eletrodos com $\phi_1 = \phi_2 = 35^\circ$ e $e = 0,007^\circ$ (ângulo que separa os eletrodos) que foi a que, com menor ângulo de envolvimento do eletrodo no tubo ϕ , apresentou uma curva de capacitância em função da espessura sem pontos de inflexão. Obtendo-se, assim, uma medida mais local.

Nos experimentos alguns valores foram diferentes dos simulados numericamente: o diâmetro interno da tubulação (tubo de vidro) é 61,8 mm e sua permissividade dielétrica relativa 5, a permissividade relativa do óleo 2,65 e do Teflon 2 conforme apresentado nos Apêndices A e B. As outras medidas foram iguais.

Definida a configuração transversal do eletrodo, falta, então, a longitudinal (o comprimento do eletrodo sensor ao longo do eixo), que deve estar entre dois limites: o de medir uma “fatia” infinitesimal do escoamento e o de tão grande quanto sua capacitância para que o transdutor seja capaz de medir seu sinal.

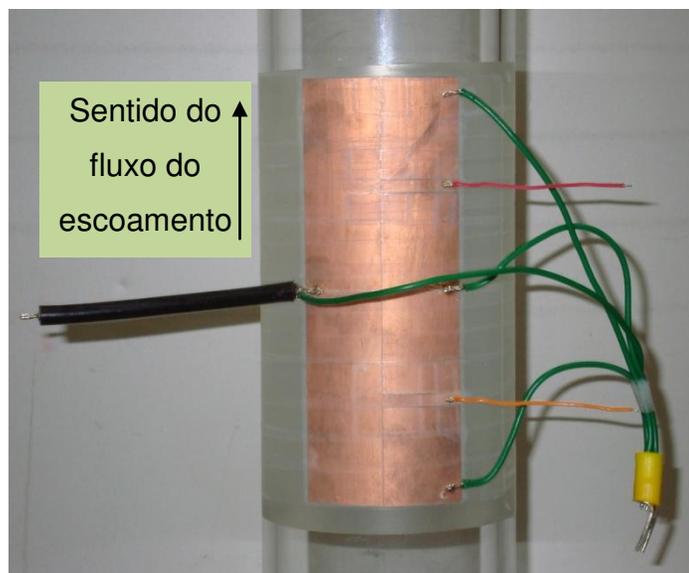


Fig. 2.6 Eletrodos no tubo com respectiva fiação.

A resposta do sensor nas simulações com o tubo cheio d'água foi da ordem de $60 \text{ pF}/m$ (unidade de capacitância por metro de eletrodo). Escolhendo-se um comprimento de 3 mm para o eletrodo sensor, resulta numa capacitância da ordem de centenas de femtoFaraday (180 fF), que pode ser uma boa escolha para uma aplicação experimental, pois, segundo Yang *et al.* (1994), que desenvolveram um transdutor do mesmo tipo usado nesse trabalho, a faixa ideal da capacitância para esse tipo transdutor deve estar entre 0,1 pF e 10 pF.

Escolheu-se uma distância entre fonte e sensor e guardas (e) e entre esses dois últimos de 0,5 mm, que foi o mínimo que se conseguiu para que não houvesse curto circuito (ou contato elétrico) entre eles. O eletrodo de guarda, entre os dois sensores, tem o dobro do comprimento de cada um dos guardas laterais.

O comprimento axial do eletrodo fonte escolhido foi de 111 mm. Isso para que a distância entre o eletrodo sensor e o flange mais próximo fosse de aproximadamente 2 diâmetros da tubulação. Assim, o campo elétrico entre o eletrodo sensor e o flange fica pequeno e suficientemente impeditivo de forma a favorecer a detecção de corrente no eletrodo sensor pelo sistema de transdução.

2.1.2 Transdutor de capacitância

Foi desenvolvido um transdutor de capacitância especialmente para o sensor (capacitor) descrito no subitem anterior. Esse transdutor detecta a corrente do eletrodo fonte induzida no sensor.

O transdutor, esquematizado na Fig. 2.7, funciona da seguinte forma: um oscilador baseado numa ponte de Wien, disponibiliza uma tensão senoidal com frequência e amplitude constantes. As capacitâncias entre os eletrodos e o funcionamento do sistema de detecção são conforme explicado no item 1.2.3b.

Além disso, existe no sensor uma parte resistiva (R_x), que deve ser muito alta para que a fonte (ponte de Wien) consiga suprir a corrente e para que a corrente detectada seja relativa somente à capacitância, uma vez que sistema de detecção não separa a parte resistiva da reativa. Para isso, o capacitor foi montado externamente ao tubo de modo que o vidro o isola do contato com o fluído que é onde poderia ocorrer maior condução de *elétrons*.

Depois da etapa de detecção da corrente, é utilizado um amplificador diferencial com ganho de 50 vezes. Na etapa seguinte são utilizados diodos *skottky* para retificação do sinal que, além de uma componente estática, tem uma componente dinâmica relativa às variações da capacitância e ao próprio sinal senoidal induzido na etapa detecção.

Um filtro ativo passa-baixa de dois pólos *Butterworth*, com resposta de 80 dB e frequência de corte de 1 kHz, atenua o sinal em frequências que são relativas ao próprio sinal AC de operação do transdutor e às transientes de amplificação e detecção. Por último, um amplificador com ganho de até 5 vezes permite ajustar a saída para um sistema de aquisição.

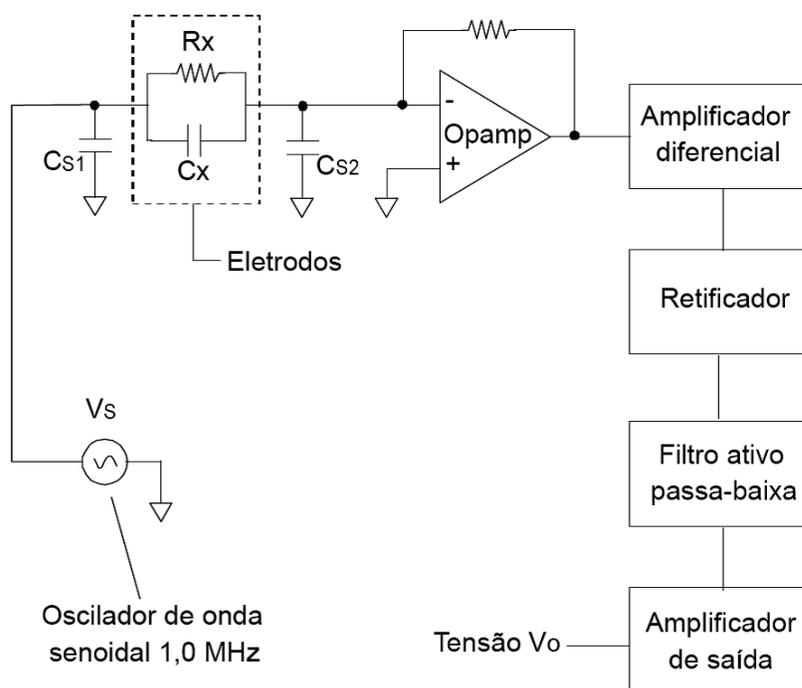


Fig. 2.7 Circuito eletrônico do transdutor (DOS REIS, 2003).

Todo o circuito é confinado e isolado pelas blindagens e os condutores de sinal por malhas, sendo aquelas e estas aterradas, configurando um sistema em malha fechada. Nesse tipo de sistema, o campo magnético devido à corrente através dos condutores de sinal de anula com aquele devido à corrente através da malha e das blindagens.

A corrente detectada, para essa configuração, é devida somente à capacitância, pois a resistência é altíssima. Sabendo-se que a carga induzida no sensor num período é proporcional à capacitância, a tensão na saída deverá ser diretamente proporcional à capacitância.

Segue um diagrama do circuito eletrônico utilizado nesse trabalho, que foi baseado no desenvolvido por Dos Reis (2003).

Apesar de não reconhecer a fase do sinal e, portanto, pela disposição dos eletrodos na parte externa e pela alta frequência do sinal, detectar somente a parte reativa (capacitância) do sinal, o transdutor é capaz de medir rapidamente quaisquer alterações da geometria ou propriedades dos meios dielétricos medidos.

2.1.3 Core-Flow na bancada estática

Uma bancada foi desenvolvida para simular o padrão de escoamento com uma camada anular de água usando tarugos de Politetrafluoretileno (PTFE), ou Teflon®, que apresentam propriedades dielétricas próximas das do óleo. Detalhes dessa instalação e os motivos que levaram a fazê-la estão no Capítulo 3.

As características geométricas utilizadas para simular experimentalmente a presença de óleo na sonda são apresentados a seguir para o sensor apresentado em 2.1.1.

Diâmetros dos tarugos

A escolha dos diâmetros dos tarugos foi baseada na tendência (derivada) de uma curva ajustada entre os resultados de capacitância para cada espessura da camada anular obtidos através das simulações numéricas bidimensionais do sensor com $\phi_1 = \phi_2 = 35^\circ$ e $e = 0,007$.

A curva é representada:

$$\theta = \alpha \left[1 - e^{-\frac{S}{\beta}} \right] + \gamma \left[1 - e^{-\frac{S}{\kappa}} \right] \quad 2.2$$

onde S é a espessura de camada anular e θ é a capacitância adimensionalizada:

$$\theta = \frac{C - C_o}{C_{\max} - C_o} \quad 2.3$$

e as constantes: $\alpha = 0,455105$, $\beta = 13,88481$, $\gamma = 0,543971$ e $\kappa = 0,33655$.

O subscripto o é relativo à capacitância obtida para a condição onde o tubo está cheio de um óleo de permissividade dielétrica relativa 2, assim, a espessura da camada anular é nula. Já o subscripto max é uma condição onde a espessura da camada anular do escoamento é máxima. Esse limite foi definido a partir de uma condição de estabilidade do próprio padrão de escoamento.

A faixa de medida da espessura da camada anular a ser considerada para que fossem usinados os tarugos que simulariam a presença de óleo na seção da medida foi de 1 a 10 mm.

Para uma espessura menor que 1mm, poderia ocorrer interferência na inserção do tarugo dentro do tubo devido a alguma distorção do último ao longo de seu eixo.

A máxima foi calculada considerando-se o escoamento como anular perfeito, onde o núcleo de óleo forma um cilindro concêntrico ao eixo do tubo.

Segundo Bannwart (2001), o padrão de escoamento anular óleo – água é estável a partir de um *holdup* de óleo (H_{V_o}) de 50%. Com essa informação, com o diâmetro interno do tubo e considerando-se o escoamento homogêneo, ou seja, as fases escoam com uma mesma velocidade média, poderia se calcular uma espessura máxima da camada anular.

Na prática, entretanto, existe uma diferença entre a velocidade média do óleo (u_o) e a da água (u_a).

Utilizando-se uma razão de escorregamento (h), que é a razão de u_o por u_a , de 1,4, que é sugerida por Joseph (2000) para um escoamento anular óleo – água horizontal, pode ser calculada a espessura média máxima que ocorrerá no escoamento.

Considerando-se os fluidos do escoamento como incompressíveis, a vazão da fase óleo (Q_o) pela a da água (Q_a) é a razão de escorregamento pela razão da área transversal das fases:

$$Q_o/Q_a = u_o A_o / u_a A_a \quad 2.4$$

Num intervalo de tempo, a razão de vazões entre as fases é igual a razão dos *holdups* das fases num trecho de tubulação. A partir do diâmetro interno da tubulação, $D_i=61,8$ mm, e da eq. 2.1, pode se obter a espessura média máxima, de aproximadamente 10 mm, junto com a equação:

$$H_{Vo}/(1 - H_{Vo}) = h D_t^2 / (D_i^2 - D_t^2) \quad 2.5$$

Sabida a faixa de espessuras a ser abrangida, falta o número de espessuras a serem formadas pelos tarugos.

Segundo O'Brien (1996), o número de pontos, nos quais se ajusta uma curva, deve ser, pelo menos, o dobro do número de graus de liberdade dessa curva para que se tenha o menor erro em sensibilidade no ajuste. Assim sendo, para que se ajuste nos pontos experimentais, de tensão de saída da sonda por espessura da camada, uma curva do tipo ajustada nos pontos calculados numericamente, o número mínimo de espessura anulares, formadas por tarugos, deve ser 8.

O diâmetro de cada tarugo foi definido derivando-se a eq. 2.2 e dividindo sua faixa de sensibilidade em iguais partes. Dessa forma, o erro em sensibilidade no ajuste da curva também é mínimo.

Para o cálculo das espessuras, seguindo os critérios acima, foi utilizado um programa computacional em linguagem FORTRAN apresentado no Anexo 1.

Foram obtidos, então, 11 pontos de espessura de camada anular de água, e, pela eq. 2.1, os 11 tarugos de PTFE. As dimensões são apresentadas na Tabela 2.1, considerando-se um diâmetro interno médio do tubo de 61,8 mm (D_i).

Tabela 2.1 Espessuras da camada e diâmetros dos tarugos.

Numeração do tarugo	S, mm	D_t , mm
1	1	59,8
2	1,2	59,4
3	1,35	59,1
4	1,5	58,8
5	1,75	58,3
6	2	57,8
7	2,45	56,9
8	3,15	55,5
9	4,5	52,8
10	7,65	46,5
11	10	41,8

2.1.4 Determinação da incerteza da medida da espessura da camada anular

Para determinar a incerteza da medida da espessura da camada anular foram tomadas algumas medidas do diâmetro interno dos tubos de vidro e o externo dos tarugos. Esse trabalho foi feito por um centro credenciado e acreditado pelo INMETRO, o CT (Centro de Tecnologia) da UNICAMP. O documento contendo o resultado das medidas é apresentado no Anexo 2.

A partir das incertezas nos diâmetros, obteve-se a incerteza da espessura da camada anular, pelo método sugerido por Holman (1996), como na equação:

$$\delta S = \sqrt{\left(\frac{dS}{dD_i} \delta D_i\right)^2 + \left(\frac{dS}{dD_t} \delta D_t\right)^2} \quad 2.6$$

Derivando-se a Eq. 2.1 para cada uma de suas variáveis de incerteza, tem-se:

$$dS/dD_i = 1/2 \delta D_i \quad 2.7$$

$$dS/dD_t = -1/2 \delta D_t \quad 2.8$$

A incerteza no diâmetro interno do tubo e no diâmetro externo dos tarugos foi de $\pm 0,02$ mm. Assim, utilizando-se as equações acima, tem-se que a incerteza na espessura da camada é de $\pm 0,01$ mm.

Capítulo 3

Bancadas de Testes Experimentais

Neste capítulo são descritas duas bancadas construídas para estudar a sonda capacitiva para medir a espessura da camada de água num escoamento anular óleo - água, i.e., com o padrão de escoamento *core-flow*. O sensor da sonda foi descrito no capítulo anterior.

Algumas características de sensores não são relacionadas ao tempo, como a sensibilidade e a faixa de medição, enquanto que outras são: o tempo de resposta e a resposta em frequência.

A avaliação das características que não dependem do tempo pode ser realizada através de testes estáticos incluindo-se ou não os efeitos de variação das condições ambientais. Por outro lado, as características dependentes do tempo podem ser avaliadas através de testes dinâmicos avaliando-se, por exemplo, a grandeza na entrada, variável medida, enquanto registra-se a saída para posterior comparação.

De forma a isolar o medidor para uma condição independente do tempo e também simplificar a geometria do meio dielétrico, foi desenvolvida uma bancada de testes estáticos. E para se avaliar sua medição numa condição dinâmica, foi utilizada uma bancada dinâmica devidamente preparada para que a espessura da camada anular medida fosse conhecida.

3.1 Bancada para Testes Estáticos

No projeto desse novo sistema de medição, há interesse por características que determinam seu desempenho como a curva de resposta, sensibilidade, faixa de medição, etc. Trata-se, portanto, da percepção do sensor em relação ao meio e a influência desta percepção sobre a

grandeza de interesse. As condições ambientais de temperatura e umidade também têm influência.

O intuito de se construir essa bancada foi o de projetar uma configuração da seção de medida que reproduza, estaticamente, a condição de um *core-flow*.

As principais simplificações foram:

- i) a interface é lisa;
- ii) o núcleo de óleo, substituído por tarugos de PTFE com permissividade dielétrica próxima à do óleo puro, não se emulsifica; e
- iii) a configuração é simétrica em relação ao eixo do tubo, isto é, a espessura da camada de água é a mesma ao longo de toda a região anular.

O efeito da variação das condições ambientais foi eliminados pelo fato dos testes terem sido realizados numa sala onde as condições ambientais variaram muito pouco durante cada teste. A mesma seção que deverá operar com o *core-flow* foi utilizada nos testes.

A idéia da construção de uma instalação para testes estáticos foi aproximar a condição de medição de ordem zero (FIGLIOLA; BEASLEY, 2000), ou seja, uma condição em que a resposta do sistema independe do tempo, semelhante à estudada através de modelagem matemática por outro membro da equipe (GALVIS, 2009).

A Fig. 3.1 apresenta um diagrama da bancada de testes constituída de: uma base acoplada a uma sonda capacitiva, um reservatório para a água, uma válvula para controle do fluxo no enchimento e esvaziamento da seção, e uma mangueira flexível.

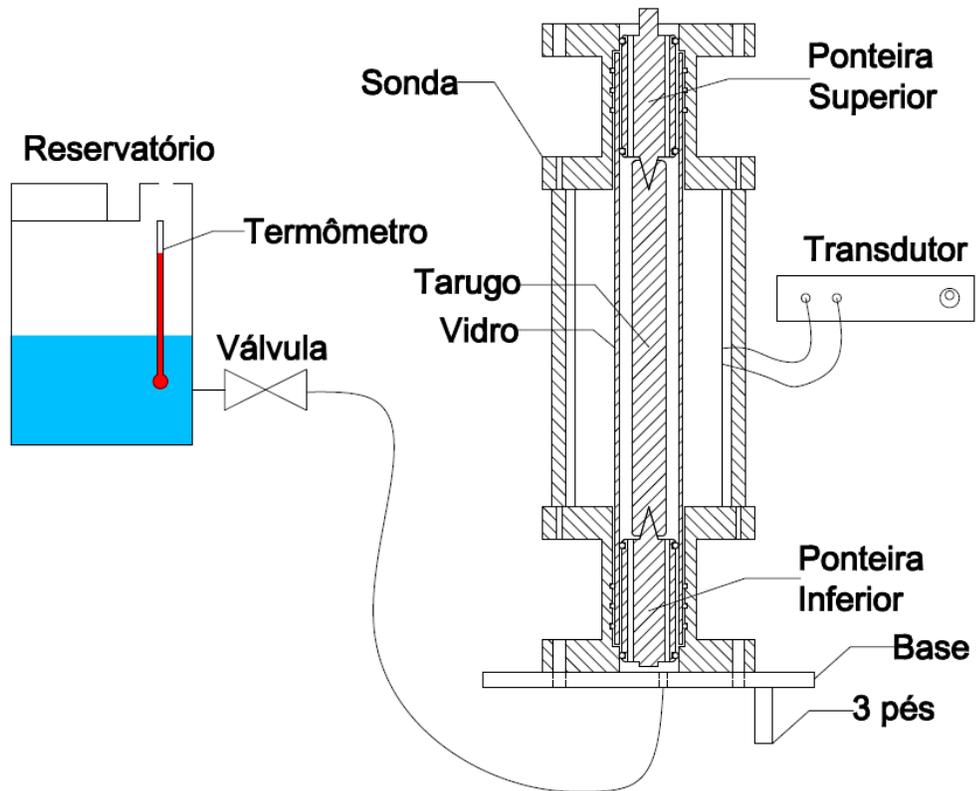


Fig. 3.1 Bancada de testes estáticos. Corte na sonda, tarugo e ponteiras.

3.1.1 Componentes da bancada

A bancada de testes estáticos simula a camada anular de água dentro do sensor pela inserção de tarugos de PTFE no tubo de vidro com se fosse o núcleo de óleo em uma condição de superfície cilíndrica plana. Os tarugos são concêntricos ao tubo de vidro e têm vários diâmetros, permitindo a variação da espessura da camada de água entre um tarugo e a superfície interna da parede do tubo de vidro.

O material escolhido para os tarugos foi o PTFE extrudado, que, segundo PTFE (2009) e TORAY (2009) é um dos plásticos com melhores propriedades dielétricas e ainda possui absorção de água menor que 0,01%, conforme o padrão ASTM D570. Segundo TRIDENT (2009), o PTFE possui propriedades dielétricas e de fator de dissipação estáveis numa ampla faixa de frequências e temperaturas.

A permissividade dielétrica relativa do PTFE utilizado nos experimentos foi medida, conforme é apresentado no Apêndice B, e tanto para uma amostra transversal quanto para uma longitudinal ao sentido de extrusão do tarugo, valor 2,01, com uma incerteza de medição de $\pm 1,39\%$.

A permissividade dielétrica do óleo utilizado na instalação dinâmica, também avaliada, conforme apresentado no Apêndice A, foi de 2,57 com uma incerteza de medição de $\pm 1,71\%$.

Uma mangueira e um furo passante na base permitem a entrada e a saída de fluídos na sonda capacitiva. Para encher ou esvaziar a sonda, eleva-se o reservatório acima ou abaixo do nível da base, controlando o fluxo do fluído pela válvula.

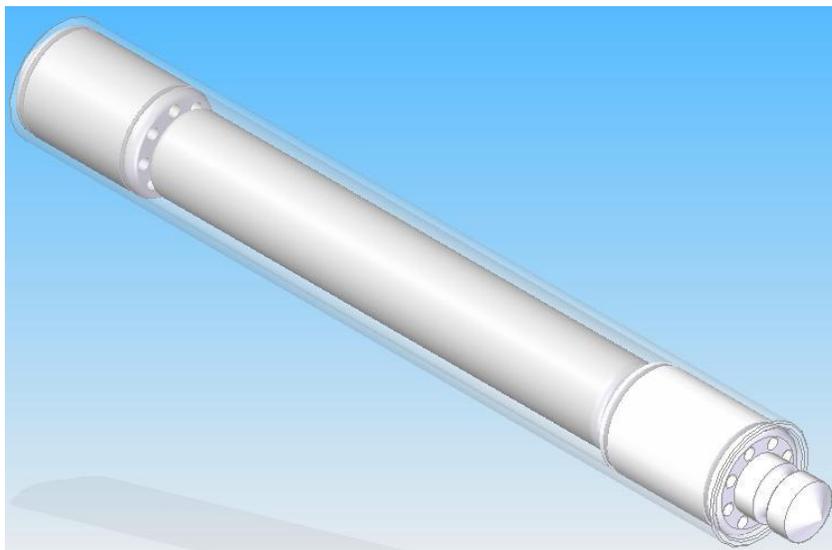


Fig. 3.2 Tarugo montado entre as ponteiros dentro do tubo de vidro.

Foram construídas duas ponteiros para centralizar os tarugos dentro do tubo da sonda, conforme mostrado na Fig. 3.2. Essas ponteiros são vazadas, com furos passantes ao longo de seus eixos de simetria, para que a água possa passar e preencher o espaço anular da seção de medição além de manter o contato com os flanges, de forma semelhante à que ocorreria se a sonda estivesse medindo um escoamento anular. Foram utilizados anéis de vedação de borracha para a centralização das ponteiros no vidro e para evitar um esforço pontual da ponteira no vidro.

As ponteiros e um tarugo são montados dentro do tubo de vidro que, por sua vez, é montado na bancada. Para alterar a espessura da camada de água a fim de avaliar as condições de medição do sensor capacitivo, muda-se apenas o tarugo.

A quantidade e os diâmetros dos tarugos foram apresentados no Cap. 2, dimensionados para aplicação em um capacitor específico.

3.1.2 Avaliação dos efeitos axiais do sensor capacitivo

De modo geral, a medida de um parâmetro do escoamento bifásico se dá numa área transversal ao eixo do tubo. Para um sensor capacitivo, no entanto, essa medição é dificultada, por haver, também, uma sensibilidade ao longo do eixo, pois a medida se refere a um volume de fluido existente ao longo do sensor.

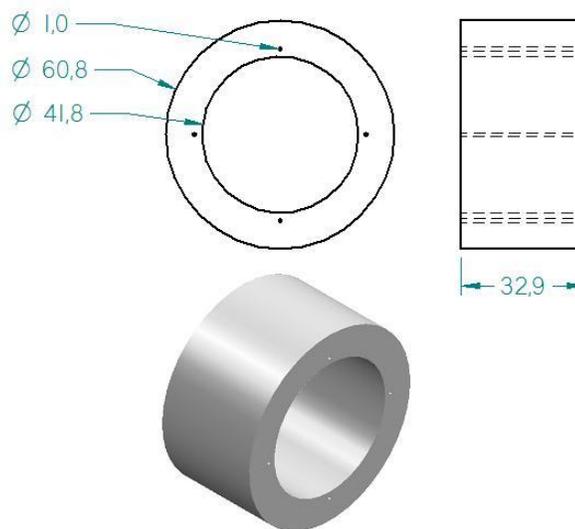


Fig. 3.3 Anel para avaliação do efeito axial.

Para avaliar o efeito na medição pelo sensor capacitivo ao longo do eixo da tubulação, foi construído um anel que desliza sobre o tarugo, entre as ponteiros.

A Fig. 3.3 apresenta um desenho do anel e a Fig. 3.4 um desenho com ele montado em um tarugo.



Fig. 3.4 Anel para avaliação dos efeitos axiais na medição montado no tarugo dentro do vidro.

O anel é puxado por fios de náilon (poliamida) também presos ao eixo de um motor que os enrola a medida que seu eixo gira.

Para se referenciar a posição do anel em relação ao sensor, a blindagem teve que ser parcialmente aberta, facilitando, assim, a visualização do anel dentro do tubo de vidro. A abertura na blindagem, entretanto, não influenciou nos valores de capacitância do sensor, uma vez que os valores de capacitância nas condições fechada e parcialmente aberta foram semelhantes.

3.1.3 Instrumentação

a. Temperatura da água

A temperatura da água foi monitorada e medida no início e no fim de cada teste. Para tanto foi utilizado um termômetro, da marca Incotherm, com bulbo de mercúrio e graduação de 0,1 °C, faixa de medição de -10 a 110 °C e incerteza de medição $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

b. Espessura da camada anular de água

A medida da espessura da camada anular de água é feita por um sensor capacitivo e um transdutor eletrônico, que foram tratados no capítulo anterior. A cada espessura conhecida da camada anular foi associada uma tensão de saída no transdutor.

c. Capacitância e propriedades dielétricas dos meios

Mediu-se com um medidor de LCR (Indutância, Capacitância e Resistência) a capacitância do sensor para as mesmas espessuras da camada de água medidas com o transdutor, na frequência de 1 MHz. Foi utilizado um medidor de LCR da marca *Agilent Technologies*, modelo E4980a, com incerteza básica de medição de $\pm 0,05\%$ e faixa de frequência de sinal aplicável de 20 Hz até 2 MHz. A incerteza da medição deve ser calculada segundo o manual AGILENT (2008), pois depende da impedância e da frequência da medida.



Fig. 3.5 Medidor LCR.

As capacitâncias assim medidas foram comparadas com as capacitâncias calculadas numericamente por Dos Reis (2009), que utilizou o Método dos Elementos Finitos - MEF, para condições geométricas e propriedades dielétricas semelhantes às experimentais.

A medição das propriedades dielétricas dos materiais precedeu as de capacitância, pois são utilizadas em sua modelagem pelo MEF, cujos resultados obtidos foram usados na comparação com as capacitâncias medidas experimentalmente.

As propriedades dielétricas dos meios envolvidos na análise experimental, i.e. vidro borossilicato e PTFE, foram obtidas, para efeito de utilização na simulação numérica, utilizando-se um dispositivo acessório do Medidor LCR específico para esse fim, também fabricados pela *Agilent Technologies*. A amostra do material, cuja permissividade dielétrica é desejada, é colocada entre seus eletrodos, possibilitando a medição da capacitância com o LCR.

Foram medidas também as permissividades de emulsões de água em óleo com diversas concentrações, sendo o mesmo utilizado na bancada dinâmica. Essas medidas foram utilizadas num trabalho paralelo do projeto, por Galvis (2009), de simulação numérica do comportamento do capacitor quando o óleo está emulsificado.

Os Apêndices A e B apresentam a metodologia, os dispositivos e o equacionamento para obtenção das permissividades relativas dos materiais sólidos e líquidos acima citados e suas incertezas.

Poder-se-ia questionar por que não utilizar o Agilent LCR ao invés do transdutor de capacitância. O Agilent LCR, apesar de possuir correção de temperatura e apresentar a capacitância diretamente, pode medir e armazenar dados a uma taxa máxima de 2,5 amostras por segundo, isto seria suficiente para registrar sinais de até 1,25 Hz. Para uma situação de escoamento, entretanto, isso seria pouco, uma vez que uma flutuação da espessura do escoamento pode variar com frequências bem mais altas de até 120.

Essa frequência foi estimada medindo-se a velocidade do núcleo de óleo e a distância entre dois picos de uma onda com uma câmera filmadora. No caso das imagens da Fig. 3.6, por exemplo, a velocidade foi de 18000 *pixels/s*, isso porque o intervalo de tempo entre cada foto é de 0,002 s, e a distância entre dois picos de uma onda de 152 *pixels*. A contagem dos *pixels* foi feita com o editor de imagens *Paint* da empresa *Microsoft*.



Fig. 3.6 Sequência de imagens.

3.2 Bancada para Testes Dinâmicos

A bancada de testes dinâmicos se situa no LabPetro do CEPETRO (Centro de Estudos de Petróleo), na UNICAMP.

Os fluidos utilizados para se rodar o sistema foram: óleo fornecido pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES) da PETROBRAS proveniente do Campo de Jubarte (RJ), de densidade 974 kg/m^3 e viscosidade de $4944 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ à temperatura de 20°C , e água da rede de abastecimento da UNICAMP, cuja densidade é 998 kg/m^3 e viscosidade de $1.10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (1 cP).

A instalação foi instrumentada para medir a espessura da camada anular de água, tanto com uma sonda, disposta para esse fim, quanto com uma câmera filmadora de alta resolução temporal.

3.2.1 Fluxograma do processo

A instalação consta de um circuito fechado capaz de escoar óleo pesado com água em um escoamento horizontal anular. Opera segundo o esquema apresentado na Fig. 3.7. O óleo é succionado do tanque de separação por uma bomba de deslocamento positivo (parafuso) e introduzido por um bocal injetor na tubulação de escoamento bifásico com água. A água também é succionada do tanque de separação e bombeada por uma bomba centrífuga até o bico injetor,

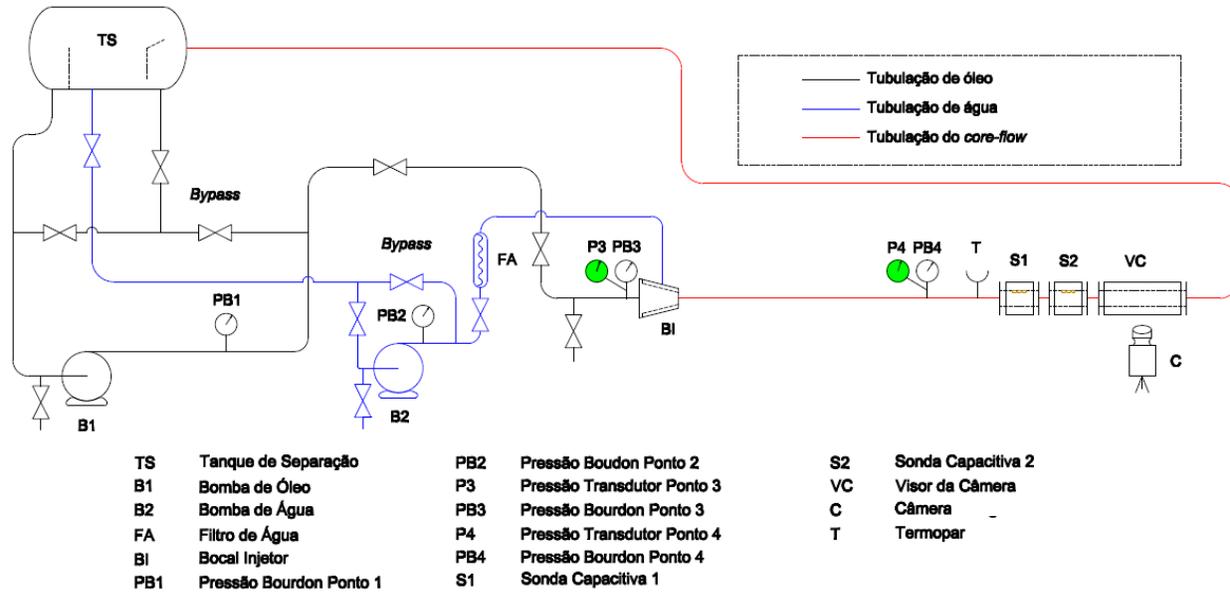


Fig. 3.7 Bancada de testes dinâmicos.

onde entra paralela e anular ao óleo. A mistura, então, retorna ao tanque de separação que decanta a água e que, por uma chicana, desvia o óleo para outro compartimento, para reiniciar o processo.

A bomba de óleo é da marca NETZSCH, modelo NEMO F0. O motor que a movimenta é trifásico, de indução, com rotor de gaiola WEG, e o inversor de frequência que controla sua rotação é DANFOSS, modelo VLT 2800. A vazão de óleo pode variar de 5 a 32 m³/h.

A bomba de água é do tipo centrífuga horizontal, marca KSB, modelo Megabloc, tamanho 50-160, sendo o diâmetro do rotor de 0,174 m, e rotação máxima de 3500 rpm. O motor que a movimenta é trifásico, de indução tipo gaiola, da WEG, linha W21, e acionada por um inversor de frequência, WEG, modelo CFW 09, da linha Vectrue Inverter. A vazão de água pode variar de 7 a 20 m³/h.

A tubulação de óleo é de 3 pol de diâmetro, de aço galvanizado; a da água é de 2 pol, de PVC, e a do escoamento bifásico é de 2,5 pol, com algumas partes de aço galvanizado e outras de vidro borossilicato.

Uma parte importante da instalação do escoamento anular óleo-água é o bocal injetor, pois é quem condiciona a entrada dos líquidos paralelamente. Contudo, ele pode limitar o escoamento,

devido ao diâmetro de encontro das fases ser constante – igual ao do bocal. Com isso, por exemplo, no caso de uma vazão de óleo muito superior à de água, acontece, numa condição limite, o cisalhamento das camadas mais externas do óleo pela água, de tal maneira que se formam bolhas de óleo na camada anular de água. Esse fenômeno ocorreu nos testes experimentais e, apesar de não ter impedido o escoamento, limitou a medição com a técnica óptica.

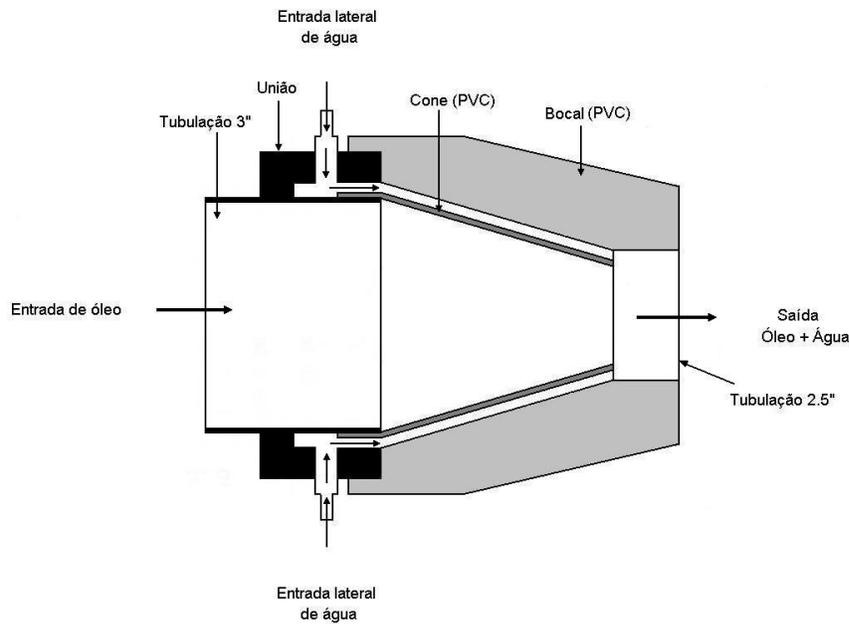


Fig. 3.8 Bocal injetor (GRANZOTTO, 2008).

Ghosh *et al.* (2009) fizeram uma revisão dos tipos de bocais existentes na literatura e que foram utilizados para a injeção do óleo paralelamente com a água. Um desenho do bocal utilizado nessa instalação é apresentado na Fig. 3.8 e uma foto na Fig. 3.9:

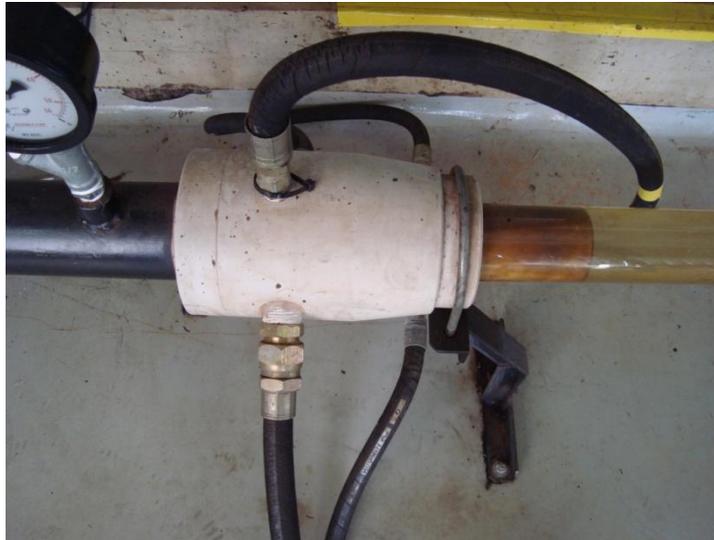


Fig. 3.9 Foto do bocal injetor.

3.2.2 Instrumentação

A bancada dinâmica foi preparada para medir a espessura da camada anular tanto com um sensor capacitivo quanto a partir de imagens de uma câmera filmadora. Outras variáveis que influenciaram a medição do sensor capacitivo foram a temperatura da água e o quantidade de água emulsionada no óleo.

a. Temperatura

A temperatura do fluido foi obtida utilizando-se um termopar tipo J, que foi inserido na tubulação de tal forma que ficasse rente à superfície do tubo, sem perturbar o escoamento, ou a distribuição das fases. Esse sensor foi calibrado em um banho-maria termostático, com incerteza de medição de $\pm 0,1$ °C. Por ter a linearização dos pontos calibrados ficado em 99,9%, quando 100% estariam na linha, é razoável dizer que a incerteza de medição desse termopar, é de $\pm 0,1$ °C. A Fig. 3.10 apresenta uma imagem da instalação do sensor.



Fig. 3.10 Termopar para medição da temperatura do fluido.

b. Medidores de Pressão

Mede-se a pressão do óleo antes do bocal injetor e a pressão do escoamento, respectivamente, em P3 e P4.

Foram utilizados medidores de pressão com transdutores piezoelétricos. A saída destes foi calibrada com referência à pressão indicada por um manômetro de Bourdon.

c. Espessura da camada de água

A espessura da camada anular de água do topo da tubulação foi medida de duas formas: com o sensor capacitivo descrito no Cap. 2 e através das imagens do escoamento.

A distância entre o sensor capacitivo e o plano da imagem da câmera é de 1,3 m e para efeito de comparação das espessuras dos escoamentos considerou-se que a interface do escoamento não se alterou ao longo desse espaço. Ademais, o tratamento das respostas desses medidores, para efeito de comparação, foi o cálculo da média.

Uma sonda capacitiva, com transdutor e suportes, foi utilizada para medir a espessura da camada anular de água (à direita na Fig. 3.11).

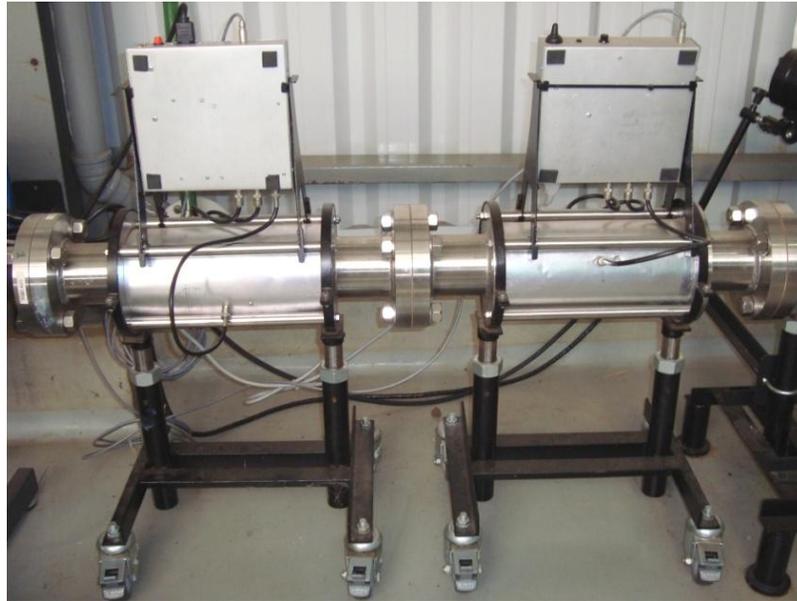


Fig. 3.11 Foto do medidor de espessura (da direita) capacitivo instalado com suportes.

3.2.3 Técnica ótica

Uma seção de tubulação de vidro, por onde passa o escoamento bifásico, com uma caixa de visualização, de vidro, cheia de água, foi construída para medição da espessura pela técnica ótica (Fig. 3.12) (MATOS, 2008).

Atrás da caixa de visualização, na foto (Fig. 3.12), estão instalados dois holofotes e duas câmeras. Porém, foi usada somente uma, de marca Encore, modelo *High-Speed* 1000 quadros/s, e que pode gravar 2 segundos de imagens nessa taxa (máxima).

A iluminação utilizada é do tipo indireta. Para a luz chegar até a câmera utilizou-se um fundo reflexivo e difuso. Esse fundo cobre a parte frontal (a que primeiro se vê na foto da Fig. 3.12) da caixa de visualização e foi retirado para a fotografia.



Fig. 3.12 Foto da seção de medição com técnica fotográfica.

3.2.4 Medição da espessura da camada de água através de imagens dos escoamentos

a. Descrição do sistema

A câmera, Encore, modelo *High-Speed*, com resolução da imagem de 320x240 pontos (*pixels*) e 8 bits de profundidade (256 tons de cinza) foi utilizada para adquirir um filme da imagem da espessura da camada anular superior vertical do escoamento.

b. Análise das imagens

O filme obtido com a câmera filmadora foi dividido em fotografias utilizando o programa computacional *Pinnacle Studio 9*. Já para o tratamento e análise dessas imagens foi utilizado o software *ImageJ (Image Processing and Analysis in Java)*.

3.3 Sistemas de Condicionamento de Sinais e Aquisição de Dados

O sistema de aquisição foi usado para adquirir e armazenar na forma digital dois tipos de sinais:

a. Sinais em tensão: O sistema de condicionamento de sinais pode converter sinais de tensão de até 16 canais em sinais digitais com 16 bits, numa faixa máxima de -10 a 10 V, com incertezas de medição, para essa faixa, de $\pm 1,92$ mV, e com taxa de amostragem de até $1,25E+6$ amostras/s para um canal.



Fig. 3.13 Placa de aquisição de dados.

Consta desse sistema um multiplexador de 16 canais da National Instruments, modelo SC-2345, e um condicionador de sinal do mesmo fabricante, modelo USB-6256, apresentados na figura acima.

Para se armazenar os dados digitais, que são transferidos via *USB (Universal Serial Bus)*, é usado um computador da Intel, modelo *Core2Duo*, com frequência de processamento de 1,86 GHz.

O condicionador pode medir tensão diferencial, assim como tensão referenciada ao terra. Basta que seja configurada a medição de tensão, via software, que nesse caso é o *LabView v. 8.5*, como diferencial.

b. Sinais em corrente: Os sinais em corrente elétrica (de 4 a 20 mA) foram condicionados na forma de tensão diferencial utilizando-se uma resistência conhecida, em circuito como no esquema apresentado na Fig. 3.14.

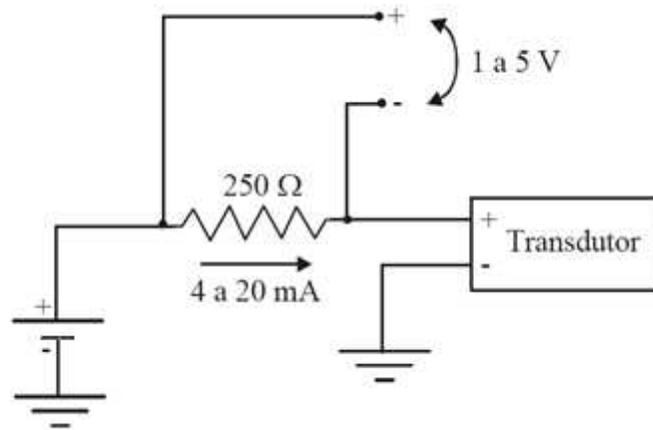


Fig. 3.14 Circuito para medição de corrente (DOS REIS, 2003).

Capítulo 4

Procedimento Experimental e de Redução de Dados

Neste capítulo são apresentados os procedimentos de operação e de aquisição e redução dos dados obtidos nos testes com as bancadas estática e dinâmica. Os procedimentos são descritos referidos aos fluxogramas das bancadas apresentadas no Cap. 3.

4.1 Procedimentos de Operação da Bancada de Testes Estáticos

A bancada de testes estáticos, bem como os materiais utilizados na medição (i.e. água e tarugos) devem permanecer numa sala com temperatura constante ao longo do dia.

A sonda e os materiais devem estar isentos de contaminantes ou de sujeira.

4.1.1 Partida da instalação

Antes de iniciar as medições, deve se ligar o transdutor da sonda a ser avaliada, conforme a Fig. 3.1, pois seu tempo de aquecimento é de 90 min, conforme Dos Reis (2003). Em seguida, são ligados o sistema de aquisição e o microcomputador.

O AGILENT LCR deve ser ligado para a medição da capacitância. O seu tempo de aquecimento é de 30 min, segundo Agilent (2008). Aguardados os 90 min de aquecimento pode se iniciar os testes.

4.1.2 Avaliação do sensor capacitivo com o transdutor

Inserir-se a ponteira inferior na sonda pelo lado do flange que será acoplado na base. Isso deve ser feito para que não haja risco da ponteira ficar presa ao vidro, devido às irregularidades do último. Em seguida, acopla-se a sonda na base.

Introduz-se o tarugo de maior diâmetro pelo lado aberto da sonda, até que ele encaixe na ponteira inferior. Com a introdução da ponteira superior, o tarugo fica centralizado.

Eleva-se o reservatório de água a um nível acima do topo da sonda. Abre-se parcialmente a válvula de esfera do reservatório de modo que a tubulação seja enchida lentamente com água. Assim, garante-se que na formação da camada anular de água não haja bolhas de ar.

Com a camada anular formada, fecha-se a válvula e mede-se a tensão apresentada na saída do transdutor a cada 1s durante 10 s.

Abaixa-se o reservatório e abre-se a válvula para esvaziar a sonda. Retira-se a ponteira superior e o tarugo.

Inicia-se a inserção do tarugo seguinte, repetindo os procedimentos acima, até que, para a maior espessura (somente água) insere-se somente a ponteira superior, na posição que deveria ficar se ali houvesse um tarugo, ficando a água entre as ponteiros.

Para se avaliar uma possível histerese do transdutor de capacitância, foi invertida a sequência dos tarugos, ou seja do menor diâmetro para o maior.

4.1.3 Avaliação do sensor capacitivo com o Agilent LCR

Foi avaliada a capacitância do sensor, pelo Agilent LCR, para cada espessura da camada anular. Para isso, troca-se o transdutor pelo Agilent e repete-se os procedimentos acima. A medida, entretanto, é obtida pelo Medidor, em unidades de capacitância, e não mais em Volts pelo transdutor.

Para adquirir e armazenar os sinais de forma temporizada foi utilizada a saída *USB – Universal Serial Bus* do Agilent comunicando-se com o programa *LabView* num computador. Adquiriu-se 10 medidas de capacitância numa frequência de 1 amostra/s.

4.1.4 Avaliação dos efeitos axiais

Insere-se o tarugo de diâmetro 41,8 mm na sonda encaixando-o na ponteira inferior. Transpassa-se dois fios de náilon nos quatro furos do anel e, sem cruzá-los, passa-se suas pontas em quatro furos da ponteira superior. Insere-se o anel no tarugo e encaixa-se a ponteira superior, ficando o tarugo centralizado e as pontas dos fios para fora da sonda.

Os fios são amarrados no eixo do redutor de um motor CC, mostrado na Fig. 4.1, que ao girar os enrola puxando o anel.

Para dar início às medições completa-se, por fim, a sonda com água para formar a camada anular.

Uma abertura foi feita na blindagem para poder enxergar a posição do anel no tubo. Mediuse a saída do transdutor com e sem essa abertura e não foi observada diferença usando o transdutor para detecção do sinal.

Foi feita uma rotina no *software LabView* que registra o momento de um clique do *mouse* enquanto a saída do transdutor foi adquirida pela placa de aquisição a uma taxa de 400 amostras/s, armazenada na memória dum computador.

Com isso, inicia-se, no computador, o programa descrito acima, liga-se o motor para elevar o anel de PTFE e registra-se, com um clique, quando a primeira face do anel se alinhar com um plano transversal, ao eixo do tubo, médio do eletrodo sensor, e com outro clique quando a última face sair do mesmo.

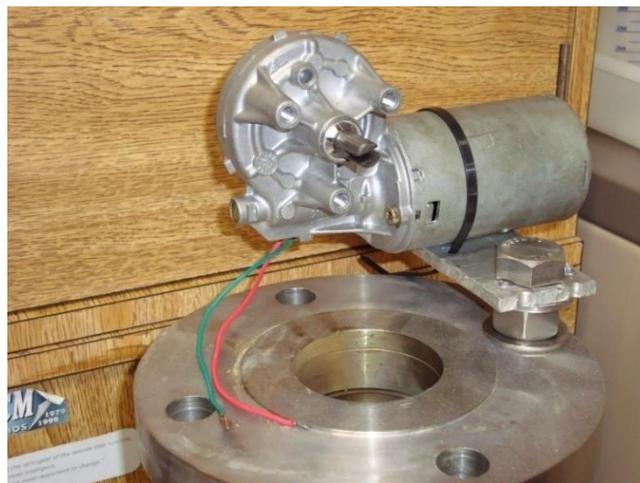


Fig. 4.1 Motor e redutor para elevar o anel.

4.2 Procedimentos de Operação da Bancada de Testes Dinâmicos

Essa bancada deve ser operada com atenção, pois existe o risco, caso falte água na tubulação, do tubo se romper devido à alta pressão que ocorreria devido a perda de carga do escoamento do óleo, por esse fluido ser incompressível e pela bomba ser de deslocamento positivo.

A descrição do procedimento experimental se refere ao fluxograma apresentado na Fig. 3.7.

Considera-se que o operador já tenha seguido e realizado o procedimento de calibração da imagem e de posicionamento da câmera, descrito em 4.2.3.

4.2.1 Partida da instalação

Inicialmente, devem ser ligados o transdutor da S2, as fontes dos transdutores de pressão, o sistema de aquisição e os microcomputadores.

Passados 90 min de aquecimento do transdutor da S2, liga-se a câmera, os holofotes e posiciona-se o fundo reflexivo difuso atrás do visor. Energiza-se os inversores da B1 e B2, liga-se B2, e abre-se a válvula do *Bypass* da B1. As válvulas por onde os fluidos do *loop* circulam devem estar abertas.

A válvula do *Bypass* da B1 deve estar aberta para o caso de alguma instabilidade que ocorra no início da injeção do óleo. Pode acontecer que, com a injeção do óleo e o aumento da pressão na saída do injetor, a vazão de água diminua pelo fato de B2 ser centrífuga.

4.2.2 Sequência dos procedimentos de testes

Passo 1: Depois de estabilizada a vazão de água, observando-se uma pressão constante em PB4, adquire-se o sinal da sonda com a tubulação com somente água que seria uma condição de espessura máxima da camada anular. Esse sinal em tensão é denominado tensão de referência.

Passo 2: Inicia-se um escoamento anular: liga-se B1, aumentando-se a rotação de seu motor através do inversor até chegar a 20 rpm. Aguarda-se que o escoamento se estabilize, o que se dá quando a pressão na saída do injetor oscilar em torno de uma constante.

Passo 3: Aguarda-se 5 min ou até que a pressão estática na saída do injetor (PB3) se estabilize e oscile em torno de uma constante. Também, a pressão PB1 no recalque da bomba de água deve se estabilizar, indicando uma vazão constante de água.

Com isso, inicia-se, sincronizadamente, a aquisição dos sinais relativos ao escoamento: pressão nos pontos 3 e 4, tensão de saída da sonda 2, a temperatura pelo termopar e as imagens da câmera.

Passo 4: Terminada a aquisição, aumenta-se a vazão de óleo ou a de água. Inicia-se outro escoamento, procedendo-se a partir do passo 3. Quando os dados forem suficientes, pára-se B1, aguarda-se até que todo o óleo do tubo vá para o tanque com a vazão da bomba e, depois disso, desliga-se B2.

a. Medição da tensão de saída da sonda capacitiva

Os sinais em tensão da sonda são medidos pela placa de aquisição e registrados no computador utilizando o *software LabView*. Cada aquisição tem duração, por teste, de 20 s. A frequência amostral foi de 2000 amostras/s.

b. Medição da espessura da camada de água através das imagens de uma câmera

As imagens da espessura da camada anular são gravadas na memória da câmera, que é limitada a 2000 imagens de resolução 320x240 pontos, e devem ser copiadas para o computador. Para isso, utiliza-se uma placa de vídeo que possibilita a leitura e a reprodução das imagens da câmera para o computador.

Em cada teste foram, então, adquiridos filmes, com 2000 imagens, a uma taxa amostral de 500 imagens/s. O tempo máximo de aquisição foi, assim, de 4s para cada teste.

c. Medição da pressão pelos transdutores piezoelétricos

O saída dos transdutores de pressão piezoelétricos (P3 e P4) é de 4 a 20 mA e foi adquirida pela placa de aquisição na forma de tensão utilizando-se um esquema como apresentado na Fig. 3.14. Em cada teste, esse sinal foi adquirido a uma taxa de 2000 amostras/s durante 4s.

d. Medição da temperatura

O sinal em tensão relativo à temperatura no termopar foi adquirido a uma taxa de 2000 amostras/s durante 4s.

4.2.3 Calibração e instalação da câmera

a. Instalação da câmera e da régua

Primeiramente, instalou-se a câmera com o eixo do seu foco na posição horizontal, isso foi feito regulando-se o comprimento de um tripé que dispunha de um nivelador de bolha.

A régua foi inserida no tubo e alinhada ao eixo vertical deste, através de uma marcação previamente feita na superfície superior desse último.

Depois, com a régua devidamente posicionada no tubo cheio de água, regulou-se o foco da câmera para que se enxergasse o mais distante possível, determinando uma distância específica da câmera ao tubo. O foco mais distante, entretanto, diminui a faixa de medição, ou quantos milímetros são vistos na imagem (Fig. 4.2). A faixa obtida foi de 18 mm, o que é razoável levando-se em consideração o que foi discutido para a faixa de medição do sensor no subitem 2.1.3.

Obtém-se, dessa forma, uma imagem quase plana da régua, ou seja, os raios de luz são quase paralelos.

b. Calibração da imagem

Para medir a partir da imagem adquirida pela câmera, a régua foi fotografada, como mostrado na Fig. 4.2.

Assim, após a verificação de que o tubo está cheio d'água e que a posição da câmera e seu foco na régua não se alteraram, pode-se reproduzir a espessura da camada anular no escoamento através das imagens que verão a espessura no mesmo plano da régua (foco), bastando que se calibre a imagem da câmera.

Na figura abaixo, à direita da régua, foram pintados os pontos (em preto) cujas coordenadas foram utilizadas para determinação da curva de calibração da régua. O ponto (*pixel*) (1,1) é o mais superior à esquerda na figura e o ponto (320, 240) é o mais inferior à direita. A matriz de pontos é a figura toda e não somente a da janela por onde se vê a régua.

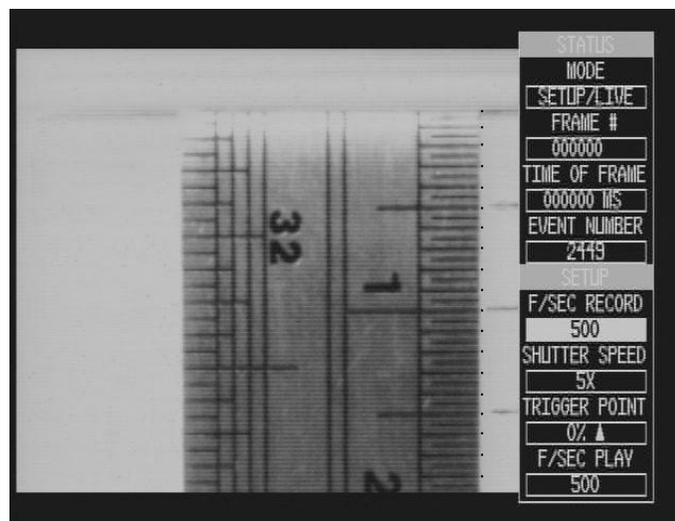


Fig. 4.2 Imagem com régua e pontos selecionados a cada milímetro.

Definida a referência para as coordenadas dos pontos da imagem, pode-se obter uma função de calibração quando se ajusta uma reta a esses pontos. A Fig. 4.3 apresenta um ajuste linear entre os pontos selecionados para cada milímetro da régua.

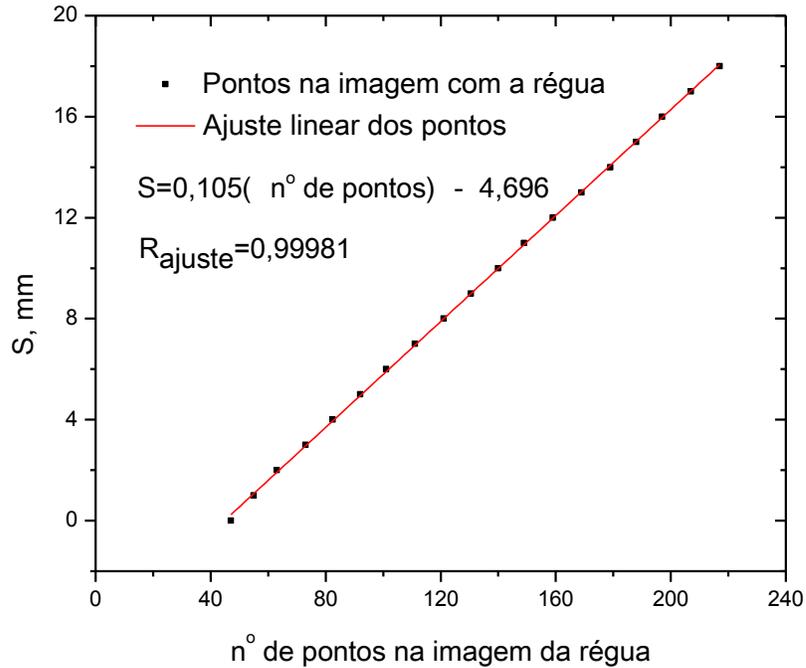


Fig. 4.3 Linearização dos pontos para calibração de uma imagem.

4.3 Análise dos Sinais e Redução dos Dados Experimentais

Nesse item, são descritos os procedimentos de análise e o equacionamento para redução dos dados de cada bancada.

4.3.1 Bancada estática

a. Tensão de saída da sonda

Foi feita uma média das 10 amostras de tensão adquiridas de cada espessura.

b. Capacitância do sensor

Foi feita uma média das 10 amostras de capacitância adquiridas de cada espessura com Agilent LCR.

4.3.2 Para a bancada dinâmica

Foi feita uma média dos sinais dos transdutores de pressão e do termopar adquiridos em cada teste dinâmico. Para os outros medidores a análise é a que segue.

a. Sonda capacitiva

Foi avaliado o espectro de frequências apresentado pela sonda utilizando o programa *LabView 8.5*, percebeu-se desse espectro frequência maiores de 150 Hz, que, entretanto, não tinham correspondência com as frequências de variação da espessura medidas pelas imagens. Também, foi percebida uma amplificação na frequência de 120 Hz no sinal da sonda, mas sem correspondente no espectro da espessura pelas imagens.

Por isso, os sinais da sonda foram tratados com um filtro passa-baixa frequências, com corte na frequência de 150 Hz. Também, foi aplicado um filtro corta-faixa para atenuar o sinal na frequência de 120 Hz. Considerou-se que essa amplificação era devida a uma harmônica da frequência da rede (60 Hz), pois ela ocorreu em todos os testes do escoamento bifásico.

Dos sinais tratados de cada teste foi feita uma média, tanto dos obtidos com a sonda quanto com a câmera.

b. Imagens da camada anular

As imagens da camada anular foram tratadas para identificação da interface do óleo na água e para medição da quantidade de pontos na imagem que são pretos. Um *software* capaz de fazê-lo, tratar e medir, é o *ImageJ* v. 1.41, de domínio público. Esse programa pode emitir relatórios com a quantidade de pontos pretos de cada imagem ou de uma determinada região delas.

Também, ele é capaz de gravar e executar macros (sequência de procedimentos) para um conjunto de imagens.

Foi desenvolvido um tratamento robusto para cada conjunto de 2000 imagens, pois aconteceram bolhas de ar e de óleo na água, e reflexos e bilhos na superfície do óleo.

As bolhas de ar aconteceram devido à ineficiência do tanque separador que, além de deixar passar água para o compartimento de óleo, succionava ar junto com os outros dois.

Os procedimentos para o tratamento são descritos abaixo e as imagens obtidas em cada um deles são, respectivamente, apresentadas na Fig. 4.5.

Saturação

As imagens fornecidas pela câmera são de 8 bits, 256 tons de cinza, e são transformadas em imagens binárias, ou seja, em preto ou branco. Deve-se escolher um tom de cinza a partir do qual um tom mais escuro se tornará preto e um tom mais claro se tornará branco. Esse procedimento é chamado de saturação e transforma a imagem em uma binária.

O *ImageJ* apresenta para cada figura um histograma da frequência de pontos por cada tom de cinza. Escolhe-se, para cada conjunto de imagens, o tom abaixo do qual ocorrerá a saturação, conforme apresentado na Fig. 4.4.

Nesse procedimento, define-se, também, se uma bolha de ar na água ficará branca ou preta. Como as bolhas são fontes de incerteza na medição da espessura da camada de água tanto para a câmera quanto para a sonda, preferiu-se contabilizar as bolhas de ar como se fossem óleo porque a permissividade relativa do ar (1,0005) é próxima da do óleo (2,65).

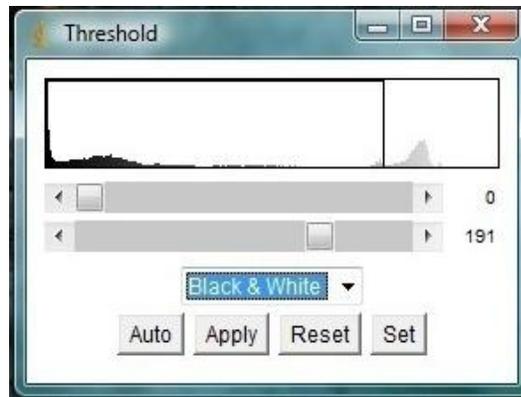


Fig. 4.4 Histograma para escolha da saturação.

Media

Faz-se uma média de uma interface de *pixels* aplicando o filtro *Median* no *ImageJ* com um raio de 2 *pixels*. Isso faz com que em cada superfície dentro desse raio seja feita uma média entre os pontos.

Preenchimento

Utiliza-se uma ferramenta para preencher os “buracos” na parte preta da imagem que são devidos aos brilhos e reflexos da luz e às bolhas de ar sobre a superfície do óleo na imagem. Antes de fazê-lo, deve se recortar a parte da imagem que não será utilizada.

Filtro

Aplica-se um filtro para arredondar as superfícies com um raio de 5 pontos (*pixels*) ou retirar outras cuja área seja menor que a de um círculo com raio de 5 pontos.

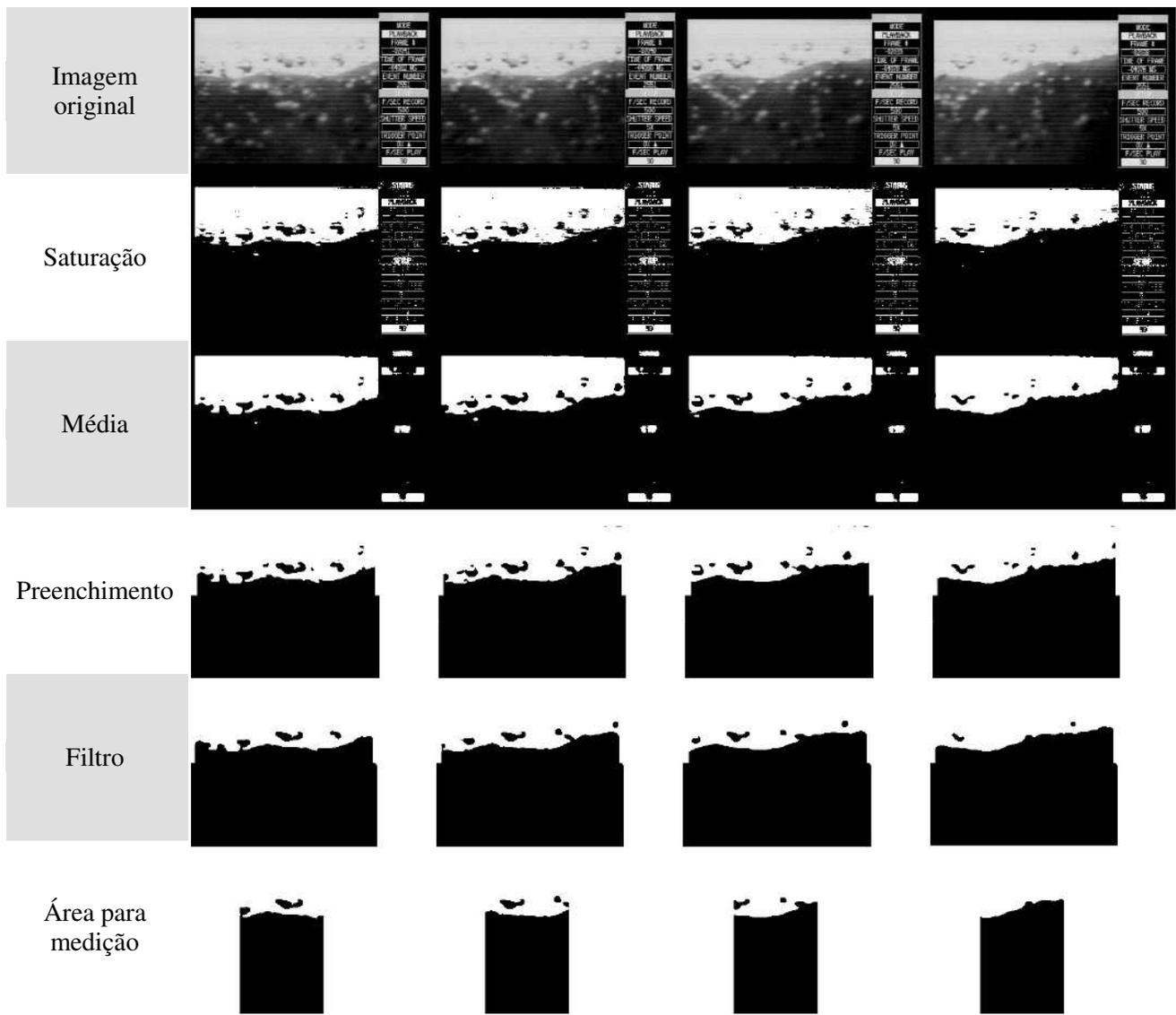


Fig. 4.5 Tratamento de uma sequência de imagens.

Área para medição

Por último, seleciona-se um retângulo, de 108x240 pontos na imagem, cuja quantidade de pontos pretos será contada pelo programa e considerada para a medição. Para efeito de cálculo, faz-se uma média das colunas de pontos ao longo do eixo do escoamento, ou seja, soma-se todos os pontos pretos e divide-se por 108. Com essa soma, as bolhas somam-se à superfície do óleo.

Considerando-se que o coeficiente angular da reta de calibração, apresentada na Fig. 4.3, valha também para a horizontal, o retângulo da área de medição tem 11,3x25,2 [mm].

A escolha do tamanho desse retângulo deve ser coerente com aquela feita no procedimento de saturação de se contabilizar as bolhas de ar como óleo. Preferiu-se escolher um retângulo mais largo para que não se corresse o risco de uma bolha, em uma coluna estreita de pontos, representar a superfície toda como óleo na imagem.

4.3.3 Função de conversão das imagens em uma espessura

Para converter quantidade de pontos da imagem em milímetros de espessura de camada anular de água foi utilizada uma função onde se entra com a quantidade de pontos pretos (óleo) de uma coluna de pontos que, subtraídos da quantidade total de pontos da coluna, corresponderá a quantidade de pontos brancos (água). Como a água sempre está na posição superior da figura, basta que se multiplique a quantidade de pontos pela função de calibração obtida com a régua.

$$S = 0,105(PB) - 4,696 \quad 4.9$$

onde o número de pontos de água é:

$$PB = PC - PP \quad 4.10$$

onde PB é o número de pontos brancos, PC é o número de pontos da coluna e PP é o número de pontos pretos.

A incerteza nessa medida, relativa à de determinação da interface do escoamento pela imagem, que é de 1 ponto (*pixel*), é de $\pm 0,05$ mm.

4.3.4 Caracterização do escoamento nos testes dinâmicos

Para se caracterizar o escoamento de cada teste foram adquiridas duas pressões do escoamento, uma vez que não se tinha medidores de vazão disponíveis: a pressão do óleo (P3) a

nas proximidades do injetor (50 cm antes do encontro dos fluidos) e a pressão do escoamento (P4) dali 8 m.

Assim, para cada escoamento, tem-se um par de pressões que o caracteriza: uma pressão de início do escoamento, pois devido à pequena distância a montante do bocal injetor, pode assim ser considerada, e uma de perda de carga.

Tabela 4.1 Caracterização do escoamento.

Dia	Teste	P3 [KPa]	P4 [KPa]	Temp. amb. Média [°C]	S média câmara [mm]
1	1	48,4	45,3	24,4	3,84
	2	62,5	56,8	24,4	3,12
	3	72,3	65,5	24,4	1,44
2	1	46,5	39,1	22,7	3,85
	2	45,4	38,9	22,7	3,54
	3	45,5	39,0	22,7	3,88
	4	84,3	71,8	22,8	2,39
	5	84,4	71,6	22,8	1,45
	6	89,1	76,3	22,8	1,68
	7	88,1	75,3	22,9	2,71
	8	87,5	75,0	22,9	2,33
	9	86,1	73,3	22,9	2,12
	10	84,2	72,9	22,9	2,39
	11	65,1	57,5	22,9	3,55
	12	66,9	59,4	22,9	3,17
	13	66,6	59,7	22,9	3,43
	14	39,9	36,9	22,9	3,21
	15	40,4	37,0	22,9	3,54
	16	40,7	37,2	22,9	3,54
	17	38,6	36,0	23,0	3,24
18	38,5	35,8	23,0	2,90	
19	38,6	36,0	23,0	2,97	
20	39,3	36,1	23,0	3,01	
3	1	38,8	34,9	23,8	2,26
	2	38,6	35,0	23,8	2,22
	3	38,0	34,4	23,8	2,17
	4	37,9	34,4	23,8	2,23
	5	31,8	29,7	23,9	2,92

Para cada escoamento caracterizado e estável foram avaliadas as espessuras da camada anular do escoamento: pela sonda capacitiva e pelas imagens da câmera. Sendo que, para isso, a aquisição delas se inicia simultaneamente.

A Tabela 4.1 caracteriza o escoamento de cada teste realizado. Os testes foram realizados em dias diferentes. Também, no segundo dia foram realizados mais testes para se verificar se com maiores vazões, e assim maiores pressões estáticas, se obteria menores espessuras da camada anular.

Capítulo 5

Apresentação e Discussão dos Resultados

5.1 Introdução

Os resultados foram divididos em estáticos e dinâmicos. Ou seja, aqueles obtidos na instalação de testes estáticos e na instalação de testes dinâmicos, respectivamente, descritas anteriormente no Cap. 3.

Os resultados estáticos mostram algumas características da Sonda, tais como: a tensão elétrica na saída do transdutor em função da espessura da camada anular de água com diferentes propriedades dielétricas, a sensibilidade desse sistema, sua faixa de medição e os efeitos da condutância dos fluidos na distribuição do campo elétrico entre seus eletrodos. Em operação no campo, a água poderá alterar sua condutividade elétrica devido a variações de sua salinidade ao longo do escoamento.

O transdutor foi avaliado para a medição da capacitância e os efeitos volumétricos da sonda foram estudados visando medir a espessura da camada de água ao longo do eixo tubo.

Os resultados dinâmicos mostram uma comparação das espessuras obtidas através das imagens da câmera filmadora com as espessuras medidas com a sonda capacitiva.

5.2 Resultados dos Testes Estáticos

Com o objetivo de se estudar o efeito do sal na condutividade da água, foram utilizados dois tipos de água para a formação da camada anular: uma da rede hidráulica da Unicamp e outra destilada. Dessas águas, foram medidas propriedades elétricas tais: permissividade relativa, dissipação dielétrica e permissividade relativa complexa (soma complexa das anteriores) utilizando-se o Agilent LCR operando com um sinal de frequência 1 MHz.

As análises que seguem foram feitas a partir das variações da espessura da camada anular de cada água utilizando-se o transdutor desenvolvido no projeto. O Agilent LCR foi utilizado como transdutor de referência. Para isso, o mesmo conjunto de eletrodos da seção de medida foi conectado a um ou a outro equipamento.

Para uma avaliação do transdutor da sonda como medidor da capacitância foram medidas, para as mesmas condições de espessura, materiais e frequências de sinal, as capacitâncias no sensor com o transdutor e o Agilent LCR. Na Fig. 5.1, são apresentadas as respostas de cada medidor e a incerteza de medição do Agilent LCR, cujo cálculo foi baseado no equacionamento proposto pelo fabricante no manual Agilent (2000).

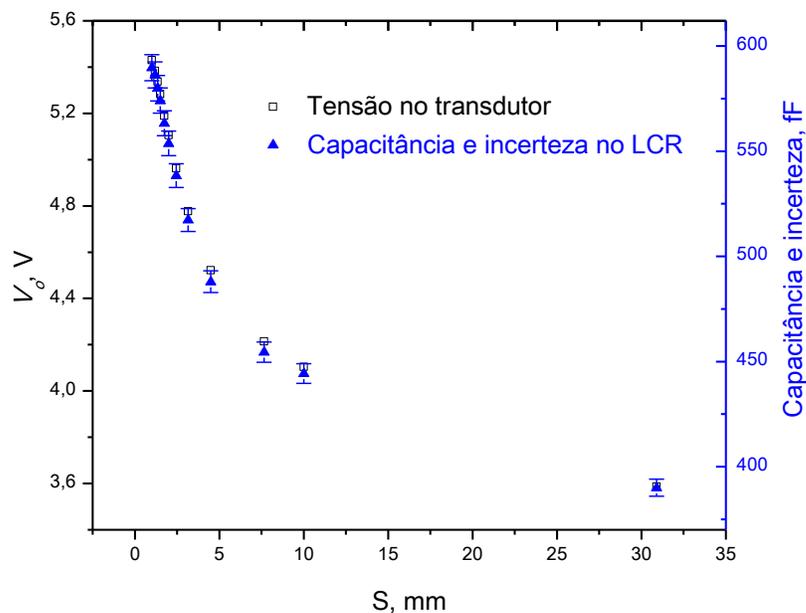


Fig. 5.1 Comparação entre o transdutor e o Agilent LCR.

A resposta do transdutor da sonda, em Volt, e do Agilent, em Faraday, foram proporcionais e, numa escala, para cada 10 mV na saída do transdutor teve-se 1,1 fF na saída do Agilent LCR. Ou seja, se a saída do transdutor apresentou 4 V, o Agilent LCR apresentou 440 fF.

5.2.1 Resposta da sonda em função da espessura da camada anular de água

Durante os testes, a temperatura das águas manteve-se entre 23,5 e 23,8 °C. Os resultados são apresentados no gráfico da Fig. 5.2, onde a ordenada é a tensão na saída do transdutor, V_o , e a abscissa é a espessura da camada anular de água, S .

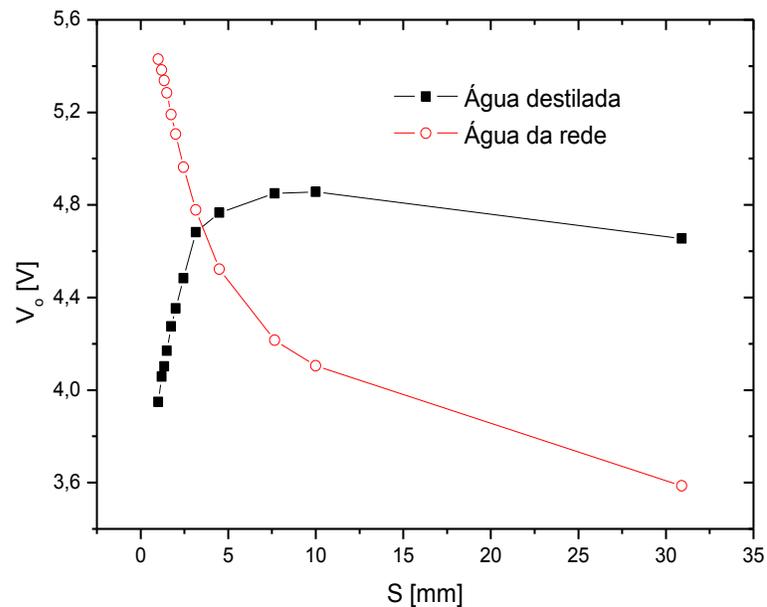


Fig. 5.2 Resposta da sonda em função da espessura da camada anular de água.

Para maior certeza dos resultados, foram feitas replicatas desses testes, conforme procedimento experimental descrito no item 4.1. Até por que os resultados dos testes estáticos com o transdutor e com o Agilent LCR foram equivalentes, conforme apresentado na Fig. 5.1 onde foi utilizada água da rede, e ainda, coerentes com os resultados, para essa mesma água, apresentados na Fig. 5.2.

Dentre as replicatas, houveram diferenças nas respostas devido à temperatura ambiental. Isso porque o transdutor apresenta uma deriva (*drift*) na tensão de saída devido aos efeitos da temperatura nos semicondutores responsáveis pela detecção e geração de seus sinais. Dos Reis (2003) apresenta uma análise desses efeitos em relação à temperatura ambiente.

A influência disso nos resultados da Fig. 5.2, entretanto, é desprezível, pois esses testes foram realizados em um tempo total de, no máximo, 8 min com o transdutor já aquecido.

A partir dos dados da Fig. 5.2, pode-se estimar a sensibilidade estática Γ da sonda ao longo da faixa de medida da espessura S . A sensibilidade é definida como sendo $\Gamma = dV/dS$ (FIGLIOLA; BEASLEY, 2006), portanto, ela pode ser aproximada como sendo a inclinação dos trechos de reta que interligam os pontos dos testes experimentais da Fig. 5.1 da seguinte forma: $\Gamma \cong \Delta V/\Delta S$ ou $\Gamma \cong (V_n - V_{n-1})/(S_n - S_{n-1})$, onde n representa o número do ponto de 1 a 12. Assim, pode-se calcular 11 valores de Γ .

A Fig. 5.3 apresenta a distribuição de Γ tanto para água destilada quanto para a água da rede, onde, para valores positivos, o gráfico da curva é decrescente e para valores negativos ele é crescente. Próximo a $S = 1$ mm, ocorre um ponto de inflexão no gráfico de Γ para a água da rede indicando uma mudança brusca na taxa de decrescimento do gráfico da Fig. 5.2.

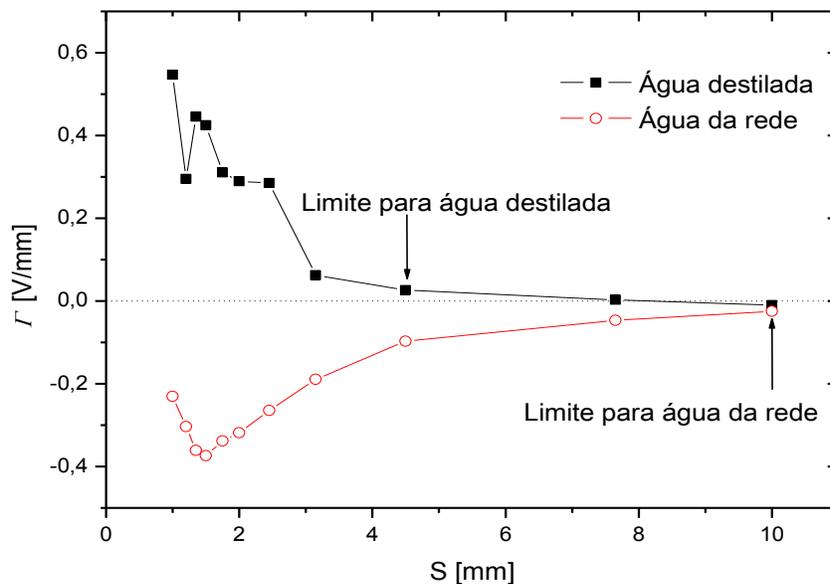


Fig. 5.3 Sensibilidade da sonda para ambos os tipos de água.

A inflexão da sensibilidade entre os três pontos de menores espessuras da água destilada se deve principalmente à alta sensibilidade nessa região e ao fato do campo elétrico se distorcer na interface entre a água e o vidro, conforme explicado no próximo item.

Outra informação importante na Fig. 5.3 é a tendência de Γ a zero com o aumento da espessura S da camada de água. Deve haver um limite da medida da espessura para o qual uma mínima variação sua não seja assim registrada no sistema de aquisição. Assim, considerando-se que o limite de sensibilidade da sonda é determinado pela resolução do sistema de dados e pelo ruído na tensão de saída da própria sonda para uma condição estática de medição (capacitância constante), e sabendo-se que a resolução do sistema de aquisição, apresentado no ítem 3.3, de 16 bits é de 0,305 mV, uma estimativa deste limite de sensibilidade pode ser determinado da seguinte forma: calcula-se o desvio padrão de uma amostra de sinal e obtém-se, para um intervalo de confiança de 95%, um desvio de 0,5mV. A raiz da soma dos quadrados desses valores corresponde a 0,58 mV

A faixa de medida de S da sonda tanto para a água destilada quanto para a água da rede pode ser adotado como sendo aquele em que $\Gamma \geq 0,025$ V/mm, isto é, neste limite, variações de cerca de 0,1 mm de S provocariam variações de cerca de 2,5 mV na saída do transdutor, que correspondem a cerca de quatro vezes a estimativa do limite de sensibilidade. Nesse limite de sensibilidade, pode se considerar que a resolução na espessura é de $\pm 0,025$ mm.

Para a água destilada a faixa é de 1 a 5 mm e para a água da rede de 1 a 10 mm. Para a água da rede, o início de ambas as faixa é diferente devido ao comportamento das curvas que foi estudado mais detalhadamente através de método numérico como exposto nos itens a seguir.

A Fig. 5.2 permite observar um comportamento distinto das curvas de resposta de tensão elétrica versus espessura da camada de água. Há dois fatores que provocam este comportamento: a espessura da parede do tubo e o sal dissolvido nas águas testadas, conforme discutido a seguir.

a. Efeito da espessura da parede do tubo de vidro

Para água destilada com condutividade elétrica baixa, segundo Jaworski e Bolton (2000), esse comportamento se deve à espessura da parede do tubo de vidro, que está entre o sensor e a água na camada anular, e acontece com maior intensidade quando os eletrodos fonte e sensor são adjacentes na tubulação. Uma possível explicação para este fenômeno é baseada no exame da Fig. 5.3, retirada de Hayt Jr e Buck (2001), pg. 146, onde $\mathbf{D}_1 = \varepsilon_1^* \mathbf{E}_1$ e $\mathbf{D}_2 = \varepsilon_2^* \mathbf{E}_2$ são os vetores de densidade de fluxo elétrico, ε_1^* e ε_2^* as permissividades dielétricas complexas dos meios 1 e 2, \mathbf{E}_1 e \mathbf{E}_2 os vetores campo elétrico e θ_1 e θ_2 os ângulos com a direção normal à interface entre os meios. Para meios isotrópicos e sem a presença de cargas distribuídas ao longo da interface, a equação que rege o fenômeno é:

$$\varepsilon_1^* D_1 \text{ sen } \theta_1 = \varepsilon_2^* D_2 \text{ sen } \theta_2 \quad 5.1$$

Como os eletrodos foram montados externamente ao tubo de vidro, a explicação para o comportamento observado na Fig. 5.2 é a forte distorção do campo elétrico quando sai de um meio para outro, ou seja, quando sai do vidro e entra na água (próximo ao eletrodo fonte) e quando sai da água e entra no vidro (próximo ao sensor), causando, por conseguinte, fortes alterações na distribuição das cargas ao redor do eletrodo sensor.

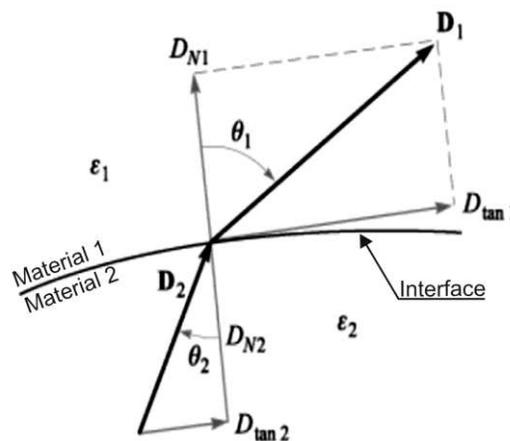


Fig. 5.4 Refração do campo elétrico através da interface entre dois meios com diferentes permissividades dielétricas (HAYT JR; BUCK, 2001).

A Tabela 5.1 apresenta os valores das propriedades das águas obtidas com o medidor de LCR junto com os acessórios de testes de fluidos e sólidos: permissividade relativa complexa (ϵ_r^*), permissividade relativa (ϵ_r'), dissipação dielétrica (ϵ_r''). Estas propriedades foram obtidas utilizando-se metodologia, equacionamento e dispositivos apresentados nos Apêndices A e B. Como pode ser visto, a permissividade dielétrica ϵ_r' da água destilada é da ordem 16 vezes a do vidro.

Tabela 5.1 Propriedades dielétricas dos materiais ($j = \sqrt{-1}$).

	ϵ_r^*	ϵ_r'	ϵ_r''	Temp. amb. [°C]
Água da rede	79,0 - 406,1j	79,0	406,1	23,3
Água Destilada	78,6- 14,4 j	78,6	14,4	23,2
PTFE	2 - 0,001j	2	0,001	23,2
Vidro Borossilicato	5 - 0,001j	5,0	0,001	23,2
Ar	1,0005 - 0,0001j	1,0005	0,0001	23,2

Sabe-se que houve uma parcela de condutividade elétrica pela água destilada ($\epsilon_r''=14,4$), pois não se conseguiu isentar água utilizada na sonda, cuja permissividade fora medida posteriormente, de sais e óxidos.

Os resultados deste item apontaram uma grande desvantagem da opção pela montagem externa dos eletrodos devido às distorções do campo elétrico. Outra opção seria uma montagem interna, isto é, com a superfície dos eletrodos alinhada com a parede interna da tubulação mantendo a não-intrusividade do sistema. Para isso, deve ser feito um tratamento na superfície dos eletrodos para que não “molhem” ao óleo, pois, caso ocorra impregnação de óleo nessa superfície, os efeitos serão os mesmos de uma superfície dielétrica, como o vidro no caso dos eletrodos externos, entre o eletrodo e a água.

Entretanto, a complexidade aumentaria pelo fato da distribuição do campo elétrico depender também de ambas as parcelas da permissividade dielétrica relativa complexa: ϵ_r' e ϵ_r'' , isto é da forma com que a corrente elétrica total transpassaria os meios. Porém, há diferenças de defasagem entre ambas as componentes da corrente elétrica, isto é, enquanto está em fase com o sinal de excitação, relacionada à dissipação dielétrica ϵ_r'' , a outra está deslocada em 90° , relacionada à permissividade ϵ_r' . Portanto, no transdutor eletrônico, poder-se-ia prover a devida separação destas componentes para que apenas aquela devida a ϵ_r' seja calibrada em função da espessura da camada anular de água na seção de medida. Ademais, a literatura descreve outros fenômenos que poderiam estar presentes nesta condição, tais como polarização interfacial (RAJU, 2003) e impedância de contato (ALME; MYLVAGANAM, 2006).

b. Efeito do sal dissolvido na água

Neste item, o efeito do sal é estudado utilizando-se modelagem da distribuição do campo elétrico na seção de medida da sonda através das equações de Maxwell. Para a solução foi utilizado o Método dos Elementos Finitos – MEF (DOS REIS, 2009).

Em relação ao efeito da condutividade elétrica da água devido ao sal, a Fig. 5.2 mostra que, para uma espessura da camada de água menor do que cerca de 3 mm, a tensão elétrica foi maior para água da rede do que para água destilada. Por outro lado, para espessuras maiores do que 3 mm, o comportamento foi o oposto.

Os fenômenos eletromagnéticos são descritos através das quatro Equações de Maxwell: (i) a Lei de Gauss para campos elétricos, (ii) a Lei de Indução de Faraday, (iii) a Lei de Gauss para campos magnéticos e a (iv) Lei de Ampère. As hipóteses de que os materiais na seção são isotrópicos e de que a intensidade do campo magnético induzido é desprezível são suficientes para o cálculo das distribuições dos campos elétricos através da Lei de Gauss, para a geometria da sonda e dos materiais propostos. Se for adotada também a hipótese de que não há cargas livres no interior da seção, mas apenas no corpo dos eletrodos cujo potencial elétrico é fixo, então:

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) + j\omega\epsilon(r)] \nabla\phi(x, y, z) = 0 \quad 5.2$$

onde σ é a condutividade elétrica do material em S/m, $\omega = 2 \pi f$ é a velocidade angular em rad/s, $\varphi(x,y,z)$ é a distribuição do potencial elétrico com $E = - \nabla\varphi(x,y,z)$ e $j = \sqrt{-1}$. Caso os eletrodos sejam montados externamente ao tubo de material dielétrico e os materiais na seção sejam considerados dielétricos perfeitos com $\sigma = 0$ S/m, a equação 5.2 se torna a seguinte equação de Laplace:

$$\nabla \cdot \varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z) = 0 \quad 5.3$$

Com o intuito de esclarecer o efeito do sal dissolvido, foram realizadas, por Dos Reis em 2008, simulações bidimensionais (2D), isto é, foi considerado que não havia variações do potencial ao longo do eixo axial da sonda.

Conforme apresentado na Tabela 5.1, a hipótese de que $\sigma = 0$ S/m parece ser satisfatória para o vidro e para o PTFE, que possuem baixas condutividades elétricas; portanto, esta hipótese seria válida somente para o caso da água destilada. Para este caso, a equação 5.3 acima seria válida.

Segundo Alme e Mylvaganam (2006) para que o divergente devido à permissividade e à condutividade equacionado na eq. 5.2 seja resolvido num domínio onde existam ambos efeitos devem ser resolvidas para as duas parcelas paralelamente ou harmonicamente.

Já o modelo de Debye, que correlaciona a parcela real e a imaginária da permissividade complexa a partir de parâmetros como frequência, condutividade elétrica, permissividade elétrica do vácuo e outros (RAJU, 2003), permite calcular a condutividade elétrica a partir dos valores de ε_r'' apresentado na Tabela 5.1. Assim, para o caso da água da rede em que $\sigma \cong 0,023$ S/m e, portanto, não é desprezível, a eq. 5.2 deve ser resolvida ao invés da 5.3.

As capacitâncias da solução 2D da eq. 5.3, para diferentes espessuras da camada de água (DOS REIS, 2008), foram comparadas com os valores de tensão elétrica medidos na saída do transdutor. Entretanto, para água para uma frequência de excitação f fixa igual a 1 MHz e condutividade dos materiais desprezível, a tensão elétrica de saída pode ser interpretada como diretamente proporcional à capacitância, como é o caso dos testes com água destilada da Fig. 5.1.

A Fig. 5.4, abaixo, compara os valores de capacitância medidos com o Agilent LCR conectado aos eletrodos da seção de medida com os valores calculados numericamente. Os valores teóricos calculados por comprimento de eletrodos, isto é, em [pF/m], foram multiplicados pela largura do eletrodo sensor de 3×10^{-3} m (3 mm) conforme discutido no item 2.1.1.

Na Fig. 5.4, diferenças entre os gráficos dos dados experimentais e numéricos podem ter sido provocados por uma série de fatores: (i) diferenças da geometria dos componentes na seção de medida devido à tolerância de fabricação das partes (diâmetro e espessura do tubo de vidro, dimensões dos eletrodos, da blindagem, etc.); (ii) presença de alguma salinidade na água destilada como pode ser observado no valor de ϵ_r'' da Tabela 1; (iii) efeitos devido à presença de partes metálicas próximo à seção, tal como a dos flanges com potencial zero devido ao aterramento da blindagem (veja a Fig. 2.2), que podem influenciar a distribuição do campo elétrico entre os eletrodos. Este último efeito é discutido com mais detalhes no item a seguir.

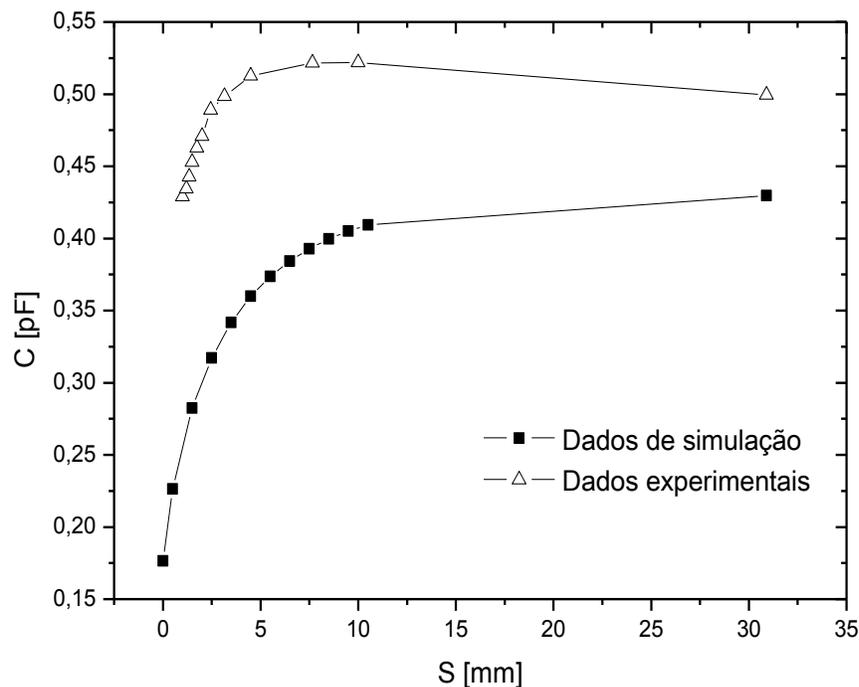


Fig. 5.5 Resultados de simulação e experimentais com água destilada.

Da mesma forma, a eq. 5.3 pode ser resolvida para a distribuição das condutividades elétricas dos materiais $\sigma(x,y,z)$, isto é, a equação de Laplace também permite calcular a distribuição do potencial elétrico no interior da seção quando as permissividades dielétricas de todos os materiais são desprezíveis ($\varepsilon = 0$ F/m) ou quando a velocidade angular $\omega = 2 \pi f$ ou a frequência do sinal f forem suficientemente baixas. A Fig. 5.5 apresenta os resultados destas simulações com várias espessuras da camada de água. Da mesma forma que no caso anterior, os valores da capacitância C apresentados na ordenada foram calculados a partir da definição $C = Q/\Delta V$, onde ΔV é a diferença de potencial elétrico entre o eletrodo fonte e o sensor e Q é a quantidade de cargas elétricas distribuídas na superfície do eletrodo sensor. Vale ressaltar que os valores de C são muito mais baixos do que aqueles apresentados no gráfico da Fig. 5.4 pelo fato da condutividade do vidro ser muito baixa, sendo $\sigma \cong 2 \pi f \varepsilon_r'' \varepsilon_0 \cong 0,05563 \mu\text{S/m}$, onde ε_0 é a permissividade dielétrica do vácuo ($\varepsilon_0 = 8,8542 \text{ pF/m}$) de acordo com o modelo de Debye (RAJU, 2003).

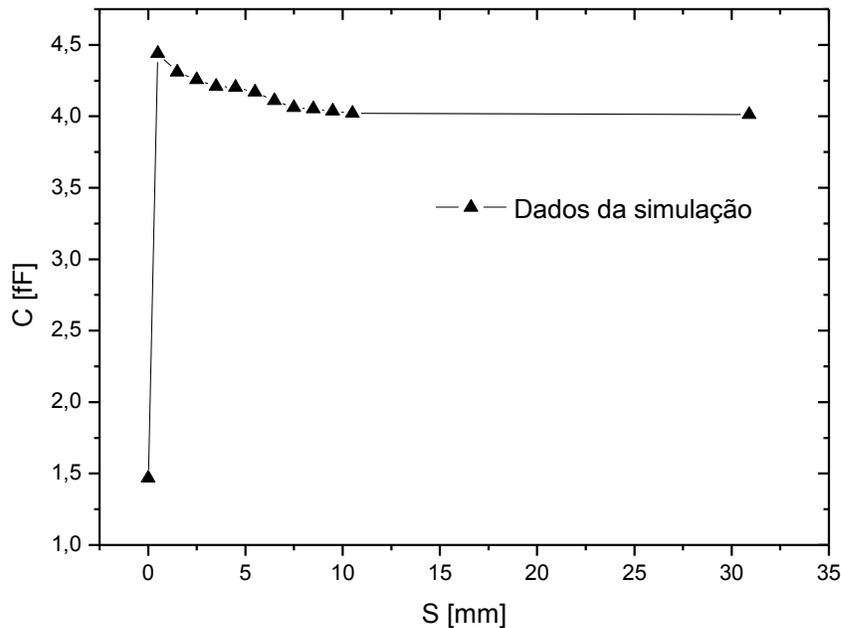


Fig. 5.6 Resultados de simulação com permissividade dielétrica dos materiais igual a zero.

Em relação aos dados experimentais da Fig. 5.1, sabe-se que, dentre as tendências dos pontos da água da rede, deverá haver uma derivada nula entre uma espessura anular entre zero e 1 mm semelhante ao observado na Fig. 5.5, ou seja, um ponto de máximo, pois caso a tubulação estivesse cheia de PTFE, o que seria impossível, deveria se ter uma tensão de saída no transdutor menor que a de tubo cheio d'água (último ponto à direita na figura). Essa característica foi verificada, medindo-se a saída do transdutor quando a seção de medida estava cheia de ar ($\varepsilon \cong 1$) com permissividade próxima da do PTFE ($\varepsilon \cong 2$), que foi de 2,93 V.

Na prática, a menor espessura da camada anular foi de 1 mm devido às irregularidades do vidro que poderiam interferir com tarugos de diâmetros maiores que 59,8 mm. Poderia ter sido feito um teste com a tubulação cheia de óleo com as mesmas propriedades dielétricas do PTFE, porém, isso custaria tempo para a pesquisa do material (com as mesmas propriedades dielétricas do PTFE) e, quando nos testes, para a limpeza do equipamento.

Conclui-se, portanto, que a distribuição do campo elétrico na camada anular de água sofre forte influência da salinidade, sendo que uma possível forma de eliminar o problema seria instalar os eletrodos internamente, ao invés de externamente, a fim de eliminar a influência do tubo e depois, eletronicamente, separar as componentes relativas à condutividade e à permissividade dielétrica, já que elas se encontram defasadas em 90° .

c. Aterramentos adicionais

Distorções do campo elétrico entre eletrodos flutuantes (não aterrados) e os flanges (Fig. 2.3) da unidade de suporte podem influenciar na capacitância C_{s2} (item 1.2.3b). Esses efeitos foram considerados na simulação numérica na qual foi baseado o projeto da unidade de suporte e do sensor, por isso tomou-se o devido cuidado para que os eletrodos ficassem distantes de 99,5 mm dos flanges. Os flanges, a blindagem, os eletrodos de guarda e toda a tubulação do escoamento estarão em contato elétrico e aterrados.

5.2.2 Efeitos da distribuição axial da camada anular

Os efeitos da distribuição axial da camada anular têm a ver com a capacidade da sonda de reproduzir variações da espessura na direção axial, tal como a presença das ondas características do *core-flow*. O chamado efeito volumétrico tem a ver com o fato de que o campo de sensibilidade da sonda se distribui ao longo de uma região finita ao redor dos eletrodos, sendo que variações adjacentes provocam distorções do campo ao redor de todo o conjunto como um “efeito em cascata”. Como o objetivo é o desenvolvimento de uma sonda que possa operar em condições reais de escoamento, neste item são apresentados dados para a avaliação desse efeito volumétrico. Conforme descrito no item 3.1.2, a idéia foi a de provocar uma perturbação através da passagem de um anel de PTFE com dimensões conhecidas através da região dos eletrodos. Através da comparação do formato do anel com os sinais registrados na saída do transdutor, procurou-se avaliar o efeito volumétrico.

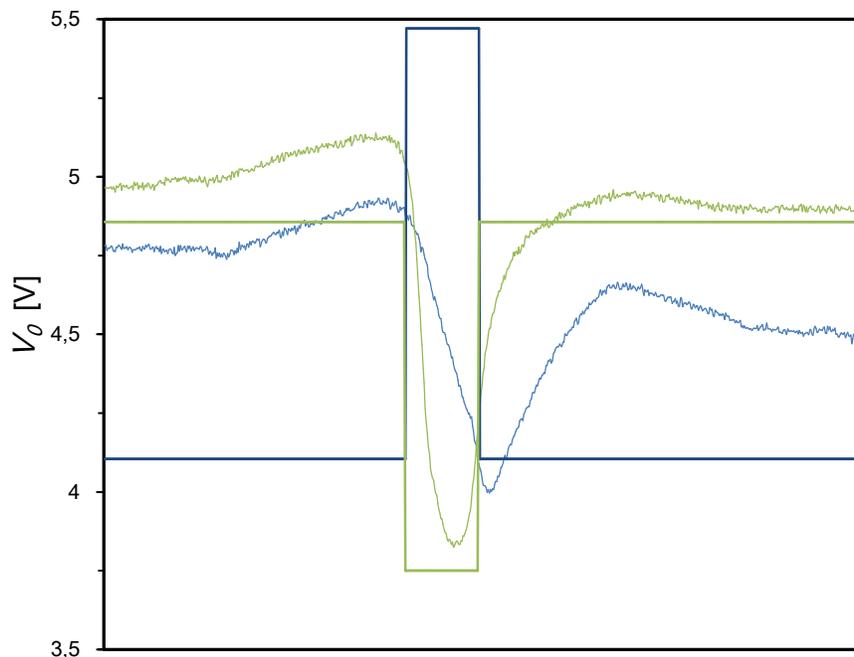
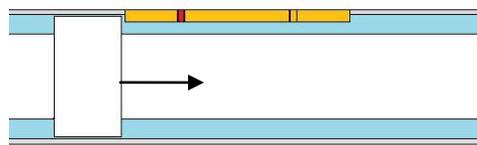
Avaliaram-se os efeitos axiais na medição do sensor quando a água na camada anular era da rede ou destilada. Para se fazer essa avaliação, mediu-se, no tempo, quando o anel passava em velocidade constante, a tensão apresentada na saída do transdutor quando o mesmo media a corrente conduzida pelo eletrodo sensor.

Essa análise é possível já que se pode considerar a medição do conjunto sensor – transdutor como independentes do tempo e tão somente dependente do espaço. Porque: a) devido à frequência do sinal aplicado ao eletrodo fonte ser alta (1 MHz), e, assim, a cada período de transmissão do potencial (1 μ s), tem-se uma disposição das fases nas proximidades do sensor que determinará uma capacitância; quaisquer mudanças na disposição das fases que ocorram nesse intervalo de tempo poderão ser desconsideradas, b) e, também, a taxa de mudança da saída a um estímulo instantâneo (*slew rate*) do amplificador operacional (OPA627, *Texas Instruments*) utilizado no transdutor é, nas condições de um ganho de 4, da ordem de 100 V/ μ s.

Com a passagem do anel de PTFE pela região da sonda, busca-se informações que permitam analisar a capacidade da sonda capacitiva em reproduzir os perfis das ondas quando estiver em operação no *core-flow*. Na Fig. 5.6, estão apresentados os sinais adquiridos com água destilada e água da rede.

Foram assumidos, por hipótese, dois outros perfis que representam uma resposta ideal baseada naquela onde variou-se somente a espessura transversalmente ao eixo do tubo, mostrada na Fig. 5.2, do tubo reprodução do perfil do anel que, pela forma geométrica, representaria uma onda de perfil “quadrado”.

Os sinais do sensor na cor vermelha foram sobrepostos na figura com a representação da posição do anel que, na bancada, deslocou de baixo para cima, mas que na figura foi representado com deslocamento da esquerda para a direita a fim de que o eixo do tempo ficasse na horizontal.



Posição do anel, em escala com o desenho dos eletrodos

- Água da rede
- Água destilada
- Tensão esperada água da rede
- Tensão esperada água destilada

Fig. 5.7 Tensão transduzida no eletrodo sensor em vermelho (no desenho acima) em função da posição do anel com água destilada.

Para explicar melhor esse comportamento, o sensor pode ser avaliado como uma fatia da área total de recepção do potencial do fonte (guardas e sensor), conforme discutido no subitem 2.1.1 . A corrente induzida no sensor será, então, diretamente proporcional à densidade das cargas no fonte, quando o sensor for uma área infinitesimal da área total de recepção do potencial do fonte (guardas e sensor), no caso 3,3% da área total.

Quando o anel está na borda do fonte, ele isola o campo elétrico que era transmitido por ali direcionando e concentrando-o para uma região mais próxima do sensor e fazendo com que ele meça uma densidade de carga maior. Isso acontece para as respostas do sensor para as duas águas, pois a tensão é máxima quando o anel está na entrada do lado do sensor. Na saída do anel existe uma tensão máxima local que, entretanto, não supera a da entrada devido a sua distância ao eletrodo sensor considerado, porque a distorção do campo vai se atenuando até alcançá-lo.

À medida que o anel fica mais próximo do sensor e mais no meio do eletrodo fonte, a transmissão do potencial do fonte para o sensor e para os guardas diminui. Em ambas respostas houve essa diminuição da transmissão, entretanto, no caso da água da rede, a diferença entre a tensão máxima e a mínima foi menor que no caso da destilada. Além do que, o ponto de tensão mínima da água da rede foi deslocado da resposta ideal esperada, que seria quando o anel estivesse na frente do sensor, mostrando que predomina na resposta o efeito de distorção do campo, entretanto atenuado pelo efeito da distorção do campo na transversal discutido no subitem 5.2.1a.

5.3 Resultados dos Testes Dinâmicos

As espessuras das camadas anulares no escoamento foram obtidas de duas formas, através das imagens da câmera e do sinal do transdutor da sonda capacitiva.

O foco da câmera foi ajustado, quando na calibração da imagem com a régua, no plano vertical de simetria do tubo de forma a obter uma imagem paralela ao eixo, na espessura superior da camada anular. Os eletrodos foram disposto de tal forma que pela linha que divide os eletrodos sensor e fonte passasse o plano vertical de simetria do tubo. Dessa forma, tem-se que ambos estariam medindo, majoritariamente, a mesma espessura de uma camada anular de água.

5.3.1 Resposta da sonda em função da espessura da camada de água das imagens

Foram adquiridos, num mesmo intervalo de tempo, os sinais de tensão na saída da sonda e as imagens da câmera relativas a um determinado escoamento. Os testes foram realizados em dias diferentes, e por isso, caracterizando um conjunto de testes diferente. Cada conjunto de testes foi feito no decorrer de, no máximo, uma hora.

Abaixo, são comparadas as respostas das médias de tensão de saída do sensor com as médias de espessura das imagens, num intervalo de tempo, caracterizando um ponto. Em cada início e final de um conjunto de testes foram adquiridas as tensões de saída da sonda para tubo com somente água. Esses pontos são apresentados como espessura anular igual ao raio do tubo (30,9 mm).

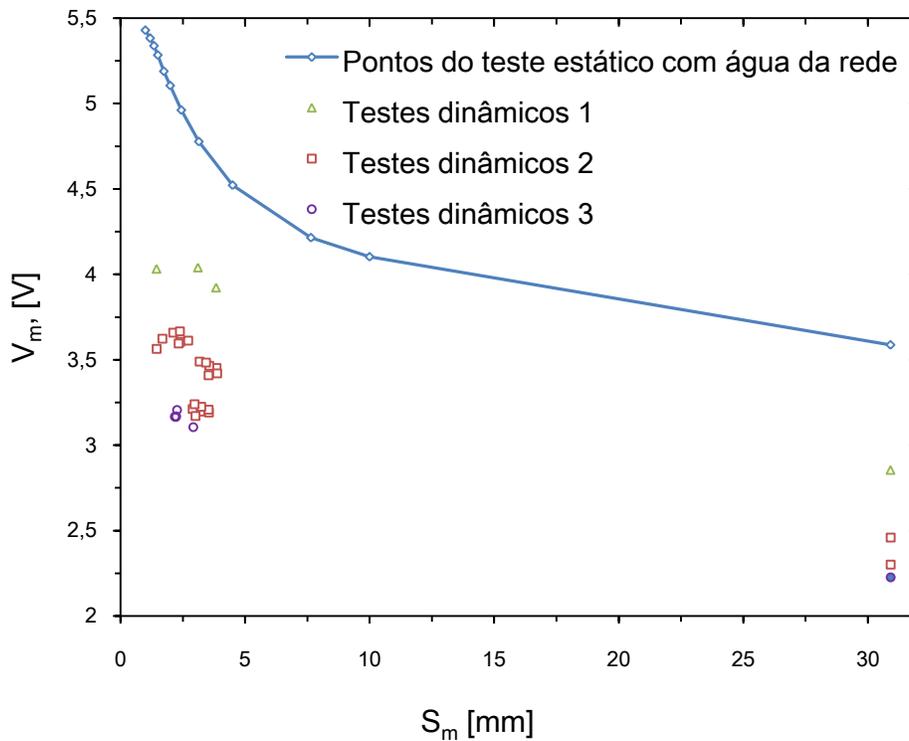


Fig. 5.8 Tensão de saída média por espessura média da camada anular.

São apresentados, também no gráfico acima, os pontos do teste estático que caracterizariam uma média espacial da espessura para o sensor. Para isso, considera-se que a média temporal da saída da sonda nos testes dinâmicos equivalem a uma média espacial da espessura da camada no

escoamento. Isso porque o tempo de resposta do transdutor a uma mudança da capacitância é de pelo menos 1 ms (DOS REIS, 2003), considerando-se que alterações da distribuição espacial das fases num intervalo de tempo de até 1 ms são pequenas e, então, lineares para o transdutor nesse tempo.

Além do fato da resposta da sonda não ser linear em função da espessura e , então, uma média aritmética da saída não representa a média de espessura no escoamento. A explicação para a diferença entre os resultados, uma vez que a água e tampouco o óleo do sistema foram trocados, é a alteração do grau de emulsão do óleo, a ionização da água por sais e íons que estavam no óleo, e outros que já estavam nela, a temperatura dos fluídos e a temperatura e umidade ambientais.

A influência da alteração do grau de emulsão do óleo não é tão significativa quanto a alteração da salinidade da água, pois, conforme apresentado no Apêndice A, a permissividade relativa de uma emulsão com 40% de água em óleo é de 8,85.

5.3.2 Utilização da resposta estática como método de calibração

Já que, conforme pode ser observado na Fig. 5.7, os pontos representados pelos pares coordenados (média da tensão elétrica na saída do transdutor de capacitância e média da espessura medida com a câmera filmadora) para cada um dos três conjuntos de testes dinâmicos, estão deslocados verticalmente para baixo em relação à curva com os pontos obtidos na bancada de testes estáticos para água da rede (Fig. 5.1), propôs-se utilizar uma curva de tensão elétrica adimensional assumindo como hipótese que estas variações advêm, principalmente, das mudanças das propriedades elétricas da água.

Para uma comparação entre os pontos de cada teste, adimensionalizou-se a tensão elétrica de cada teste, $V_{o,s}$, dividindo-a pela tensão apresentada com o tubo cheio de água em cada conjunto de testes dinâmicos, $V_{o,a}$, enquanto que a espessura média S permaneceu dimensional. Adimensionalizou-se também os pontos do teste estático. A Fig. 5.8 apresenta os dados com a média da tensão elétrica adimensional (ζ_m).

$$\zeta = \frac{V_o}{V_{o,a}}$$

5.4

Como sugestão para uma equação de calibração, fez-se o ajuste de uma função potência nos pontos do teste estático. A função potência foi a que mais se aproximou desses pontos.

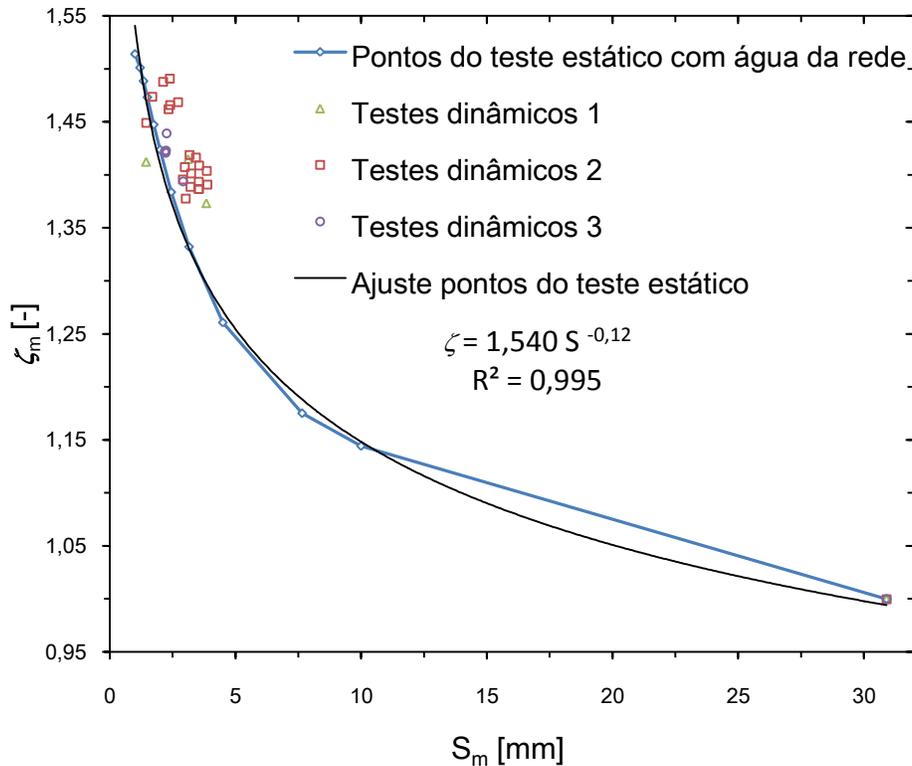


Fig. 5.9 Tensão média adimensional por espessura média da camada anular.

Esse procedimento adimensionalização elimina as variações da permissividade dielétrica da água devidas à temperatura e à salinidade. Isso porque o meio de maior influência na sensibilidade da sonda é a água, pelo fato da água estar mais próxima do eletrodo que o óleo e sua permissividade ser mais de 10 vezes maior que a dele.

Um gráfico com os pontos do teste estático e a função inversa do ajuste exponencial é apresentado na Fig. 5.10. Sendo que a função de ajuste e sua inversa são, respectivamente:

$$\zeta = 1,540 S^{-0,12}$$

5.5

$$S_{son} = (0,649\zeta)^{-1/0,12} \quad 5.6$$

Pode ser calculada uma incerteza devida ao ajuste pelo método *RSS* conforme a equação abaixo:

$$\Delta\tau_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_n (\Delta S)^2}{(n-1)}} \quad 5.7$$

$$U = t \Delta\tau_{xy} / \sqrt{n} \quad 5.8$$

onde ΔS é a diferença entre uma espessura dada função inversa do ajuste e uma experimental, n é o número de pontos e t é o coeficiente de *Student* para um intervalo de confiança de 95% (HOLMAN, 1996).

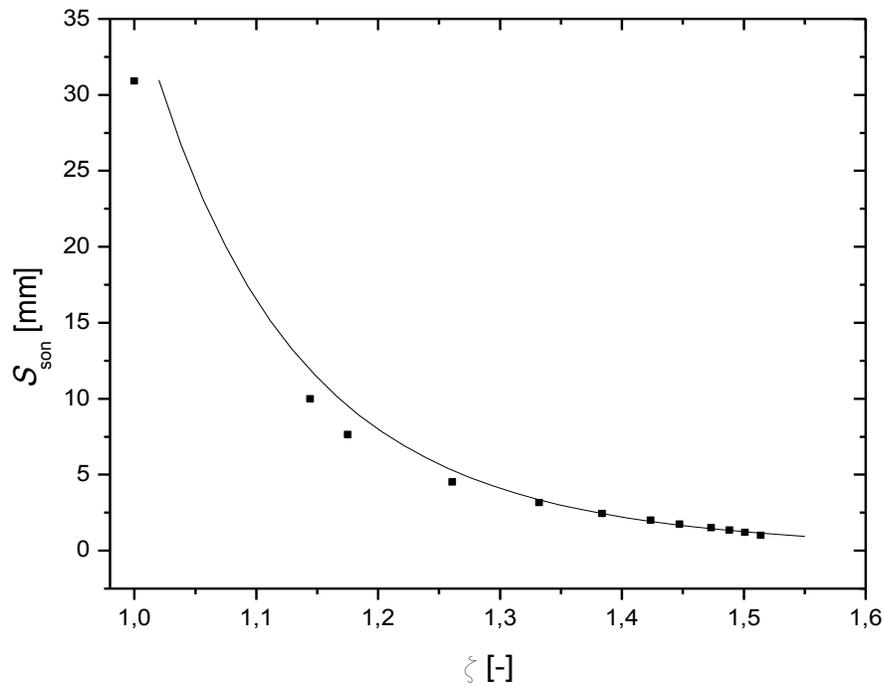


Fig. 5.10 Espessura pela tensão adimensional.

Para se obter uma incerteza total na medida da espessura pela sonda, a incerteza do ajuste (U) deve ser contabilizada juntamente com a incerteza da espessura dada pela geometria dos tarugos e do diâmetro interno, que foi determinada no item 2.1.4. A incerteza total, utilizando-se o mesmo método da raiz da soma dos quadrados (RSS) para o cálculo, foi de $\pm 0,65$ mm.

Desconsiderou-se a incerteza em espessura devida ao circuito de transdução, apresentada no item 5.2.1, que, para a menor sensibilidade detectável pelo sistema, foi de $\pm 0,05$ mm. Isso porque, quando considerada na forma adimensional, através da eq. 5.4, será ainda menor em relação a incerteza devida ao ajuste e à geometria.

A fim de se verificar a consistência da eq. 5.5, que é o ajuste dentre os pontos do teste estático, como forma de calibração do sensor, foram realizadas comparações das espessuras médias medidas com a sonda capacitiva com as medidas com a câmera filmadora. Para isso, foram calculadas as espessuras da camada de água assumindo-se como curva de calibração a função inversa de $\zeta = f(S)$, isto é, $S_{son} = f^{-1}(\zeta)$.

Depois de transformadas as tensões adimensionais em espessuras, fez-se a média destas e comparou-se com a média das espessuras medidas pelas imagens. Os dados são apresentados nos gráficos das Fig. 5.9, onde a linha $S_{son,m} = S_{im,m}$ em preto representa a condição ideal.

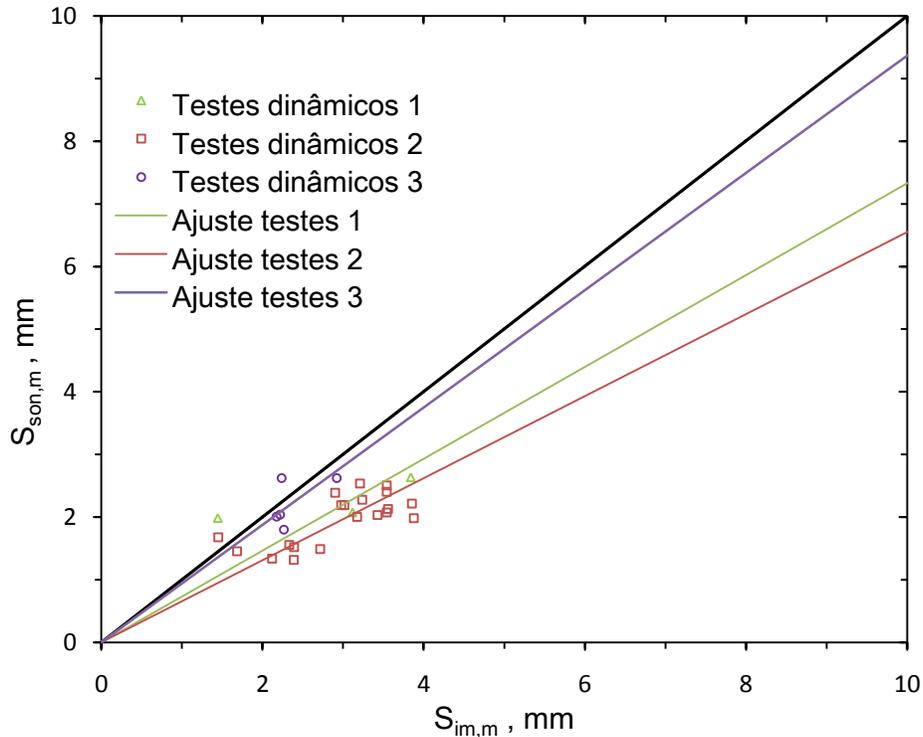


Fig. 5.11 Espessura média a partir da sonda pela espessura média das imagens para cada teste.

Para cada teste dinâmico, obteve-se a variação da espessura de água na camada anular do *core-flow* medidos pela câmera (imagens) e pela sonda capacitiva como apresentado na figura seguinte. Conforme discutido no item 3.2.2c, a câmera filmadora e a sonda capacitiva estavam distanciadas cerca de 1,3 m, portanto, os sinais apresentados nos gráficos não podem ser comparados diretamente através de superposição simples, mas os valores de picos e vales e as faixas de frequências trazem informações importantes sobre o desempenho da sonda. A Fig. 5.12 apresenta os dados de um teste obtidos no domínio do tempo, enquanto que a Fig. 5.13 apresenta os mesmos dados no domínio da frequência.

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam dados sobre as diferenças dos sinais gráficos da espessura da medida pela sonda capacitiva e pelas imagens da câmera filmadora: espessuras da camada de água máxima e mínima, $S_{máx}$ e $S_{mín}$, espessura média, S_m , desvio padrão das espessuras, δS , no domínio do tempo e intervalo da frequência cuja frequência limite foi determinada como sendo aquela que faz com que 95% do espectro esteja contido no intervalo desde 0 Hz, Δf , e a

frequência dominante como sendo aquela relacionada ao maior valor do espectro de potência, f_{dom} .

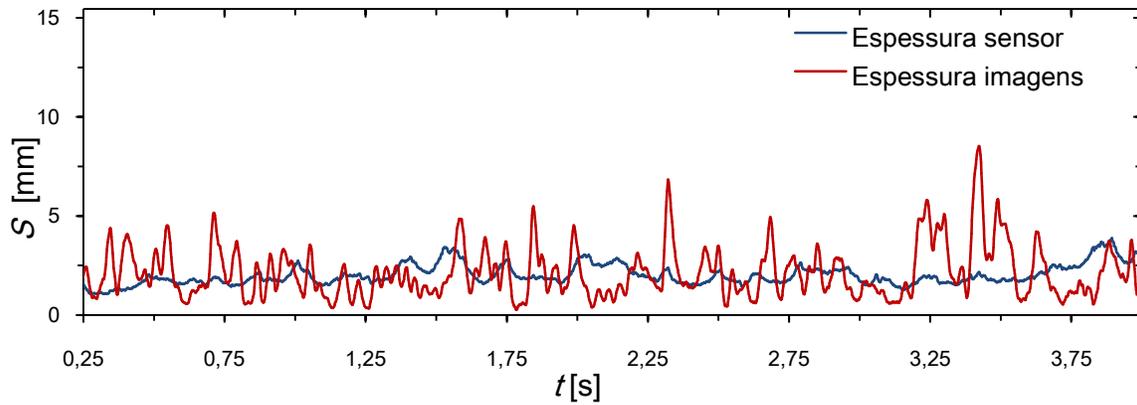


Fig. 5.12 Espessura obtida com a sonda em comparação com a obtida das imagens no teste 3 do dia 3.

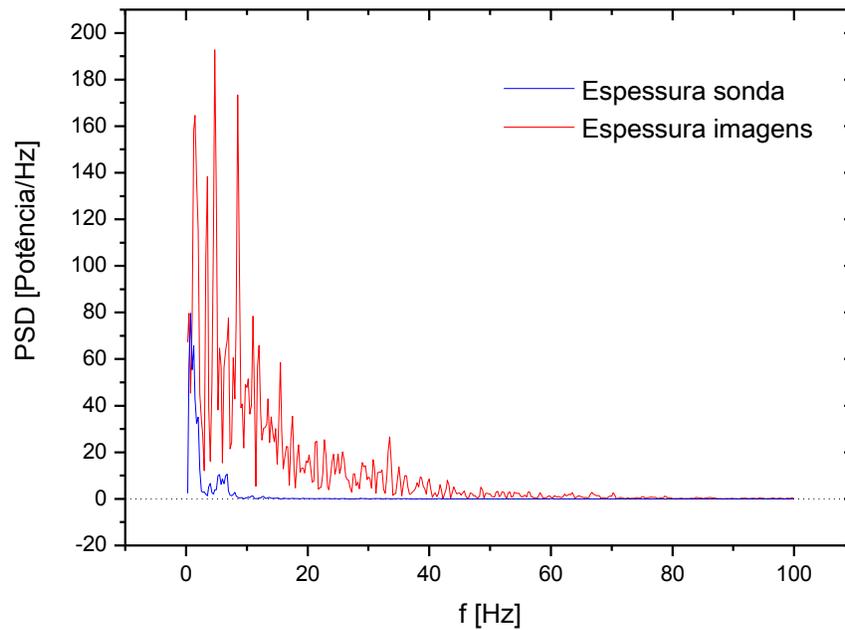


Fig. 5.13 Espectros de potência - comparação com a obtida das imagens e com a sonda no teste 3 do dia 3.

Da Fig. 5.12 e das Tabelas 5.2 e 5.3, verifica-se que, na média, os valores de espessura medidos com a sonda são ligeiramente menores dos que os medidos com as imagens da câmera filmadora, isso aconteceu em todos os testes. Este fato tem relação com o que foi observado junto á Fig. 5.9. As faixas de amplitude $S_{máx} - S_{min}$ dos sinais registrados pelos dois sistemas também foi diferente, com as da câmera sempre maiores do que a da sonda capacitiva, este fato também é claramente observado nos gráfico do espectro de potência. Este resultado mostra que esta sonda capacitiva se porta como um filtro passa-baixa com frequência de corte da ordem de 5 Hz. Isto já havia sido observado com os dados apresentados no item 5.2.2 obtidos com a passagem de um anel de PTFE durante os testes na bancada de testes estáticos.

Conclui-se, portanto, os dados mostram que o procedimento de adimensionalização das tensões elétricas, pela eq. 5.4, permite que os dados de calibração da sonda na bancada de testes estáticos sejam utilizados nos testes dinâmicos. Este procedimento tem a vantagem de transformar a tensão de saída da sonda em valores de espessura com tarugos de PTFE, o que não seria possível na bancada dinâmica devido à fluidodinâmica do *core-flow*. Entretanto, novos estudos devem ser realizados a fim de se quantificar outros efeitos que estariam causando diferença nas medições.

Tabela 5.2 Informações dos dados de espessura da camada de água obtidos com a câmera.

		Domínio do tempo				Domínio da frequência	
Dia	Teste	$S_{máx}$ [mm]	S_{min} [mm]	S_m [mm]	δS [mm]	Δf [Hz]	f_{dom} [Hz]
3	3	11,47	0,14	2,17	1,59	0 a 43,5	4,75

Tabela 5.3 Informações dos dados de espessura da camada de água obtidos com a sonda.

		Domínio do tempo				Domínio da frequência	
Dia	Teste	$S_{máx}$ [mm]	S_{min} [mm]	S_m [mm]	δS [mm]	δf [Hz]	f_{dom} [Hz]
3	3	3,88	1,07	2,02	0,51	0 a 1,75	0,75

Também se conclui que há necessidade de se conceber um novo arranjo dos eletrodos de forma a aumentar a resolução espacial da sonda capacitiva, isto é, para que ela não suprima sinais

em frequência tão baixas quanto 5 Hz. Uma das formas seria eliminar os eletrodos de guarda e aumentar a largura do eletrodo sensor na direção axial da tubulação de tal forma que os efeitos de distorção do campo elétrico na borda axial sejam minimizados. O melhor compromisso é a maior razão entre a sensibilidade transversal e a axial do sensor.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões

Este trabalho estudou uma sonda capacitiva para medição da espessura da camada de água na região anular do escoamento anular óleo pesado-água, o *core-flow*.

Em relação a análise do comportamento da sonda em testes estáticos, pode-se concluir que:

1. A sonda não apresentou linearidade na curva de espessura versus tensão elétrica em sua saída. Sua resposta foi diferente para a água destilada e a água da rede. Há dois fatores que provocam este comportamento: a espessura da parede do tubo de vidro e a condutividade elétrica devido ao sal dissolvido nas águas testadas que altera permissividade dielétrica complexa distorcendo o campo elétrico.
2. Devido às diferenças de permissividade dielétrica entre o vidro e água, o campo elétrico sofre forte distorção quando os eletrodos são montados externamente ao tubo.
3. A distribuição do campo elétrico na camada anular de água sofre forte influência da salinidade, sendo que uma possível forma de eliminar o problema seria instalar os eletrodos internamente ao tubo de vidro, ao invés de externamente, a fim de eliminar a influência do vidro e, depois, eletronicamente, separar as componentes relativas à condutividade e à permissividade dielétrica, já que elas se encontram defasadas em 90° .

4. Os efeitos dos aterramentos adicionais podem ser minimizados montando-se os eletrodos distantes das partes metálicas como flanges e outros.
5. Os eletrodos de guarda foram adicionados a fim de limitar os efeitos de distorção junto às bordas do eletrodo sensor ou efeito volumétrico; porém, distorções adjacentes são fortemente percebidas na saída do transdutor tanto à montante quanto à jusante nas regiões dos respectivos eletrodos de guarda. Portanto, no futuro, deve-se pensar em novas formas de montagem dos eletrodos na seção a fim de limitar este efeito, sendo que uma alternativa é aumentar a largura do eletrodo sensor e eliminar os eletrodos de guarda, considerando-se, entretanto, que o aumento da largura do eletrodo sensor poderá atenuar frequências mais altas na medida da espessura.

Em relação à análise do comportamento da sonda nos testes dinâmicos, pode-se concluir que:

6. A sonda também é afetada por fatores como: grau de salinidade da água, temperatura da água e grau de emulsificação do óleo. Para os testes realizados, o efeito do grau de emulsificação foi mínimo, conforme discutido no item 5.3.1. Por outro lado, os efeitos do grau de salinidade da água e da temperatura foram minimizados através do procedimento de adimensionalização das tensões elétricas como discutido no item 5.3.2.
7. O efeito das variações de espessura da camada de água devido às ondas do escoamento foi analisado comparando-se os gráficos de espessura média versus tensão elétrica média na saída da sonda. Os dados indicaram que tal efeito, sobre a média, é mínimo, mostrando que os dados de calibração da sonda na bancada de testes estáticos podem ser nos testes dinâmicos nas condições examinada. Este procedimento tem a vantagem de transformar a tensão de saída da sonda em valores de espessura com tarugos de PTFE, o que não seria possível na bancada

dinâmica devido à fluidodinâmica do *core-flow*. Entretanto, novos estudos devem ser realizados a fim de se quantificar melhor tais efeitos que estariam alterando as medições.

8. Há necessidade de se conceber um novo arranjo dos eletrodos de forma a aumentar a resolução espacial da sonda capacitiva, isto é, para que ela meça uma espessura mais próxima daquela de uma seção transversal do escoamento. Uma das formas seria eliminar os eletrodos de guarda e aumentar a largura do eletrodo sensor na direção axial da tubulação de tal forma que os efeitos de distorção do campo elétrico na borda axial sejam minimizados.

Referências Bibliográficas

AGILENT TECHNOLOGIES. Agilent 16451B Dielectric Test Fixture: Operation and Service Manual. 3. ed. Japão, 2000. 149 p. Rev. junho de 2008. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/16451-90020.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2009.

AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent E4980A Precision LCR Meter: User's Guide*. 7. ed. Japão, 2008. 549 p. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E4980-90070.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2008.

ALME, K. J.; MYLVAGANAM, S. Electrical Capacitance Tomography - Sensor Models, Design, Simulations, and Experimental Verification. *Ieee Sensors Journal*, v. 6, n.5, p. 1256-1266. 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAS. ASTM. Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation: D150-98, 20 p. United States, 2004.

BANNWART, A. C.. Modeling Aspects of Oil-water Core-annular Flows. *Journal Of Petroleum Science And Engineering*, p. 127-143, 2001.

BANNWART, A. C.. Wavespeed and volumetric fraction in core annular flow. *Int. Journal of Multiphase Flow* 24, p. 961-974, 1998.

BELT, R. J. *On the liquid film in inclined annular flow*. Delft University of Technology. Doctor Thesis. 2007.

BIAZUSSI, J. L. Desenvolvimento de uma Técnica de Medida de Vazão de Óleo em Escoamento Bifásico do Tipo Core-Flow. 120 p. Dissertação de Mestrado – DETF, Unicamp, Campinas – SP, 2010.

BRIGGS, Peter J. *et al.* DEVELOPMENT OF HEAVY-OIL RESERVOIRS. *Journal Of Petroleum Technology*, p. 206-214. Fev. 1998.

CULLIVAN, J. C.; WILLIAMS, R. A.. Advanced Experimental Techniques: Velocity, Size, and Shape and Concentration Measurements of Particulate Mixtures. In: CROWE, Clayton T. *Multiphase Flow Handbook*. New York: Taylor & Francis Group, 2006. Cap. 14, p. 42-85.

DAMSOHN, M., PRASSER, H.-M. High-speed liquid film sensor for two-phase flows with high spatial resolution based on electrical conductance. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 20, p. 1–14. 2009.

DOS REIS, E. ; FLORES, F. A. C.; Moura, L. F. M. Numerical modeling of a capacitive probe for measuring the water layer thickness in the annular heavy oil-water flow. Em: 11th International Conference on MULTIPHASE FLOW IN INDUSTRIAL PLANTS, 2008, Palermo. *Proceedings ...*, 2008.

DOS REIS, E. Informações do autor. *Email*: emersonr@cefetsp.br. 2009.

DOS REIS, E.. *Estudo do escoamento pistonado horizontal ar-água em tubulações com ramificação “T”*. Universidade Estadual de Campinas, 2003, v.I, 600 p. Tese de Doutorado.

DYAKOWSKI, Y. A.. Advanced Experimental Techniques: Two-Component Fraction Measurement. In: CROWE, Clayton T. *Multiphase Flow Handbook*. New York: Taylor & Francis Group, 2006. Cap. 14, p. 21-29.

ESPI. *High Purity Metal Specialists: Kovar*. Disponível em:
<<http://www.espimetals.com/tech/kovar.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2009.

FIGLIOLA, R. S., BEASLEY, D. E. *Theory and design for mechanical measurements*. John Wiley e Sons, 2000.

GALVIS, R. A. M. Simulação Numérica do Comportamento do Sensor de Capacitância para Monitoramento de Escoamento Multifásico do Tipo Core-Flow. 2009. 96 p. Dissertação de Mestrado – DETF, Unicamp, Campinas – SP, 2009.

GEORGE D. L., TORCZYNSKI J. R., SHOLLENBERGER K. A., O'HERN T. J., CECCIO S. L. Validation of electrical-impedance tomography for measurements of material distribution in two-phase flows, *Int. J. Multiphase. Flow*, v. 26, p. 549–581. 2000.

GHOSH, S.; MANDAL, T.K.; DAS, G; DAS, P.K. Review of oil water core annular flow. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 8, p.1957-1967, Out. 2009.

GRANZOTTO, Desiree. *Modelagem e Projeto de um Sistema de Controle Aplicado ao Escoamento Bifásico de Óleo Viscoso e Água em Padrão Anular*. 2008. 94 f. Dissertação (Mestre) – DEP/ Unicamp, Campinas-SP, 2008.

HAYT, W. H. Jr.; BUCK, J. A. *Engineering Electromagnetics*. McGraw-Hill Books, New York, 6th Ed., 2001.

HAMMER, E. A.. Advanced Experimental Techniques: Two-Component Fraction Measurement. In: CROWE, Clayton T. *Multiphase Flow Handbook*. New York: Taylor & Francis Group, 2006a. Cap. 14, p. 2-7.

- HAMMER, E. A.. Advanced Experimental Techniques: Two-Component Fraction Measurement. In: CROWE, Clayton T. *Multiphase Flow Handbook*. New York: Taylor & Francis Group, 2006b. Cap. 14, p. 8-10.
- HASSON, D.; MANN, U.; NIR, A. Annular Flow of Two Immiscible Liquids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 48. Outubro, 1970.
- HOLMAN, J. P. *Experimental Methods for Engineers*. McGraw-Hill Books, New York, 2nd Ed., 1996.
- HUANG, S. M.; STOTT, A. L.; GREEN, R. G.; BECK, M. S.. Electronic transducer for industrial measurement of low value capacitances. *Journal of Physics E – Scientific Instruments*, v. 21, n. 3, p. 242-250, 1988.
- HURLBURT, E. T., NEWELL, T. A..Optical Measurement of liquid film thickness and wave velocity in liquid film flows. *Air Conditioning and Refrigeration Center*, University of Illinois. Set. 1995.
- JAWORSKI, A J; BOLTON, G T. The design of an electrical capacitance tomography sensor for use with media of high dielectric permittivity. *Meas. Sci. Technol*, Machester - Reino Unido, v. 11, p.743-757, 08 mar. 2000.
- JOHANSEN, G. A. Advanced Experimental Techniques: Gamma-Ray Densitometry. In: CROWE, Clayton T. *Multiphase Flow Handbook*. New York: Taylor & Francis Group, 2006. Cap. 14, p. 42-85.
- JOSEPH, D. D.. Lubricated Pipeline. *Syncrude*, 2000. Disponível em:
<<http://m.njit.edu/~kondic/pasi/files/joseph-lubeSlides.ppt>>. Acesso em: 07 abr. 2009.

- JOSEPH, D. D.; BAI, R.; CHEN, K. P.; Renady, Y. Y.. Core-annular flows. *Annual Review on Fluid Mechanics*, p. 65-90, 1997.
- LEBLOND, J.; STEPOWSKI, D.. Some non-intrusive methods for diagnosis in two-phase flows. In: HEWITT, G. F.; DELHAYE, J. M.. *Multiphase Science and Technology Vol 8*. Washington, DC: Hemisphere, 1994. p. 715-782.
- MARSHALL, B; W; TIEDERMAN, W. G.. A capacitance depth gauge for thin liquid films, *Review of Scientific Instruments*, v. 43, p. 544. 1972.
- MATOS, D. do Rio. *Projeto mecânico de sonda capacitiva para monitoramento e controle de "Core-Flow"*. 2008. 19 p. Relatório de Iniciação Científica - Departamento de Térmica e Fluidos, Unicamp, Campinas-SP, 2008.
- MORSE, P.M. AND INGARD, K.U., *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, New York, 1968.
- MUSTAFA, R. O.; JOHN C. C.; NIKOLAI, E.. A capacitance method for measurement of film thickness in two-phase flow, *Review of Scientific Instruments*, v. 44, p. 1714. 1973.
- NYFORS, E. G. Cylindrical microwave resonator sensors for measuring materials under flow. Helsinki University of Technology. Doctor Thesis. 2000.
- O'BRIEN, T. E.. *Robust Design Strategies for Nonlinear Regression Models*. University of Georgia, 1996. Disponível em: <<http://webpages.math.luc.edu/~tobrien/research/versuchsplanung96.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2009.
- PTFE. Disponível em: <<http://www.aulun.com/PTFE-Properties.htm>>. Acesso em: 2 set 2009.
- RAJU, G. G. *Dielectrics in Electric Fields*. Nova Yorque: Marcel Dekker, 2003. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=JPcjS9L4wFOC&dq=raju+dielectric+electric+fields&prints>>

Anexos

1 Programa para Determinação das Espessuras da Camada Anular

```
C *****
C *      PROGRAMA COMPUTACIONAL - TARUGOS.FOR      *
C *      AUTOR: EMERSON DOS REIS (SETEMBRO DE 2008)      *
C *      DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS - DETF      *
C *      FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA - FEM      *
C *      UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP      *
C *****
C
C PROGRAM TARUGOS
C
C COMMON /BLK1/ IN,IO,ID
C COMMON /BLK2/ A1,A2,A3,A4,A5
C
C INTEGER NP,L,M,IN,IO,ID,NG
C REAL*8 ES(3000),CAP(3000),D,E,EE1,A(5),S,A1,A2,A3,A4,A5,SMAX,TOL,
C * SDEF(500),SUM
C
C DEFINICAO DOS PARAMETROS DE ENTRADA E SAÍDA DE DADOS
C
C IN=5
C IO=8
C ID=9
C IT=10
C
C ABERTURA DOS ARQUIVOS DE ENTRADA E SAIDA
C
C OPEN(IN,FILE='OUTPUT.DAT')
C OPEN(IO,FILE='TARUGOS.DAT')
C OPEN(ID,FILE='DADOS.DAT')
C OPEN(IT,FILE='SAIDA.DAT')
C
C *****
C *      SUBROTINA DE LEITURA DOS DADOS      *
C *****
C
C CALL INPUT(NP,ES,CAP)
C
```

```

C *****
C * CHAMADA DA SUBROTINA DE AJUSTE DAS CURVAS C VERSUS ES DE ACORDO *
C * COM O MODELO: A(2)*(1.-EXP(-X/A(3)))+A(3)*(1.-EXP(-X/A(4))), *
C * ONDE A(1), A(2), A(3), A(4) E A(5) SÃO OS COEFICIENTE A CALCULAR*
C * - CURVA AJUSTADA NOS PONTOS ORIGINAIS DE SIMULAÇÃO *
C *****
C
C CHUTE INICIAL
C
C A(1)=10.D0
C A(2)=10.D0
C A(3)=10.D0
C A(4)=10.D0
C A(5)=10.D0
C
C DEMAIS PARAMETROS
C
C L=5
C D=0.D0
C M=0
C E=1.D-10
C EE1=1.D-4
C
C CALL PARAM_LS(L,M,NP,D,E,EE1,A,ES,CAP)
C
C PARAMETROS DA CURVA AJUSTADA NOS PONTOS ORIGINAIS DE SIMULAÇÃO:
C A1, A2, A3, A4 E A5
C
C A1=A(1)
C A2=A(2)
C A3=A(3)
C A4=A(4)
C A5=A(5)
C
C *****
C * CHAMADA DA SUBROTINA DE ESCOLHA DOS DIÂMETROS DOS TARUGOS *
C *****
C
C SMAX=ES(NP)
C TOL=1.D-6
C CALL TARCALC(SMAX,TOL,NG,SDEF,SUM,A)
C
C *****
C * IMPRESSÃO DOS RESULTADOS *
C *****
C
C DESVIOS PERCENTUAIS DA CURVA AJUSTADA NOS PONTOS ORIGINAIS
C
C DO 42 I=1,NP
C S=ES(I)
C FS=F(S)
C WRITE(ID,40)I,ES(I),((FS-CAP(I))/CAP(I))*100.D0
C 42 CONTINUE
C
C DIÂMETROS DOS TARUGOS
C

```

```

DO 44 I=1,NG
  S=SDEF(I)
  WRITE(IO,43)I,SDEF(I),2.D0*(ES(NP)-SDEF(I)),F(S)
44 CONTINUE
C
  WRITE(IT,46)
  WRITE(IT,45)A1,A2,A3,A4,A5
  WRITE(IT,47)
  WRITE(IT,45)A(1),A(2),A(3),A(4),A(5)
  WRITE(IT,48)SUM
C
40 FORMAT(I6,7F15.6)
43 FORMAT(I5,3F10.3)
46 FORMAT(/ COEFICIENTES DA CURVA ORIGINAL')
47 FORMAT(/ COEFICIENTES DA CURVA COM NOVOS PONTOS')
45 FORMAT(5F10.5)
48 FORMAT(/ MÉDIA DO SOMATÓRIO DOS ERROS ABSOLUTOS =',E10.5)
C
  STOP
  END
C
C *****
C *          SUBROTINA DE LEITURA DOS DADOS          *
C *****
C
  SUBROUTINE INPUT(NP,ES,CAP)
C
  COMMON /BLK1/ IN,IO,ID
C
  INTEGER IN,NP
  REAL*8 RB,EE,TETA1,TETA2,ES(3000),RC,CAP(3000)
C
C  LEITURA DO ARQUIVO DADOS.DAT
C
  NP=0
10 CONTINUE
  READ(IN,*,END=20)I,RB,EE,TETA1,TETA2,ES(I),RC,CAP(I)
  NP=NP+1
  GO TO 10
C
20 RETURN
  END
C
C*****
C PARAMETRIC LEAST SQUARES CURVE FIT SUBROUTINE. THIS PROGRAM *
C LEAST SQUARES FITS A FUNCTION TO A SET OF DATA VALUES BY *
C SUCCESSIVELY REDUCING THE VARIANCE. CONVERGENCE DEPENDS ON *
C THE INITIAL VALUES AND IS NOT ASSURED. *
C N PAIRS OF DATA VALUES, X(I), Y(I), ARE GIVEN. THERE ARE L *
C PARAMETERS, A(J), TO BE OPTIMIZED ACROSS. *
C REQUIRED ARE INITIAL VALUES FOR THE A(L) AND E. ANOTHER *
C IMPORTANT PARAMETER WHICH AFFECTS STABILITY IS E1, WHICH IS *
C INITIALLY CONVERTED TO E1(L)FOR THE FIRST INTERVALS. *
C THE PARAMETERS ARE MULTIPLIED BY (1 - E1(I)) ON EACH PASS. *
C*****
C

```

```

SUBROUTINE PARAM_LS(L,M,N,D,E,EE1,A,X,Y)
C
PARAMETER(SIZE=300)
INTEGER I,L,M,N
REAL*8 D,E,EE1,A(L),X(SIZE),Y(SIZE),E1(L),A0,L1,L2,M0,M1
C
DO I = 1, L
E1(I) = EE1
END DO      ;
C
C   SET UP TEST RESIDUAL
C
C   L1 = 1.D6
C
C   MAKE SWEEP THROUGH ALL PARAMETERS
C
50 DO I = 1, L
A0 = A(I)
C
C   GET VALUE OF RESIDUAL
C
C   A(I) = A0
100 CALL S200(L,L2,N,D,A,X,Y)
C
C   STORE RESULT IN M0
C
C   M0 = L2
C
C   REPEAT FOR M1
C
C   A(I) = A0 * (1.D0 - E1(I))
CALL S200(L,L2,N,D,A,X,Y)
M1 = L2
C
C   CHANGE INTERVAL SIZE IF CALLED FOR
C   IF VARIANCE WAS INCREASED, HALVE E1(I)
C
C   IF (M1 > M0) THEN
E1(I) = -E1(I) / 2.D0
END IF
C
C   IF VARIANCE WAS REDUCED, INCREASE STEP SIZE BY INCREASING E1(I)
C
C   IF (M1 < M0) THEN
E1(I) = 1.2D0 * E1(I)
END IF
C
C   IF VARIANCE WAS INCREASED, TRY TO REDUCE IT
C
C   IF (M1 > M0) THEN
A(I) = A0
END IF
IF (M1 > M0) THEN
GOTO 100
END IF
END DO !I LOOP

```

```

C
C  END OF A COMPLETE PASS
C  TEST FOR CONVERGENCE
C
  M = M + 1
  IF (L2.EQ.0.) THEN
    RETURN
  END IF
  IF (ABS((L1 - L2) / L2) < E) THEN
    RETURN
  END IF
C
C  IF THIS POINT IS REACHED, ANOTHER PASS IS CALLED FOR
C
  L1 = L2
  GOTO 50
C
  END
C
C *****
C *           MODEL FUNCTION FOR FITTING           *
C *****
C
  SUBROUTINE S500(L,X,Y,A)
C
  REAL*8 X,Y,A(L)
C
  Y=A(1)+A(2)*(1.D0-DEXP(-X/A(3)))+A(4)*(1.D0-DEXP(-X/A(5)))
C
  RETURN
  END
C
C *****
C *           RESIDUAL GENERATION SUBROUTINE           *
C *****
C
  SUBROUTINE S200(L,L2,N,D,A,X,Y)
C
  PARAMETER(SIZE=300)
  INTEGER L,N,J
  REAL*8 D,L2,A(L),X(SIZE),Y(SIZE),XX,YY
C
  L2 = 0.
  DO J = 1, N
    XX = X(J)
C
  C  OBTAIN FUNCTION
  C
  CALL S500(L,XX,YY,A)
  L2 = L2 + (Y(J) - YY) * (Y(J) - YY)
  END DO
  D = DSQRT(L2 / DFLOAT(N - L))
C
  RETURN
  END
C

```

```

C *****
C *           RESIDUAL GENERATION SUBROUTINE           *
C *****
C
C SUBROUTINE TARCALC(SMAX,TOL,NGN,SDEF,SUM,AA)
C
C COMMON /BLK1/ IN,IO,ID
C COMMON /BLK2/ A1,A2,A3,A4,A5
C
C INTEGER IO,NG,I,L,M,K,NGN
C REAL*8 A1,A2,A3,A4,A5,SMAX,AUX(5),SUM,STAR(10000),STEP,SDEF(500),
C * DF1,DF2,X(300),Y(300),A(5),TOL,D,E,EE1,S,AA(5)
C
C VARIACÃO INICIAL DA DERIVADA PRIMEIRA
C
C DF0=1.D-1
C
C CALCULO ITERATIVO DOS PONTOS
C
C NG=1
C STAR(1)=0.D0
C DF1=DF(0.D0)
C K=0
C STEP=0.D0
C
C 50 CONTINUE
C K=K+1
C 60 IF(STEP.GT.SMAX) GO TO 62
C STEP=STEP+1.D-5
C DF2=DF(STEP)
C IF(DABS(DF1-DF2).GE.DF0)THEN
C NG=NG+1
C STAR(NG)=STEP
C DF1=DF(STEP)
C ENDIF
C GO TO 60
C
C 62 IF(NG.GT.300) THEN
C NG=1
C STAR(1)=0.D0
C DF1=DF(0.D0)
C DF0=DF0+1.D-1
C STEP=0.D0
C GO TO 60
C ENDIF
C
C DO 64 I=1,NG
C X(I)=STAR(I)
C S=STAR(I)
C Y(I)=F(S)
C 64 CONTINUE
C
C ULTIMO PONTO
C
C NG=NG+1
C X(NG)=SMAX

```

```

      Y(NG)=F(SMAX)
C
C   CHUTE INICIAL
C
      A(1)=10.D0
      A(2)=10.D0
      A(3)=10.D0
      A(4)=10.D0
      A(5)=10.D0
C
C   DEMAIS PARAMETROS
C
      L=5
      D=0.D0
      M=0
      E=1.D-10
      EE1=1.D-4
C
      CALL PARAM_LS(L,M,NG,D,E,EE1,A,X,Y)
C
      AUX(1)=A1
      AUX(2)=A2
      AUX(3)=A3
      AUX(4)=A4
      AUX(5)=A5
C
      SUM=0.D0
      DO 66 I=1,5
          SUM=SUM+DABS((A(I)-AUX(I))/AUX(I))
66   CONTINUE
      SUM=SUM/5.
C
      IF(SUM.GE.TOL.AND.K.NE.1)GO TO 68
C
      WRITE(*,*)K,NG,DF0,SUM
      NGN=NG
      DO 70 I=1,NG
          SDEF(I)=X(I)
70   CONTINUE
      DO 71 I=1,5
          AA(I)=A(I)
71   CONTINUE
      NG=1
      STAR(1)=0.D0
      DF1=DF(0.D0)
      DF0=DF0+1.D-1
      STEP=0.D0
      GO TO 50
C
68 CONTINUE
C
      RETURN
      END
C
C *****
C *           FUNÇÃO DO MODELO           *

```

```

C *****
C
C REAL FUNCTION F(X)
C
C COMMON /BLK2/ A1,A2,A3,A4,A5
C
C REAL*8 X,A1,A2,A3,A4,A5
C
C F=A1+A2*(1.D0-DEXP(-X/A3))+A4*(1.D0-DEXP(-X/A5))
C
C RETURN
C END
C
C *****
C * DERIVADA DA FUNÇÃO MODELO *
C *****
C
C REAL FUNCTION DF(X)
C
C COMMON /BLK2/ A1,A2,A3,A4,A5
C
C REAL*8 X,A1,A2,A3,A4,A5
C
C DF=(A2/A3)*(DEXP(-X/A3))+(A4/A5)*(DEXP(-X/A5))
C
C RETURN
C END
C
C *****
C * FIM DO PROGRAMA *
C *****

```

2 Incerteza de Medição dos Tubos de Vidro e Cilindros

Foram medidos o diâmetro interno dos tubos para construção da sonda e o diâmetro de 3 cilindros (tarugos de PTFE). No caso do tubo, interessa a medida e sua incerteza, já no caso dos tarugos interessa somente a incerteza, pois os mesmos foram usinados numa só máquina com diâmetros previamente determinados.

Tabela 2.1 Medição diâmetro interno dos tubos e externo dos tarugos.

UNICAMP		FOLHA DE REGISTROS MEDIÇÃO DE PEÇAS LABORATÓRIO DE METROLOGIA CENTRO DE TECNOLOGIA			PROCEDIMENTO:			
					PT-6254.0			
					REFERÊNCIA:			
					OS: 0328/2008			
		DATA: 13/11/2008		FOLHA: 01 de 01				
		Relatório de medição nº 540-06CT2008						
Empresa:	FEM - Faculdade de Engenharia Mecânica							
Peça:	2 tubos de vidro e 3 cilindros de teflon			Ident.:	não consta			
Referência	Laser, fabric. HP, certificado de calibração nº DIMCI1170/2006 INMETRO (validade 07/2010)							
Equip./Padrão:	Máquina universal de medição, fabricante Carl Zeiss Relógio comparador centesimal, fabricante Tesa, certificado de calibração nº216-06CT2006 - CT Unicamp (validade 06/2009) Comparador de diâmetros internos, fabricante Carl Mahr							
Observações	Medições nos pontos solicitados pelo cliente Medições realizadas em sentido horário Temperatura 20,40°C							
Executor:	Jose Ricardo Vulto			Visto:				
Cilindro 1		Valores obtidos (mm)						
D1	59,66	59,66	59,66	59,66	59,65	59,66	59,66	59,66
D2	59,69	59,69	59,68	59,68	59,69	59,69	59,69	59,69
	Média D1	59,66		Média D2	59,69			
Cilindro 2		Valores obtidos (mm)						
D1	58,27	58,27	58,27	58,27	58,27	58,27	58,27	58,27
D2	58,27	58,27	58,27	58,27	58,27	58,27	58,27	58,27
	Média D1	58,27		Média D2	58,27			
Cilindro 3		Valores obtidos (mm)						
D1	55,53	55,53	55,53	55,53	55,53	55,53	55,53	55,53
D2	55,53	55,52	55,53	55,52	55,53	55,53	55,53	55,53
	Média D1	55,53		Média D2	55,53			
Tubo 1		Valores obtidos (mm)						
D1	62,19	62,30	62,51	62,66	62,67	62,52	62,31	62,19
D2	62,12	62,25	62,46	62,63	62,61	62,47	62,28	62,15
	Média D1	62,42		Média D2	62,37			
Tubo 2		Valores obtidos (mm)						
D1	61,65	61,52	61,50	61,60	61,72	61,79	61,79	61,73
D2	61,66	61,55	61,56	61,66	61,77	61,85	61,84	61,77
	Média	61,66		Média	61,71			

	D1		D2	
--	-----------	--	-----------	--

Dispersão utilizada para o cálculo de incerteza

							desv pad
Cilindro 1 D1	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	0,00
Tubo 1 D1	62,19	62,19	62,19	62,19	62,19	62,19	0,00

Incerteza de medição dos tubos 0,02 mm, para k=2,4.

Incerteza de medição dos cilindros 0,02 mm, para k=2,6.

As incertezas de medição relatadas são declaradas como incertezas-padrão das medições, multiplicadas pelos fatores de abrangência respectivos (k) que, para uma distribuição normal, correspondem a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. As incertezas-padrão de medição foram determinadas de acordo com a publicação EA-402.

Apêndice A

Medição de Permissividade Relativa Complexa e Suas Componentes em Emulsões de Água em Óleo – A/O

A.1 Introdução

A utilização de instrumentos dedicados na medição fração de vazio, *holdup* e outras relações pertinentes em escoamentos multifásicos trouxe a necessidade de se medir as propriedades de certos materiais expostos a campos elétricos e magnéticos.

Para o caso de tomógrafos capacitivos e sensores capacitivos as propriedades relevantes são: i) permissividade relativa é uma dessas propriedades, quando se aplica uma ddp em eletrodos imersos em um material é gerado um campo elétrico e também é acumulada uma carga no material e também nos eletrodos que variam de acordo com a grandeza escalar dessa propriedade; ii) Fator de dissipação que corresponde à razão entre a reatância e a resistência apresentadas em certa frequência de excitação.

A.2 Objetivos

O relatório tem os seguintes objetivos: i) Medir permissividade relativa e o fator de dissipação da água, do óleo e de emulsões de óleo-água na frequência de 1Mhz; ii) Calcular os erros relativos da medição e das frações das amostras.

A.3 Descrição dos aparatos experimentais

Para se medir permissividade relativa e fator de dissipação de um fluido são necessários instrumentos que meçam capacitância e resistência do mesmo. É necessário também um dispositivo que encerre o fluido em análise e nele disponha um campo elétrico.

O instrumento utilizado para se medir capacitância e resistência, mostrado abaixo, foi o Medidor LCR, marca *Agilent*, modelo E4980A, sinal em frequência na faixa de 20 Hz a 2 MHz, faixa de medição de impedância de $1\text{m}\Omega < |Z| < 1\text{G}\Omega$ e incerteza de medição básica de $\pm 0,05\%$.

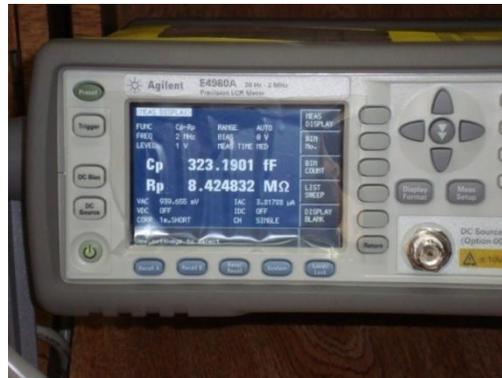


Fig. A.1 Medidor LCR.



Fig. A.2 DTF.

Para se dispor o líquido para medição é necessário um acessório, mostrado abaixo, chamado Dispositivo Testador de Líquidos (DTF) da marca *Agilent*, modelo 16452A, faixa de

freqüências aplicáveis de 20Hz a 30 MHz, temperatura de operação de -20 a 125 °C e incerteza na medição dependente da freqüência e da impedância do fluido.

A temperatura e a umidade ambiente foi medida com um Termohigrômetro, mostrado abaixo, da marca RadioShack, com resolução de 1°C.



Fig. A.3 Termohigrômetro.

A.4 Procedimento Experimental

Materiais em análise

O óleo analisado é petróleo proveniente do campo de Jubarte, região da costa do Espírito Santo - Brasil , de classe asphaltênica existente no LabPetro - UNICAMP.

A água utilizada nas misturas é destilada.

Amostras preparadas para medição

Na Tabela A.1 encontram-se os materiais cujas constantes dielétricas deverão ser medidas.

Tabela A.1 Materiais amostrados.

Quantidade	Material
09	Amostras de emulsões do óleo e água destilada.
01	Amostra de água destilada

A.4.1 Descrição da seqüência para medição de capacitância e resistência

a. Preparação dos aparatos

Em sala com temperatura aproximadamente constante ao longo do dia, onde encontram-se os equipamentos para medições, são ligados, conectados e instalados, em posição de medida, os seguintes instrumentos, na ordem: i) Medidor LCR; ii) Dispositivo Testador de Fluido; iii) Termohigrômetro.

Segundo o guia de usuário (AGILENT, 2008) do Medidor LCR o equipamento entra em regime de temperatura em 30 min.

b. Inserção do líquido no DTF

Existe certa dificuldade de se inserir o líquido a ser medido no DTF pois a seção de medida é pequena assim como a cânula de entrada. Para líquidos ultra viscosos como o óleo cru e suas emulsões essa dificuldade aumenta.

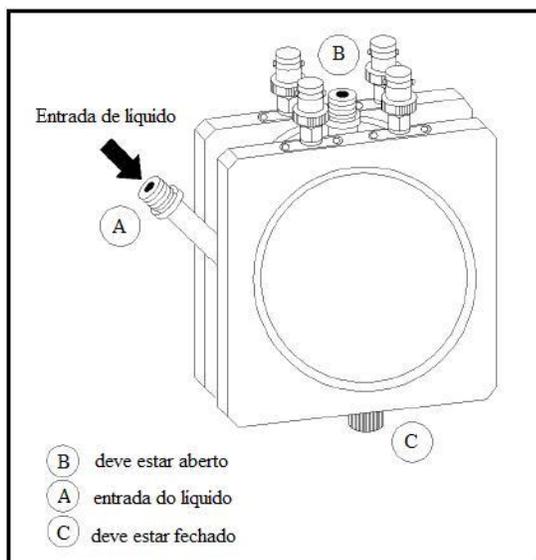


Fig. A.4 DTF.

Para contornar esse problema e garantir a ausência de bolhas na seção de medida utiliza-se uma seringa com a ponta aberta para facilitar a sucção do óleo do recipiente onde está a emulsão.

Com a ponta da seringa sempre para baixo, e assim o ar da seringa fica sempre para cima o que evita que bolhas passem pelo fluido, acopla-se a ponta da mangueira no DTF e injeta-se o líquido, como indicado na Fig. A.5 vagarosamente para que preencha todo o espaço da seção de medida.



Fig. A.5 DTF pronto para injeção do fluido.

Em detalhe, a figura acima mostra como deve estar o DTF e o fluido dentro da seringa para garantir a ausência de bolhas.

c. Correções

Deve se inserir no DTF uma peça de ouro com a placa espaçadora de 1,3 mm para se fazer a compensação de impedância em série das placas paralelas do DTF. Este procedimento é também descrito em AGILENT (2004a).

Seleciona-se a posição $L_s - R_s$ no Agilent LCR para uma frequência de 1MHz, tensão $1V_{rms}$, cabo de 1m. Mede-se os valores de indutância e resistência em série. Os valores obtidos, para as condições definidas acima, devem, respectivamente, ser menores que 20 nH e $0,5 \Omega$ para o correto funcionamento do DTF.

Faz-se, então, a correção de indutância e da resistência do DTF. Para isso, acessa-se no Agilent LCR *Meas Setup /Correction/ Short/ Perform correction* . Aguarda-se alguns segundos para que o aparato faça a correção automaticamente.

d. Medições

Retira-se a peça de ouro e insere-se um espaçador que garante uma distância de 2 mm entre as placas do DTF. Conecta-se o DTF no Agilent LCR, seleciona-se para medir $C_p - R_p$, ou seja, capacitância e resistência paralelas (relativas ao líquido entre as placas do DTF), seleciona-se a frequência de 1MHz para uma tensão de $1V_{rms}$. Acessa-se no Agilent LCR *Meas Setup /Correction/ Short* e coloca-se na posição *on*.

Com o DTF devidamente limpo e seco, mede-se a capacitância do ar deixando o DTF entrar em regime de temperatura, assim como o LCR para a nova medida em 30 minutos.

Deve se deixar, a cada nova medição, o fluido, o DTF e o Agilent LCR entrar em regime de temperaturas em 30 min. Faz-se, finalmente, a leitura da medida de capacitância e da resistência do fluido.

Lê-se, também, a temperatura ambiente e a umidade do ar.

e. Limpeza dos instrumentos

Após a medição o aparato de medição de permissividade deve ser limpo da seguinte forma:

1. Preparar uma solução com 20% de detergente Extran 01;
2. Retirar o óleo do aparato succionando com a seringa
3. Abre-se o DTF, retira-se o óleo com um papel toalha
4. Depois de retirada a maior parte do óleo, limpa-se os resíduos com querosene;
5. Limpar o equipamento com a solução preparada;
6. Enxaguar com água destilada;
7. Secar.

É importante que os aparatos estejam limpos, em especial os eletrodos, para que as medições dêem valores constantes uma vez que há relatos, segundo AGILENT (2000), de problemas de instabilidade na medida devido à sujeiras nos eletrodos.

A.5 Redução de dados

A.5.1 Capacitância e resistência em paralelo

Podem ser medidas quando se encerra o material sob teste entre duas placas paralelas (modo mais fácil) e se aplica um sinal senoidal. O circuito equivalente é representado na Fig. A.6.

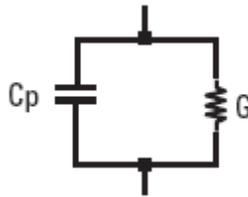


Fig. A.6 Circuito equivalente ao do DTF.

A.5.2 Permissividade relativa complexa

A permissividade relativa complexa é definida como a soma complexa da grandeza escalar da quantidade de energia que pode ser armazenada em um material na forma de campo elétrico e na forma de corrente elétrica.

Segundo AGILENT (2008), a admitância do circuito acima pode ser definida como:

$$Y = G + j\omega C_p = j\omega C_0 \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} \right) \quad \text{A.1}$$

Onde j é uma unidade imaginária, ω é a velocidade angular do sinal e:

$$G = 1/R_p \quad \text{A.2}$$

A soma entre parêntesis na eq. 1 é chamada de permissividade relativa complexa.

A permissividade relativa complexa é relativa porque como mostrado na parte direita da equação acima é dividida pela energia admitida na forma de campo elétrico no vácuo.

É notada como na equação abaixo:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad \text{A.3}$$

Se C_0 pode ser considerado como C_{ar} :

$$\epsilon_r' = C_p / C_{ar} \quad \text{A.4}$$

$$\epsilon_r'' = 1 / \omega C_{ar} R_p \quad \text{A.5}$$

Onde ϵ_r' é chamada de permissividade relativa e ϵ_r'' chamada de dissipação dielétrica e ω é a velocidade angular do sinal.

Em coordenadas cartesianas pode-se representar a permissividade relativa complexa:

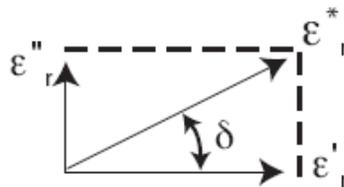


Fig. A.7 Permissividade relativa complexa. Fonte: AGILENT (2008).

a. Permissividade relativa

Para geometrias simples como placas paralelas em forma de disco, pode-se calcular diretamente, a partir da geometria, a permissividade relativa e a dissipação dielétrica.

A permissividade pode ser calculada de duas formas, baseando-se na geometria do capacitor (eq. A.6), ou na proporcionalidade do campo elétrico para cada meio (eq. A.4). É mais razoável utilizar a eq. A.4, uma vez que se houver algum erro sistemático esse será eliminado.

$$\epsilon_r' = C_p \cdot t / A \cdot \epsilon_0 \quad \text{A.6}$$

Onde C_p é a capacitância apresentada no Agilent com o fluido em análise, t é a espessura da camada de fluido entre as placas que é de 2 mm, A é a área do eletrodo capacitivo que é de 38 mm \pm 0,5mm, ϵ_0 é a constante permissividade do vácuo de 8,854 E-12 F/m.

b. Dissipação dielétrica

A dissipação dielétrica corresponde a parcela imaginária da permissividade relativa complexa.

Pode ser calculada na forma:

$$\epsilon_r'' = t / \omega A R_p \epsilon_0 \quad \text{A.7}$$

Porém, como na forma de interesse o equacionamento será:

$$\epsilon_r'' = 1 / \omega R_p C_{ar} \quad \text{A.8}$$

Fator de dissipação

O fator de dissipação, D , é a razão entre a dissipação dielétrica e a permissividade relativa:

$$D_x = \tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad \text{A.9}$$

Em um capacitor ideal não existiria o ângulo δ e assim não haveriam perdas nem acúmulos de energia na forma resistiva.

A.5.3 Correção do efeito de borda na permissividade relativa complexa

Esse fenômeno, pode ser explicado descrevendo-se o campo elétrico entre duas placas paralelas infinitas no vácuo (HALLIDAY *et. al.*, 2007), segundo a lei de Gauss:

$$\oint_{E_0} \vec{dA} = q / \epsilon_0 \quad A.10$$

Onde ϵ_0 é a constante de permissividade em F/m. Como as placas do dispositivo utilizado para medição são paralelas, mas também finitas, pode-se utilizar a equação acima.

Onde o vetor E é paralelo ao vetor dA , o produto vetorial pode ser escrito como um produto escalar.

$$\oint_{E_0} \vec{dA} = E_0 dA \cos 0^\circ \quad A.11$$

E então, para uma variação linear no campo (inserção de um material dielétrico não-condutor) tem-se uma variação linear na carga. Porém acontece que na borda não se pode considerar o produto escalar da eq. A.12. O campo elétrico nessa região é da forma mostrada na Fig. A.8.

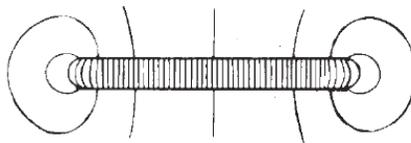


Fig. A.8 Campo elétrico entre placas paralelas. Fonte: ASTM (2004b).

As linhas campo elétrico nessa região não são lineares e logicamente com uma variação linear da permissividade do meio tem-se uma variação não-linear da carga na borda.

Para corrigir esse efeito, AGILENT (2000) indica um equacionamento para a correção da impedância apresentada pelo dispositivo devido ao efeito de borda.

$$\alpha = 100|\epsilon_{rm}^*| / (97,0442|\epsilon_{rm}^*| + 2,9558) \quad A.12$$

$$\epsilon_{rm}^* = \sqrt{\frac{C_p^2}{C_0^2} + 1/\omega C_p^2 C_0^2} \quad A.13$$

A equação para permissividade relativa complexa fica na forma final corrigida:

$$\epsilon_{rc}^* = \alpha(\epsilon_{re}' - j\epsilon_{re}'') \quad A.14$$

As parcelas obtidas experimentalmente corrigidas ficam representadas da forma :

$$\epsilon_{rt}' = \alpha\epsilon_{re}' \quad A.15$$

$$\epsilon_{rt}'' = \alpha\epsilon_{re}'' \quad A.16$$

A.5.4 Cálculo de incerteza

a. Incerteza na medição resistência e capacitância

O Agilent de LCR apresenta em AGILENT (2008) as incertezas totais ou absolutas de medição como a soma das incertezas relativas e das incertezas de calibração, da forma:

$$A_a = A_r + A_c \quad A.17$$

Sendo que a incerteza relativa depende das impedâncias medidas:

$$A_r = \left[\left(A_b + \frac{Z_s}{|Z_m|} \right) 100 + Y_o |Z_m| 100 \right] K_t \quad A.18$$

onde:

A_b é a incerteza básica;

Z_s é a impedância devida ao *offset* da correção *short* (AGILENT, 2008);

Z_m é a impedância da medição;

Y_o é a admitância (inverso da impedância) devida ao *offset* da correção *open*;

K_t é o coeficiente de temperatura.

A incerteza de calibração depende da frequência e da faixa de impedância, e é indicada em AGILENT (2008) como variação da coordenada polar, ou seja, uma variação no módulo de Z e no ângulo de fase θ .

A incerteza básica depende das condições de tempo de medição do Agilent, da impedância do Dispositivo e da frequência do sinal. Também pode ser obtida consultando-se AGILENT (2008).

A impedância da medição pode ser calculada para esse caso como:

$$Z_m = 1/Y \quad A.19$$

onde:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad A.20$$

$$B = 2\pi f C_p \quad A.21$$

R_p é a resistência em paralelo do sinal. O fator de dissipação pode ser, também, como a razão entre a Condutância G e Sustenância B :

$$D_x = G/B = \tan \delta = \cot \theta \quad \text{A.22}$$

Onde δ e θ são os ângulos representados no diagrama de defasagem abaixo:

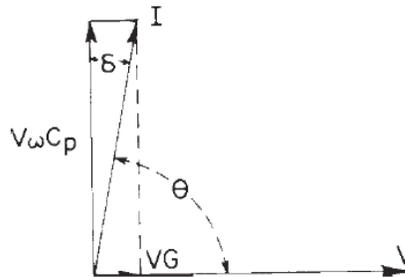


Fig. A.9 Diagrama de defasagem. Fonte: ASTM (2004a).

Na tabela abaixo são apresentados os valores aplicados de cada variável citada (AGILENT, 2008):

Tabela A.2 Valores aplicados.

Variável	Valor	Unidade
A_b	0,10	%
Z_s	4,1265E-4	Ω
Y_o	5,5E-9	S
K_t	1	-

A incerteza de calibração do Agilent LCR é apresentada como uma razão de cada coordenada polar, ou seja, de $|Z|$ e de θ . Essa incerteza não será utilizada pois é totalizadora das medidas de interesse, portanto será utilizada somente a incerteza relativa.

A incerteza relativa da capacitância corresponderá a A_r [%].

Para se calcular a incerteza relativa na resistência, em Ω , utiliza-se a equação indicada AGILENT (2008):

$$R_{pr} = \pm R_p \times D_e / D_e \mp D_x \quad \text{A.23}$$

Onde R_p é o valor medido, e D_x é o fator de dissipação calculado e D_e , incerteza relativa de D_x é da seguinte forma:

$$D_e = D_x A_r / 100 \quad \text{A.24}$$

Utilizou-se o maior valor apresentado para R_{pr} uma vez que o mesmo é dependente de $\mp D_x$.

Os valores de incertezas em resistência paralela são equacionados da forma:

$$A_{Rp} = 100 R_{pr} / R_p \quad \text{A.25}$$

b. Incerteza na permissividade relativa

O cálculo da permissividade relativa será baseado na eq. A.4 e as incertezas relativas da medição experimental da capacitância serão aplicadas segundo suas tendências quadráticas para se obter a incerteza na permissividade, ou melhor:

$$\delta \varepsilon'_{re} = \sqrt{\left(\frac{d\varepsilon'_r}{dC_p} \delta C_p \right)^2 + \left(\frac{d\varepsilon'_r}{dC_0} \delta C_0 \right)^2} \quad \text{A.26}$$

$$d\epsilon_r' / dC_p = \frac{1}{C_0} \quad \text{A.27}$$

$$d\epsilon_r' / dC_0 = -\frac{C_p}{C_0^2} \quad \text{A.28}$$

$$\delta C_p = C_p \frac{A_{C_p}}{100} \quad \text{A.29}$$

A incerteza da medida de capacitância apresentada para o ar δC_0 é calculada da mesma forma que δC_p (eq. A.30).

Além das incertezas relativas ao Agilent LCR calculadas acima, existem também as incertezas relativas ao DTF (AGILENT, 2000).

As incertezas relativas ao Testador são dependentes da frequência e da permissividade relativa complexa. Essa incerteza na forma totalizada (complexa) pode ser decomposta pela soma dos quadrados das tendências e assim, obtém-se as incertezas relativas a cada componente.

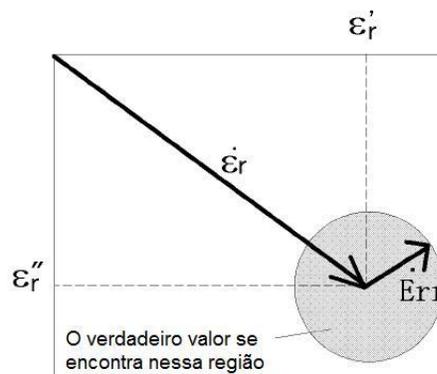


Fig. A.10 Incerteza do DTF

Pode-se equacionar da forma que a raiz da soma de iguais quadrados de incertezas para cada componente contempla o raio da circunferência, \dot{E}_{rr} , então:

$$\dot{E}_{rr} = \sqrt{\delta\varepsilon'_{rt}{}^2 + \delta\varepsilon''_{rt}{}^2} = \delta\varepsilon'_{rt} = \delta\varepsilon''_{rt} \quad \text{A.30}$$

$$|\dot{E}_{rr}|/|\varepsilon_{rc}^*| \leq (A + B)/100 \quad \text{A.31}$$

Onde A é a incerteza do Testador devida ao módulo da permissividade relativa complexa e B é incerteza do Testador devida a frequência de operação e são fornecidas no manual AGILENT (2000a), ε_{rc}^* é a permissividade relativa complexa corrigida e pode ser obtida equacionando-se:

$$\varepsilon_{rc}^* = \alpha|\varepsilon_{rm}^*| \quad \text{A.32}$$

Para se obter a incerteza em cada componente de $A_{\varepsilon_r'}$ e $A_{\varepsilon_r''}$ relativas somente ao Testador deve se fazer:

$$A_{\varepsilon_{rt}'} = 100 \delta\varepsilon'_{rt} / \varepsilon_{rt}' \quad \text{A.33}$$

$$A_{\varepsilon_{rt}''} = 100 \delta\varepsilon''_{rt} / \varepsilon_{rt}'' \quad \text{A.34}$$

Faz-se a raiz da soma-se dos quadrados das incertezas do testador e do Medidor:

$$A_{\varepsilon_r'} = \sqrt{A_{\varepsilon_{rt}'}^2 + A_{\varepsilon_{re}'}^2} \quad \text{A.35}$$

onde:

$$A_{\varepsilon_{re}'} = 100 \delta\varepsilon'_{re} / \varepsilon_{re}' \quad \text{A.36}$$

Existe diferenciação entre o valor de ε'_{re} e de ε'_{rt} pois o primeiro é obtido da razão obtida experimentalmente entre capacitâncias e o segundo é devido ao Testador que é corrigido devido ao efeito de borda.

c. Incerteza em dissipação dielétrica

O cálculo da incerteza de medição da dissipação dielétrica será baseado na eq. A.5, da forma:

$$\delta\varepsilon''_{re} = \sqrt{\left(\frac{d\varepsilon''_r}{dC_0} \delta C_0\right)^2 + \left(\frac{d\varepsilon''_r}{dR_p} \delta R_p\right)^2} \quad A.37$$

onde:

$$\frac{d\varepsilon''_r}{dC_0} = -1/\omega R_p C_0^2 \quad A.38$$

$$\frac{d\varepsilon''_r}{dR_p} = -1/\omega R_p^2 C_0 \quad A.39$$

As incertezas em dissipação dielétrica devidas ao Testador terão o mesmo tratamento das apresentadas para a permissividade relativa.

$$A_{\varepsilon''_r} = \sqrt{A_{\varepsilon''_{rt}}^2 + A_{\varepsilon''_{rc}}^2} \quad A.40$$

A.6 Apresentação e discussão dos resultados

As equações mostradas na seção anterior foram dispostas no programa computacional *EES* – *Engineering Equation Solver v. Academic*. Os resultados são obtidos a partir das seguintes

entradas: i) Capacitância e resistência paralela; ii) Incertezas indicadas nos manuais do Medidor e do Testador.

A.6.1 Resultados em capacitância e resistência

São mostrados na tabela abaixo os valores de capacitância e resistência adquiridos experimentalmente nas condições de temperatura e umidade ambientais e das misturas:

Onde C_p é a capacitância do dispositivo preenchido com o líquido a ser testado e R_p é a resistência em paralelo.

Tabela A.3 Capacitâncias e resistências para condição do DTF.

Misturas	Meios	C_p [pF]	R_p , [Ω]	Temp. Amb. [$^{\circ}$ C]	Umidade [%]
Homogêneas	Ar	5,34	14M	25	47
	Água	409,29	2,41k	25	63
	Óleo	13,49	674k	23	46
Emulsões água em óleo [%] em volume	5,37%	15,76	539k	25	48
	9,91%	18,17	483k	25	50
	15,07%	20,94	387k	25	47
	19,97%	24,60	336k	25	44
	25,02%	29,35	280k	23	46
	29,93%	33,32	231k	24	45
	35,00%	38,85	187k	23	45
	40,01%	46,00	160k	22	45

A.6.2 Resultados das incertezas relativas em capacitância e resistência

Foram obtidos as seguintes incertezas relativas para os valores de capacitância e resistência, segundo as variáveis contabilizadas.

Tabela A.4 Incertezas relativas em Capacitância e Resistência paralelas.

Misturas	Meios	Z_m [k Ω]	X_p [k Ω]	D_x	A_{Cp} [%]	A_{Rp} [%]
Homogêneas	Ar	29,80	2,98	0,0021	0,116	0,117
	Água	0,38	0,39	0,1615	0,100	0,086
	Óleo	11,79	11,79	0,0175	0,107	0,107
Emulsões água em óleo [%] em volume	5,37%	10,07	10,07	0,0187	0,106	0,106
	9,91%	8,74	8,75	0,0181	0,105	0,105
	15,07%	7,61	7,62	0,0197	0,104	0,104
	19,97%	6,47	6,47	0,0193	0,104	0,104
	25,02%	5,41	5,41	0,0193	0,103	0,103
	29,93%	4,78	4,78	0,0207	0,103	0,103
	35,00%	4,09	4,09	0,0219	0,102	0,102
	40,01%	3,46	3,46	0,0216	0,102	0,102

Na tabela A.4, X_p , reatância capacitiva, é o inverso da sustentância (B).

A.6.3 Resultados em permissividade e dissipação e respectivas incertezas

São apresentados os resultados de permissividade relativa complexa, permissividade relativa, dissipação dielétrica e incertezas relativas.

Tabela A.5 Resultados em permissividades.

Misturas	Meios	ϵ_{rc}^*	ϵ_{rt}''	ϵ_{rt}'	$A_{\epsilon_r''}$ [%]	A_{ϵ_r}' [%]
Homogêneas	Ar	1,00	0,0021	1,00	140,9	0,34
	Água	79,92	12,7	78,89	20,7	3,35
	Óleo	2,57	0,045	2,57	97,2	1,71
Emulsões água em óleo [%] em volume	5,37%	3,02	0,056	3,02	125,8	2,36
	9,91%	3,48	0,063	3,48	135,3	2,46
	15,07%	4,00	0,079	4,00	137,2	2,64
	19,97%	4,72	0,091	4,72	140,2	2,71
	25,02%	5,64	0,109	5,64	139,7	2,71
	29,93%	6,40	0,132	6,40	132,9	2,75
	35,00%	7,48	0,164	7,48	130,3	2,85
	40,01%	8,85	0,191	8,85	136,5	2,95

Os resultados se mostraram condizentes com os apresentados na literatura (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007).

A incerteza apresentada para a dissipação dielétrica é basicamente devida à incerteza de medição do próprio Testador e também pelo módulo da mesma ser diminuto.

Acontece que, com a dissipação de calor, a condutividade do meio aumenta o que gera incertezas na medição de dissipação dielétrica e o sistema fica dependente da temperatura.

A incerteza relativa a permissividade também é basicamente devida a incerteza de medição do testador, com uma parcela mínima devida ao Medidor.

Abaixo é apresentado gráfico de permissividade relativa vs. porcentagem de emulsão, com as devidas faixas de incerteza para ambas:

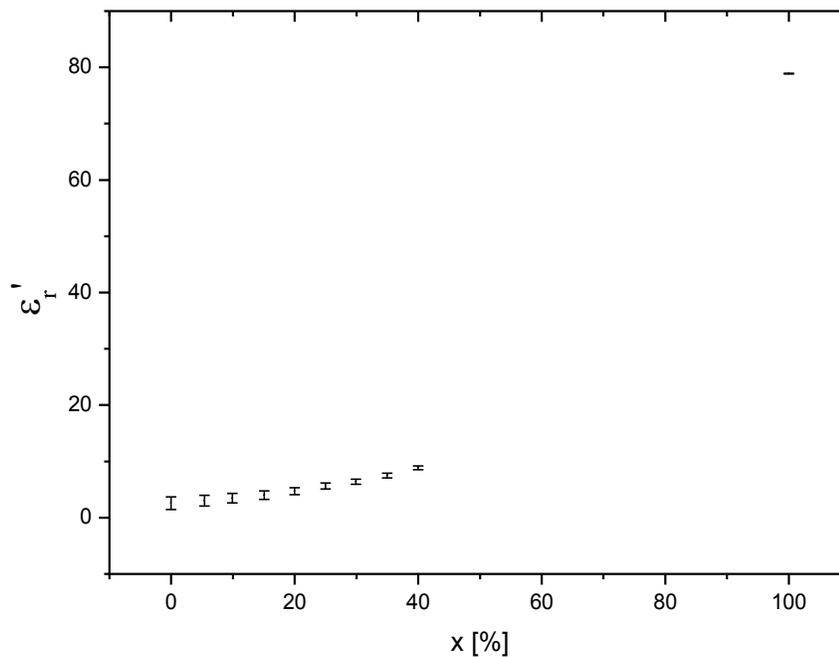


Fig. A.11 Permissividade relativa vs. percentual de água em óleo

O módulo da incerteza é maior para os casos de menor permissividade quando os módulos de impedância aumentam (vide

Tabela A.4). A atenuação do sinal faz com que aumente a incerteza na medição da fase (BOVERMAN *et al.*, 2007).

A.7 Conclusões

A medição de permissividade relativa de emulsões A/O apresentou resultados satisfatórios e animadores, em especial para medições de tomografia capacitiva, uma vez que tal propriedade varia pouco com a adição de água até a concentração de 40%.

A dissipação dielétrica, entretanto, apresentou incertezas relativas elevadas devido a resistência ser da ordem de centenas de $k\Omega$, isso pode ser melhor interpretado no diagrama de defasagem, da Fig. A.9, onde $D_x = \tan \delta$ equivaleria a um ângulo da ordem de centésimos de um grau.

A.8 Referências Bibliográficas

AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent E4980A Precision LCR Meter: User's Guide*. 7. ed. Japão, 2008. 549 p. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E4980-90070.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2008.

AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent 16452A Liquid Test Fixture Precision LCR Meter: Operation and Service Manual*. 3. ed. Japão, 2000. 549 p. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/16452-90000.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2008.

BOVERMAN, Gregory; KIM, Bong Seok; ISAACSON, David. The Complete Electrode Model For Imaging and Electrode Contact. In: IEEE EMBS, 29., 2007, Lion, Fr. *Proceedings of the 29th Annual International*. Lion: Ieee, 2007. p. 3462 – 3465.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física 3: Eletromagnetismo*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAS. ASTM. Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids: D924-04. United States, 2004a. 7 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAS. ASTM. Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation: D150-98. United States, 2004b. 20 p.

Apêndice B

Medição da Permissividade Relativa e do Fator de Dissipação de Materiais Sólidos

B.1 Introdução

A permissividade relativa de materiais sólidos é requerida quando se deseja medir algo através de um campo elétrico. Por exemplo, quando se faz alguma correção analítica da saída de um medidor capacitivo em função de uma variação da propriedade de um material sólido envolvido na medição. Também quando se quer simular numericamente um capacitor e os meios sólidos por onde o campo elétrico se dispõe.

B.2 Objetivos

O relatório tem os seguintes objetivos: i) Medir permissividade relativa e o fator de dissipação de vidro Duran® e do Teflon® PTFE na frequência de 1 MHz; ii) Calcular os erros relativos da medição.

B.3 Descrição dos aparatos experimentais

Para se medir permissividade relativa e fator de dissipação do sólido são necessários instrumentos que meçam a capacitância e a resistência do mesmo. É necessário também um acessório para que se disponha o material em análise a um campo elétrico.

O instrumento utilizado para se medir capacitância e resistência, mostrado abaixo, foi o Agilent LCR, marca *Agilent*, modelo E4980A, sinal em frequência na faixa de 20 Hz a 2 MHz, faixa de medição de impedância de $1\text{m}\Omega < |Z| < 1\text{G}\Omega$ e incerteza de medição básica de 0,05%.

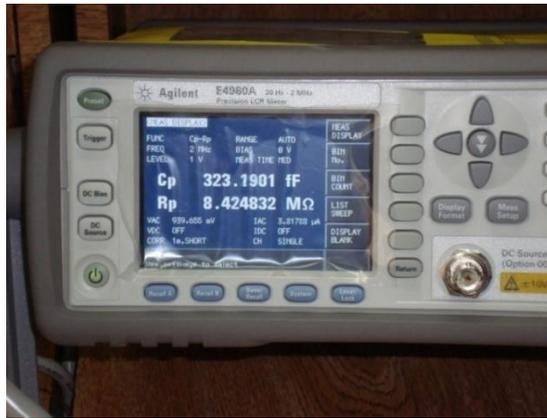


Fig. B.1 Agilent LCR.



Fig. B.2 Dispositivo Testador de Dieletrico.

Para se dispor o sólido para medição é necessário um acessório, mostrado acima, chamado Dispositivo Testado de Dielétrico (DTD) da marca *Agilent*, modelo 16451B, faixa de frequências aplicáveis de 20 Hz a 30 MHz, temperatura de operação de -20 a 125 °C e incerteza na medição da permissividade dependente da frequência e da impedância do sólido.

Já a incerteza na espessura da amostra indicada pelo micrômetro, marca Mitutoyo, acoplado no DTD é de $\pm 10\mu\text{m}$.

As amostras dos materiais em análise são dispostas entre duas placas, ou eletrodos, paralelas que deverão apresentar uma ddp e assim formar um campo elétrico. Uma das placas é o eletrodo fonte e a outra é o sensor e seu guarda. Dependendo do diâmetro da amostra, troca-se a placa do eletrodo sensor e guarda, mantendo-se a do eletrodo fonte.

Isso não prejudica formação de um campo elétrico paralelo, pois os guardas, isso o garantem. Abaixo, são apresentadas as placas disponíveis.

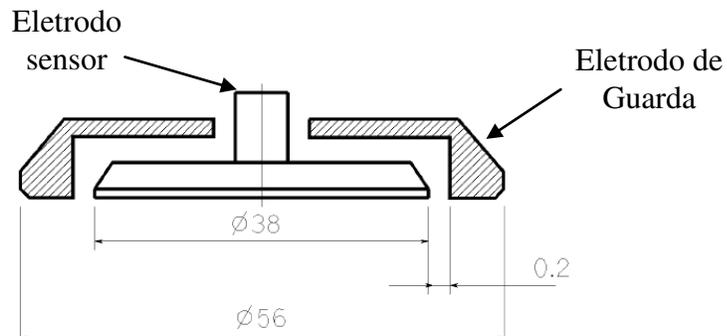


Fig. B.3 Placa A

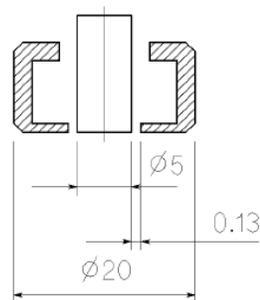


Fig. B.4 Placa B

A temperatura e a umidade do ambiente foi medida com um Termohigrômetro, mostrado abaixo, da marca RadioShack, com resolução de 1°C e 1% (umidade).



Fig. B.5 Termohigrômetro.

A espessura das amostras dos materiais foi medida através de um micrômetro, da marca Mitutoyo, apresentado abaixo, de incerteza de medição de $\pm 1\mu m$.



Fig. B.6 Micrômetro.

B.4 Procedimento Experimental

B.4.1 Materiais em análise

Serão analisadas duas amostras de Teflon® PTFE e duas de vidro Duran®

B.4.2 Amostras preparadas para medição das propriedades dielétricas

A partir de um tarugo extrudado de PTFE, foram usinadas uma amostra longitudinal e uma transversal ao eixo do tarugo. Ambas com suas faces paralelas.

Para o vidro foram feitas duas amostras de uma tubulação de fundindo-se pedaços do vidro Duran® e deixando-as na forma plana. Posteriormente essas peças foram usinadas para obtenção de paralelismo entre as faces.

Abaixo, é apresentada uma imagem das amostras:



Fig. B.7 Amostras

Segundo o manual AGILENT (2000), o diâmetro das amostras não tem influencia nas medições desde que esteja compreendido entre 40 e 56 mm para o teste com a placa A e entre 10 e 56 para o teste com a placa B. As espessuras, entretanto, devem ser menores ou iguais a 10 mm.

B.4.3 Para medição da espessura das amostras

Utilizando-se o micrômetro mede-se a espessura de cada amostra em 4 pontos deslocados de 90° entre si ao longo de uma circunferência de 38 mm centralizada nas amostras maiores e uma de 5 mm para a menor.

Escolheu-se esses pontos pois compreendem as regiões limítrofes do contato com o eletrodo sensor.

B.4.4 Descrição da seqüência para medição de capacitância e resistência

a. Preparação dos aparatos

Em sala com temperatura aproximadamente constante ao longo do dia, onde encontram-se os equipamentos para medições, são ligados, conectados e instalados, em posição de medida, os seguintes instrumentos, na ordem:

1. Agilent LCR;
2. Dispositivo Testador de Dielétrico (DTD);
3. Termohigrômetro

Segundo o guia de usuário (AGILENT, 2008) do Agilent LCR o equipamento entra em regime de temperatura em 30 min.

b. Compensações

Para se compensar o efeito dos cabos e de impedância do próprio Dispositivo o Agilent LCR dispõe das compensações *Short/ Open/ Load e Cable 1, 2, 3 ou 4 m*.

A compensação *Load* deve ser feita somente para casos em que a frequência do sinal for maior que 5 MHz, não contemplada nesse caso.

As compensações *Short* e *Open* podem ser feitas com os acessórios do DTD.

Compensação *Open*:

Para a compensação de circuito aberto, deve-se acessar o menu do Agilent LCR na ordem: *Meas Setup /Correction*. Seleciona-se a frequência em *FREQ*: como 1 MHz, e a função em *FUNC*: como $C_s - R_s$.

Deve-se inserir um acessório constante do DTD na seção de medição de tal forma que o elemento sensor fica confinado por guardas e, também, uma capa plástica que isola o eletrodo fonte (não-guardado) do guarda.

Deve-se registrar o valores de $C_s - R_s$ apresentados para essa medição, pois os mesmos serão utilizados, na forma de admitância (Y_o), para o cálculo da incerteza relativa do Agilent LCR.

Posiciona-se o cursor, agora no menu *Corretion* do Agilent LCR, em *Open* e seleciona-se *Perform corretion*. Aguarda-se alguns segundos para que o aparato faça a correção automaticamente. Faz-se, na sequência, a compensação *Short*.

Compensação Short:

Para se fazer a compensação de curto circuito, deve-se retirar o acessório de compensação e virá-lo de tal forma que o eletrodo fonte entre em contato com o eletrodo sensor, para isso remove-se o plástico isolante usado na compensação *Open*.

Agora no menu do Agilent LCR, em *Meas Setup /Correction*, altera-se a função em FUNC: para $L_s - R_s$.

Registra-se o valores de $L_s - R_s$ apresentados para essa condição de curto circuito, pois os mesmos serão utilizados, na forma de impedância (Z_s) para o cálculo da incerteza relativa do Agilent LCR.

Posiciona-se o cursor em *Short* e seleciona-se *Perform corretion*. Aguarda-se alguns segundos para que o aparato faça a correção automaticamente.

Ainda no menu de correção deve-se alterar *Short e Open* para a posição *on*.

Paralelismo das placas do capacitor

Para que as medições tenham boa precisão deve-se garantir o paralelismo das placas do DTD. O manual de operações do dispositivo (AGILENT, 2000) recomenda que para se ajustar as placas dos eletrodos paralelamente, deve-se colocar as placas a uma distância de 0,01mm e medir capacitância em paralelo (C_s) e fator de dissipação (D) com o Agilent LCR:

- ✓ Utilizando-se a placa A a capacitância deverá ser de: 700 a 1000 pF.
- ✓ Utilizando-se a placa B a capacitância deverá ser de: 12 e 17 pF

Deve-se parar o aperto com o micrômetro quando D aumentar o valor subitamente, significando o contato fechado.

O ajuste do paralelismo das placas é feito ajustando-se a placa não-guardada (sem eletrodo de guarda), através dos três parafusos existentes na carcaça, tomando-se o cuidado de não forçar uma placa contra outra, o que evita amassar as placas e danificar a rosca do micrômetro.

Quando não se consegue atingir a capacitância de 700 pF para um distância entre placas de 10 μm , o manual AGILENT (2000) recomenda que se garanta o paralelismo com pelo menos 500 pF.

Retira-se o acessório de correção e os aparatos estão prontos para medição devendo-se ler capacitância e fator de dissipação, bastando, para isso, selecionar em *Meas Setup* em FUNC: como $C_p - D$.

c. Medições

As medições podem ser feitas de duas formas: com o material em contato com o eletrodo sensor e com o fonte e o material sem contato com o eletrodo sensor e somente com o fonte. No segundo caso, o material fica apoiado no eletrodo fonte devido ao campo gravitacional com uma camada de ar entre o material e o eletrodo sensor. A posição do aparato é como a mostrada na Fig. B.8.



Fig. B.8 Posição do DTD.

Nesse trabalho foi utilizado o método de contato, porque, no manual, só há equacionamento para o cálculo da incerteza de medição para esse método.

Método de contato

Para essa medição deve-se inserir a amostra no DTD com a face dos eletrodos na posição horizontal, como mostrado na Fig. B.8, assim, a força resultante devida a mola de retorno dos eletrodos sensor e guarda no micrômetro é menor, gira-se o micrômetro até que a placa comprima a amostra, o limite da compressão é dado pelo limitador de torque do micrômetro. Para padronizar esse torque, dá-se 20 voltas no limitador de torque, o que deve garantir o mesmo aperto para todos as medições.

Mede-se, então, C_p , D e t_t , respectivamente, capacitância em paralelo, fator de dissipação e distância entre eletrodos (lida no micrômetro do DTD).

Monitora-se as variáveis temperatura e umidade ambientais no início e no final do experimento.

B.5 Redução de dados

B.5.1 Capacitância e Fator de Dissipação

O circuito equivalente do meio amostrado entre as placas do DTD é representado na Fig. B.9.

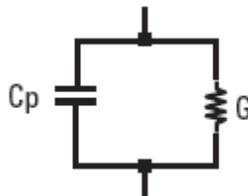


Fig. B.9 Circuito equivalente ao do DTD.

Pelo fato da resistência em paralelo ser da ordem de centenas de $M\Omega$ no caso da maioria dos meio sólido, dá-se preferência por apresentar os resultados dessas medições na forma de

Fator de Dissipação. Preferiu-se, pelo fato do Agilent LCR é capaz de calcular e apresentar os resultados dessa forma, obter os resultados em Capacitância e Fator de Dissipação.

O fator de dissipação pode ser equacionado como a razão entre a Condutância G e Sustenância B:

$$D_x = G/B = \tan \delta = \cot \theta \quad \text{B.1}$$

Onde δ e θ são os ângulos representados no diagrama de defasagem abaixo:

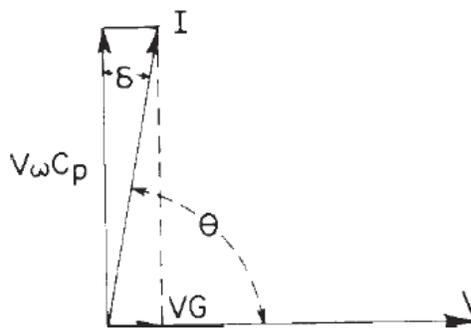


Fig. B.10 Diagrama de defasagem. Fonte: ASTM (2004a).

Sendo que a Sustenância:

$$B = \omega C_p \quad \text{B.2}$$

Onde ω é a velocidade angular.

B.5.2 Permissividade relativa e Fator de Dissipação

Para geometrias simples como placas paralelas em forma de disco, pode-se calcular diretamente a permissividade relativa:

$$\epsilon'_{re} = C_p \cdot t_t / A \cdot \epsilon_0 \quad \text{B.3}$$

$$\epsilon'_r = C_p / C_{ar} \quad \text{B.4}$$

A dissipação dielétrica corresponde a parcela imaginária da permissividade relativa complexa.

Pode ser calcula na forma:

$$\epsilon''_{re} = t_t / \omega A R_p \epsilon_0 \quad \text{B.5}$$

ou,

$$\epsilon''_r = 1 / \omega R_p C_{ar} \quad \text{B.6}$$

Onde C_p é a capacitância apresentada no Medidor, t a distancia entre os eletrodos fonte e sensor, A é a área do eletrodo sensor, ϵ_0 é a constante permissividade do vácuo de $8,854 \text{ E-12}$ F/m.

Fator de dissipação

O fator de dissipação, D_x , é a razão entre a dissipação dielétrica e a permissividade relativa:

$$D_x = \tan \delta = \epsilon''_{re} / \epsilon'_{re} \quad \text{B.7}$$

Em um capacitor ideal não existiria o ângulo δ e assim não haveriam perdas nem acúmulos de energia na forma resistiva.

O manual de operações do DTD (AGILENT, 2000) considera que a dissipação dielétrica do material é muito próxima da do ar e portanto pode-se escrever:

$$D = D_x$$

B.8

Onde D é o fator de dissipação medido no Agilent LCR.

B.5.3 Correção do efeito de borda

O DTD opera com eletrodos de guarda, como mostrado na figura abaixo. Apesar desses eletrodos diminuírem o efeito de borda (e obter o paralelismo entre as linha de campo) o mesmo continua acontecendo.

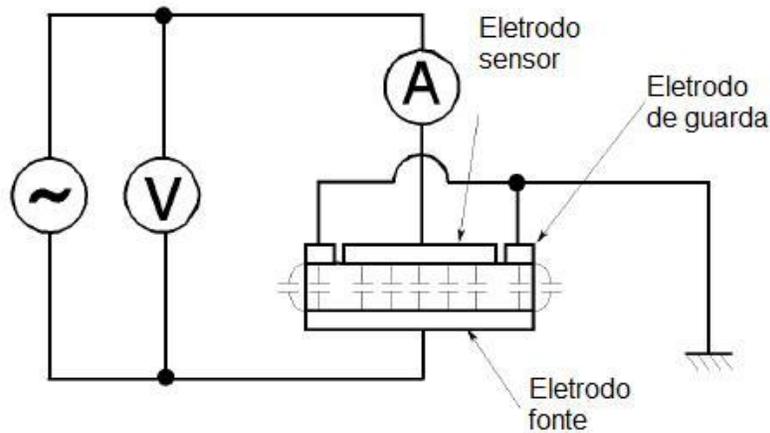


Fig. B.11 Capacitor com eletrodo de guarda

Para correção desse efeito o manual do DTD (AGILENT, 2000) propõe um aumento teórico da área do eletrodo sensor.

Quando a permissividade medida é próxima da do ar, $\epsilon'_r \approx \epsilon'_{ar}$, considera-se:

$$\alpha = (1 + g/d + B_a)^2$$

B.9

para,

$$B_a = 1 - (2/\pi) \arctan(g/2t_t) + \left(2t_t/\pi g\right) \ln\left(1 + (g/2t_t)^2\right) \quad \text{B.10}$$

onde:

g é a distancia entre o eletrodo sensor e o eletrodo de guarda, mostrado na Fig. B.3;

d é o diâmetro do eletrodo sensor;

t_t é a espessura do material sob teste;

Então, a permissividade relativa corrigida para o método de medição de contato fica a forma:

$$\epsilon'_{rc} = t_t C_p / A \epsilon_0 \alpha \quad \text{B.11}$$

onde: A é a área do eletrodo sensor;

B.5.4 Cálculo de incerteza

a. Incerteza na medição de fator de dissipação e capacitância

O Agilent de LCR apresenta em AGILENT (2008) as incertezas totais ou absolutas de medição como a soma das incertezas relativas e das incertezas de calibração, da forma:

$$A_a = A_r + A_c \quad \text{B.12}$$

Sendo que a incerteza relativa depende das impedâncias medidas:

$$A_r = \left[\left(A_b + Z_s / |Z_m| \right) 100 + Y_o |Z_m| 100 \right] K_t \quad \text{B.13}$$

onde:

A_b é a incerteza básica;

Z_s é a impedância devida ao *offset* da correção *short* (AGILENT, 2008);

Z_m é a impedância da medição;

Y_o é a admitância (inverso da impedância) devida ao *offset* da correção *open*;

K_t é o coeficiente de temperatura.

A incerteza de calibração depende da frequência e do módulo da impedância e é indicada em AGILENT (2008) como variação da coordenada polar, ou seja, uma variação no módulo de Z e no ângulo de fase θ .

A incerteza básica depende das condições de tempo de medição do Medidor, da impedância do Dispositivo e da frequência do sinal. Também pode ser obtida consultando-se AGILENT (2008).

A impedância da medição pode ser calculada para esse caso como:

$$Z_m = 1/Y \quad \text{B.14}$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad \text{B.15}$$

$$B = 2\pi f C_p \quad \text{B.16}$$

Na tabela abaixo são apresentados os valores aplicados de cada variável citada (AGILENT, 2008):

Tabela B.1 Valores aplicados.

Variável	Placa A	Placa B	Unidade
A_b	0,05	0,05	%
Z_s	0,6969	0,6356	Ω
Y_o	3,255E-08	4,527E-09	S
K_t	1	1	–

A incerteza de calibração do Agilent LCR é apresentada como uma razão de cada coordenada polar, ou seja, de $|Z|$ e de θ . Pelo fato do fator de dissipação ser muito pequeno pode se considerar que a incerteza no módulo de Z é próxima da incerteza em reatância capacitiva.

A incerteza relativa em capacitância e em fator de dissipação corresponderá a A_r [%]. Da forma:

$$A_r = A_{D_m} = A_{C_m} \quad \text{B.17}$$

Para se calcular a incerteza absoluta em fator de dissipação o manual do Agilent LCR (AGILENT, 2008) recomenda que, para $D_x < 0,1$, se utilize a seguinte equação:

$$A_D = A_{D_e} + \theta_{cal} \quad \text{B.18}$$

Onde θ_{cal} é a incerteza de calibração em θ (radianos), que depende da frequência e da impedância e pode ser obtida do manual AGILENT (2000). E a incerteza relativa de medição em D :

$$A_{D_e} = A_r / 100 \quad \text{B.19}$$

Onde: D_x é o fator de dissipação medido.

b. Incerteza na permissividade relativa

Incerteza propagada das variáveis fundamentais

O cálculo da permissividade relativa é baseado na eq. B.3, assim, pode se utilizar o método das incertezas propagadas, proposto por Holman (1996), onde os quadrados das incertezas relativas da medição experimental da capacitância, da espessura e da área são aplicadas segundo suas tendências quadráticas para se obter a incerteza na permissividade, ou melhor:

$$\delta \varepsilon'_{rp} = \sqrt{\left(\delta C_p \frac{d\varepsilon'_{re}}{dC_p}\right)^2 + \left(\delta d \frac{d\varepsilon'_r}{dd}\right)^2 + \left(\delta t \frac{d\varepsilon'_r}{dt}\right)^2} \quad \text{B.20}$$

onde:

$$\frac{d\varepsilon'_{re}}{dC_p} = \frac{t_t}{\varepsilon_0 A_0} \quad \text{B.21}$$

$$\frac{d\varepsilon'_{re}}{dd} = -\frac{8C_p t_t}{\pi d^3 \varepsilon_0} \quad \text{B.22}$$

$$\frac{d\varepsilon'_{re}}{dt} = \frac{C_p}{\varepsilon_0 A_0} \quad \text{B.23}$$

$$\delta C_p = C_p \frac{A_{C_p}}{100} \quad \text{B.24}$$

Onde, δC_p é a incerteza na medida da capacitância, δd é a incerteza na medida do diâmetro do eletrodo sensor que é dada no manual do DTD (AGILENT, 2000) para cada placa e δt é a incerteza na espessura do amostra que é obtida como segue.

A incerteza no diâmetro é de $\pm 0,13\%$ para a placa A e de $\pm 1\%$ para placa B.

Incerteza na espessura da amostra

A incerteza na espessura da amostra δt foi calculada a partir de 4 medições realizadas com o micrômetro da Fig. B.6 em pontos deslocados de 90° entre si no raio médio de um círculo circunscrito em cada amostra. Obtém-se a incerteza da medida utilizando-se o método de *Student* para um intervalo de confiança de 95%:

$$S = \sqrt{(t_n - \bar{t})^2 / n - 1} \quad \text{B.25}$$

$$\delta t_a = \pm SA / \sqrt{n} \quad \text{B.26}$$

Onde n é o número de pontos, S (eq. B.66) é o desvio e A é o coeficiente de *Student* tabelado.

A incerteza da medida (δt_a) deve estar contabilizada com àquela do próprio micrômetro (δt_m) da seguinte forma:

$$\delta t = \sqrt{\delta t_a^2 + \delta t_m^2} \quad \text{B.27}$$

Incerteza em permissividade devida ao DTD

Existem as incertezas do Testador (DTD) devido a sua impedância, que não é devida à amostra, mas sim, ao aparato. São equacionadas da seguinte forma, segundo o manual:

$$\delta \varepsilon'_{rt} = \varepsilon'_{re} / 100 \left(A_a + 0,04f^2 \varepsilon'_{re} \varepsilon_0 \left(\frac{\pi d}{2} \right)^2 / t_t + 100(\varepsilon'_{re} - 1) / \varepsilon'_{re} - t_t / 0,01 \right) \quad \text{B.28}$$

Assim pode se contabilizar as incertezas propagada e do testador da forma:

$$\delta \varepsilon'_r = \sqrt{\delta \varepsilon'_{rp}{}^2 + \delta \varepsilon'_{rt}{}^2} \quad \text{B.29}$$

E a incerteza total da permissividade em percentual da permissividade corrigida:

$$A_{\varepsilon_r'} = 100 \delta \varepsilon_r' / \varepsilon_{rc}' \quad \text{B.30}$$

c. Incerteza no fator de dissipação

Além da incerteza do Agilent LCR, existe a incerteza devida ao testador (DTD) que, segundo AGILENT (2000), para $\tan \delta < 0,1$, é da forma:

$$A_{D_t} = E_a + E_b \quad \text{B.31}$$

onde:

$$E_a = 0,005 + 0,4f^2 \varepsilon_r' \varepsilon_0 \left(\frac{\pi d}{2} \right)^2 / t_t \quad \text{B.32}$$

$$E_b = A_{\varepsilon_{re}'} D_x / 100 \quad \text{B.33}$$

A incerteza total, ou seja, do Medidor (A_{D_m}) junto com a do DTD foi calculada da seguinte forma:

$$A_D = \sqrt{A_{D_t} + A_{D_m}} \quad \text{B.34}$$

B.6 Apresentação e discussão dos resultados

Para o cálculo dos resultados as equações mostradas na seção anterior foram dispostas no programa computacional *EES – Engineering Equation Solver v. Academic*.

B.6.1 Resultados em capacitância e resistência

São mostrados na tabela abaixo os valores de capacitância e resistência adquiridos experimentalmente e a temperatura ambiental:

Tabela B.2 Capacitâncias e resistências e incerteza do Medidor.

Meios	Placa	Cp [pF]	Rp [MΩ]	$A_{LCR}, \pm [\%]$
PTFE T	A	3,34	626,5	0,66
PTFE L	A	3,20	532,8	0,66
Vidro A	A	12,44	1,9	0,55
Vidro B	B	0,29	57,1	0,75

Onde C_p é a capacitância do dispositivo preenchido com o líquido a ser testado e R_p é a resistência em paralelo do dispositivo preenchido.

B.6.2 Incerteza na espessura

Utilizou-se a placa A (Fig. B.3) para medição das propriedades dielétricas das amostras PTFE L, PTFE T e Vidro A. Para a amostra de Vidro B utilizou-se a placa B (Fig. B.4).

Tabela B.3 Espessuras das amostras e incertezas.

Amostra	$t_t,$ [mm]	Ponto 1 [mm]	Ponto 2 [mm]	Ponto 3 [mm]	Ponto 4 [mm]	Média [mm]	$\delta t,$ \pm [mm]
PTFE L	6,16	6,171	6,178	6,155	6,153	6,165	0,020
PTFE T	6,31	6,117	6,114	6,119	6,120	6,125	0,020
Vidro A	3,35	3,355	3,395	3,239	3,208	3,299	0,140
Vidro B	3,19	3,201	3,198	3,203	3,199	3,200	0,004

Deve se ressaltar que as espessuras medidas com o micrômetro da Fig. B.6, apresentadas na tabela acima, foram feitas somente para o cálculo da incerteza na espessura.

Já a espessura utilizada para os cálculos da permissividade, e de suas incertezas, foi aquela obtida no micrômetro do DTD.

B.6.3 Resultados em permissividade e dissipação e respectivas incertezas

São apresentados os resultados de permissividade relativa complexa, permissividade relativa, dissipação dielétrica e incertezas relativas.

Tabela B.4 Permissividade, dissipação dielétrica e respectivas incertezas.

Meios	Placa	ϵ'_r [-]	D [-]	$A_{\epsilon'_r}$ \pm [%]	$A_D/100$ \pm [-]	Temp. Amb. [°C]	Umidade. [%]
PTFE L	A	2,03	7,6E-5	1,39	292	26	54
PTFE T	A	1,99	9,3E-5	1,39	238	26	56
Vidro A	A	4,10	6,7E-3	4,42	3,07	25	55
Vidro B	B	5,00	9,7E-3	5,73	0,74	25	57

A grande incerteza apresentada para a dissipação dielétrica é basicamente devida à incerteza de medição do próprio Testador e também pelo módulo da mesma ser diminuto. A resistência, é da ordem de centenas de M Ω .

A incerteza relativa a permissividade também é basicamente devida a incerteza de medição do testador e da incerteza propagada da espessura da amostra, com uma parcela mínima devida ao Medidor.

B.7 Conclusões e Sugestões

Deve se considerar como melhor valor para a permissividade do Vidro Duran® o obtido da amostra Vidro B, isso porque foi o que apresentou o maior valor em permissividade, pois quando existe uma camada de ar entre o eletrodo e a amostra a permissividade diminui, o que

provavelmente aconteceu com a amostra Vidro A. Também, a amostra B apresentou menor incerteza em sua espessura.

O fato de o vidro ser refundido pode ter alterado suas propriedades dielétricas.

Não se verifica diferença entre a permissividade da amostra de PTFE transversal ou longitudinal ao eixo de extrusão, uma vez que a diferença dos valores estaria compreendida na incerteza de medição, caso se fizesse uma média entre as duas.

Sugere-se, quando da medição das propriedades dielétricas do vidro, para que se tenha uma menor incerteza nas medidas que se utilize uma amostra com as faces mais planas. Pode-se, também, utilizar o método de não-contato, ou seja, aquele que a amostra, apoiada no eletrodo fonte, fica em série com uma camada de ar entre os eletrodos, nos casos em que a amostra não é totalmente plana, entretanto, o manual AGILENT (2000) não dispõe o equacionamento para o cálculo da incerteza devida ao DTD.

B.8 Referências

AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent E4980A Precision LCR Meter: User's Guide*. 7. ed.

Japão, 2008. 549 p. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E4980-90070.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2008.

AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent 16451B Dielectric Test Fixture: Operation and Service*

Manual. 3. ed. Japão, 2000. 149 p. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/16451-90020.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAS. ASTM. Dissipation Factor (or

Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids: D924-04. United States, 2004a. 7 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAS. ASTM. Standard Test Methods for

AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation: D150-98. United States, 2004b. 20 p.