

**FÁBIO STABILE DE OLIVEIRA**

**MEDIÇÃO DE ESPESSURA E VELOCIDADE DE ONDA EM  
FILMES LÍQUIDOS UTILIZANDO LASER**

Trabalho apresentado a Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para a  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.

São Paulo

2003

**FÁBIO STABILE DE OLIVEIRA**

**MEDIÇÃO DE ESPESSURA E VELOCIDADE DE ONDA EM  
FILMES LÍQUIDOS UTILIZANDO LASER**

Trabalho apresentado a Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para a  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Engenharia  
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Jurandir Itizo  
Yanagihara

São Paulo

2003

a Nilson Narciso de Oliveira

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara a quem devo o incentivo para o mestrado, apoio para a realização desse trabalho bem como sugestões, críticas e diretrizes sem as quais não poderia tê-lo concluído.

Ao amigo Antonio Luiz Pacífico pela infra-estrutura deixada pelo seu trabalho, apoio e sugestões.

Ao amigo Amaury Rotger pela companhia e sugestões valiosas.

Aos estudantes Rodrigo Akira Sonomia Sabanai, Mariane Akemi Hota e Fábio Massato Hori pela ajuda, sugestões e auxílio no laboratório.

A Ana Marcia Targa, Grace Magiar e Luciana Cristina Rinaldi pelo apoio.

A Melissa de Mattos Pimenta pelo apoio e revisão do texto da qualificação.

A Tatiana Stabile de Oliveira pelo empréstimo do computador.

A Juliana Stabile de Oliveira pela revisão do texto.

Aos colegas do LETE - Laboratório de Engenharia Térmica e de Energia por todas as discussões e sugestões.

Ao amigo Francesco Valentino Grazini pelo apoio.

Ao técnico Ademir Ladeira pelo trabalho que prestou auxiliando a montar o laboratório, usinar peças e calibrar os apoios da mesa.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento - CNPq, pela bolsa concedida.

A Embraer - Empresa Brasileira de Aeronáutica por me liberar quatro horas por semana para dar prosseguimento ao meu trabalho.



A Escola Politécnica por todos estes anos de aprendizado e a todos os colegas,  
funcionários e professores.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
3.1 Estudo do escoamento bifásico.....	6
3.2 Caracterização do Escoamento.....	7
3.3 Técnicas Experimentais em Escoamento Bifásico.....	10
3.4 Conceituação da Medição de Velocidade e Espessura de Filme.....	11
3.4.1 Técnicas baseadas em medição de condutância.....	12
3.4.2 Técnica de contato de agulha.....	17
3.4.3 Técnica de fluorescência.....	18
3.4.4 Técnicas baseadas em medição de radiação.....	23
3.4.5 Técnicas de condutância entre arames.....	24
3.4.6 Técnicas baseadas em medição de capacitância.....	28
3.4.7 Técnica de eco ultra-sônico.....	29
3.5 Medição de espessura de filme utilizando técnica laser.....	32
3.6 Conclusão.....	45
<b>4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....</b>	<b>47</b>
4.1 Luz laser.....	47
4.2 Fibras ópticas e guias de onda.....	48
4.3 Absorção, dispersão e reflexão.....	53
4.4 Modelamento da técnica de medição de espessura de filme.....	56

<b>5 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO.....</b>	<b>62</b>
5.1 Equipamento óptico.....	62
5.2 Equipamento Mecânico.....	72
5.2.1 Canal metálico.....	73
5.2.2 Calibração do equipamento.....	79
5.2.3 Geração de ondas na interface.....	80
5.3 Equipamento Fotográfico.....	84
5.4 Instrumentos de medição.....	88
5.4.1 Medição do volume através da massa.....	89
5.5 Programas utilizados.....	90
<b>6 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>91</b>
6.1 Ajuste do canal.....	93
6.2 Calibração do sistema.....	95
6.3 Descrição da rotina de ensaio.....	96
6.4 Observações preliminares.....	98
<b>7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>100</b>
7.1 Comparação com o modelo.....	102
7.2 Dados de calibração do sistema.....	110
7.3 Espessura de filme.....	117
7.4 Dados fotográficos.....	123
7.5 Frequência da onda.....	126
7.6 Velocidade de onda.....	131
7.7 Comparação da velocidade de onda com dados teóricos.....	132
<b>8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>136</b>

**10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....139**

**ANEXO A: CÁLCULO DE INCERTEZAS.....142**

A.1 Incerteza na calibração por adição de líquido.....143

A.2 Incerteza da medição de velocidade da onda na interface.....147

A.3 Análise de incerteza da frequência.....148

A.4 Análise de incerteza da espessura fotografada.....148

## LISTA DE FIGURAS

- Fig. 3.1 Padrões de escoamento bifásico vertical para cima em tubulação.....7
- Fig. 3.2 Mapas de escoamento bifásico. Os dois mapas foram extraídos de HEWITT (1978), sendo o da esquerda para escoamento vertical para cima e o da direita, para escoamento horizontal.....8
- Fig. 3.3 Medição de filme médio através de medição de impedância em ANDREUZZI et al. (1988). Este sensor serve não apenas para medir espessura de filme mas fração de vazio.....13
- Fig. 3.4 (a) Bolha passando no centro da tubulação não pode ser detectada pelas técnicas normais que empregam corrente alternada. (b) Bolha passando no centro pode ser detectada pela técnica CECM. (c) Desenho esquemático do sensor.....15
- Fig. 3.5 Vista esquemática do sensor CECM pontual mostrado em FUKANO (1998). O eletrodo central A e o eletrodo C compõem a fonte de corrente contínua enquanto a leitura de condutância é feita entre o eletrodo A e B. ....16
- Fig. 3.6 Esquema do sensor de contato de agulha (1) agulha, (2) mecanismo movimentador e (3) eletrodo a ser posicionado na parede conforme HEWITT (1978).....18
- Fig. 3.7 Técnica de Fluorescência para a medição de espessura de filme. Os componentes do sistema acima são: (A) lâmpada de vapor de mercúrio, (B) filtros, (C) prismas, (D) espelho semi-refletor, (E) lentes objetivas, (F) parede da tubulação, (G) filme líquido, (H) espectrômetro, (I) fotomultiplicador, (J) amplificador, (K) osciloscópio gravador e (L) seletor de canais.....19
- Fig. 3.8 Secção em corte do atomizador estudado em DRISCOLL et al. (1992). O combustível é injetado na área anular.....20
- Fig. 3.9 Esquema de iluminação do filme dopado com material luminescente em

DRISCOLL et al. (1992).....	21
Fig. 3.10 (a) Cone de material plástico com purga de Nitrogênio para evitar entrada de água, (b) esquema óptico utilizado e (c) técnica de calibração em DRISCOLL et al. (1992).....	22
Fig. 3.11 Detectores de radiação X para a determinação de fração de vazio em uma corda do diâmetro em HEWITT (1978).....	23
Fig. 3.12 $\lambda$ -densidômetro de três feixes mostrado em HEWITT (1978).....	24
Fig. 3.13 (a) Eletrodos montados rentes à parede, (b) medidor de dois arames paralelos e (c) eletrodo rente à parede com arame.....	25
Fig. 3.14 Medidor de capacitância proposto em GERAETS; BORST (1988). A configuração helicoidal proposta é a melhor para esse tipo de medidor..	29
Fig. 3.15 (a) Esquema do equipamento montado em KAMEI; SERIZAWA (1998) para medição de espessura de filme líquido, (b) esquema de funcionamento do sensor e (c) forma do sinal resultante da emissão de um pulso de ultrassom. Quarto pico corresponde à interface entre fluido e gás.....	31
Fig. 3.16 Esquema experimental para medição de ângulo de interface e espessura proposto em SAMENFINK et al. (1996). Este esquema é baseado em um arranjo simples de divisores de feixe e dois detectores de posição possibilitam determinar o ângulo da interface em dois eixos.....	33
Fig. 3.17 Efeito do emprego de um obturador em WITTING et al. (1996).....	36
Fig. 3.18 Esquema do equipamento empregado para medição de velocidade utilizando Velocímetro a Laser de efeito Doppler (VLD) WITTING et al. (1996).....	36
Fig. 3.19 Como WITTING et al. (1996) relatam, quando a leitura é realizada em ângulo, os eixos da imagem emergem distorcidos sendo necessário o pós-processamento.....	37

- Fig. 3.20 Esquema experimental empregado por HULBURT; NEWELL (1996). O raio do círculo escuro formado determina a espessura de filme.....39
- Fig. 3.21 Equipamento empregado para medição com apenas uma fibra. Nota-se a montagem da fibra na parede do escoamento, não interferindo neste.....45
- Fig. 4.1 O ângulo de aceitação de uma fibra óptica é obtido considerando-se que a luz sofre reflexão total na interface entre núcleo e casca.....49
- Fig. 4.2 Formulação de primeira lei para o volume de controle sujeito a radiação monocromática.....54
- Fig. 4.3 Esquema geométrico para modelagem do sensor óptico. Utilizando simetria é possível determinar a posição e a quantidade de radiação que incide na imagem.....57
- Fig. 4.4 Esquema geométrico mostrando a origem do feixe no interior da fibra... 59
- Fig. 4.5 Resultados de simulação para fibras ópticas com diâmetro do núcleo de 50  $\mu\text{m}$  e 80  $\mu\text{m}$ , respectivamente. A abertura numérica da fibra é de 0,2 e a abertura do feixe laser emergente é de 5,28°, conforme é visto em OHBA et al. (1992).....61
- Fig. 5.1 Esquema do circuito óptico utilizado por PACIFICO (2000). Trata-se do mesmo esquema utilizado nesse trabalho, a diferença é que as pontas das fibras foram distanciadas da parede e o circuito foi condensado ao máximo.....63
- Fig. 5.2 Efeito da placa de meia onda em um feixe de luz monocromática. O plano de polarização é girado o dobro do ângulo de rotação da placa.....66
- Fig. 5.3 O Divisor de Feixes Polarizador ajusta a intensidade transmitida e a refletida, conforme o ângulo de polarização da placa de meia onda é alterado. Como pode ser observado, o plano de polarização do feixe transmitido é perpendicular ao feixe refletido.....68
- Fig. 5.4 Disposição dos amplificadores ao lado do osciloscópio, (a) amplificadores (b) osciloscópio.....71

Fig. 5.5 Canal metálico em duas vistas. Os apoios são ajustáveis.....	74
Fig. 5.6 Esquema de posicionamento da fibra óptica no fundo do canal.....	74
Fig. 5.7 Determinação da incerteza angular baseada no erro de medição desejado para o sistema.....	76
Fig. 5.8 Dispositivo para geração de ondas unidimensionais na interface do filme líquido.....	81
Fig. 5.9 Dispositivo para geração de ondas unidimensionais na interface do filme líquido.....	82
Fig. 5.10 Ondas geradas no canal.....	82
Fig. 5.11 Dispositivo para destruição de ondas.....	83
Fig. 5.12 Visualização do filme. Uma câmera fotográfica é acoplada a uma extremidade do fole e a objetiva à outra. A câmera é apontada para a lateral de acrílico.....	86
Fig. 5.13 Iluminação permitiu a utilização de filme de baixa sensibilidade, proporcionando alta resolução e baixo tempo de exposição.....	87
Fig. 5.14 Fotos mostram a montagem do sistema fotográfico sobre a mesa (a), a lâmpada de 1000 W empregada (b) e uma foto demonstrando o resultado desse esquema (c).....	88
Fig. 6.1 Curvas de aquecimento para o laser de He-Ne empregado. Nota-se que o patamar de equilíbrio é alcançado após 40 min, em média.....	92
Fig. 6.2 Valores diferentes de ajuste (offset) levam a faixas de pontos em diferentes curvas de calibração. O auto-ajuste do osciloscópio não pode ser utilizado para o levantamento da curva de calibração.....	93



Fig. 6.3 Corte longitudinal: esquema de nivelamento do canal utilizando duas fibras.....	94
Fig. 6.4 Instrumento de adição de líquido sendo pesado cheio, (a) vista superior da balança e (b) vista do prato da balança.....	95
Fig. 6.5 Levantar a haste para preencher o compartimento atrás da chapa.....	99
Fig. 7.1 Esquema experimental para levantamento de curvas de intensidade variando o ângulo e a distância do espelho em relação à ponta da fibra óptica conforme esquema (a), fotografia lateral (b) e detalhe da fixação da fibra em frente ao espelho com botões magnéticos (c).....	103
Fig. 7.2 Curvas levantadas utilizando goniômetro para posicionar o espelho.....	104
Fig. 7.3 Intensidade subtraída do sinal de fundo e adimensionalizada.....	105
Fig. 7.4 Distribuição de intensidade no feixe emergente da fibra óptica de acrílico. São mostradas duas curvas, a primeira com 76 mm de distanciamento do fotodiodo e a segunda com 123,9 mm.....	107
Fig. 7.5 Curvas de intensidade obtidas numericamente para fibra óptica com abertura de feixe de $23,16^\circ$ e diâmetro de $500 \mu\text{m}$ .....	108
Fig. 7.6 Menisco adere na ponta da fibra óptica ocasionando um degrau no gráfico de calibração.....	111
Fig. 7.7 Gráfico mostra os pontos obtidos no processo de levantamento da curva de calibração desconsiderando os pontos fora do líquido durante a fase em que o menisco descola da ponta da fibra.....	112
Fig. 7.8 Lei de Beer-Lambert não aproxima a curva obtida no canal 1.....	113
Fig. 7.9 Curva ajustada com polinômio do segundo grau.....	114
Fig. 7.10 Ajuste com polinômio de segundo grau para determinar a espessura em	

função do sinal.....	115
Fig. 7.11 Ajuste com polinômio de sexto grau para determinar a espessura em função do sinal.....	116
Fig. 7.12 Corte e saturação dos vários níveis de tensão registrados no canal 1 do osciloscópio.....	118
Fig. 7.13 Sinal filtrado com várias médias de três pontos aplicada sobre a conjunto de pontos várias vezes.....	119
Fig. 7.14 Sinal filtrado com média de três pontos aplicada quatro vezes no sinal amostrado.....	120
Fig. 7.15 Picos de tensão extraídos do sinal suavizados.....	121
Fig. 7.16 Dados transformados em espessura.....	122
Fig. 7.17 Fotografia da onda na posição onde as fibras ópticas estão instaladas. ....	123
Fig. 7.18 Espessura de filme medida pelo reflexo na interface.....	124
Fig. 7.19 Espessura de filme pela sombra da interface em (a). Gráfico da interface reconhecida pelo programa manual da mesma foto em (b).....	125
Fig. 7.20 Coeficiente de correlação obtido da correlação do canal 1 com o canal 2 em (a) e obtido da correlação do canal 1 com ele mesmo em (b).....	129
Fig. 7.21 Coeficiente de correlação obtido para determinação da frequência.....	130
Fig. 7.22 Coeficiente de correlação para três sinais amostrados de ondas, cujo batedor foi acionado em diferentes frequências.....	131
Fig. 7.23 Velocidades medidas e calculadas de acordo com MOODY (1990)....	134

## LISTA DE TABELAS

Tab. 6.1 Pontos levantados durante as rotinas experimentais.....	98
Tab. 7.1 Comparação entre velocidades (medida e teórica). As frequências obtidas também são mostradas.....	133

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CECM	<i>Constant Electrical Current Method</i>
DFP	Divisor de Feixe Polarizador
LDA	<i>Laser Doppler Anemometer</i>
LDV	<i>Laser Doppler Velocimeter</i>
LOCA	<i>Loss of Coolant Accident</i>
NEP	<i>Noise Equivalent Power</i>
PIN	Junção de material semiconductor tipo <i>p</i> , intrínseco ( <i>i</i> ) e tipo <i>n</i>
PSD	<i>Photovoltaic Sensor Detector</i>
VLD	Velocímetro a Laser por Efeito Doppler

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Fração da fluorescência recebida pelo detector
$a_1, a_2, a_3 \dots$	Coefficiente de polinômio ajustado por Método dos Mínimos Quadrados
$A$	Distância longitudinal da borda do canal até o centro da primeira fibra óptica [m]
$A$	Coefficiente de intensidade emergente
$A_{canal}$	Área da superfície do canal [m <sup>2</sup> ]
$b$	Coefficiente de atenuação
$B$	Comprimento longitudinal do canal [m]
$c$	Concentração de material luminescente [kg/m <sup>3</sup> ]
$C$	Terminal C
$d$	Diâmetro de orifício calibrado [μm]
$d_{espelho}$	Distância da ponta da fibra óptica ao espelho [mm]
$d_{pixel}$	Comprimento do pixel em relação à imagem [m/pixel]
$dx$	Deslocamento infinitesimal na direção x [m]
$dA$	Área infinitesimal [m <sup>2</sup> ]
$D$	Diâmetro do núcleo da fibra óptica [m]
$D$	Terminal D
$E$	Eficiência da fluorescência
$f$	Distância focal [mm]

$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)$	Função multivariável
$f_1(h_{filme})$	Função que fornece o nível de tensão em função da espessura de filme [V]
$f_2(S_{osciloscópio})$	Função que fornece a espessura de filme em função da leitura do osciloscópio [m]
$g$	Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$G_e^0$	Condutibilidade da secção dividida pela condutibilidade da secção cheia
$h1'$	Espessura do filme líquido sobre a fibra 1 [m]
$h2'$	Espessura do filme líquido sobre a fibra 2 [m]
$h_{cálibre}$	Altura do degrau usinado no cálibre [m]
$h_f$	Espessura de filme da ponta da fibra óptica à interface líquida [m]
$h_{filme(cámera)}$	Espessura do filme medido com câmara [m]
$h_{filme[pixel]}$	Espessura local de um ponto sobre a interface líquida dado em elementos de imagem
$h_{filme}$	Espessura do filme líquido resultante de medição [m]
$h_{líquido}$	Altura total da lâmina de líquido contida no canal (do fundo do canal até a interface líquida) [m]
$h_{pixel}$	Altura da fibra óptica medida em elementos de imagem
$h_{wall}$	Espessura da parede [m]
$H$	Espessura da lâmina de líquido [m]
$H_l$	Fração de vazão
$i$	Corrente do fotodiodo [μA]
$i_t$	Ângulo de reflexão total na lateral da fibra óptica [rad]

$I$	Intensidade de radiação monocromática [W/m <sup>2</sup> ]
$I_f$	Fluxo ou intensidade de radiação monocromática de fundo medido quando a fibra óptica é apontada para o infinito [W/m <sup>2</sup> ]
$I^*$	Fluxo de radiação monocromática total determinado por integração numérica [W]
$I^*$	Fluxo de radiação monocromática total medido [W]
$I_A$	Corrente na situação da instalação A
$I_B$	Corrente na situação da instalação B
$I_{CL}(z)$	Fluxo ou intensidade de radiação monocromática no centro do feixe laser à distância $z$ da ponta da fibra óptica [W/m <sup>2</sup> ]
$I_0$	Fluxo total de radiação monocromática emergente da fibra óptica [W]
$I_0$	Intensidade de radiação monocromática [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{entrando}$	Fluxo de radiação monocromática entrando no volume de controle [W/m <sup>2</sup> ]
$I_p$	Fluxo de radiação monocromática polarizado no plano $p$ [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{saindo}$	Fluxo de radiação monocromática saindo no volume de controle [W/m <sup>2</sup> ]
$I(r, z)$	Fluxo ou intensidade de radiação monocromática na direção normal a ponta da fibra óptica, na posição radial $r$ na distância $z$ da ponta da fibra óptica [W/m <sup>2</sup> ]
$I_R(r, z)$	Fluxo ou intensidade de radiação monocromática na direção que passa pela origem virtual na fibra óptica à posição radial $r$ na distância $z$ da ponta da fibra óptica [W/m <sup>2</sup> ]
$I_s$	Fluxo de radiação monocromática polarizado no plano $s$ [W/m <sup>2</sup> ]

$k$	Constante de calibração
$k$	Fator de abrangência dado em número de desvios padrão
$K_1$	Coefficiente de absorção para a luz incidente
$K_2$	Coefficiente de auto-extinção ( <i>self-quenching</i> )
$K_3$	Coefficiente de auto-absorção
$K_4$	Coefficiente de auto-absorção
$l$	Comprimento de referência ou distância da fibra a superfície líquida [m]
$L_{comprimento}$	Comprimento longitudinal do canal [m]
$L_{largura}$	Largura transversal do canal [m]
$m$	Espessura de filme [m]
$m$	Número de intervalos de amostra de atraso para o cálculo do coeficiente de correlação
$m_{100ml}$	Massa equivalente a um volume aproximado de 100ml [kg]
$m_{liquido}$	Massa de líquido [kg]
$n_0$	Índice de refração do ar
$n_1$	Índice de refração do núcleo de fibra óptica
$n_2$	Índice de refração da casca da fibra óptica
$n_{local}$	Espessura de filme local medida em pontos de imagem [pixel]
$n_{pixel}$	Número de pontos de imagem correspondentes ao comprimento de referência [pixel]
$N$	Número de amostras de um sinal



$P_{base}$	Coordenada da base da fibra óptica em elementos de imagem
$P_{ponta}$	Coordenada da ponta da fibra óptica em elementos de imagem
$q$	Calor gerado por unidade de volume [W/m <sup>3</sup> ]
$r$	Posição radial em relação ao centro do feixe [m]
$r$	Raio do núcleo da fibra óptica [m]
$r$	Raio da circunferência escura formada por feixe laser refletido na parede do canal opaco [m]
$r_l$	Raio menor [m]
$r_h$	Raio maior [m]
$R$	Relação comprimento por elemento de imagem
$R(z)$	Raio do feixe laser à distância $z$ da ponta da fibra [m]
$S$	Leitura de tensão [V]
$S_1$	Leitura do sinal de tensão do canal 1 do osciloscópio com intervalos de amostragem igualmente espaçados [V]
$S_2$	Leitura do sinal de tensão do canal 2 do osciloscópio com intervalos de amostragem igualmente espaçados [V]
$S_{osciloscópio}$	Leitura do osciloscópio [V]
$T$	Tensão lida no osciloscópio [V]
$u(x)$	Incerteza da variável $x$
$u_c(y)$	Incerteza combinada da variável $y$ obtida por meio de cálculo com base nas incertezas das variáveis com as quais se calcula $y$
$U$	Incerteza expandida

$v_p$	Velocidade de propagação de onda em lâmina de água [m/s]
$V_{100ml}$	Volume próximo de 100ml [m <sup>3</sup> ]
$V_A$	Tensão na situação da instalação A
$V_B$	Tensão na situação da instalação B
$V_l$	Velocidade média da fase líquida [m/s]
$V_g$	Velocidade média da fase gás [m/s]
$V_{liquido}$	Volume de líquido adicionado no canal [m <sup>3</sup> ]
$V_{sg}$	Velocidade superficial da fase gás [m/s]
$V_{sl}$	Velocidade superficial da fase líquida [m/s]
$x$	Coordenada do eixo x [m]
$x_c$	Coordenada no eixo x do centro da imagem da fibra óptica [m]
$x_m$	Coordenada do centro de elemento infinitesimal no domínio de integração
$X_1$	Componente de flutuação do sinal do canal 1
$X_2$	Componente de flutuação do sinal do canal 2
$y$	Distância da parede [m]
$y$	Coordenada do eixo y [m]
$y$	Resultado de cálculo de uma função multivariável
$y_c$	Coordenada no eixo y do centro da imagem da fibra óptica [m]
$y_m$	Coordenada do centro de elemento infinitesimal no domínio de integração
$Y$	Variável resultante de cálculo com dados experimentais

e que deve ser apresentada juntamente com sua incerteza expandida

$z$	Coordenada no eixo z [m]
$z_c$	Coordenada no eixo z do centro da imagem da fibra óptica [m];
$z_m$	Coordenada do centro de elemento infinitesimal no domínio de integração

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Coefficiente de absorção de radiação monocromática
$\delta A_{canal}$	Incerteza da área da superfície do canal [m <sup>2</sup> ]
$\delta d_{pixel}$	Incerteza associada ao comprimento do <i>pixel</i> em relação à imagem [m/pixel]
$\delta f$	Incerteza da frequência [Hz]
$\delta h_{cálibre}$	Incerteza da altura do degrau usinado no cálibre [m]
$\delta h_{filme}$	Incerteza da espessura do filme líquido [m]
$\delta h_{filme (cámara)}$	Incerteza na espessura do filme medido com câmera [m]
$\delta h_{filme [pixel]}$	Incerteza de um dado ponto pertencente a interface líquida em elementos de imagem
$\delta h_{filme (volume)}$	Incerteza da espessura de filme obtida sabendo-se o volume [m]
$\delta h_{líquido}$	Incerteza da altura total da lâmina de líquido contida no canal [m]
$\delta h_{nível}$	Incerteza do nível do canal sobre a ponta da fibra óptica relativa ao nivelamento do canal [m]
$\delta h_{pixel}$	Incerteza da altura da fibra em elemento de imagem
$\delta l$	Incerteza associada ao comprimento de referência [m]
$\delta L_{comprimento}$	Incerteza do comprimento longitudinal do canal [m]
$\delta L_{largura}$	Incerteza da largura transversal do canal [m]
$\delta m$	Incerteza no número de intervalos de amostragem que possui o atraso apresentado entre dois sinais para o cálculo da velocidade

$\delta m_1, \delta m_2 \dots \delta m_n$	Incertezas de quantidades discretas de água adicionada no canal [kg]
$\delta m_{100ml}$	Incerteza da massa equivalente a aproximadamente 100ml [kg]
$\delta m_{liquido}$	Incerteza da massa de líquido [kg]
$\delta n$	Incerteza no número de intervalos de amostragem que possui o atraso apresentado entre dois sinais para o cálculo da frequência
$\delta n_{local}$	Incerteza na espessura de filme local medida em pontos de imagem [pixel]
$\delta n_{pixel}$	Incerteza associada ao número de pontos de imagem correspondentes ao comprimento de referência [pixel]
$\delta P_{base}$	Incerteza da coordenada da base da fibra óptica em elementos de imagem
$\delta P_{ponta}$	Incerteza da coordenada da ponta da fibra óptica em elementos de imagem
$\delta P^2_{ponto}$	Incerteza da coordenada de um dado ponto sobre a interface líquida em elementos de imagem
$\delta R$	Incerteza da relação comprimento por elemento de imagem
$\delta S$	Incerteza da leitura de tensão associada à incerteza de nível [V]
$\delta S_{calibração}$	Incerteza da leitura de tensão associada ao processo de calibração [V]
$\delta S_{osciloscópio}$	Incerteza da leitura de tensão no osciloscópio [V]
$\delta V$	Incerteza associada à velocidade de onda [m/s]
$\delta V_{100ml}$	Incerteza do volume de 100ml de água [m <sup>3</sup> ]

$\delta V_{\text{liquido}}$	Incerteza do volume de líquido adicionado ao canal [m <sup>3</sup> ]
$\delta \rho$	Incerteza da densidade [kg/m <sup>3</sup> ]
$\delta \Delta s$	Incerteza associada à distância percorrida pela onda [m]
$\delta \Delta t$	Incerteza associada ao intervalo de tempo entre duas amostras de sinal [s]
$\Delta \lambda$	Intervalo de banda [nm]
$\Delta \tau$	Alargamento de banda [s]
$\Delta s$	Distância percorrida pela onda [m]
$\Delta S$	Distância do fotodetector ao prisma [m]
$\Delta t$	Intervalo de tempo entre duas amostras de sinal [s]
$\vartheta$	Ângulo de incidência com a normal em superfície de feixe luminoso [rad]
$\vartheta$	Ângulo de abertura do feixe laser emergente da fibra óptica [rad]
$\vartheta'$	Ângulo com a normal de feixe luminoso refratado [rad]
$\vartheta_{\text{Film}}$	Ângulo do plano do objeto com o eixo óptico da objetiva de detecção
$\theta$	Ângulo de incidência máximo com o eixo óptico na fibra óptica [rad]
$\theta$	Ângulo de abertura de feixe laser emergente da fibra óptica [rad]
$\theta$	Ângulo de rotação do plano de polarização [rad]
$\theta'$	Ângulo de refração do raio incidência na ponta da fibra óptica relativo ao ângulo de incidência máximo com o eixo óptico [rad]

$\theta_{nível}$	Ângulo da superfície líquida com o fundo do canal [rad]
$\lambda$	Comprimento de onda de radiação eletromagnética [nm]
$\mu_{S_1}$	Média do sinal do canal 1
$\mu_{S_2}$	Média do sinal do canal 2
$\rho$	Densidade da água [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_l$	Densidade da fase líquida [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	Densidade da fase gás [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{S_1 S_2}$	Coefficiente de correlação entre sinais discretos
$\tau$	Intervalo de tempo de propagação de pulso [s]
$\phi$	Ângulo de inclinação da superfície líquida [rad]
$\psi$	Ângulo do vetor $I_R$ com o eixo da fibra óptica [rad]
$\omega$	Ângulo de rotação de eixo de polarização [rad]

## Subscritos

<i>0</i>	Indica fluxo originário, inicial do feixe laser ou emergente da fibra óptica
<i>A</i>	Referente à situação A
<i>B</i>	Referente à situação B
<i>c</i>	Variável refere-se ao centro
<i>calibração</i>	Referente ao processo de calibração
<i>cálibre</i>	Refere-se ao padrão metálico utilizado para posicionar as fibras ópticas no canal
<i>canal</i>	Referente ao canal de ensaio
<i>CL</i>	Refere-se ao centro
<i>comprimento</i>	Referente à medida de tamanho longitudinal do canal
<i>e</i>	Referente à corrente elétrica
<i>entrando</i>	Referente à grandeza entrando no volume de controle
<i>f</i>	Referente ao filme líquido
<i>f</i>	Referente a fundo (radiação de fundo)
<i>filme (câmera)</i>	Referente à variável do filme medida através de imagem lateral obtida com câmera
<i>filme (volume)</i>	Referente à variável obtida pela medição do volume
<i>g</i>	Referente à fase gasosa
<i>l</i>	Referente ao líquido
<i>largura</i>	Referente à medida de tamanho transversal do canal
<i>líquido</i>	Referente à fase líquida no interior do canal



<i>local</i>	Referente ao valor local de variável
<i>m</i>	Referente ao elemento discreto de integração no interior do domínio
<i>nível</i>	Referente ao nível de líquido no canal
<i>osciloscópio</i>	Referente à medida obtida, direta ou indiretamente, com osciloscópio
<i>p</i>	Referente ao plano horizontal que contém a direção de propagação da luz
<i>pixel</i>	Referente ao elemento de imagem
<i>s</i>	Referente ao plano vertical que contém a direção de propagação da luz
<i>saindo</i>	Referente à grandeza saindo do volume de controle
<i>t</i>	Referente ao valor total
<i>R</i>	Referente à direção radial
<i>sg</i>	Referente à variável média da fase gasosa
<i>sl</i>	Referente à variável média da fase líquida $S_1 S_2$ sinal dos canais um e dois do osciloscópio

## **Sobrescritos**

- 0                    **Refere-se ao quociente adimensional de valor intermediário por valor total**
- \*                   **Referente ao valor pontual de função**

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento da técnica de medição de espessura de filme e velocidade em escoamentos de filme líquido, utilizando medição da intensidade de laser em meio líquido. Esta técnica foi desenvolvida para estudo de escoamento anular mas tem sido pouco utilizada até o presente momento devido à complexidade do equipamento, se comparada com outras técnicas.

A técnica a laser utiliza a reflexão do feixe laser na interface da água e atenuação de sua intensidade para determinar a posição da interface. Sendo assim, é necessário o levantamento de curvas de calibração que relacionem intensidades com espessuras.

Neste trabalho foi estudado um modelo teórico para o fenômeno óptico empregado na medição de espessura de filme. Os resultados numéricos do modelo foram comparados com experimentos simples utilizando espelho plano.

Um experimento controlado foi feito utilizando-se ondas unidimensionais em um pequeno canal onde foram variadas a frequência da interface através de um batedor e a espessura da lâmina de água através de adições de líquido. Foi feita uma medida de referência da espessura da interface utilizando fotografia na lateral transparente do canal para comparar com os resultados de espessura lidos utilizando a técnica laser.

Os resultados dos ensaios mostraram coerência para espessura, quando comparada com dados fotográficos, e boa concordância para velocidade de propagação de onda na interface, quando comparados com dados teóricos.

## ABSTRACT

The objective of this work is to develop a film thickness and velocity measurement technique using laser intensity measurement in liquid film flow. This technique was developed for annular flow studies, but it has been scarcely used due to the equipment's complexity, if compared to other techniques.

The laser technique uses the reflection of the laser beam in water interface and the attenuation of its intensity to determine the interface position. Thus, the relation between intensity and thickness must be obtained by calibration.

A theoretical model was proposed to model the optical phenomena present in the film thickness measurement. The numerical results of the model were compared to a simple experiment using a planar mirror.

A controlled experiment was made using unidimensional waves in a short channel where the wave frequencies were varied by changing the vibrator's frequency and the film thickness were modified by changing the liquid volume. The reference film thickness was obtained by the analysis of photographic data taken through the channel transparent walls, allowing the comparison to the results taken by the laser technique.

The experimental results for the film thickness presented a good agreement to reference photographic data. The interface wave propagation velocity were measured with a good accuracy, showing good agreement to the theoretical data.

## 1 INTRODUÇÃO

A instrumentação geralmente empregada para o estudo de escoamento bifásico baseia-se numa série de princípios, cada qual com uma faixa de aplicação específica. Cada técnica é utilizada no estudo de um determinado fenômeno, ou seja, o escoamento bifásico possui uma tipologia associada aos padrões de escoamento sendo que, cada padrão (de escoamento) possui um número restrito de formas de medição de uma dada variável

As variáveis medidas em escoamento bifásico são importantes na formulação de modelos para os diversos tipos de padrões de escoamento, sendo que a sua obtenção empírica é a única forma de levantar correlações para este modelamento. Essas correlações são utilizadas para o projeto de equipamentos, onde o escoamento interno ocorre em duas fases, sendo necessário o exato conhecimento dos fenômenos decorrentes para dimensionar equipamentos e otimizá-los.

Exemplos de aplicação ocorrem de diversas áreas, como a combustão, refrigeração, trocadores de calor em caldeiras etc. Os estudos que despertaram o interesse para o escoamento bifásico surgiram das novas necessidades da indústria de potência quando do início do desenvolvimento de caldeiras mais eficientes como as aquatubulares e flamotubulares. Problemas como ocorrência de erosão no material das tubulações e rompimentos propiciaram motivos suficientes para um grande desenvolvimento teórico desta área.

Outro fator que alavancou o desenvolvimento desta área foi o crescente interesse que ocorreu nas décadas de 30 e 40 pela utilização de combustível líquido

em propulsão de foguetes. O combustível líquido possuía características técnicas que o tornava interessante para essa aplicação, pois ao contrário dos combustíveis gasosos, os combustíveis líquidos possuem alto poder calórico ocupando um volume menor, e não necessitam de vasos de pressão reforçados para o armazenamento. O único inconveniente é que necessitam de condições adequadas de nebulização na câmara de combustão, que até aquele momento eram pouco conhecidas.

A utilização mais recente das técnicas de medição de parâmetros em escoamento bifásico ocorre no estudo do comportamento do núcleo de reatores do tipo BWR (do inglês *Boiling Water Reactor*) ou reatores de água em ebulição como em KAMEI; SERIZAWA (1998). Nesses reatores, o escoamento de fluido refrigerante ocorre em torno das barras de combustível. Este escoamento é uma mistura de duas fases. A barra de combustível é refrigerada pela fase líquida, devendo estar suficientemente imersa nesta para garantir a refrigeração adequada do elemento combustível.

Um exemplo de aplicação de interesse nacional é o estudo de bocais nebulizadores em PACIFICO (2000). Neste trabalho, levantou-se parâmetros de processo para obtenção de correlações, visando a otimização do projeto de nebulizadores do tipo Y-Jet. A técnica óptica, assunto da presente dissertação, foi empregada no referido trabalho para a medição da espessura de filme e velocidade de interface no escoamento anular no interior do bocal. O objetivo era formular modelos, baseados nas equações de transporte utilizando estes dados, pois o filme que se forma na parede no escoamento anular tem grande influência nos fenômenos de transporte em ambas as fases.

A formulação de modelos para o escoamento anular é importante para a otimização dos parâmetros de processo de bocais nebulizadores quanto a fatores

econômicos e ambientais.

Nesse trabalho, a técnica a laser foi empregada apenas para a obtenção da distribuição de espessura de filme líquido, visando obter o comportamento da fração de vazio, ou seja, a técnica em si não era o objeto de estudo. Agora, no presente trabalho, pretende-se estudar a técnica propriamente dita.

As conclusões de PACIFICO (2000) apontam para resultados satisfatórios quanto à medição de velocidade do filme. Por outro lado, a medição de espessura não resultou em dados conclusivos devido à dificuldade de caracterização do padrão de escoamento, ocasionada, segundo o autor, por inexistência de dados na literatura, mostrando que as técnicas de medição de parâmetro em escoamento bifásico estão intimamente ligadas aos padrões.

A técnica proposta a ser analisada neste trabalho emprega o laser. Entretanto, para a mesma aplicação, existem outras técnicas, baseadas em outros princípios. Será feita uma breve descrição das outras técnicas para situar o objeto de estudo deste trabalho, citando as vantagens e desvantagens comparativamente.

A técnica da medição de espessura e velocidade de filme em escoamento bifásico que será tratada neste trabalho, utiliza luz laser, a qual é lançada numa fibra óptica que conduz a radiação até o ponto de medição. Neste ponto, é refletida pela interface do escoamento. A radiação refletida é detectada na extremidade de lançamento da fibra por meio de sensores fotocondutivos capazes de medir a intensidade da luz. Por meio de uma curva de calibração, essa intensidade pode ser relacionada com a espessura do filme líquido.

A velocidade pode ser determinada com base na hipótese de Taylor da turbulência congelada. Neste caso, as ondas (correspondentes aos turbilhões da turbulência) da interface mantêm, aproximadamente, durante um curto espaço de

tempo, o seu formato (formato da interface). Exceto por uma pequena deformação, causada por dissipação de energia, pode-se considerar que a superfície se mantém aproximadamente a mesma, em curtas distâncias, e que, os sinais detectados pelas duas fibras ópticas, que compõem o sensor, serão semelhantes e passarão pela ponta de cada fibra, em intervalos de tempo distintos. Conhecendo-se a distância entre as fibras, é possível correlacionar os sinais e obter a velocidade da onda.



## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é o desenvolvimento da técnica experimental de medição de espessura e velocidade de filme líquido através de um sistema óptico que mede a atenuação de radiação laser. A metodologia empregada utiliza cálculos numéricos, medições com espelho e ensaio em laboratório em uma situação de medição criada artificialmente. Mais especificamente, os objetivos são:

- Estudar, utilizando a simulação numérica, o comportamento da fibra óptica quando são variados os parâmetros do sistema (diâmetro do núcleo, abertura de feixe);
- Realizar ensaios com espelho plano para comparar os resultados numéricos com os experimentais;
- Comparar os resultados experimentais e numéricos com os resultados obtidos em literatura para determinar quais as características do sistema óptico que contribuem para a melhoria da qualidade dos resultados;
- Realizar um experimento controlado criando ondas em um canal pequeno, variando a espessura do filme e a frequência das ondas para verificar o comportamento do sistema óptico;
- Comparar as medições feitas no canal com medições obtidas através de fotografia;
- Comparar os resultados de velocidade com a teoria.

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 Estudo do escoamento bifásico

Segundo HEWITT (1978), em diversas aplicações na indústria ocorrem situações onde equipamentos operaram com fluido escoando em duas fases distintas.

Na indústria de processo, há exemplos clássicos onde ocorre escoamento bifásico, como por exemplo, nos evaporadores e condensadores, onde uma única substância química flui mudando de fase. Nessas condições, ocorrem processos de mudança de fase que envolvem troca de calor e situações de não equilíbrio, onde é necessária a compreensão dos fenômenos envolvidos, afim de estabelecer um conhecimento que seja suficiente para construir tais equipamentos, otimizando-os, na medida das necessidades do projeto.

Ainda dentro da indústria de processos, temos o exemplo das torres de destilação e de absorção, onde ocorrem situações de mudança de fase no escoamento envolvendo troca de calor e de massa em fluido, o qual é constituído por uma mistura de duas substâncias.

Já na indústria de potência, o escoamento de duas fases é comum em geradores de vapor, em turbinas, condensadores, reatores nucleares, refrigeradores, ar condicionados, resfriadores criogênicos, combustores de leito fluidizado, nebulizadores de caldeira etc.

Os exemplos abordados mostram a importância do estudo do escoamento bifásico e as razões para os recursos gastos com o seu estudo.

### 3.2 Caracterização do Escoamento

A diferença entre os vários tipos de escoamento bifásico, segundo HEWITT (1978), decorre da existência ou não da interface deformável, cuja forma e distribuição são de importância crítica para a determinação das características do escoamento.

Em escoamentos com interface deformável, o efeito da tensão superficial causa a tendência de deformação em superfícies arredondadas como bolhas e gotas. O escoamento no interior de tubulações torna-se difícil de ser analisado, pois a maneira como este se acomoda espacialmente passa a ser determinada pelos parâmetros de processo. Sendo assim, passou-se a analisar o escoamento bifásico associando-o a padrões típicos como mostra a figura 3.1.

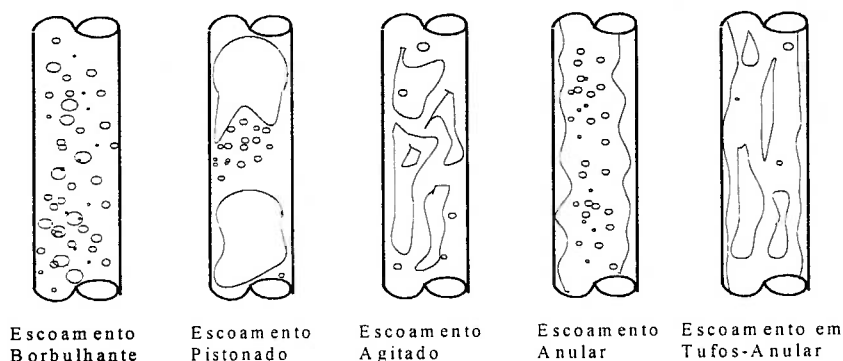


Fig. 3.1 Padrões de escoamento bifásico vertical para cima em tubulação.

Os desenhos estão ordenados à medida que o fluxo de massa aumenta. Sendo assim, o padrão em Tufos-Anular é o de maior fluxo de massa.

Escoamentos horizontais sofrem ação da gravidade e a fase de maior densidade possui a tendência de se concentrar na parte inferior da tubulação, sendo que, à medida que a velocidade superficial do gás aumenta, a fase líquida tende a se

distribuir uniformemente ao longo da superfície interna da tubulação com o gás escoando no centro. Grandes esforços são feitos no sentido de identificar os vários padrões de escoamento, e o resultado desse trabalho são os mapas de escoamento como os demonstrados na figura 3.2.

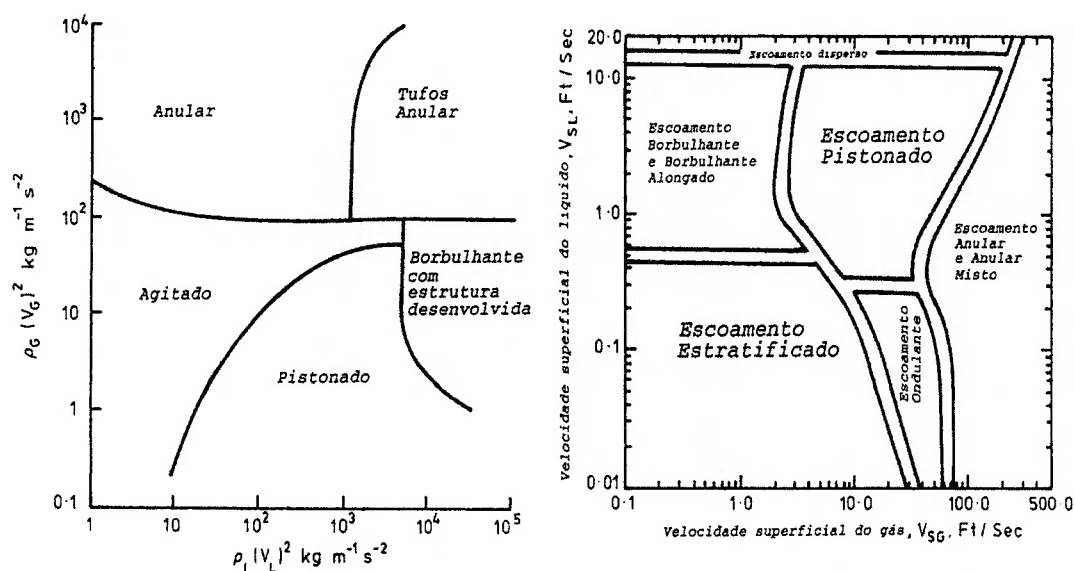


Fig. 3.2 Mapas de escoamento bifásico. Os dois mapas foram extraídos de HEWITT (1978), sendo o da esquerda para escoamento vertical para cima e o da direita, para escoamento horizontal.

Entretanto, estes mapas são alvo de críticas e revisões constantes, pois estes padrões, muitas vezes, são baseados em formas subjetivas de caracterização, dadas as dificuldades técnicas para a visualização dos mesmos. Além disso, outras subclassificações surgem entre as classes vistas anteriormente e, mesmo dentro de cada classe, padrões de escoamento superficial ocorrem em separado, como no exemplo da ondas superficiais estudadas em OHBA; NAGAE (1993), onde preocupou-se em caracterizar o comportamento das ondas superficiais no escoamento anular. Estas ondas, no trabalho citado, são caracterizadas como ondas de flutuação, distúrbio, anel, anel quebrado e suspenso.

A primeira dificuldade de identificação do padrão de escoamento é superada quando se utilizam tubulações transparentes e fotografia de alta velocidade. Tal procedimento é necessário em determinadas situações onde o olho humano não consegue identificar diferenças significativas entre determinados padrões de escoamento. Entretanto, a curvatura das tubulações ocasiona problemas relacionados com os diferentes índices de refração dos meios interno e externo. Deste modo, técnicas experimentais que utilizam luz de grande coerência para medir parâmetros com baixa incerteza são prejudicadas, devido ao fato de que superfícies curvas provocam diferença de caminho óptico entre os raios emergentes na parede da tubulação.

A solução está na adoção de tubulações com paredes planas (secção quadrada) e manipulação do índice de refração dos elementos, para que o líquido no interior da tubulação e o acoplamento ao sistema óptico minimizem a introdução de diferenças de caminho óptico, que podem prejudicar as leituras ou pós processamento dos dados de ensaio, e que levem em conta a distorção dos raios emergentes.

Como se verifica em COLLIER; THOME (1996), existe a dificuldade de se formular correlações globais e mesmo executar simulações computacionais em escoamento bifásico. O resultado observado na literatura é uma grande quantidade de correlações empíricas, cada qual levantada para um determinado padrão de escoamento bem definido. Essas correlações evoluem e são melhoradas a medida que os instrumentos de ensaio são aperfeiçoados e o conhecimento acerca do fenômeno é desenvolvido.

Ainda conforme COLLIER; THOME (1996), o interesse no estudo da evaporação convectiva remonta ao século passado, mas apenas com o advento da tecnologia nuclear e da propulsão a jato, a partir da Segunda Guerra Mundial, houve

o estímulo necessário à pesquisa sobre este assunto. O crescimento do número de publicações, segundo esse autor, é exponencial com o tempo. Esse número dobrou em 1940 e em 1970, contabilizando cerca de 10.000 publicações. Mesmo assim, apesar de os métodos empíricos de projeto de equipamentos de troca de calor bifásico terem evoluído consideravelmente nas últimas duas décadas, permanece sendo um assunto pouco estudado.

### **3.3 Técnicas Experimentais em Escoamento Bifásico**

HEWITT (1978) separa os parâmetros de escoamento bifásico em parâmetros primários, secundários e terciários. Segundo este autor, os parâmetros primários são aqueles diretamente relacionados com o projeto do equipamento. Exemplos desses são a perda de carga, o fluxo de calor, as falhas e prováveis efeitos, a potência de eixo, a pressão de operação, a vazão, a temperatura, a refrigeração dos elementos combustíveis nucleares submetidos a super-aquecimento, etc.

Já os parâmetros de segunda ordem são obtidos a partir da pesquisa do sistema, com o objetivo de obter um projeto melhor. A análise individual dos componentes leva ao levantamento de correlações, que tornam possível o projeto do sistema. Essas correlações são obtidas com base em parâmetros de segunda ordem.

São exemplos de parâmetros de segunda ordem o padrão de escoamento, a espessura média de filme, a distribuição de fluxo de massa, a distribuição de concentração de fase, a fração volumétrica local, as velocidades e fluxos de momento, as características de mistura e transporte de massa, as dimensões de gotas, bolhas e partículas, a tensão de cisalhamento na parede, a distribuição de temperatura, o ângulo de contato etc.

Os parâmetros de terceira ordem levam em conta o fato do escoamento bifásico ser transitório. Enquanto os parâmetros de segunda ordem são médias temporais de certas grandezas, os parâmetros de terceira ordem são as flutuações. Estes parâmetros também não são de direta relevância para o projeto de um equipamento, mas nem por isso o conhecimento destes deixa de ser importante. São exemplos de parâmetros de terceira ordem as flutuações de velocidade, concentração de fase, temperatura, tensão de cisalhamento na parede etc. A possibilidade de medir tais parâmetros aumenta com a evolução das técnicas experimentais. Técnicas experimentais mais rápidas permitem obter dados mais realistas sobre esses parâmetros.

Como pode ser observado, muitas dessas propriedades são intensivas e necessitam ser medidas localmente no interior do escoamento. Sendo assim, na maioria das vezes, deve-se empregar técnicas não invasivas. Uma série grande de métodos experimentais não invasivos vêm sendo propostas por diversos autores, a fim de substituir as técnicas invasivas.

### 3.4 Conceituação da Medição de Velocidade e Espessura de Filme

Conforme a afirmação de HEWITT (1978), a medição de espessura de filme no escoamento anular é importante para testar modelos teóricos pois, como será detalhado adiante, as características do filme influenciam as propriedades de transporte.

Várias técnicas podem ser empregadas para essa medição, as quais segundo HEWITT (1978), podem ser agrupadas em três grupos principais:

- Método de filme médio: é determinada a espessura de filme através da medição da condutância, indutância ou capacitância em segmento de tubulação baseando-se em corrente contínua ou alternada;
- Métodos localizados: é determinada a espessura de filme através da medição de condutância total, capacitância, indutância, absorção de radiação de feixe ou emissão de radioisótopo dissolvido no filme líquido;
- Medição pontual: é determinada a espessura de filme utilizando técnicas como a do contato de agulha, absorção de luz, método de fluorescência, absorção de feixe fino de raio X, método de corrente contínua pontual, métodos baseados em ultrassom, reflexão de luz pela interface;

Serão detalhados alguns métodos de medição de filme líquido mais utilizados atualmente, fornecendo dados comparativos para análise. Observou-se que cada fenômeno em escoamento bifásico possui um método de medição mais apropriado.

#### 3.4.1 Técnicas baseadas em medição de condutância

HEWITT (1978) explica que o Método de Condutância mede a condutância entre dois eletrodos, passados através das paredes "não condutoras" do canal. Quanto mais próximos os eletrodos, menor a espessura do filme máximo que pode ser medida e o líquido deve ser dopado com eletrólito. Em algumas aplicações, esses sensores podem ser usados em modo capacitivo. Esse método opera em região linear apenas a partir de uma dada distância entre os eletrodos, sendo que a região linear diminui à medida que os eletrodos são aproximados.

De fato, ANDREUZZI *et al.* (1988) demonstra que, se os eletrodos estiverem afastados a uma distância muito maior que a espessura de filme que se pretende



medir, é possível relacionar a leitura da condutância com a fração líquida instantânea na secção, tendo como restrição a frequência da corrente que deve ser superior a 100 kHz. Acima deste valor, a impedância possui ângulo de fase nulo e a resistência é medida direta da impedância. No caso de fluidos não condutores, é possível a medição da capacitância. Segundo o mesmo autor, a calibração do sistema é simples, mas a frequência deve ser acima de 100 kHz.

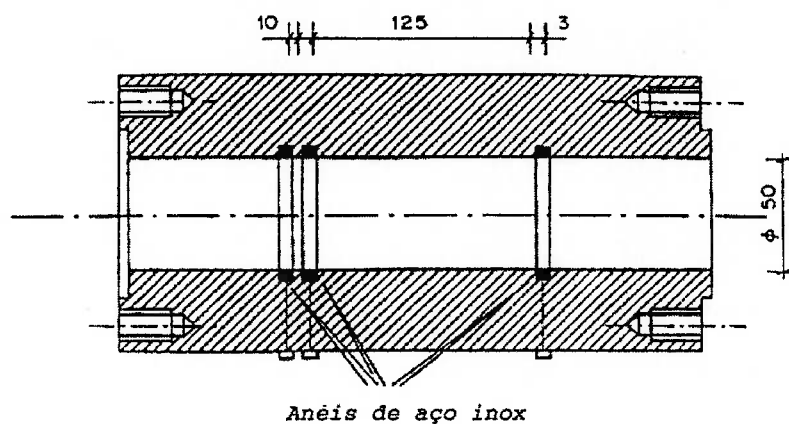


Fig. 3.3 Medição de filme médio através de medição de impedância em ANDREUZZI *et al.* (1988). Este sensor serve não apenas para medir espessura de filme mas fração de vazio.

ANDREUZZI *et al.* (1988) também demonstra que, para medir a fração líquida, uma técnica simples é medir a condutividade elétrica desta e dividir pela leitura experimental da condutividade com a tubulação cheia de líquido obtendo a fração de líquido por uma das duas relações:

$$G_e^0 = \frac{2 \cdot H_l}{3 - H_l} \quad (3.1)$$

$$G_e^0 = H_l^{\frac{2}{3}} \quad (3.2)$$

Nas equações acima  $G_e^0$  é a condutividade medida e adimensionalizada pela

leitura efetuada com a tubulação cheia. A variável  $H_l$  é a fração de área  $A$  da tubulação ocupada pela fase líquida.

A calibração realizada para comparar com as relações acima foi feita com barras de *plexiglass* de diâmetro conhecido, colocadas no interior da tubulação, simulando a fase gasosa, o que resulta em uma boa concordância com ambas as relações.

Um dado importante sobre este sistema é que, para o caso de medição de espessura de filme em uma dada secção, ele fornece uma espessura média e não pontual. Outro dado importante é que, ao contrário das técnicas convencionais, ela independe do tipo de escoamento, desde que a espessura ou as dimensões máximas sejam muito menores que o distanciamento entre os eletrodos. As técnicas de medição de impedância convencionais são falhas no sentido de que a distribuição de densidade de corrente no volume medido é muito concentrada na parede. Sendo assim, se uma bolha passar no centro da tubulação, ela pode não ser detectada.

FUKANO (1998) propõe uma solução para esse problema que consiste em separar os eletrodos de medição dos eletrodos que fornecem corrente. Esta técnica é denominada CECM (*Constant Electric Current Method*). Utilizando corrente contínua e afastando os eletrodos é possível tornar homogênea a densidade de corrente na tubulação. A condutância é medida por sensores instalados entre os dois eletrodos, sendo os sensores constituídos de dois anéis montados rente à parede e que não necessitam ter um distanciamento muito grande como na técnica anterior. Eles são conectados em um amplificador com alta impedância de entrada, o que ocasiona uma influência mínima sobre a fonte e os outros sensores.

Na técnica de corrente contínua convencional, a saída aumenta assintoticamente à medida que a espessura de filme aumenta em valores cada vez

menores, quando comparados com a distância entre eletrodos. A vantagem desse método é que, no CECM, a distribuição de corrente é uniforme e conseqüentemente a linearidade entre a espessura de filme e a saída é boa.

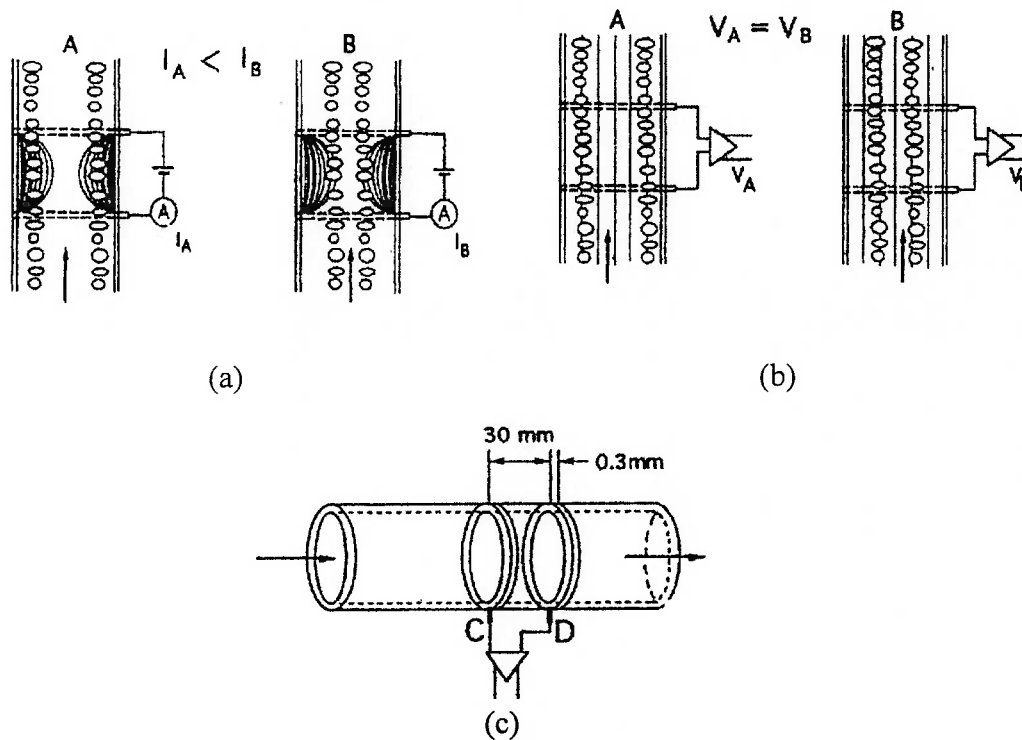


Fig. 3.4 (a) Bolha passando no centro da tubulação não pode ser detectada pelas técnicas normais que empregam corrente alternada. (b) Bolha passando no centro pode ser detectada pela técnica CECM. (c) Desenho esquemático do sensor.

Quando a resistência é elevada, a corrente é mantida constante, mesmo em espessuras pequenas, pois os sensores possuem alta impedância de entrada. Sendo assim, quanto menor a espessura do filme, maior a queda de tensão. É importante ressaltar que a medição de fração líquida fornecida por este instrumento, é uma média do volume que engloba os dois anéis dos sensores.

FUKANO (1998), no mesmo artigo, descreve um sensor capaz de fornecer espessura de filme local utilizando o CECM. Este sensor pode ser observado na

figura 3.5.

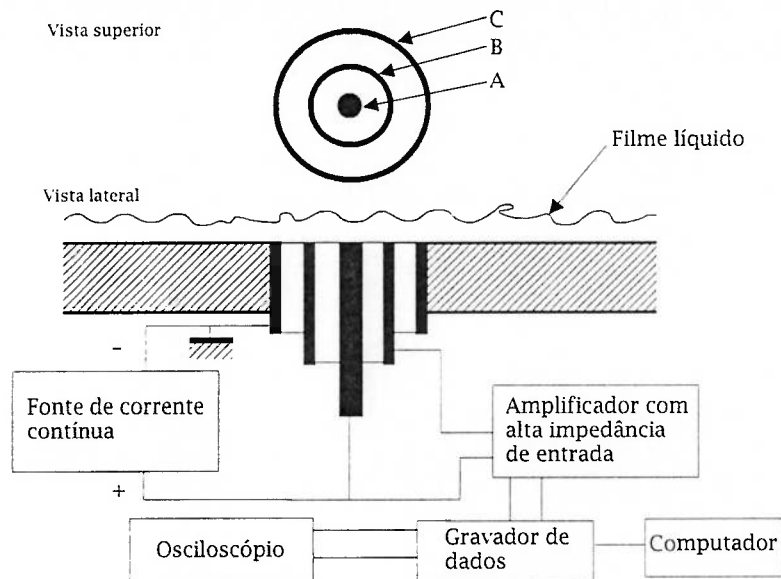


Fig. 3.5 Vista esquemática do sensor CECM pontual mostrado em FUKANO (1998). O eletrodo central A e o eletrodo C compõem a fonte de corrente contínua enquanto a leitura de condutância é feita entre o eletrodo A e B.

Como pode-se ver na figura 3.5, este sensor possui fonte própria de modo que, quanto maior o diâmetro do eletrodo externo, melhores resultados são obtidos, pois seu diâmetro afeta a uniformidade da corrente elétrica.

Entretanto, uma desvantagem desse eletrodo, segundo o autor, é que a linearidade entre a leitura e a espessura de saída não é boa, exigindo o levantamento da curva de calibração. Outra desvantagem é que cada sensor deve possuir sua própria fonte em separado.

Quando esse sensor de condutância é utilizado para medir espessuras muito pequenas, o anel externo deve ser menor do que a espessura a ser medida, de modo a assegurar uma boa resolução. Sendo assim, supõe-se que, para espessuras muito pequenas (inferiores a 0,5 mm), o custo de construção deste tipo de sensor

inviabilizaria sua utilização.

Por outro lado, a leitura desse sensor fornece diretamente o valor local da espessura de filme, o que constitui uma vantagem em relação à técnica laser descrita em OHBA *et al.* (1992), pois esta técnica, quando utilizada, permite somente a medição de vales e picos, não fornecendo a espessura de valores intermediários (que possuem inclinação da interface não paralela ao plano da ponta da fibra óptica) com o tempo.

### 3.4.2 Técnica de contato de agulha

A técnica de contato de agulha mede a distância de uma agulha da parede por condução no fluido. Quando a agulha está imersa no fluido, ela conduz corrente por meio deste, que normalmente é dopado com eletrólito. Nessa técnica não existe medição dinâmica da interface, pois a movimentação da ponta da agulha é feita externamente. Sendo assim, flutuações da interface, tão comuns na maioria dos regimes de escoamento anular, não podem ter a espessura dinamicamente medida. Nesse tipo de medição, existe a possibilidade de histerese de contato. Por outro lado, como afirma HEWITT (1978), esta histerese é pequena quando a velocidade do gás é elevada. A existência de elevada incerteza de medição concorre com o fato desse sistema ser de baixo custo e de fácil utilização.

Com a técnica de agulha, pode-se instrumentar o escoamento pistonado com facilidade, uma vez que este é formado por bolhas de diâmetro da ordem da tubulação. Uma única exceção é feita no caso de se desejar estudar fenômenos de parede nesse escoamento. Muitas vezes, a técnica da agulha é empregada como gatilho em outra técnica, como por exemplo, nas técnicas baseadas em medição da

condutância, impedância e capacitância.

Gatilhos são normalmente empregados em estudos de escoamento pistonado, pois no caso, deseja-se apenas estudar a passagem do "pistão". Sendo assim, o gatilho dispara a leitura do sistema a partir de uma dada condição, programada no sistema de aquisição.

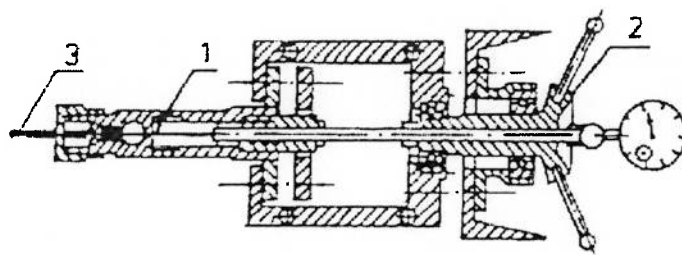


Fig. 3.6 Esquema do sensor de contato de agulha (1) agulha, (2) mecanismo movimentador e (3) eletrodo a ser posicionado na parede conforme HEWITT (1978).

### 3.4.3 Técnica de fluorescência

A técnica de fluorescência, segundo HEWITT (1978), é uma técnica essencialmente pontual e utiliza água misturada com pó fluorescente. Quando a luz incide no filme, esta induz a fluorescência. Utiliza-se lâmpada de mercúrio e uma guia de onda para conduzir a luz até o ponto de medição. A luz incide na água dopada, que emite radiação luminosa. A radiação é colhida na mesma guia de onda e é direcionada para um espectrômetro que separa a radiação fluorescente do resto. A intensidade da iluminação fluorescente é uma medida direta da espessura do filme. Pode-se utilizar filtros no lugar do espectrômetro.

Em HEWITT (1978) é citada a seguinte expressão para a intensidade da luz

verde:

$$I = \int_0^m \frac{E \cdot a \cdot I_0 \cdot K_1 \cdot C \cdot y}{1 + K_2 \cdot c} \cdot e^{-K_1 \cdot C \cdot y - K_3 \cdot \sqrt{C} \cdot y - K_4 \cdot C \cdot y} dy \quad (3.3)$$

O esquema experimental utilizado por HEWITT (1978) é mostrado na figura 3.7.

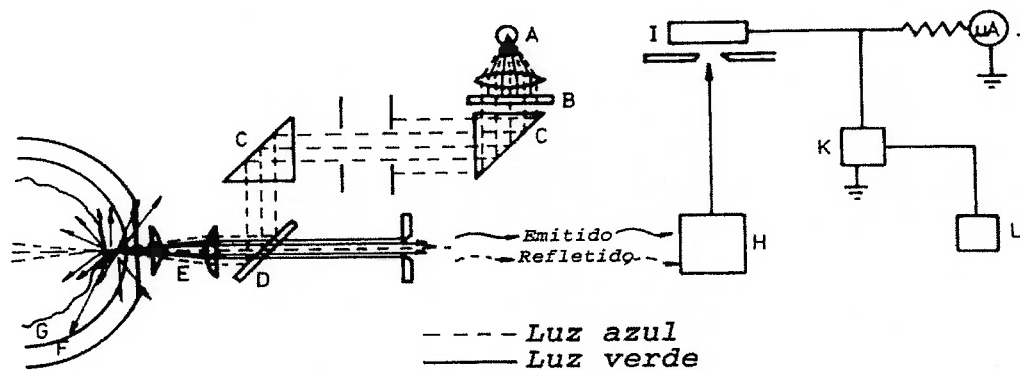


Fig. 3.7 Técnica de Fluorescência para a medição de espessura de filme. Os componentes do sistema acima são: (A) lâmpada de vapor de mercúrio, (B) filtros, (C) prismas, (D) espelho semi-refletor, (E) lentes objetivas, (F) parede da tubulação, (G) filme líquido, (H) espectrômetro, (I) fotomultiplicador, (J) amplificador, (K) osciloscópio gravador e (L) seletor de canais.

O valor da incerteza da técnica de fluorescência pode ser reduzida utilizando-se laser para estimular a emissão do material fluorescente, desde que tome-se o cuidado para que o material fluorescente não atinja a saturação.

DRISCOLL *et al.* (1992) utilizam a técnica para estudar o comportamento do filme líquido na descarga em um atomizador e sua relação com a formação de gotas. Esta técnica é muito semelhante à mostrada por HEWITT (1978), descrita acima, exceto pelo fato de que utiliza laser de Argônio operando em 514,5 nm polarizado. Ao ser exposto ao laser, o fluido dopado com material fluorescente emite radiação que é detectada por fotomultiplicadores.

A área estudada, conforme mostra a figura 3.8, consiste de um intervalo onde o fluido se encontra com o ar interno do atomizador. Nessa região, o escoamento de ar é forçado a girar por aletas colocadas a montante. Quando o fluido deixa o lábio do atomizador, entra em contato com o ar que flui externamente e que possui movimento rotacional contrário ao fluxo interno, originado do posicionamento das aletas externas. Esse mecanismo, em que duas camadas de ar se movem em direções e sentido não coincidentes, causa um grande cisalhamento no filme líquido após o lábio do atomizador, forçando-o a romper-se. Esse rompimento é mais frequente quando a instabilidade gerada no pré-filme é maior.

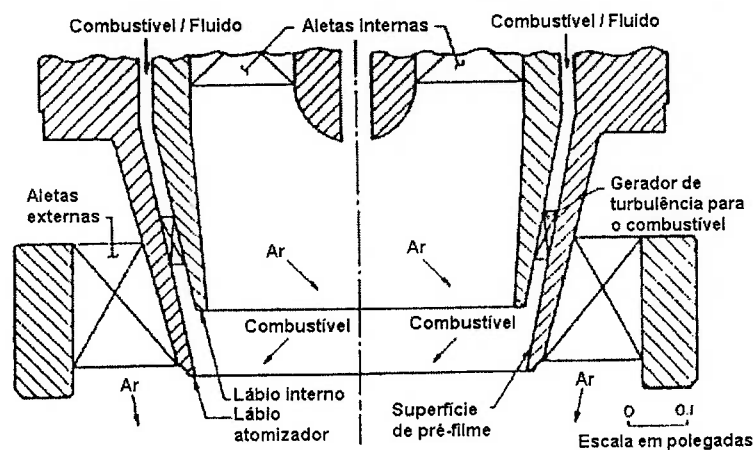


Fig. 3.8 Seção em corte do atomizador estudado em DRISCOLL *et al.* (1992). O combustível é injetado na área anular.

A desvantagem desta técnica é que, após a medição, deve-se efetuar cálculos para se obter a espessura de filme, pois o ângulo e as características de reflexão da interface não possibilitam a obtenção de uma medição diretamente relacionada com a curva de calibração. A rotina de calibração deve descontar efeitos causados pela sobreposição de cones de vidro no bocal para se formar um filme artificial de espessura conhecida. Apesar de todos esses fatores, a incerteza obtida com esta



técnica parece ser uma das menores.

O esquema abaixo mostra como o filme é iluminado com o laser. Como pode-se notar, efeitos de interface e de refração são determinantes do resultado e devem ser levados em conta na formulação do problema.

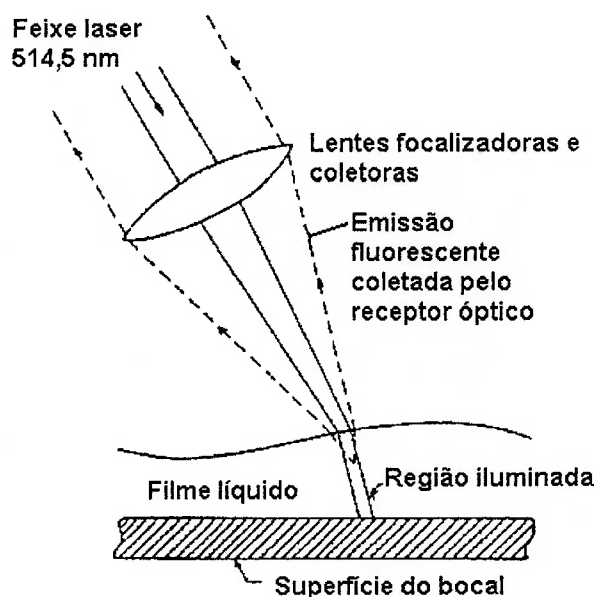


Fig. 3.9 Esquema de iluminação do filme dopado com material luminescente em DRISCOLL *et al.* (1992).

A configuração do sistema óptico é mostrada no esquema abaixo. Como pode-se observar, o laser é introduzido na posição de medição por meio de uma proteção. A proteção consta de um cone de plástico com Nitrogênio injetado no interior de forma que esse seja purgado pelo orifício em que sai o feixe. Essa purga impede que gotículas de água penetrem no interior. Entretanto o fluxo de Nitrogênio pode perturbar o pré-filme, introduzindo mais instabilidade do que o fenômeno tenderia a demonstrar.

O Nitrogênio é apolar, portanto reduz a atenuação no campo eletromagnético do laser, o que não ocorreria se a umidade fosse elevada na saída do bocal.

Outra técnica que utiliza fluorescência é a fluoroscopia de raio X, que pode ser usada para observar visualmente o escoamento, mas, conforme HEWITT (1978), a resolução temporal não é boa como a técnica que utiliza feixe de raio X.

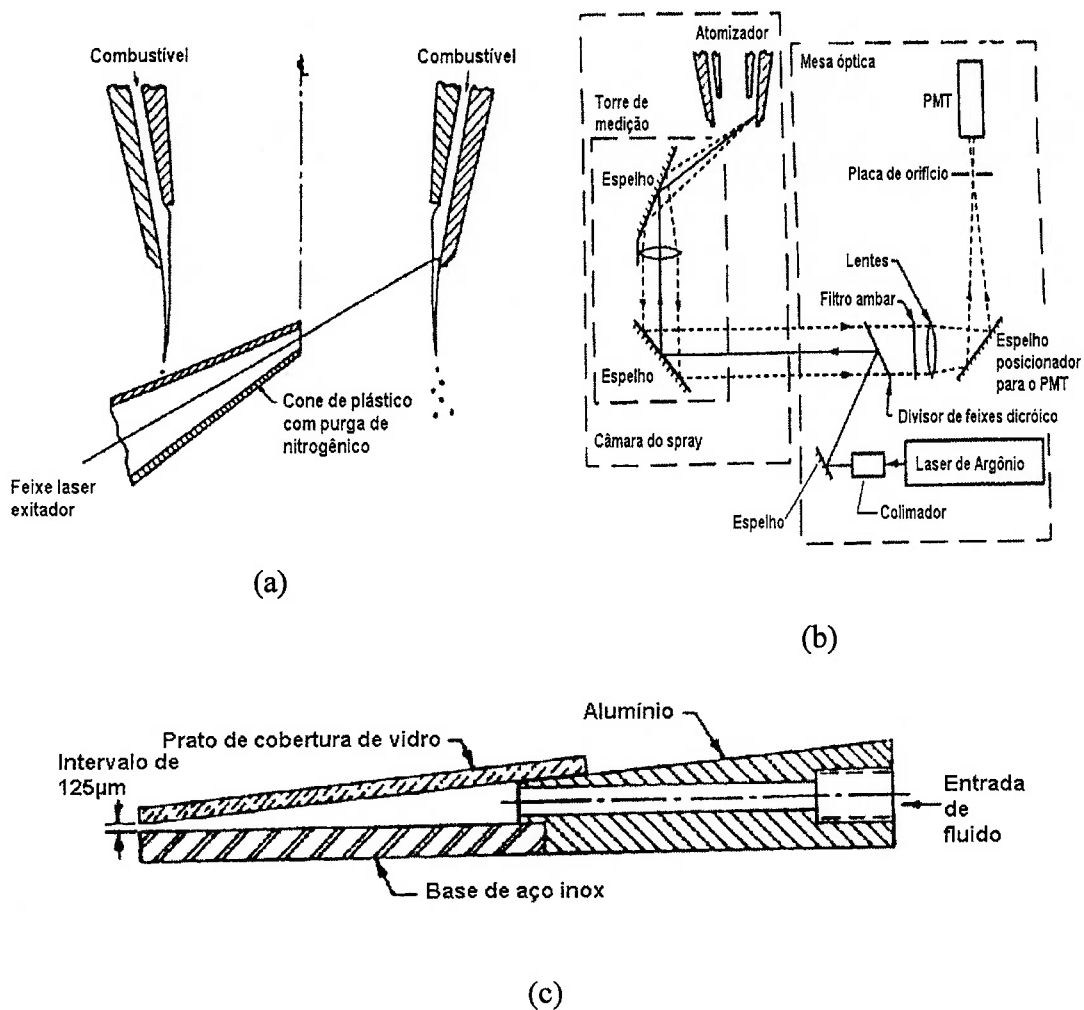


Fig. 3.10 (a) Cone de material plástico com purga de Nitrogênio para evitar entrada de água, (b) esquema óptico utilizado e (c) técnica de calibração em DRISCOLL *et al.* (1992).

### 3.4.4 Técnicas baseadas em medição de radiação

Essas técnicas são não invasivas e baseiam-se na medição total da radiação não espalhada disparada através de tubulação opaca. Uma desvantagem é que tais técnicas não dão a distribuição espacial de fração de vazio, ou seja, sabe-se apenas que a leitura é proporcional a uma fração de vazio naquela secção, mas não se pode determinar a posição da interface. Somente a caracterização do escoamento proporcionará uma correta identificação do padrão de escoamento.

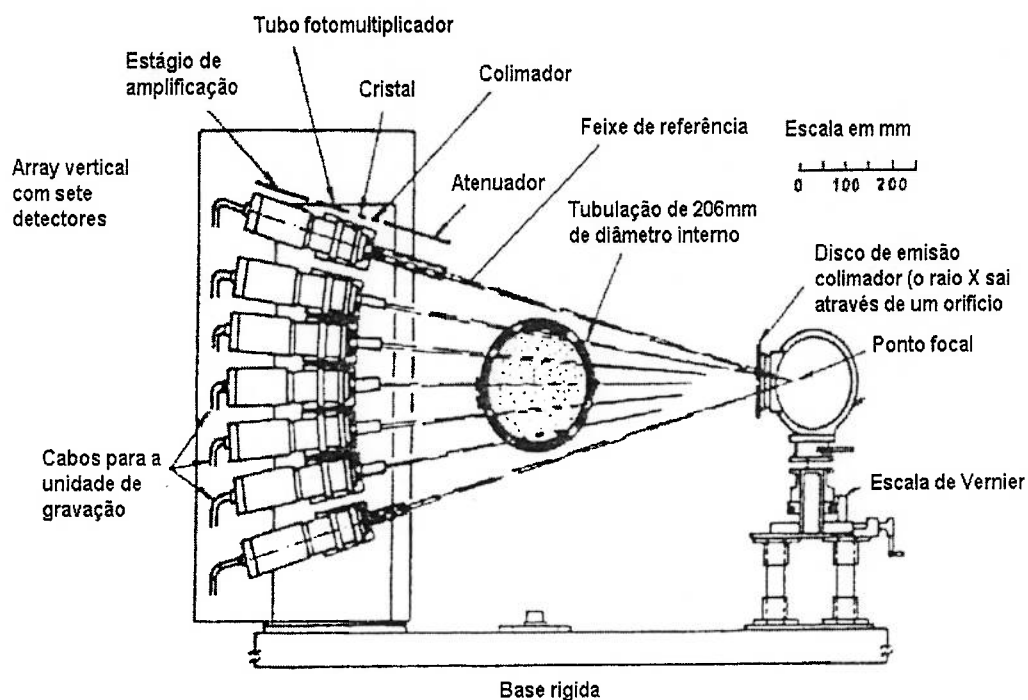


Fig. 3.11 Detectores de radiação X para a determinação de fração de vazio em uma corda do diâmetro em HEWITT (1978).

Uma maneira não invasiva de medir a fração de vazio em uma tubulação é a  $\lambda$ -densitometria utilizada em KAWAJI *et al.* (1986), onde são estudados regimes de escoamento em tubulações de fornecimento de fluido refrigerante para reatores visando obter maior controle, evitando o LOCA (*Loss of Coolant Accident*). Nesse

estudo, os autores exploram o comportamento da tubulação de fluido refrigerante que entra no reator nuclear (gerador de vapor), variando parâmetros como a pressão e velocidades superficiais, para tentar identificar o comportamento do escoamento.

Os  $\lambda$ -densidômetros são cápsulas de Césio 137 que podem ser instaladas tanto para dar tiros de radiação vertical quanto horizontal. É necessária a utilização de detectores de radiação para leitura do  $\lambda$ -densidômetro. No caso do artigo citado, foi utilizado Iodeto de sódio cintilante.

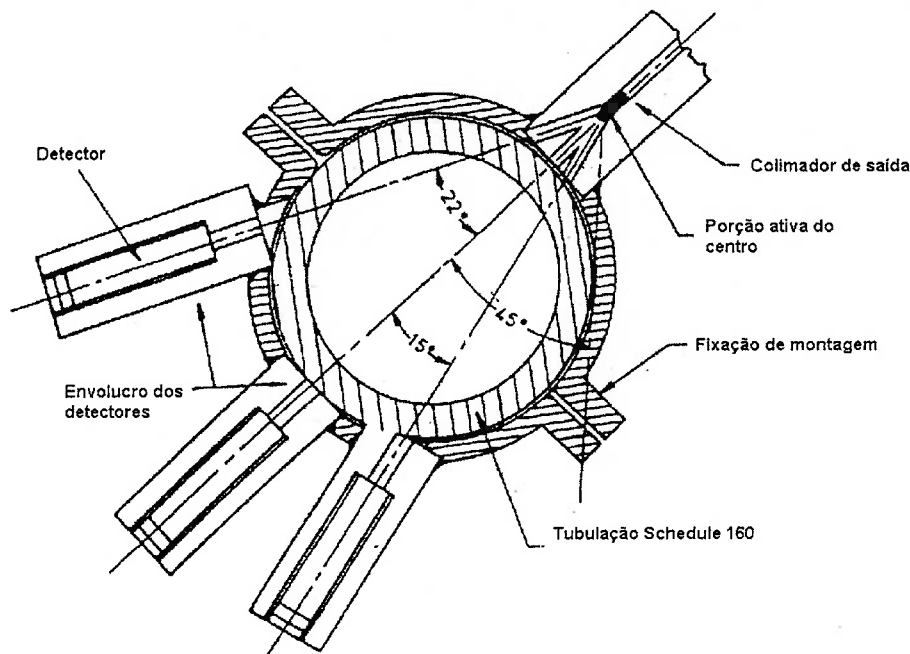


Fig. 3.12  $\lambda$ -densidômetro de três feixes mostrado em HEWITT (1978).

### 3.4.5 Técnicas de condutância entre arames

Outras técnicas empregadas na medição de espessura de filme são as baseadas em arames. Destacam-se entre elas a de dois arames paralelos, a de eletrodos montados rentes à parede e a de eletrodo rente e arame como pode ser visto na figura 3.13.

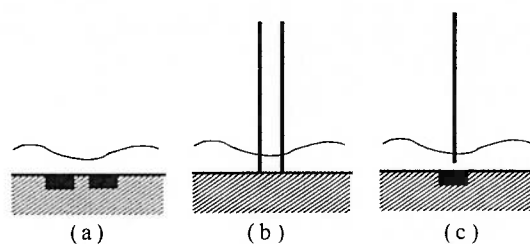


Fig. 3.13 (a) Eletrodos montados rentes à parede, (b) medidor de dois arames paralelos e (c) eletrodo rente à parede com arame.

Os primeiros medidores de condutância eram baseados em contato de agulha não sendo nada mais do que uma variante dos bem conhecidos medidores de nível por contato, os quais são normalmente empregados na hidráulica. Tais sensores possuíam baixa incerteza e eram fáceis de montar e utilizar. Por outro lado, eles davam pouca informação sobre a existência do filme na região de medição, além de serem extremamente susceptíveis a problemas relativos a fenômenos de superfície como a formação de meniscos.

A condutância em um medidor de corrente alternada, conforme ANDREUZZI *et al.* (1988), possui ângulo de fase zero quando a frequência do sinal de entrada é maior que 100 kHz.

Os medidores de condutância de eletrodos montados rentes à parede têm ótima resolução espacial para espessuras de filme inferiores a 2 mm. A faixa de medição desses medidores de condutância foi ampliada a partir de 1966, segundo KANG; KIM (1992), quando começaram a ser empregados os medidores de dois arames paralelos.

Os medidores de dois arames paralelos são montados em posição normal à parede, sendo que KOSKIE *et al.* (1989) propõem uma montagem que aumenta a precisão de paralelismo entre os arames. Tal montagem baseia-se em manter os

arames tensionados por uma carga de tração externa. No mesmo artigo afirmam que a redução do espaçamento entre os arames aumenta a definição espacial, resultados estes, que estão de acordo com várias simulações numéricas mostradas no referido trabalho.

KOSKIE *et al.* (1989) ainda mencionam que a escolha do arame é crucial para a boa linearidade de operação do mesmo, pois quando a resistência do arame deixa de ser desprezível face à condutibilidade do filme, a curva de calibração não apresenta comportamento linear. Dessa forma, o arame deve ser suficientemente grande (diâmetro grande) para possuir baixa resistência, e pequeno o suficiente a ponto de não perturbar significativamente o escoamento.

De qualquer forma, esse método é claramente invasivo, uma vez que no meio fluido, a presença do arame acaba ocasionando problemas, como o da vibração induzida por vórtice e formação de menisco em torno do arame (influência da tensão superficial).

A vibração induzida pelo escoamento, como fonte de perturbação na medição, pode ser desprezada, desde que os devidos cuidados sejam tomados, pois a vibração dos arames faz com que a distância entre os mesmos oscile. Para evitar esse problema, manipula-se a tração dos arames de forma que a frequência estrutural ou um de seus harmônicos não coincida com a frequência da vibração induzida pelo escoamento.

Um problema relacionado à utilização desses medidores é que a condutância do fluido é sujeita a variações. Desse modo, KOSKIE *et al.* (1989) sugerem a utilização de um medidor de referência cuja leitura se presta à adimensionalização da curva de calibração do sensor.

A faixa de medição desse sensor é de 0 mm a 12 mm, sendo que para filmes

pequenos, os arames são da ordem do tamanho do filme a ser medido e todos os efeitos citados anteriormente são muito relevantes. A solução para medir filmes finos, seria então, reduzir o diâmetro dos arames. Por outro lado, a resistência dos mesmos aumenta e portanto a faixa de leitura é reduzida, sem contar o fato de que em dimensões menores que as citadas por KOSKIE *et al.* (1989) (0,08 mm) a dificuldade construtiva é enorme.

A resolução espacial desse tipo de sensor é boa, entretanto, testes numéricos com ondas quadradas revelam que o sinal sofre uma suavização quando as bordas das ondas são registradas. Ondas que quebram não têm sua altura corretamente medida, uma vez que a base da onda e a crista tocam o arame separados pelo vazio do meio da onda. No entanto, segundo o referido trabalho, esse tipo de onda corresponde a uma pequena parcela do número total de ondas que são detectadas nesse tipo de escoamento (anular).

O sensor do tipo eletrodo rente à parede e arame possui, conforme KANG; KIM (1992), maior definição, menor incerteza e maior estabilidade em relação ao de dois arames paralelos e o do tipo dois eletrodos montados rentes à parede. Os autores também propõem um método de calibração baseado na probabilidade de existência do filme, o que aumenta a confiabilidade do sensor. Essa probabilidade pode ser obtida através de uma medição paralela pelo método do contato de agulha, para se determinar a probabilidade da existência do filme. A utilização o sensores de contato de agulha não é tão confiável quanto essa técnica, pois fenômenos de tensão superficial e inclinação da superfície podem mascarar a real posição da interface.

Sendo essa técnica baseada em arames e portanto, invasiva, deve-se ter em mente que ocorrem os mesmos problemas relacionados à utilização dos sensores do tipo dois arames em paralelo. Por outro lado, para baixas vazões, o sensor não

deforma apreciavelmente a superfície mas em altas vazões a deformação é apreciável, além de haver a probabilidade de deflexão do arame devido à quantidade de movimento trocada com o escoamento.

#### 3.4.6 Técnicas baseadas em medição de capacitância

Das técnicas de condutância acima citadas sabe-se que a impedância da água varia muito com a temperatura. Portanto, em experimentos nos quais ocorre essa variação, duas coisas podem ser feitas: ou adimensionalizam-se as curvas de calibração dos instrumentos ou adotam-se medidores de capacitância.

Esses medidores, conforme salientam GERAETS; BORST (1988), nascem do fato de que a permissividade da água varia pouco com a concentração de eletrólito. Dessa forma, os medidores de fração de vazio por capacitância são menos susceptíveis a erros quando há mudança de impedância, como acontece quando a temperatura aumenta.

Em GERAETS; BORST (1988) estuda-se numericamente o comportamento de medidores de capacitância helicoidais. A conclusão a qual chegam é que existem certas dimensões mínimas que devem ser planejadas, para evitar que efeitos de borda de campo elétrico influenciem na leitura. Os autores também indicam algumas condições para a perfeita linearidade entre capacitância e leitura e sugerem que a configuração helicoidal é aparentemente a melhor para construção de medidores. O medidor de capacitância, assim como os baseados em impedância, fornece leituras médias de espessura de filme no comprimento de tubulação em que está instalado, sugerindo que pode ser aplicado a escoamento pistonado.



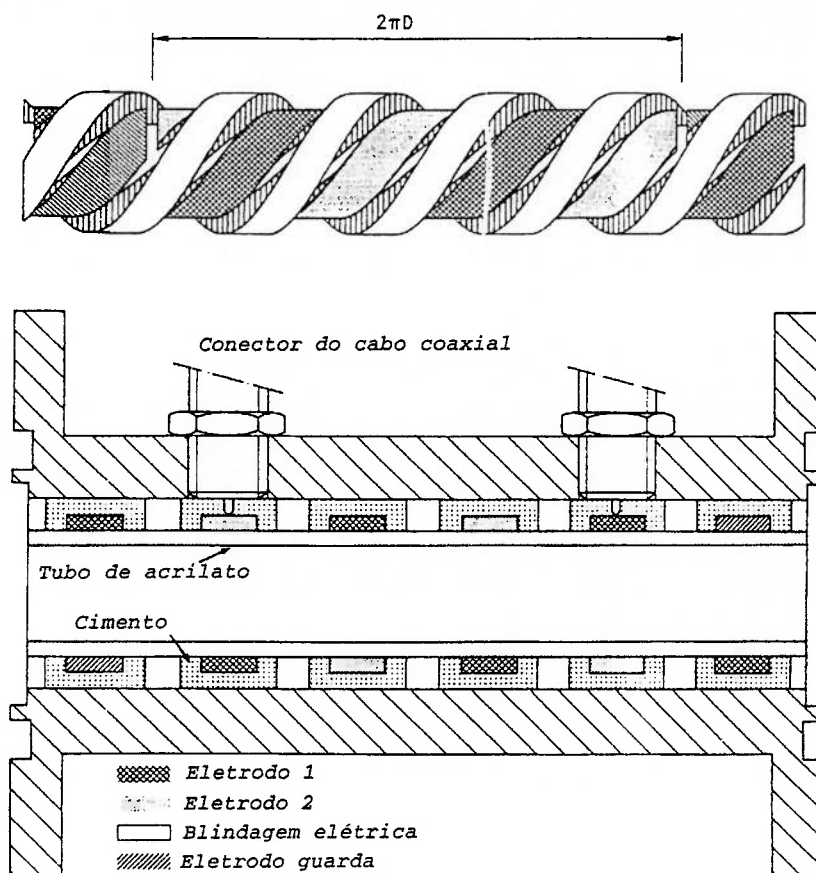


Fig. 3.14 Medidor de capacitância proposto em GERAETS; BORST (1988). A configuração helicoidal proposta é a melhor para esse tipo de medidor.

### 3.4.7 Técnica de eco ultra-sônico

A tomografia de raio-X e a radiografia de nêutrons são utilizadas como instrumentos de medição para obter a média temporal da distribuição de fases em tubulações opacas. Essas técnicas possuem custo elevado e apresentam sérias restrições à sua utilização.

KAMEI; SERIZAWA (1998) propõem que a técnica de eco ultra-sônico,

anteriormente empregada para medir espessura de filme em posição fixa de um canal, seja empregada para mapear o filme líquido no tempo.

Nesse trabalho é utilizado um espelho refletor que direciona a onda sônica para a periferia de uma tubulação, a qual simula uma barra de combustível nuclear. O espelho gira a 15.000 rpm e, a cada volta, realiza uma leitura completa da espessura de filme envolvendo a tubulação.

A varredura dura 4 ms e, para cada ponto de amostra, são registrados quatro picos. O primeiro corresponde à superfície do sensor refletindo sobre si mesma; o segundo corresponde à superfície interna da tubulação refletindo a onda; o terceiro corresponde à interface entre a superfície externa da tubulação e a água; e o quarto corresponde à reflexão da interface. Esse quarto pico é separado pelo sistema de aquisição e, com o tempo de vôo e velocidade da onda sônica, é possível calcular a espessura do filme.

A técnica sônica é simples e não invasiva, porém, sua resolução é baixa, uma vez que a incerteza é associada ao comprimento de onda do ultra-som, que é de 150  $\mu\text{m}$  (assumindo velocidade do som na água de 1500 m/s), ou seja, a incerteza associada é de 75  $\mu\text{m}$  (metade do comprimento de onda) o que pode ser considerada alta para a faixa de medição de espessura abaixo de 0,5 mm. Comparativamente, PACIFICO (2000) obtém incertezas de medição de espessura de filme com técnica laser de 22  $\mu\text{m}$ , o que é claramente superior à do eco ultra-sônico. Mesmo sendo superior em termos de menor incerteza de medição, a técnica laser citada possui limitações, que serão vistas adiante e que a técnica em questão não possui.

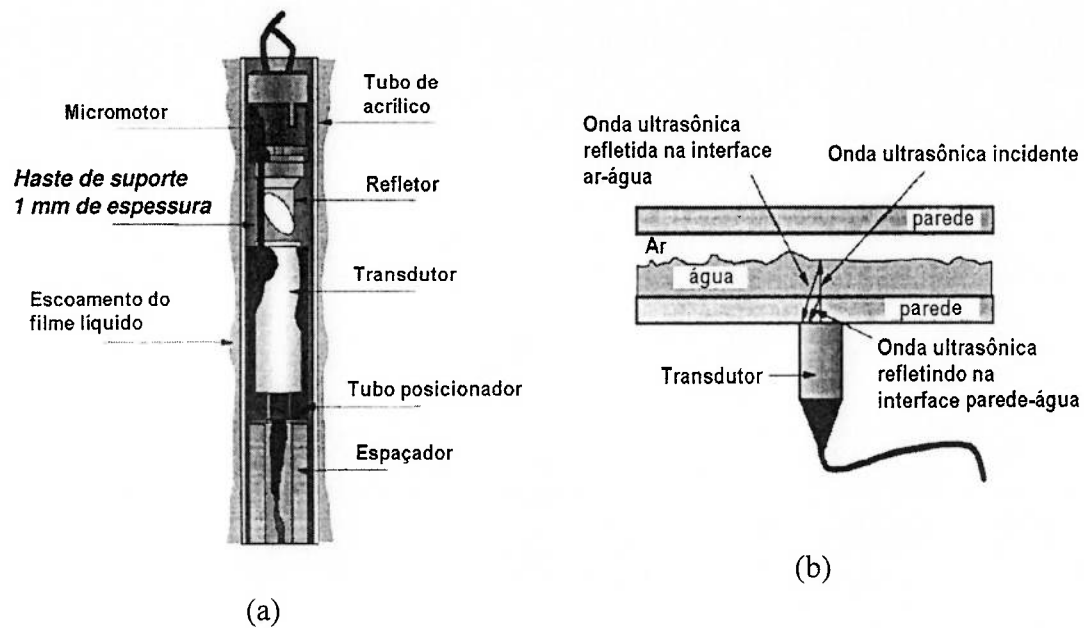


Fig. 3.15 (a) Esquema do equipamento montado em KAMEI; SERIZAWA (1998) para medição de espessura de filme líquido, (b) esquema de funcionamento do sensor e (c) forma do sinal resultante da emissão de um pulso de ultrassom. Quarto pico corresponde à interface entre fluido e gás.

O sistema de aquisição de eco ultra-sônico, na época em que esse trabalho foi publicado, possuía um fator limitante, que era a capacidade dos dispositivos de armazenagem de dados para uma dada taxa de aquisição. KAMEI; SERIZAWA (1998) utilizavam um equipamento que, inicialmente, armazenava os dados em uma

memória externa e depois, guardava-os em um dispositivo de armazenagem. O tamanho desse dispositivo e a frequência de amostragem limitavam o tempo de ensaio.

Outro problema associado a tais limitações, é o fato de que o sistema não era capaz de detectar ondas com escala de tempo menor que o tempo de amostragem. Para solucionar essa questão, é necessário aumentar a frequência de amostragem, aumentando a velocidade de rotação do espelho. Consequentemente, o tempo de ensaio é reduzido, uma vez que a capacidade de armazenagem é fixa. Portanto, também deve-se aumentar a capacidade de armazenagem.

### **3.5 Medição de espessura de filme utilizando técnica laser**

As técnicas ópticas baseadas em laser são muito variadas e utilizam diversos fenômenos, como a detecção de intensidade, interferometria de efeito Doppler, interferometria de baixa coerência e holografia.

As técnicas holográficas vêm sendo um foco constante de interesse, uma vez que possuem uma resolução espacial excelente, além da fotografia holográfica ser um retrato tridimensional de todo o escoamento.

Como ressaltam LEE; KIM (1986), a técnica holográfica aplicada a escoamento bifásico permite a gravação de todo o escoamento, possibilitando determinar a distribuição de fase instantânea (bolhas, gotas, partículas e interfaces). As técnicas holográficas para essa aplicação possuem alta resolução instantânea em campos dinâmicos.

Dentre as técnicas de detecção de intensidade, destacam-se a de fluorescência, já mencionada anteriormente (HEWITT, 1978), que não é uma técnica que utiliza

laser, e sim luz monocromática e detecção de intensidade, e as técnicas que utilizam luz laser propriamente ditas.

Para os dispositivos que serão abordados e que utilizam o laser, vários arranjos construtivos são propostos. SAMENFINK *et al.* (1996), propõem uma montagem onde o aparato óptico mede tanto a espessura do filme quanto a inclinação da interface.

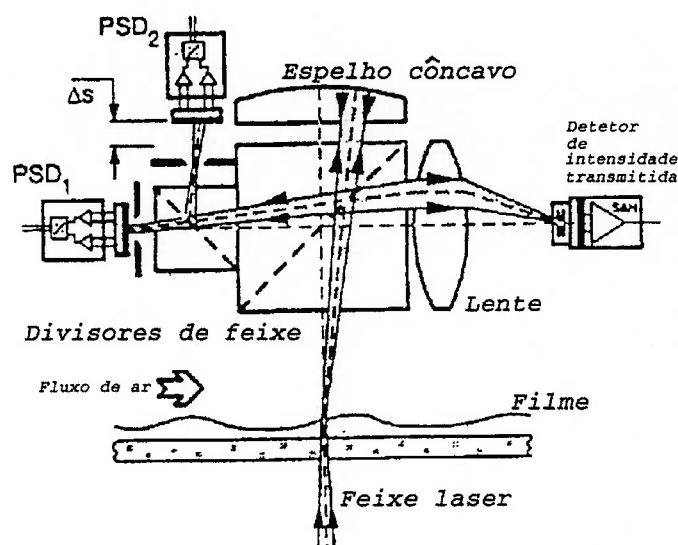


Fig. 3.16 Esquema experimental para medição de ângulo de interface e espessura proposto em SAMENFINK *et al.* (1996). Este esquema é baseado em um arranjo simples de divisores de feixe e dois detectores de posição possibilitam determinar o ângulo da interface em dois eixos.

Para medir a inclinação da superfície do filme, um arranjo simples de divisores de feixe com espelho côncavo possibilita que esse ângulo seja medido numa faixa de  $10^\circ$  a  $-20^\circ$  na orientação escolhida. A inclinação medida pode ser na direção do escoamento ou perpendicular a este. Entretanto, para grande fluxo de massa, não é possível determinar o ângulo de interface, pois as ondas desta podem possuir ângulos mais inclinados que o limite.

Mesmo a medição de espessura, sob grandes vazões de massa, talvez não possa

ser feita, dado o fato de que o feixe transmitido, sob certas circunstâncias do escoamento, pode não atingir o sistema de detecção instalado na parede de cima do canal quadrado.

A figura 3.16 mostra esquematicamente o sistema. A figura não mostra o canal, que é quadrado e facilita a instalação de elementos ópticos, o que não ocorreria se o canal fosse redondo, como em uma tubulação e, nesse caso, haveria desvio de feixe.

A intensidade transmitida pelo filme é facilmente relacionada com a espessura de filme pela seguinte relação:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-k \cdot h_f} \quad (3.4)$$

Onde  $I$  é a intensidade detectada,  $I_0$  é a intensidade antes do feixe passar pelo filme,  $h_f$  é a espessura do filme líquido e  $k$  é uma constante a ser determinada por calibração (essa equação é discutida no capítulo 4). Na prática, não se sabe a intensidade antes de passar pelo filme. Sendo assim, é necessário tomar uma referência como base para se operar o sistema. Dessa forma, é utilizado um feixe derivado do feixe de medição como referência.

SAMENFINK *et al.* (1996) também relacionam as vantagens e desvantagens desse sistema, que possui reduzida incerteza de medição (10  $\mu\text{m}$ ), rapidez (grande quantidade de informação e alta velocidade) e sincronismo entre tomada de velocidade e espessura.

Esse sincronismo é necessário, pois a medição de velocidade local é feita por meio de um LDV, ou seja, é completamente aleatória, sendo que só é possível medir a velocidade quando uma partícula do pó que dopa o líquido passa no volume de controle de medição.

Através das duas informações, obtidas pelo sistema de medição de espessura, é possível reconstruir o formato original da interface. A leitura de velocidade permite que o sinal de velocidade na posição seja reconstruído a fim de calcular grandezas temporais, tais como média e flutuação. Uma das desvantagens do sistema é a dificuldade construtiva e operacional.

A concepção do sistema LDV é muito bem colocada por WITTING *et al.* (1996), onde o sistema é empregado para o estudo de escoamento de filmes ocasionado por cisalhamento.

Existem aspectos importantes no posicionamento do equipamento de medição LDV. No caso de posicionamento lateral, é impossível certificar-se de que o feixe espalhado retorna para o detector, pois esse pode ser refletido pela interface móvel. Por isso, a medição lateral não pode ser empregada para filmes finos.

O posicionamento em baixo do canal contorna esse problema. Entretanto, a reflexão normal da interface causa uma relação sinal-ruído baixa.

Sendo assim, adotam-se obturadores para detectar apenas uma pequena região do volume de controle de medição. Para evitar refração dos raios, utiliza-se um prisma para conectar a parede translúcida do canal conforme as figuras 3.18 e 3.19 mostradas adiante. Mesmo assim, a imagem do volume de controle aparece distorcida, por causa da inclinação da superfície interna do canal em relação ao eixo do sistema detector.

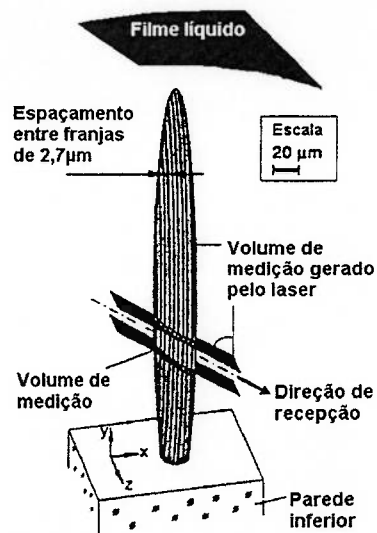


Fig. 3.17 Efeito do emprego de um obturador em WITTING *et al.* (1996).

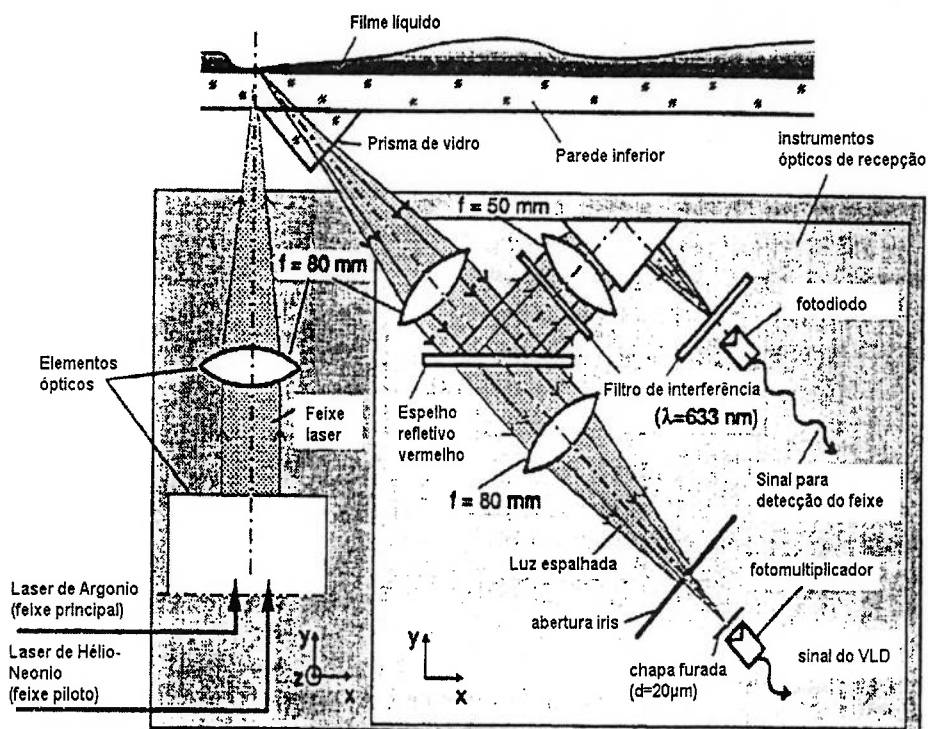


Fig. 3.18 Esquema do equipamento empregado para medição de velocidade utilizando Velocímetro a Laser de efeito Doppler (VLD) WITTING *et al.* (1996).



A solução desse problema é adotar um pós-processamento dos dados para corrigir a distorção que ocorre em um dos eixos, uma vez que a geometria dos elementos ópticos permanece fixa assim como as propriedades da água.

PARAS; KARABELAS (1992) utilizam LDA para levantar o perfil de velocidades e propõem métodos para a reconstrução de sinais a fim de obter grandezas relacionadas à turbulência. Os autores eliminaram o ruído da recepção utilizando um novo método de reconstrução de sinais, possibilitando assim desta forma transformar a aquisição discreta num sinal contínuo, onde pode-se efetuar cálculos de média temporal, flutuações e conseqüentemente, tensões turbulentas. As partículas que dopam o líquido de medição devem ser da ordem de tamanho do espaçamento entre as franjas de interferência presentes no volume de medição. Existe uma concentração ótima que reduz a relação ruído-sinal.

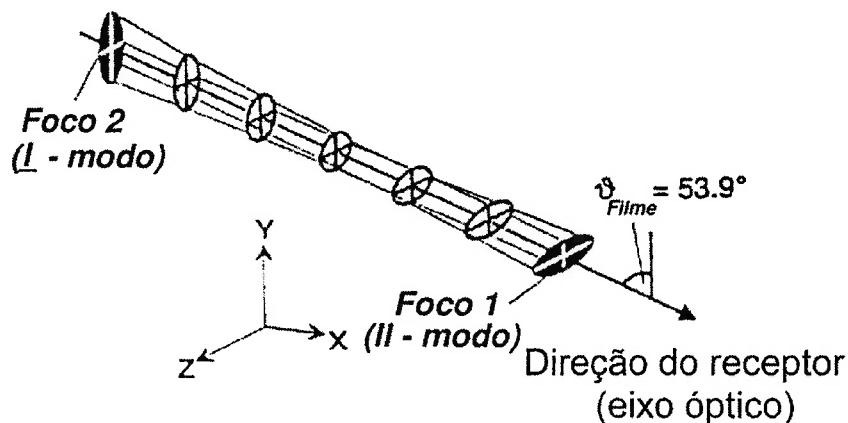


Fig. 3.19 Como WITTING *et al.* (1996) relatam, quando a leitura é realizada em ângulo, os eixos da imagem emergem distorcidos sendo necessário o pós-processamento.

Estes sistemas não são adequados para medições quando posicionados próximos à interface gás-líquido (o volume de medição é posicionado de 1 mm a 2

mm distante da interface, dependendo do caso), pois há problemas relacionados com a reflexão e, se a interface for ondulante, o volume de medição nem sempre pode estar imerso no filme líquido. Sendo assim, em filmes finos (espessuras inferiores a 1 mm) ocorrem problemas para medição de perfil e, portanto, essa técnica não é adequada.

As técnicas LDA não permitem a medição de velocidades normais ao escoamento. Desta forma, para fenômenos onde esta componente é significativa para a sua compreensão, como nas ondas superficiais, essas técnicas não podem ser empregadas.

Outra questão que PARAS; KARABELAS (1992) levantam é a reconstrução do sinal. A literatura propõe vários métodos, desde a ponderação por tempo de residência até a conversão digital-analógica. No entanto, os autores relatam que, em todas essas técnicas, o resultado não é satisfatório. A solução proposta no artigo é a utilização de programa de reconstrução de sinais para pontos de aquisição não igualmente espaçados.

As técnicas LDA e LDV não interessam para este trabalho. Essa breve discussão foi feita porque o sistema proposto por SAMENFINK *et al.* (1996) para medição de espessura e inclinação de interface, exemplifica um equipamento de detecção conjunta de parâmetros. Na utilização desses sistemas ocorrem uma série de problemas que são exemplos da utilização de óptica na medição de parâmetro em escoamento bifásico.

Os problemas quase sempre se concentram no fato dos elementos serem curvos (tubulações interfaces) e ocasionarem refração, além da necessidade do meio de ser dopado ou possuir dimensões pequenas.

HULBURT; NEWELL (1996) medem a espessura de filme utilizando o

princípio da reflexão total. Neste trabalho, um feixe laser é disparado na superfície de uma tubulação que contém uma cobertura de tinta translúcida. Essa película espalha o laser em todo o hemisfério após a película. Quando essa emissão atinge a superfície do filme líquido, os raios que incidem com ângulo de incidência maior que o ângulo crítico, sofrerão reflexão total e retornarão para a parede onde está a película translúcida branca. Ao incidirem novamente na película, espalharão novamente. Observando-se pelo lado externo da película, verifica-se que os raios refletidos formam a imagem de uma circunferência, cuja parte externa é iluminada com a radiação proveniente do laser e a parte interna é escura.

Na figura 3.20 pode-se observar como a leitura de espessura é feita. Observa-se que os raios que incidem na interface com um ângulo maior que o ângulo crítico de refração sofrerão reflexão total e retornarão para a película. O que se observará na parte externa será uma circunferência escura com sua periferia iluminada com radiação do laser.

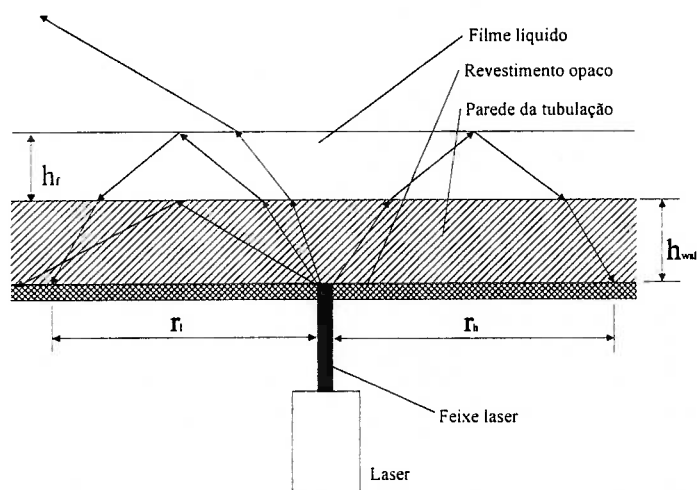


Fig. 3.20 Esquema experimental empregado por HULBURT; NEWELL (1996). O raio do círculo escuro formado determina a espessura de filme.

Determinando  $r$  é possível obter uma correspondência com  $h_f$ , uma vez que a

espessura da parede é fixa e os índices de refração não mudam. A imagem que se forma na parede é composta de um "buraco" e uma penumbra. A espessura deve ser calculada por meio do diâmetro desse "buraco" negro.

O sinal pode ser processado pela obtenção da imagem com câmera digital. Dessa forma, deve-se considerar as limitações de leitura imposta pela câmera empregada bem como pela placa de circuito de processamento de imagem. A velocidade com que os quadros são lidos muitas vezes pode ser tal que prejudique a leitura. Isso ocorre com baixas frequências de varredura, agravando-se caso o sistema use entrelaçamento. Nesse caso é necessário separar as linhas da cada varredura do entrelaçamento, pois a demora na velocidade de varredura grava o fenômeno em intervalos de tempo distintos, ou seja, o sistema varre as linhas pares e depois as ímpares. Quando ocorre a varredura das linhas ímpares, a interface já se deslocou e portanto a figura final é uma mistura de duas imagens tomadas em intervalos de tempo distintos.

Se a imagem for entrelaçada, ela deve ser pós-processada para separar as linhas. Deve-se levar em consideração o deslocamento do filme enquanto ocorre a exposição (shutter), que no caso desse trabalho é grande (3 mm). Ondas de pequeno tamanho (inferior ao tamanho da abertura do círculo negro) não são detectadas.

A transição para reflexão total ocorre em um intervalo angular de um grau, isso faz com que a borda da área escura não seja muito nítida. A imperfeição da posição da borda ocasiona uma incerteza de 3%. Esta incerteza também depende da inclinação da superfície que não pode ultrapassar  $5^\circ$ , para que a incerteza não exceda a 20%.

Os dados obtidos do processamento da imagem quadro a quadro, separados por entrelaçamento podem fornecer a inclinação e posição da superfície para cada

quadro. A velocidade é obtida por correlação de sinais de diodos emissores de luz montados em conjunto com fotocélulas.

Esta técnica é limitada a um certo valor de inclinação da superfície não detectando certos fenômenos, como ondas que quebram.

HEWITT (1978) afirma que no método de fluorescência é utilizado o meio dopado, para identificar a espessura através da intensidade detectada. Diferentemente da técnica baseada em fluorescência, OHBA *et al.* (1992) propõem a utilização de laser tomando-se por base que a radiação incidente na interface gás-líquido sofre atenuação e reflexão. Contrariamente a SAMENFINK *et al.* (1996), que determinam a espessura através da radiação absorvida, OHBA *et al.* (1992) propõem a utilização também de parâmetros geométricos para se determinar a espessura.

Uma das características da luz laser é possuir apenas um comprimento de onda. Dessa forma, a intensidade refletida não varia com mais nenhum outro parâmetro além da distância e do ângulo que a interface líquida forma com o plano da ponta da fibra óptica, sendo que absorção é desprezada. Isso ocorre se as propriedades da água permanecerem constantes e a interface do líquido com a fibra não sofrer alteração em suas propriedades.

Um sistema construído com base neste fenômeno permite, como é mostrado por OHBA *et al.* (1992), que sejam medidas apenas as cristas e vales da interface gás líquido, e através da colocação de mais uma fibra na direção do escoamento, é possível determinar a velocidade das perturbações na interface pelo método do vórtice congelado.

As restrições que ocorrem na aplicação de técnicas convencionais não ocorrem em sistemas baseados na medição de intensidade, pois o fluido pode ser dielétrico e a medição pode ser feita em tempo real, dada a rapidez dinâmica dos elementos ópticos

e dos componentes eletrônicos que constituem o sistema de aquisição no estágio tecnológico atual.

Meios dielétricos, assim como os líquidos refrigerantes, podem ser ensaiados com essa técnica obtendo-se resultados precisos. Os sensores convencionais baseados em condutividade não podem ser facilmente empregados em locais onde há ruído elétrico elevado.

Esta técnica foi estudada em YU; TSO (1995), onde uma combinação de fibras ópticas é feita em forma de estrela. Uma fibra central da qual o laser emerge e seis fibras dispostas ao redor da anterior são responsáveis pela detecção.

Este sistema foi simulado numericamente no computador e o ensaio mostra perfeita concordância teórica. Os resultados obtidos por esses autores apontam para o fato de que tal arranjo de fibras estende a capacidade de medição de espessura de filme, com o mesmo princípio empregado em OHBA *et al.* (1992), para até 4 mm, mas apresenta dificuldades para leituras de espessura inferiores a 1 mm.

Os resultados do estudo desse sistema sugerem a possibilidade de obter a orientação espacial do filme, mas em YU *et al.* (1996) essa possibilidade é questionada. Neste trabalho é repetida a simulação para um superfície genérica e constata-se que não há um padrão de medição dentro dessa faixa de espessuras que indique uma forma de medir a inclinação da superfície em dois eixos.

Como mencionado em OHBA *et al.* (1992), retomado em YU; TSO (1995) e em YU *et al.* (1996) o princípio de medição do sistema é baseado na reflexão e atenuação da luz laser.

Como descrito em OHBA *et al.* (1992), a radiação laser é incidida na extremidade de uma fibra óptica que o conduz até o local de medição. A fibra é instalada na parede lateral por onde ocorre o escoamento com sua extremidade plana

e polida coincidindo com a parede interna. Quando a radiação laser sai da fibra, esta passa pelo líquido em direção à interface líquido-gás. Quando chega a essa interface, uma parcela da radiação é transmitida e outra é refletida de volta para a fibra. Ocorre uma redução da intensidade detectada devido a fatores geométricos relacionados com a distribuição gaussiana de intensidades e abertura do feixe laser.

Pela característica do feixe laser, que emerge da ponta da fibra no escoamento, de possuir uma distribuição de intensidade que segue aproximadamente uma distribuição de Gauss, a radiação total que penetrará de volta na fibra será tanto menor quanto maior a distância da interface da parede. A parcela da radiação refletida, que incide na fibra, é conduzida até um prisma divisor, que refletirá o feixe para um fotodetector de intensidade.

Como pode-se observar, a radiação refletida é função do ângulo que a interface líquido-gás forma com o eixo de propagação da fibra, assim como da distância. Pode-se supor que, em um escoamento de ondas, essa técnica poderá detectar a passagem de cristas e vales, pois estes possuem superfície paralela à ponta de fibra ocasionando alta reflexão e, sendo assim, podem fornecer valores de espessura de filme com reduzida incerteza.

Colocando-se mais uma fibra alinhada com a anterior na direção do escoamento pode-se detectar a passagem das mesmas cristas e vales em tempos distintos, e sabendo-se a distância que as separa, pode-se calcular a velocidade local das ondas. PACIFICO (2000) calcula a velocidade por meio de um método que levanta a curva de fator de correlação entre os sinais, método esse que será utilizado neste trabalho.

O esquema experimental empregado para medição pode ser visto na figura 3.21. Neste esquema, nota-se que o feixe sai do laser, incidindo sobre uma placa de

meia onda. Após isso, passa por um divisor de feixes e incide sobre uma lente microscópica, que o focaliza na ponta de uma fibra óptica que o conduzirá até o ponto de medição.

Uma vez na interface, o feixe sofre reflexão parcial de acordo com a posição da interface, e uma parcela da radiação refletida e atenuada pelo filme líquido é capturada pela fibra. Esta parcela é conduzida de volta pela mesma fibra e emerge na outra extremidade, onde é colimada pela lente objetiva microscópica. O feixe colimado incide no divisor de feixes, que transmite ou reflete na direção de outra lente objetiva microscópica. Esta lente focaliza o feixe sobre um fotodiodo semiconductor.

O divisor de feixes pode refletir parcela da radiação colimada da lente segundo suas próprias propriedades ópticas, pois a luz que emerge da fibra óptica já perdeu a polaridade. Dessa forma, o prisma poderá transmitir uma parcela e refletir outra segundo seu próprio comportamento óptico.

A luz que incidirá no fotodiodo, por sua vez, mantém a mesma relação com a espessura com a qual foi calibrada, pois as parcelas transmitida e refletida pelo prisma mantém uma relação constante, sendo assim é possível relacionar intensidade com espessura sem se preocupar em como tratar da radiação incidente no prisma divisor de feixes.

O fotodiodo responde em corrente, que é amplificada por um amplificador de alto ganho, possibilitando que a leitura seja transmitida a um osciloscópio.



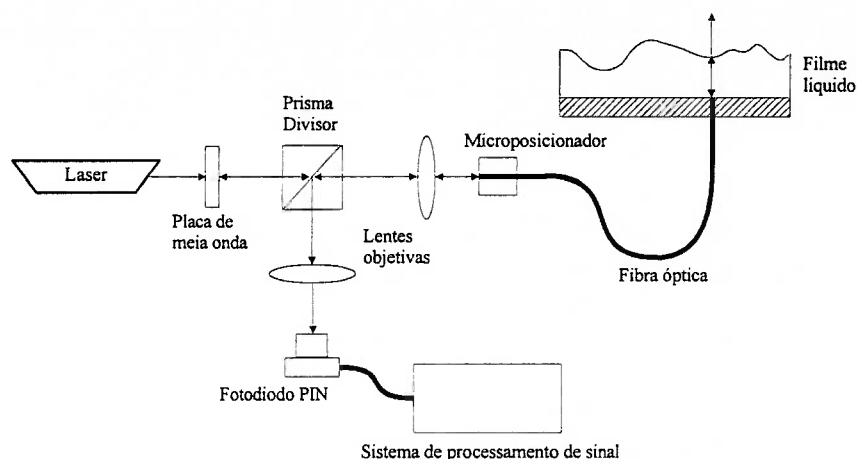


Fig. 3.21 Equipamento empregado para medição com apenas uma fibra. Nota-se a montagem da fibra na parede do escoamento, não interferindo neste.

### 3.6 Conclusão

Cada técnica proposta para a instrumentação do escoamento bifásico é dependente do fenômeno que se pretende medir. As técnicas ópticas apresentam-se em evolução com a tecnologia dos instrumentos. Atualmente dispõe-se de meios muito superiores em resposta e em capacidade de processamento para analisar dados provenientes de medição óptica. Outro fator a ser levado em consideração quando falamos em instrumentação óptica, é a rapidez de resposta da maioria dessas técnicas, simultânea com o fenômeno. Por outro lado, grande quantidade de dados e de capacidade de processamento ainda tornam inviável o uso ilimitado de algumas delas.

O trabalho de SAMENFINK *et al.* (1996) quando comparado ao de OHBA *et al.* (1992) parece mencionar alguns dados que não foram levados em conta pelo último, a atenuação. SAMENFINK *et al.* (1996), diferentemente de OHBA *et al.* (1992), não mede apenas picos e vales, mas também a inclinação da interface,

embora de forma bem limitada ( $-10^\circ$  a  $20^\circ$  na direção do escoamento). Por outro lado, a montagem proposta em OHBA *et al.* (1992) é claramente muito menos invasiva e limitadora que a proposta por SAMENFINK *et al.* (1996), sendo que este último considera até a necessidade de utilizar dutos de parede quadrada horizontais, uma vez que a parte superior não pode estar imersa em escoamento, prejudicando a detecção do feixe emergente do filme na parte inferior translúcida do canal.

YU *et al.* (1996) tentam determinar, sem sucesso aparente, a inclinação da interface em dois eixos. O insucesso foi ocasionado pela dificuldade de se determinar a posição da interface, uma vez que para cada altura há um padrão de distribuição de intensidade relacionado com as inclinações em dois eixos. YU *et al.* (1996) poderiam muito bem ter determinado a espessura pelo método desenvolvido por SAMENFINK *et al.* (1996) sob pena de incorrerem nas mesmas limitações mencionadas no citado trabalho (canal horizontal quadrado e parede superior não molhada).

## 4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Neste capítulo serão mostrados os princípios teóricos que explicam o funcionamento da técnica experimental que é objeto do presente trabalho. Será explicada a natureza física da luz laser, o funcionamento das guias de onda, os fenômenos físicos que ocorrem em transição de meios de propagação e o modelamento matemático da técnica de medição.

### 4.1 Luz laser

Denomina-se luz laser a emissão estimulada de um material fluorescente. Quando esse material é colocado entre dois espelhos, um certo número de reflexões ocorrerá entre eles amplificando a intensidade da emissão até o feixe sair por um orifício em um deles. Quando a emissão supera a absorção, ou seja, há suficiente amplificação, o caráter da emissão muda completamente: deixa de ser uma emissão difusa e não direcional e passa a ser um feixe intenso e altamente direcional que se propaga através do eixo definido pelos dois espelhos. A luz laser é muito coerente tanto no espaço quanto no tempo.

A forma como os feixes refletem no interior da cavidade entre os espelhos é que determina o modo de oscilação do laser. O modo mais simples resulta em um feixe de distribuição de intensidade em formato gaussiano.

O termo coerência temporal, segundo YOUNG (1998), designa a capacidade de uma fonte de possuir uma largura de banda espectral pequena o suficiente para que um comprimento de onda extremo não interfira destrutivamente nos outros de tal

forma que seja possível observar franjas suficientemente nítidas em uma experiência de interferência. Em outras palavras, se uma fonte de luz emite em um comprimento de onda  $\lambda$  com uma banda  $\Delta\lambda$  em torno deste, a fonte será tão coerente quanto menor for a largura de banda  $\Delta\lambda$ , o qual é capaz de introduzir diferenças de caminho óptico, que podem tirar a nitidez das franjas de interferência. Portanto, quanto maior a coerência temporal, maior será a nitidez de uma figura de interferência.

O termo coerência espacial, segundo YOUNG (1998), designa o tamanho adequado da fonte para que uma experiência de interferência ocorra e as franjas sejam bem contrastadas, ou seja, se o tamanho da fonte em uma experiência de interferência exceder um certo valor, as franjas de interferência não poderão ser observadas. Isto ocorre por que se cada átomo em uma fonte coerente irradia um pacote de onda, estando eles muito afastados entre si, teremos apenas a formação de uma figura difusa e não franjas de interferência bem nítidas, pois, se as dimensões da fonte da experiência de interferência forem muito grandes, as diferenças de caminho óptico farão os máximos e mínimos coincidirem, de forma que a figura de interferência não se forma nitidamente.

#### 4.2 Fibras ópticas e guias de onda

As guias de onda denominadas fibras ópticas são constituídas por um núcleo de material com índice de refração maior que o do meio. Elas são envoltas em uma capa de material protetor com índice de refração menor do que o núcleo. O núcleo pode ser construído com diversos tipos de materiais, mas o mais empregado comercialmente é o óxido de silício ou vidro.

O núcleo da fibra óptica é projetado para um intervalo de comprimentos de

onda bem definidos, sendo que as pesquisas de materiais para o núcleo sempre se direcionam para determinadas aplicações da fibra óptica.

Como o núcleo de uma fibra óptica possui índice de refração maior que o do meio que a circunda, a luz que incide em uma de suas pontas é, para dadas condições geométricas, retida em seu interior e transmitida para outra ponta. O fenômeno que possibilita isto é chamado reflexão total da luz.

A condição geométrica para que um raio de luz, de determinado comprimento de onda, seja capturado e transmitido pela fibra óptica, é que este incida em sua face com um ângulo que não seja maior do que um determinado ângulo limite. Como se sabe, o índice de refração da luz em um dado meio, é função de seu comprimento de onda. Dessa forma, uma fibra óptica fabricada de determinado material não conduz todos os comprimentos de onda, mas apenas uma banda bem definida. As pesquisas de material para emprego na fabricação de fibra óptica tendem a se orientar pelas necessidades de utilização, ou seja, pesquisa-se o aperfeiçoamento de técnicas de fabricação e materiais para emprego em faixas de comprimento de onda desejáveis.

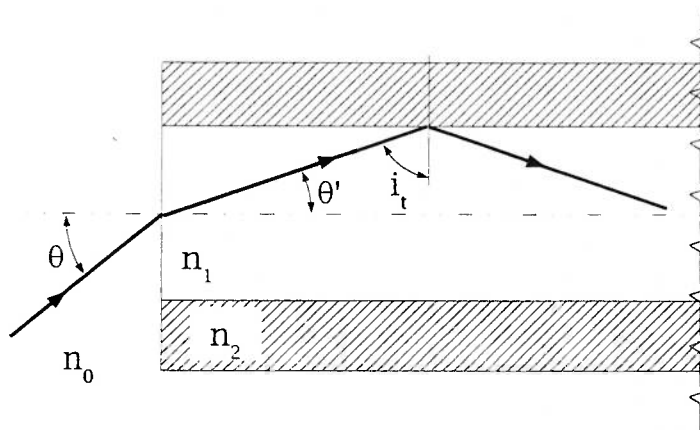


Fig. 4.1 O ângulo de aceitação de uma fibra óptica é obtido considerando-se que a luz sofre reflexão total na interface entre núcleo e casca.

O ângulo crítico pode ser determinado sabendo-se o ângulo de reflexão total do raio de luz na lateral da fibra óptica para um dado comprimento de onda. Sendo assim, observando-se a figura 4.1 tem-se:

$$n_0 \cdot \text{sen}(\theta) = n_1 \cdot \text{sen}(\theta') \quad (4.1)$$

onde  $i_t$  é o ângulo de incidência com a normal na lateral da fibra para que ocorra reflexão total no interior da fibra óptica, como demonstra a figura 4.1. Por relação geométrica simples sabe-se que  $\text{sen}(\theta') = \cos(i_t)$ , obtém-se assim:

$$n_0 \cdot \text{sen}(\theta) = n_1 \cdot \cos(i_t) \quad (4.2)$$

O ângulo de reflexão total da luz, conforme a Lei de Snell, é obtido pela equação:

$$n_2 \cdot \text{sen}(90^\circ) = n_1 \cdot \text{sen}(i_t) \quad (4.3)$$

onde  $90^\circ$  refere-se a condição de reflexão total, ou seja:

$$\text{sen}(i_t) = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.4)$$

Aplicando o Teorema de Pitágoras, sabemos que:

$$\cos^2(\theta) + \text{sen}^2(\theta) = 1 \quad (4.5)$$

Ou seja, para  $i_t$ , tem-se:

$$\cos^2(i_t) = 1 - \text{sen}^2(i_t) \quad (4.6)$$

Substituindo a equação 4.4 na equação acima, obtém-se:

$$\cos(i_t) = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (4.7)$$

Substituindo a equação acima na equação 4.2 obtém-se:

$$n_0 \cdot \text{sen}(\theta) = n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (4.8)$$

Os índices de refração  $n_0$ ,  $n_1$  e  $n_2$  são função do comprimento da luz empregada. Portanto a notação da equação acima pode ser melhorada escrevendo-se:

$$n_0(\lambda) \cdot \text{sen}(\theta) = n_1(\lambda) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2(\lambda)}{n_1(\lambda)}\right)^2} \quad (4.9)$$

O termo do primeiro membro da equação acima é denominado abertura numérica da fibra, sendo que o ângulo de aceitação pode ser calculado sabendo-se o índice de refração do meio. Qualquer raio que incida na ponta da fibra óptica dentro desse ângulo de aceitação é capturado e transmitido para a outra ponta.

A resposta em frequência é um dado muito importante no emprego de fibras ópticas. Como pôde-se deduzir, um raio que incide com um ângulo, percorre uma distância maior do que um raio que incide normalmente na ponta da fibra. Como o máximo ângulo de incidência é definido pela abertura numérica, podemos calcular o atraso entre um raio oblíquo e uma raio axial pela relação:

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = \left(\frac{1}{\text{sen}(i_i)}\right) - 1 \quad (4.10)$$

onde  $\tau$  é o intervalo de tempo de propagação de um pulso na fibra óptica e  $\Delta \tau$  é o máximo alargamento possível desse intervalo de tempo que ocorre quando o raio incide na fibra no limite do ângulo de aceitação. O inverso de  $\Delta \tau$  é a maior frequência de modulação que pode ser transmitida pela fibra em questão.

As fibras ópticas transmitem melhor raios no seu eixo do que nas direções oblíquas, pois as interações da lateral provocam perdas, ou mesmo espalhamento, devido a rachaduras e imperfeições na superfície. Entretanto, as interações entre raios

axiais e oblíquos, que ocorrem no interior da fibra, acabam por alargar a largura de banda possível de ser transportada, sendo que após alguns metros de condução o atraso passa a não ser mais proporcional a  $\tau$ , mas sim à raiz quadrada do comprimento.

A evolução da tecnologia na direção das fibras de óxido de silício de alta pureza vem melhorando cada vez mais a transmitância das fibras.

No estágio atual da tecnologia, pode-se controlar o índice de refração no interior da fibra óptica. As fibras denominadas de índice gradual, possuem um índice de refração que diminui do eixo para a periferia. Quando essa variação é controlada adequadamente, a diferença entre os tempos de trânsito dos raios axiais e oblíquos é quase nula, sendo que as larguras de banda elétricas possíveis de serem transmitidas passam a ser muito grandes.

As fibras ópticas com diâmetro inferior a  $10\ \mu\text{m}$  são denominadas guias de onda monomodo, sendo que nelas a diferença entre tempos de trânsito de raios oblíquos e axiais é nula. Transmitem grande largura de banda, sendo que seu comportamento somente pode ser descrito pela óptica ondulatória, uma vez que, nesses diâmetros, a óptica geométrica não tem precisão suficiente. Essas guias possuem restrições ao acoplamento de potência, devido às suas dimensões reduzidas, muito embora ofereçam tais vantagens técnicas.

Não há relação de fase fixa entre os raios refletidos no interior de uma fibra óptica, e poderá ocorrer interferência construtiva e destrutiva no interior da mesma.



### 4.3 Absorção, dispersão e reflexão

Quando um feixe de radiação eletromagnética atravessa um dado meio, parte desta radiação é absorvida e parte é espalhada. A reflexão ocorre na transição de um meio para outro e depende do ângulo e características da interface.

A absorção do material tem como efeito a redução da intensidade da luz transmitida. A absorção ocorre quando o meio toma parte da energia disponível na onda para si, transformando essa energia em calor.

Pode-se argumentar por meio da segunda lei da termodinâmica que, como qualquer outro processo na natureza a propagação da onda requer que uma certa entropia seja gerada em virtude da dissipação de calor. Não sendo um processo reversível, toda propagação de radiação interage com o meio gerando calor.

Já a dispersão é diferente da absorção, uma vez que o material no meio, ao invés de transmitir, pode refletir em outra direção reduzindo a intensidade do feixe incidente. O material por sua vez pode absorver a radiação original e transmiti-la em uma outra direção com um espectro diferente. Dependendo das características elétricas dos átomos e moléculas que compõem o meio, estes podem receber radiação de um tipo de espectro e transmitir em outro. Nesse processo estariam absorvendo parte da radiação e gerando calor.

Outra possibilidade é a absorção apenas de uma faixa de frequências da radiação original, ou nenhuma absorção. A absorção e transmissão seletiva constitui um assunto vasto que foge ao que se pretende tratar neste trabalho que é apenas o fenômeno da absorção.

Dessa forma, considerando um feixe de radiação monocromática que atravessa um determinado meio, segundo JENKINS; WHITE (1981) a intensidade do feixe

decrece a medida que a radiação penetra no referido meio devido à absorção do mesmo. Em outras palavras a intensidade e espessura são inversamente proporcionais.

Considerando a primeira lei da termodinâmica para um volume infinitesimal do referido meio, a intensidade absorvida é igual ao calor gerado dentro do volume. Considerando regime permanente, todo calor gerado é conduzido para fora.

Desta forma o calor gerado dentro do volume de controle é dado por uma fração da radiação incidente que se dissipa enquanto passa por  $dx$ .

$$q = \alpha \cdot I \cdot dA \cdot dx \quad (4.11)$$

A figura abaixo mostra esquematicamente a formulação.

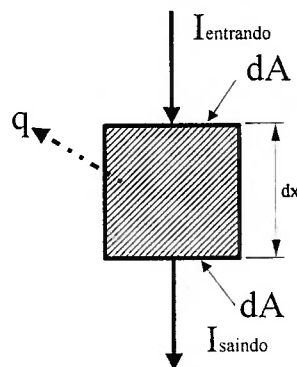


Fig. 4.2 Formulação de primeira lei para o volume de controle sujeito a radiação monocromática.

A energia do feixe de radiação eletromagnética que incide no volume de controle é dada por:

$$I_{entrando} = I \cdot dA \quad (4.12)$$

A energia do feixe de radiação eletromagnética que é transmitida pelo volume de controle é dada por:

$$I_{\text{saindo}} = \left( I + \frac{\partial I}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot dA \quad (4.13)$$

Aplicando a primeira lei da termodinâmica temos:

$$I_{\text{entrando}} - I_{\text{saindo}} - q = 0 \quad (4.14)$$

Substituindo as formulas apresentadas acima na equação 4.14 obtém-se:

$$I \cdot dA - \left( I + \frac{\partial I}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot dA = \alpha \cdot I \cdot dA \cdot dx \quad (4.15)$$

Levando-se em conta que a radiação propaga-se em uma única direção na qual a intensidade varia à medida que esta passa pelo meio em questão, obtém-se:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = \frac{dI}{dx} \quad (4.16)$$

Dessa forma, obtém-se:

$$\frac{dI}{I} = -\alpha \cdot dx \quad (4.17)$$

Integrando a equação acima levando-se em conta a intensidade incidente no meio para definir a integral, obtém-se:

$$\int_{I_0}^I \frac{1}{I} dI = \int_{x_0}^x -\alpha dx \quad (4.18)$$

Efetuada-se a integração obtém-se:

$$\ln(I) - \ln(I_0) = -(x - x_0) \cdot \alpha \quad (4.19)$$

ou

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -(x - x_0) \cdot \alpha \quad (4.20)$$

que também pode ser escrito da seguinte forma:

$$I = I_0 \cdot e^{-(x - x_0) \cdot \alpha} \quad (4.21)$$

A equação acima fornece a intensidade da radiação em qualquer ponto do meio como função da intensidade incidente e da penetração da radiação no meio. O coeficiente de atenuação é uma característica do meio em que a radiação se propaga, e deve, também, ser função de outras características do meio, tais como temperatura e concentração de sais minerais e gases dissolvidos.

A equação acima é também denominada de lei de Beer-Lambert e pode ser aplicada ao fenômeno de medição de espessura de filme para obtenção de uma relação para ajustar os dados de calibração, uma vez que a água atenua a intensidade do feixe laser de forma muito mais significativa que o ar. Em PACÍFICO (2000) notou-se que a curva de calibração obtida poderia ser aproximada muito bem por uma reta, sendo desnecessária a utilização dessa equação.

Deve-se lembrar que a intensidade medida em uma lâmina de água depende significativamente de fatores geométricos que serão mencionados a seguir.

#### 4.4 Modelamento da técnica de medição de espessura de filme

A determinação da intensidade de radiação laser refletida por uma superfície, disposta na frente de uma fibra óptica sobre ela mesma, pode ser determinada numericamente. Tal procedimento deve levar em conta as características do feixe laser, da superfície e da geometria na qual a fibra se encontra disposta em relação ao plano da superfície.

Supondo que a superfície reflete toda a luz que é emitida sobre ela e que o ar nos arredores não espalha o feixe laser, ou seja, não ocorre atenuação de intensidade, pode-se usar o modelo proposto na figura 4.3 para proceder aos cálculos teóricos.

Este modelo utiliza a lei de formação de imagens em espelho plano onde a

posição da imagem pode ser determinada apenas por simetria.

Para se determinar a intensidade refletida pela superfície líquida, utiliza-se a técnica de projeção de imagem da óptica geométrica, onde o plano em que se encontra a superfície é o plano de simetria e a imagem da fibra pode ser facilmente localizada geometricamente em relação a este, conforme se observa na figura 4.3.

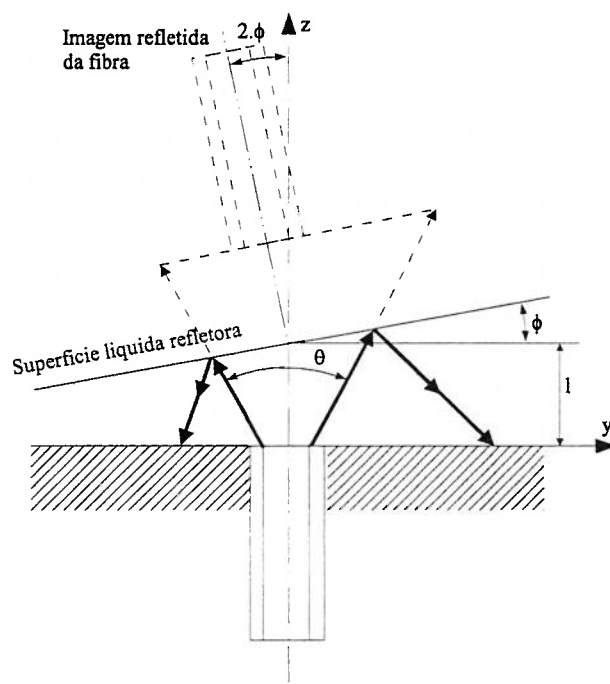


Fig. 4.3 Esquema geométrico para modelagem do sensor óptico. Utilizando simetria é possível determinar a posição e a quantidade de radiação que incide na imagem.

Nesta figura, nota-se que o plano de localização da imagem da fibra em relação ao centro da fibra óptica é dado pela seguinte equação:

$$z = l \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos(2 \cdot \phi)}\right) + y \cdot \tan(2 \cdot \phi) \quad (4.22)$$

Como observamos pela mesma figura, a posição do centro da imagem é o ponto dado pelas coordenadas  $(0, -l \cdot \sin(\phi), l \cdot (l + \cos(2 \cdot \phi)))$ . Nesse ponto do plano dado acima, posiciona-se a ponta da fibra, que é dada pela intersecção da esfera

dada pela equação abaixo com o plano dado pela equação 4.22:

$$(x-x_c)^2+(y-y_c)^2+(z-z_c)^2=\left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (4.23)$$

Nesta equação,  $D$  é o diâmetro do núcleo da fibra óptica e  $(x_c, y_c, z_c)$  são as coordenadas do centro da fibra dadas pelo ponto descrito acima.

A intersecção do plano com a esfera descritas origina o local geométrico dos pontos da superfície da ponta da fibra dispostos simetricamente em relação ao plano do espelho, e portanto na posição geométrica da imagem da ponta da fibra óptica.

Para se determinar a intensidade refletida pela imagem, basta integrar o fluxo de radiação laser que incide sobre a região descrita acima.

A integração numérica é simples e consome pouco tempo de recurso computacional. A integração é feita dividindo-se o domínio de integração em pequenos trechos quadrados, calculando-se o fluxo em cada trecho, multiplicando o fluxo pela área em que incide e somando-se todos os resultados de todos os trechos.

O feixe laser que emerge de uma fibra óptica, assim como um feixe laser comum, tem distribuição de fluxo gaussiano. Diferentemente do feixe incidente em uma extremidade da fibra, que no nosso caso é polarizado, após todas as reflexões internas pode emergir não polarizado, embora a coerência seja mantida, pois as emissões dos vários pacotes de onda não possui fase inicial alterada.

A distribuição de fluxo no feixe emergente segue a seguinte equação:

$$I(r, z)=I_{CL}(z)\cdot e^{\frac{-4\cdot r^2}{R(z)^2}} \quad (4.24)$$

onde  $r$  é o raio do feixe em relação ao eixo do mesmo onde avaliamos a intensidade,  $R(z)$  é o raio do feixe gaussiano na cota  $z$ , que é definido como o raio onde o fluxo é menor que  $e^{-4}\cdot I_{CL}(0,0183\cdot I_{CL}(z))$  e  $I_{CL}(z)$  é o fluxo no centro do feixe, que é

função da cota e é dado pela equação:

$$I_{cl}(z) = \frac{4 \cdot I_0}{\pi \cdot R(z)^2 \cdot (1 - e^{-4})} \quad (4.25)$$

onde  $I_0$  é o fluxo que emerge da ponta da fibra.

O fluxo recebido pela superfície da imagem incide numa direção que forma um dado ângulo com o eixo da fibra emissora, e a origem do raio ocorre em um ponto virtual no interior da fibra como mostra a figura 4.4.

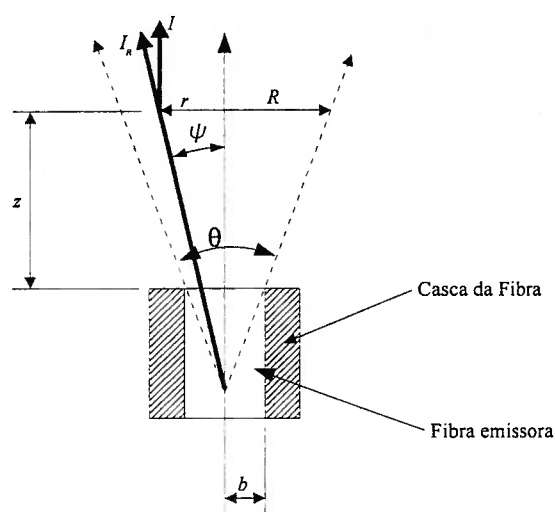


Fig. 4.4 Esquema geométrico mostrando a origem do feixe no interior da fibra.

Dada a geometria vista nessa figura, observa-se que a componente do fluxo que atinge a imagem é descrita pela equação:

$$I_R(r, z) = \frac{I(r, z)}{\cos(\psi)} \quad (4.26)$$

onde  $\psi$  é o ângulo indicado anteriormente.

Conhecendo-se o ângulo de abertura do feixe podemos determinar o raio do feixe em qualquer posição  $z$  acima da fibra emissora. Sendo assim obtém-se:

$$R(z) = z \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{D}{2} \quad (4.27)$$

Pela figura 4.4 observa-se que:

$$\frac{r}{z} = \tan(\psi) \quad (4.28)$$

e que:

$$\frac{R(z)}{z} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4.29)$$

Sendo assim, isolando  $z$ , em uma dessas equação e substituindo na outra obtém-se:

$$\tan(\psi) = \frac{r}{R(z)} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4.30)$$

Elevando ao quadrado ambos os lados da equação acima obtém-se:

$$\tan^2(\psi) = \frac{\sin^2(\psi)}{\cos^2(\psi)} = \left[ \frac{r}{R(z)} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \quad (4.31)$$

E sabendo que:

$$\sin^2(\psi) = 1 - \cos^2(\psi) \quad (4.32)$$

obtém-se finalmente:

$$\frac{1}{\cos(\psi)} = \left\{ 1 + \left[ \frac{r}{R(z)} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.33)$$

Sendo assim pode-se obter  $I_R(r, z)$  substituindo a equação 4.26, a equação 4.24, a equação 4.25 e usando a equação 4.33, obtém-se a equação abaixo:

$$I_R(r, z) = \frac{4 \cdot I_0 \cdot e^{\frac{-4 \cdot r^2}{R(z)^2}}}{\pi \cdot R(z)^2 \cdot (1 - e^{-4})} \cdot \sqrt{1 + \left[ \frac{r}{R(z)} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2} \quad (4.34)$$

Para determinar a intensidade detectada em várias posições da interface refletora variamos a posição  $z$  e o ângulo  $\phi$  e integramos o fluxo sobre a superfície.



refletora variamos a posição  $z$  e o ângulo  $\phi$  e integramos o fluxo sobre a superfície. Essa integração é numérica, como ressaltado anteriormente, e é feita discretizando-se o domínio em pequenas áreas com o centro na posição  $(x_m, y_m, z_m)$ , sendo  $m$  um elemento que possui uma área infinitesimal. A intensidade pode ser calculada fazendo-se  $I_R(\sqrt{x_m^2 + y_m^2}, z_m)$  e multiplicando-se essa intensidade pela área obtemos o fluxo.

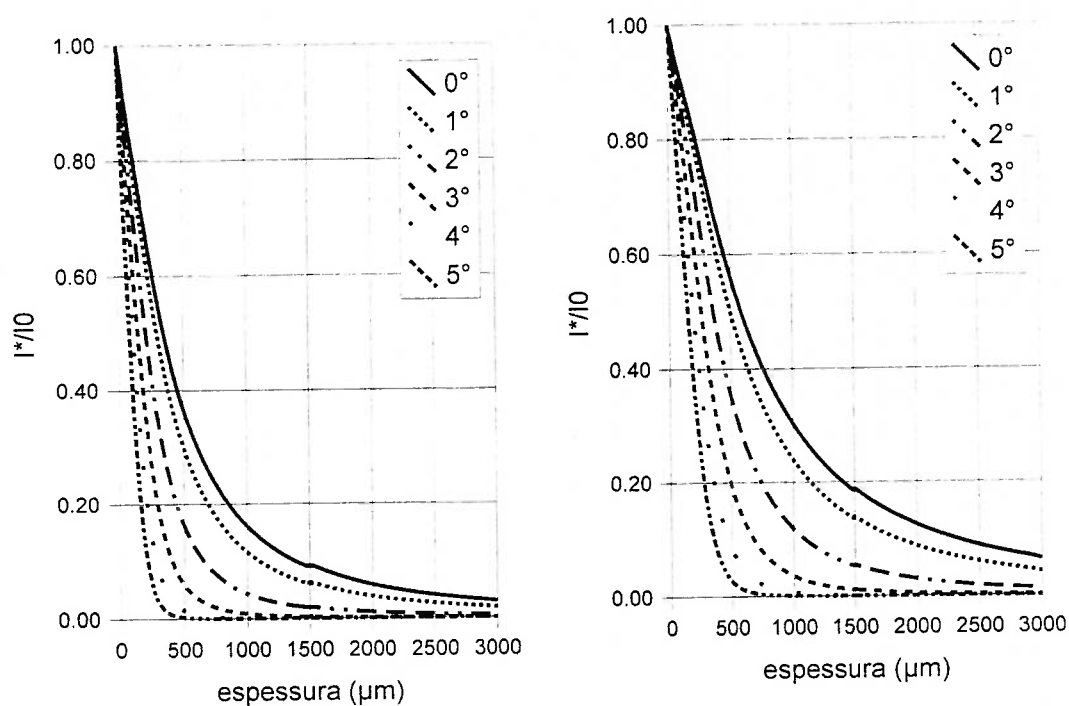


Fig. 4.5 Resultados de simulação para fibras ópticas com diâmetro do núcleo de  $50 \mu\text{m}$  e  $80 \mu\text{m}$ , respectivamente. A abertura numérica da fibra é de 0,2 e a abertura do feixe laser emergente é de  $5,28^\circ$ , conforme é visto em OHBA *et al.* (1992).

Repetindo essa operação para o todo domínio e somando-se os fluxos individuais, obtemos o fluxo total que é detectado pela fibra óptica. Os resultados para fibras ópticas simuladas são mostrados graficamente na figura 4.5.

## 5 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos utilizados, suas características técnicas e critérios de escolha. Os programas de computador utilizados também serão apresentados.

### 5.1 Equipamento óptico

O equipamento óptico empregado para leitura de sinais de intensidade de laser foi construído a partir do circuito proposto por PACIFICO (2000). Esse esquema baseia-se em apenas uma fonte laser que tem seu feixe dividido em dois feixes secundários de intensidades aproximadamente iguais, através de um Divisor de Feixes Polarizador (DFP).

Os dois feixes são lançados nas pontas de fibras ópticas que os conduzem até o ponto de medição, onde as fibras são colocadas a uma distância conhecida da parede (não são montadas rente a parede mas distanciadas).

No caso de ensaio de escoamento, a instalação é rente à parede para não prejudicar o escoamento. Neste trabalho, a tensão superficial foi considerada de menor importância quando comparada com outras grandezas envolvidas.

No escoamento o laser sofre reflexão retornando pela fibra ao circuito óptico, onde é feita a leitura do sinal. Na figura 5.1 encontra-se o esquema óptico empregado.

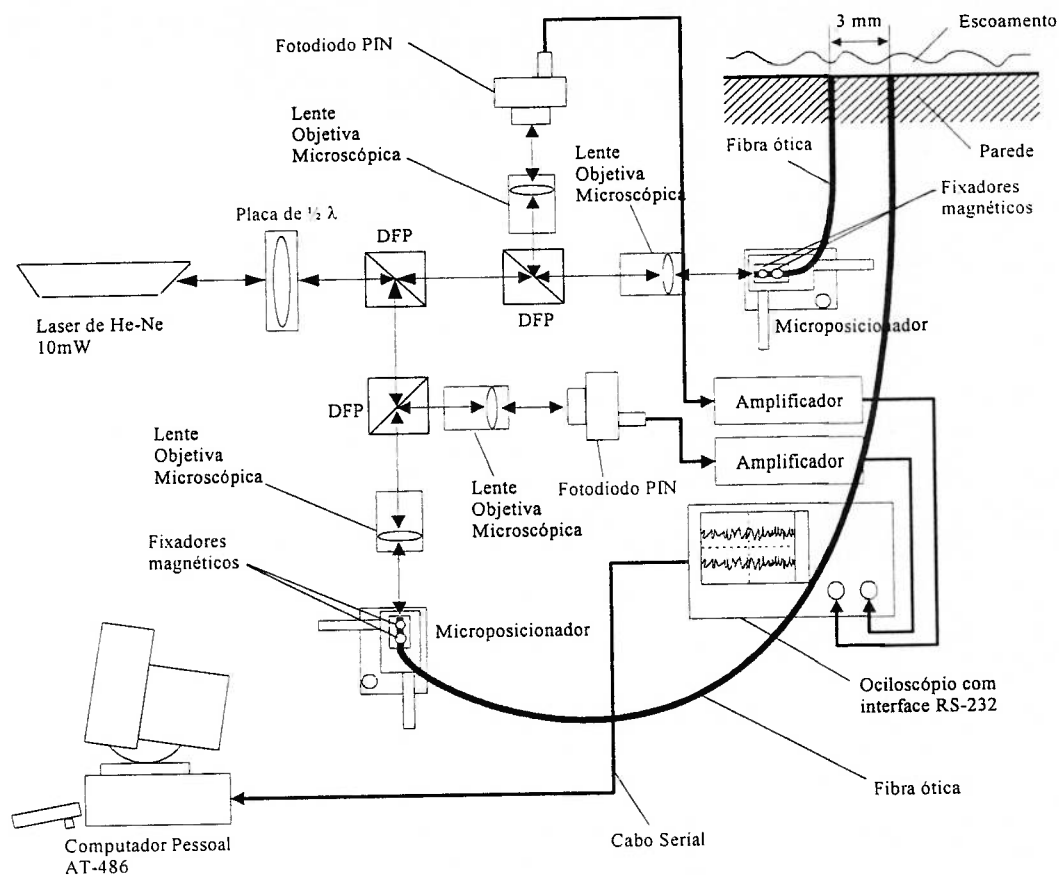


Fig. 5.1 Esquema do circuito óptico utilizado por PACIFICO (2000). Trata-se do mesmo esquema utilizado nesse trabalho, a diferença é que as pontas das fibras foram distanciadas da parede e o circuito foi condensado ao máximo.

No trabalho de OHBA *et al.* (1992) é proposta a utilização de dois lasers. Já PACIFICO (2000) propõe o emprego de apenas um laser com o dobro da potência, separando o feixe em dois através de um Divisor de Feixes Polarizador (DFP) e ajustando a intensidade de cada um através de uma placa de meia onda. Para facilitar o ajuste do laser, que já é originariamente polarizado, é instalado com seu eixo óptico alinhado aproximadamente a  $45^\circ$  com a normal. O ajuste fino é feito com o polarizador que possui um ajuste rotativo de elevada precisão.

Cada elemento do circuito óptico processa o feixe laser de uma determinada

forma. Os diversos elementos, reunidos e alinhados adequadamente, têm como resultado de medição dois sinais de tensão, os quais são lidos na tela do osciloscópio e relacionam-se com a espessura de filme através de uma curva de calibração. A atual configuração difere da proposta por PACIFICO (2000) apenas no que tange ao arranjo dos elementos (*layout*) sobre a mesa óptica.

Na disposição anterior, os elementos ópticos estavam muito afastados uns dos outros. Na disposição proposta, condensou-se o circuito com o objetivo de reduzir a perda de intensidade causada pela divergência do feixe laser.

O laser empregado é de Hélio-Neônio (He-Ne) de 30 mW a 632,8 nm, polarizado (500:1) e com fonte de alimentação própria.

Na utilização desse tipo de laser devem ser tomadas precauções pois trata-se de um laser classe IIIb que provoca lesões graves a retina do olho humano se o feixe incidir diretamente sobre ela.

A utilização de um único feixe implicou na necessidade de se empregar uma placa de meia onda e um Divisor de Feixes Polarizador, para que fosse possível dividir o feixe em dois.

A placa de meia onda possibilita que o plano de polarização do feixe seja rotacionado em torno de seu eixo até um determinado ângulo desejado. Esta placa é uma fatia de cristal uniaxial que contém o eixo óptico ou eixo rápido. Se o campo elétrico incidente nesse cristal for decomposto em duas direções perpendiculares, uma paralela ao eixo óptico, denominada ordinária e outra perpendicular ao eixo óptico, denominada extraordinária, a componente do campo elétrico que é paralela ao eixo óptico (componente ordinária), propagar-se-á com maior velocidade do que a outra (componente extraordinária). Em outras palavras, a componente do campo elétrico que percorre o eixo óptico (oscilando na direção do mesmo) da placa de meia

onda, percorre a espessura do cristal mais rapidamente do que a componente perpendicular a ela.

Com isso, pode-se escolher uma espessura para a fatia cristalina, que propicie um retardo de meio comprimento de onda entre uma componente e outra. Se a diferença de fase entre as componentes do campo elétrico emergente é de meio comprimento de onda, esta é denominada placa de meia onda. Se, por outro lado, essa diferença de fase é constituída de múltiplos de meios ou quartos de comprimento de onda, a placa é chamada placa multi ordem ou de alta ordem.

As placas de retardo de múltipla ordem são feitas de uma única placa de cristal de Quartzo, enquanto as placas de retardo de primeira ordem são feitas de pares de placas opticamente acopladas, cujos efeitos biaxiais são contrabalançados, resultando num único eixo óptico. Essas placas possuem eixos ortogonais (eixos ópticos em direções ortogonais), de modo que os vales dos raios extraordinários e ordinários são intercambiados na passagem de uma placa para outra.

Nessas placas, o retardo de uma placa para outra não varia com a temperatura, enquanto o retardo em placas de múltiplas ordens é dependente da temperatura. O coeficiente de retardo por temperatura, definido como a diferença de fase entre os raios extraordinário e ordinário na emergência, é de  $0,07 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ .

O retardo total em placas de primeira ordem seria função da diferença de espessura entre as duas placas de cristal. Sendo assim, em caso de dilatação do elemento não ocorre variação do retardo pois, em geral, ambas as placas são construídas com a mesma espessura.

Nas placas vendidas comercialmente, é a mudança de fase e não a espessura que dão nome ao componente, ou seja, uma placa de meia onda pode ter atraso de muitos comprimentos de onda. Isso se deve ao fato de que os materiais que

apresentam atividade óptica precisam ser reunidos em muitas camadas, para que o resultado do componente possua apenas um eixo óptico. Essas placas são feitas de Mica e Quartzo, sendo que o primeiro parece possuir um comportamento biaxial, e o segundo monoaxial.

Uma vez que o índice de refração, nesses materiais, é dependente da orientação dos cristais e é função do comprimento de onda, o acúmulo de atrasos de comprimento de onda é função também do comprimento de onda. Em outras palavras, tais placas são construídas para trabalhar com meio comprimento de onda, para apenas um comprimento de onda específico.

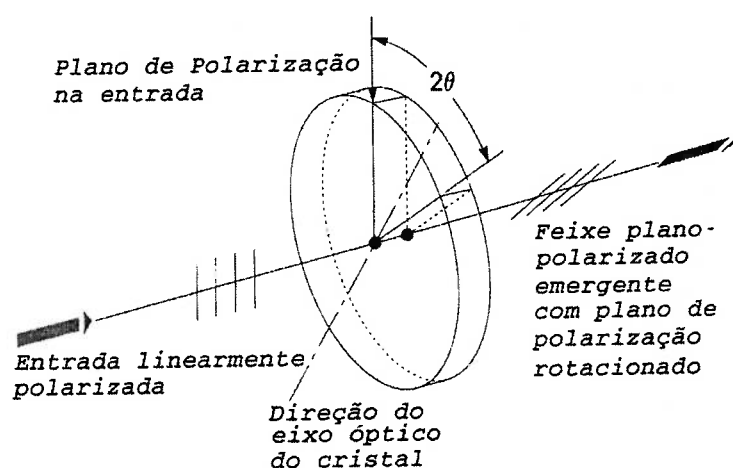


Fig. 5.2 Efeito da placa de meia onda em um feixe de luz monocromática. O plano de polarização é girado o dobro do ângulo de rotação da placa.

Uma placa de meia onda, seguida de um Divisor de Feixes Polarizador possibilita que os feixes emergentes tenham suas intensidades ajustadas gradualmente à medida que o plano de polarização do feixe é alterado pela placa. A figura 5.2 mostra esquematicamente a placa de meia onda. Observa-se que uma alteração de  $\theta$  na posição do eixo óptico ocasiona uma mudança de  $2.\theta$  no plano de polarização do feixe.

O Divisor de Feixes Polarizador, instalado na frente da placa de meia onda, recebe o feixe polarizado em um plano específico e divide o feixe em dois. Os dois feixes transmitidos são polarizados em planos perpendiculares como mostra a figura 5.3.

O prisma funciona como um polarizador e é composto de dois prismas retos, unidos pelas hipotenusas com uma camada de filme dielétrico entre eles. Os feixes emergentes estão polarizados em planos perpendiculares, sendo que o feixe transmitido está polarizado no plano denominado  $p$  e o refletido no plano denominado  $s$ , como visto na figura 5.3.

O Divisor de Feixes Polarizador separa as componentes ortogonais do campo eletromagnético em direções perpendiculares às faces emergentes. Dessa forma, alterando-se o plano de polarização do campo, pode-se aumentar uma componente e reduzir outra. Procedendo-se dessa forma, é possível manipular facilmente as intensidades refletidas e transmitidas.

O lançamento do feixe laser na fibra óptica deve ser feito de forma que este seja capturado na abertura numérica da fibra. Para que isso ocorra, é utilizada uma lente objetiva microscópica que faz o feixe de raios paralelos convergir para o ponto focal. A lente objetiva microscópica empregada possui aumento de 10x, abertura numérica de 0,25, distância de trabalho de 6,8 mm e distância focal de 16,9 mm.

O detector de intensidade empregado consiste em um fotodiodo de silício montado em uma pequena câmara metálica, coberta por uma lâmina de vidro para proteção mecânica. Este componente é fabricado por processo de difusão controlada, de modo a exibir baixa corrente de fundo e grande linearidade de operação. O comprimento de banda depende do amplificador que é utilizado em conjunto.

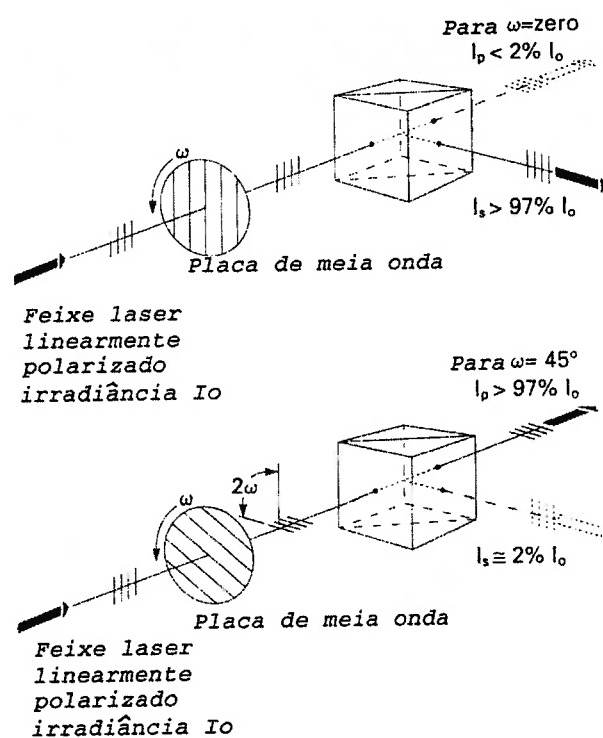


Fig. 5.3 O Divisor de Feixes Polarizador ajusta a intensidade transmitida e a refletida, conforme o ângulo de polarização da placa de meia onda é alterado. Como pode ser observado, o plano de polarização do feixe transmitido é perpendicular ao feixe refletido.

Na presente aplicação é desejável baixo tempo de resposta, de forma a manter a coerência com as características operacionais do circuito óptico e com as frequências que se pretende medir.

A área ativa do fotodiodo é de  $0,8 \text{ mm}^2$ , o tempo de subida máximo é de  $3,5 \text{ ns}$ , a potência equivalente em ruído (NEP do inglês *Noise Equivalent Power*) é de  $2,2 \cdot 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$ , a corrente de fundo máxima é de  $1 \text{ nA}$ , a capacitância entre a junção pn é de  $5,5 \text{ pF}$  e o tempo de resposta máximo é de  $0,35 \text{ ns}$  (constante de tempo).



A resposta espectral típica na faixa de 350 a 1100 nm (o laser de He-Ne empregado emite radiação com 632,8 nm) é de 0,4 A/W a 830 nm e o tempo de resposta é de 0,35 ns.

Esses componentes semicondutores funcionam pelo chamado efeito fotoelétrico que ocorre quando os elétrons do material são expostos à radiação eletromagnética que os excita. Quando um elétron numa camada de valência em um átomo de metal é excitado individualmente com um quantum de energia, este é arrancado do seu orbital atômico e pode saltar para a atmosfera circundante ou para o interior do próprio metal.

No efeito fotoelétrico externo, a luz incide sobre a superfície metálica e excita o elétron até que esse abandone a superfície. Já no interno, esse efeito apenas arranca o elétron do átomo, jogando-o na banda de condutividade. Em outras palavras, o efeito final é modificar a condutividade do material fornecendo cargas livres. Os materiais semicondutores possuem uma estrutura de níveis de energia onde a banda de condução está separada da banda de valência por um intervalo energético muito grande (intervalo proibido).

Esse intervalo energético pode ser superado por uma quantidade energética equivalente fornecida por radiação. Dessa forma, fornecendo-se radiação suficiente à superfície alteramos a condutibilidade ou resistência do material semicondutor.

Em alguns semicondutores o intervalo energético entre a banda de condução e a de valência é maior que a energia quântica da radiação que se pretende medir. Para resolver esse problema, pode-se dopar o semicondutor com doadores de elétrons (material tipo n) ou receptores (material tipo p). Procedendo-se assim, os materiais resultantes possuirão níveis energéticos extras dentro do intervalo proibido. A posição relativa dos níveis de impureza em relação à banda de condução determina a

energia quântica mínima que pode ser medida pelo material. Deve-se considerar que efeitos térmicos podem influenciar mais a medição do que a radiação, sendo necessário que o componente seja resfriado de maneira controlada. Isto costuma ocorrer para comprimentos de onda próximos do infravermelho.

O detector fotovoltaico é formado pela junção de dois semicondutores, o do tipo p com o tipo n. A irradiação da junção inverte a polaridade e eleva a corrente (modo condutivo).

Pode-se aumentar a sensibilidade do detector pela adição de uma camada de depleção espessa de material de alta resistividade (i de intrínseco) entre as camadas p e n.

Na camada de depleção não existem elétrons nem buracos. Os portadores criados dentro dessa camada possuem alta probabilidade de serem acelerados por ela. Sendo assim, contribuem muito para a fotocorrente. Essa camada é colocada próxima à superfície de detecção e a velocidade de resposta desse diodo é determinada pelo tempo de trânsito dos portadores na camada de depleção e pela sua capacitância.

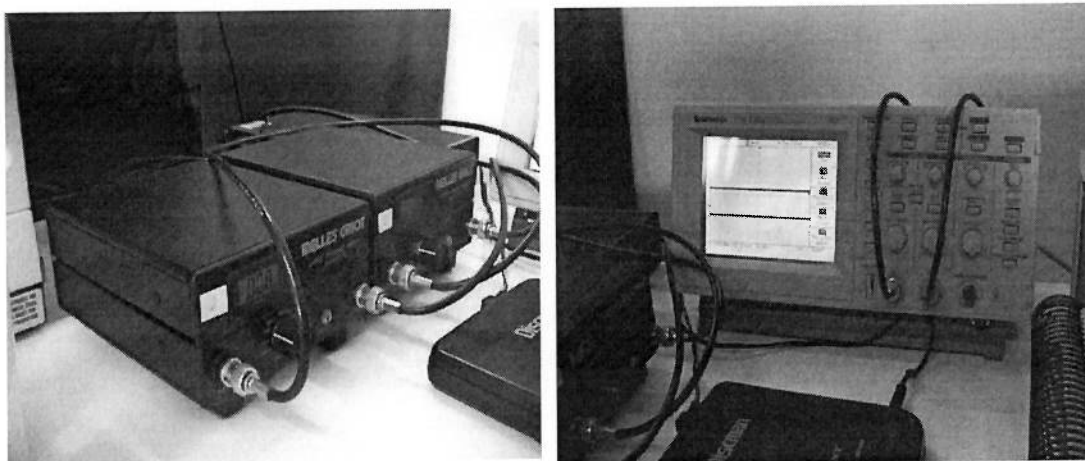
Os fotodiodos utilizados (fotodiodos PIN) operam em modo condutivo, como descrito anteriormente. Dessa forma, a leitura do sensor é feita pela variação da condutibilidade, medindo-se, portanto, a corrente. A corrente resultante de uma medição é baixa e precisa ser amplificada para que possa ser lida por outros equipamentos. Para essa finalidade emprega-se um amplificador de banda larga.

A entrada do amplificador empregado no experimento varia na escala de 1 pA a 100 mA, sendo que nessa faixa existem nove seleções de ganho e a saída é em sinal de tensão para qualquer das escalas de -2 V a 2 V.

Dessa forma, o amplificador converte o sinal de corrente em tensão e o amplifica ao mesmo tempo em que mantém o sinal a zero bias, independente de sua

amplitude. Este pode ser empregado tanto com detectores fotocondutivos como com fotovoltáicos.

A unidade amplificadora permite a leitura do sinal através de um mostrador de cristal líquido com 3 ½ dígitos, além de disponibilizar uma saída para osciloscópio, como pode ser visto nas figuras 5.1 e 5.4. Sua operação pode ser efetuada tanto conectada à rede elétrica como desconectada, sendo que, nesse caso, a alimentação interna se dá por meio de baterias.



(a) (b)  
Fig. 5.4 Disposição dos amplificadores ao lado do osciloscópio, (a) amplificadores (b) osciloscópio.

A existência de baterias próprias no equipamento possibilita a leitura de sinais isolando a unidade amplificadora da rede elétrica, possibilitando maior precisão e menor ruído (interferência eletromagnética conduzida pela rede), muito embora tal unidade deva possuir filtros na saída de sua fonte de alimentação

A recarga dessas baterias é efetuada quando o equipamento está acoplado à rede elétrica. A unidade também possui ajuste de zero, possibilitando tornar nula a corrente residual do fotodiodo.

A utilização do laser permite leituras dinâmicas extremamente rápidas e taxas de amostragem elevadas. O único fator limitante é a constante de tempo do

fotodiodo, que opera como um gargalo em todo o sistema. Dessa forma, fenômenos físicos que ocorrem mais rapidamente que a capacidade de acompanhamento do fotodiodo não podem ser medidos sem erros dinâmicos consideráveis.

O osciloscópio empregado na bancada óptica possui dois canais de leitura, essenciais para medição de velocidade de onda, uma vez que para isso são necessários dois sinais de onda tomados em locais separados a uma distância conhecida.

A taxa máxima de amostragem do osciloscópio é de 1 Gs/s ( do inglês - *giga samples per second*) e a memória disponível por canal possui capacidade para armazenar 2500 pontos.

O osciloscópio possui largura de banda de 100 MHz com limites de largura de banda selecionáveis de 20 MHz.

## 5.2 Equipamento Mecânico

O equipamento mecânico destina-se à calibração do equipamento e à geração de interface ondulante. Para calibrar o equipamento são necessários alguns instrumentos de precisão que serão descritos adiante. A geração de ondas na interface é feita por um batedor projetado para criar ondas unidimensionais. Estas ondas transitam pela interface e no final do percurso deverão ser destruídas para evitar a ocorrência de fenômenos de interferência, pois deseja-se obter uma interface ondulante para testar o sistema.

O canal instrumentado consiste em um recipiente metálico, construído com dimensões rigidamente estabelecidas, cujo fundo possui entradas para inserir as fibras ópticas para calibração e ensaio. As laterais são parafusadas, o que permitiu que fossem feitas modificações para realização dos ensaios propostos.

### 5.2.1 Canal metálico

O canal metálico está esquematizado na figura 5.5. O canal foi construído em aço, sendo que seu fundo é retificado com alta precisão, possibilitando que a superfície seja plana a ponto de não influenciar significativamente nas incertezas de calibração.

As laterais também são de aço retificado, sendo que as duas, para este trabalho, foram substituídas por placas de acrílico polido, afim de que o filme líquido pudesse ser filmado ou fotografado. Todo o conjunto metálico recebeu uma fina camada de níquel para não oxidar nas condições de ensaio.

As fibras ópticas devem estar distanciadas do fundo do canal para evitar que meniscos prejudiquem a calibração. Dessa forma, foi introduzido um degrau de altura conhecida por meio de um calibre, construído com alta precisão, o que possibilita que a fibra óptica seja instalada longe do fundo do canal. A fibra óptica é inserida no interior de um tubo capilar e encostada no calibre. Após o correto posicionamento, ela é fixada com adesivo conforme demonstra a figura 5.6. Longe do fundo do canal, o filme líquido de calibração não sofre influência dos fenômenos de superfície do líquido, tais como meniscos de parede ou de fundo.

O correto posicionamento horizontal do canal é feito por meio de três apoios, como pode ser observado na figura 5.5. Estes apoios são ajustados por meio de

roscas de passo fino. Estas roscas estão apoiadas em bases de aço por intermédio de esferas. A utilização de esferas permite o correto contato, além de possibilitar a rotação das roscas de ajuste.

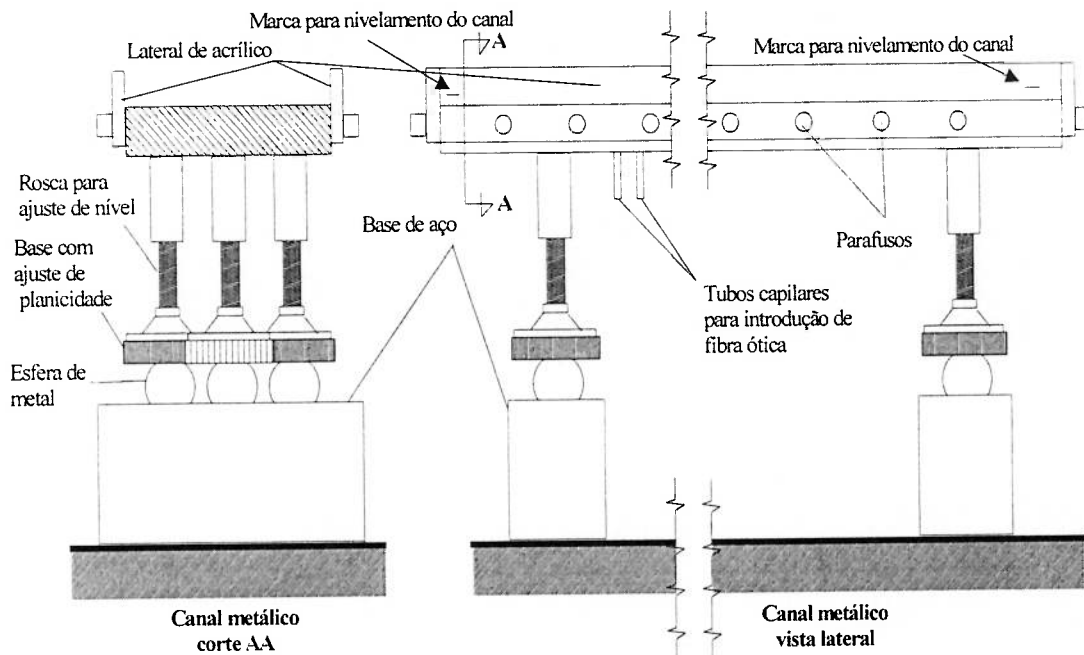


Fig. 5.5 Canal metálico em duas vistas. Os apoios são ajustáveis.

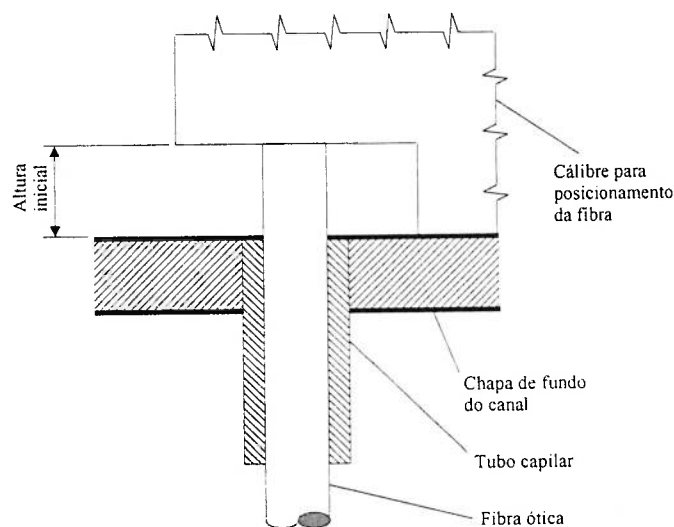


Fig. 5.6 Esquema de posicionamento da fibra ótica no fundo do canal.

O procedimento de ajuste do canal é feito por meio de marcas na lateral de

acrílico que são alinhadas com a interface líquida. É colocado um volume de líquido correspondente ao nível das marcas. Em seguida, observando-se pela lateral, os apoios dos canal são rotacionados até as marcas coincidirem com a interface líquida.

As marcas para nivelar o canal são feitas internamente na lateral de acrílico e são colocadas de forma a possibilitar baixas incertezas de medição referentes ao nivelamento. Para que isso seja possível, elas são feitas de ambos os lados e nas duas extremidades do canal. Dessa forma minimiza-se a incerteza angular de posicionamento do canal.

Essa incerteza pode ser calculada considerando-se que o filme líquido preenche o canal com a incerteza de medição, na posição em que a fibra óptica está instalada. Sendo assim, se o filme líquido estiver deslocado de sua posição, em um valor igual à incerteza de medição (10  $\mu\text{m}$ ), devido à inclinação do canal, podemos estimar a incerteza na forma de ângulo. A figura 5.7 mostra a incerteza angular no ponto de instalação da fibra.

Conforme pode-se observar, o ângulo formado pela posição desejada para a interface líquida e a interface líquida, o qual seria responsável pelo máximo erro de medição para o sistema, pode ser calculado da seguinte forma:

$$\tan(\theta_{\text{nível}}) = \frac{\delta h_{\text{nível}}}{\frac{B}{2} - A} \quad (5.1)$$

O canal possui a dimensão A igual a 239 mm e B igual a 701 mm. Efetuando-se o cálculo descrito acima obtém-se a incerteza angular de posicionamento do canal, que é de  $8,9 \cdot 10^{-5}$  m/m ou 0,08 mm/m. Espera-se obter essa precisão com as marcas na lateral do canal utilizando no ajuste o fole da máquina fotográfica (figura 5.5) para ampliar a marca. Como o fole da máquina fotográfica pode ampliar até 36 vezes, espera-se obter essa precisão de posicionamento.

A calibração da fibra óptica pode ser feita de duas maneiras. A primeira com uma câmera apontada para o perfil do filme líquido com uma escala comparativa imersa no mesmo. A segunda através da introdução de um volume de líquido conhecido no canal, cujas dimensões são conhecidas.

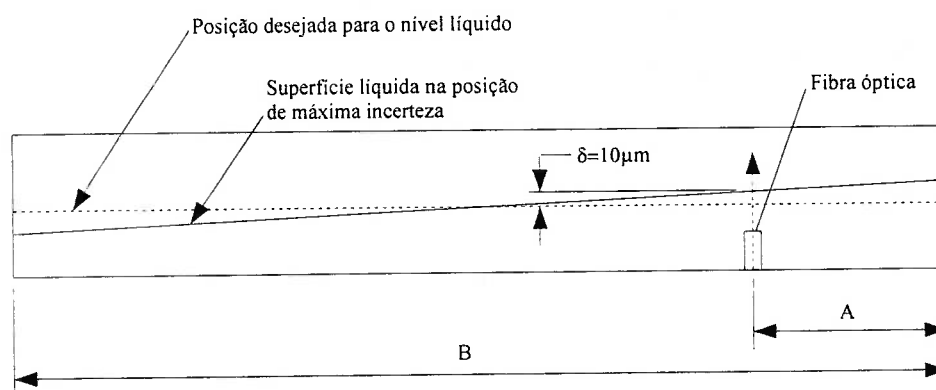


Fig. 5.7 Determinação da incerteza angular baseada no erro de medição desejado para o sistema.

A segunda forma requer a utilização de um instrumento graduado para a adição do líquido. Este instrumento pode ser uma pipeta, um becker ou uma bureta. O que nos interessa é a sua incerteza.

Nesta alternativa, a incerteza do instrumento é diretamente responsável pela qualidade da calibração e, uma vez que as dimensões do canal já são conhecidas, o único dispositivo que pode elevar a incerteza de calibração é o instrumento de



inserção do líquido. Dessa forma, deve ser escolhida uma incerteza de medição para este instrumento que não influencie a incerteza de calibração. Dentre os instrumentos disponíveis não foi possível obter uma incerteza baixa de calibração.

A alternativa foi a utilização de uma forma alternativa de medir o volume com uma baixa incerteza, como por exemplo a medição da massa. Isso pode ser feito com uma balança de laboratório.

Para a água empregada no ensaio é necessário antes conhecer a densidade da mesma. Faz-se isso com um recipiente de volume conhecido tomando cuidado de eliminar bolhas de ar que ficam presas nas paredes do recipiente quando este é preenchido com água até o volume máximo de sua capacidade. Deve-se tomar cuidado para o volume não exceder a capacidade de pesagem da balança.

Sabe-se que, após a inserção de líquido no canal, a altura do filme líquido é dada por:

$$h_{\text{filme}} = h_{\text{líquido}} - h_{\text{cálitre}} \quad (5.2)$$

A incerteza da altura do filme líquido é dada por:

$$\delta h_{\text{filme}}^2 = \delta h_{\text{líquido}}^2 + \delta h_{\text{cálitre}}^2 \quad (5.3)$$

A altura do líquido é dada por:

$$h_{\text{líquido}} = \frac{V_{\text{líquido}}}{A_{\text{canal}}} \quad (5.4)$$

A área do canal é conhecida bem como o volume de líquido que deve ser inserido. Sendo assim, é possível calcular a altura do filme através da equação 5.4 e a incerteza da altura líquida pode ser calculada por:

$$\delta h_{\text{líquido}} = \sqrt{\left(\frac{1}{A_{\text{canal}}}\right)^2 \cdot \delta V_{\text{líquido}}^2 + \left(\frac{V_{\text{líquido}}}{A_{\text{canal}}^2}\right)^2 \cdot \delta A_{\text{canal}}^2} \quad (5.5)$$

A área do canal é dada por:

$$A_{canal} = L_{comprimento} \cdot L_{largura} \quad (5.6)$$

sendo que a incerteza associada ao cálculo da área é dada por:

$$\delta A_{canal} = L_{comprimento}^2 \cdot \delta L_{largura}^2 + L_{largura}^2 \cdot \delta L_{comprimento}^2 \quad (5.7)$$

Substituindo a equação 5.5 na equação 5.3 obtém-se:

$$\delta h_{filme} = \sqrt{\left(\frac{1}{A_{canal}}\right)^2 \cdot \delta V_{liquido}^2 + \left(\frac{V_{liquido}}{A_{canal}^2}\right)^2 \cdot \delta A_{canal}^2 + \delta h_{cálbre}^2} \quad (5.8)$$

sendo que a área do canal e a incerteza associada são dadas pelas equações 5.6 e 5.7.

Da equação 5.8, pode-se concluir que todos os parâmetros geométricos do canal são fixos, exceto a incerteza associada ao volume de líquido adicionado.

O volume do líquido é dado por:

$$V_{liquido} = \frac{m_{liquido}}{\rho} \quad (5.9)$$

onde  $m_{liquido}$  é a massa de líquido medida adicionada no canal e  $\rho$  é a densidade da água utilizada no ensaio obtida antes por:

$$\rho = \frac{m_{100ml}}{V_{100ml}} \quad (5.10)$$

A incerteza da densidade é dada por:

$$\delta \rho = \sqrt{\left(\frac{1}{V_{100ml}}\right)^2 \cdot \delta m_{100ml}^2 + \left(\frac{m_{100ml}}{V_{100ml}^2}\right)^2 \cdot \delta V_{100ml}^2} \quad (5.11)$$

Essa medição da densidade é feita com um becker de 100 ml ( $V_{100ml}$ ) que não excede a capacidade máxima da balança que é de 100 gramas. A menor divisão de volume é de 1 ml sendo a incerteza portanto de 0,5 ml ( $\delta V_{100ml}$ ). A incerteza da balança é de 0,00005 ml ( $\delta m_{100ml}$ ). Calculando a incerteza da densidade

obtemos um valor de 5 kg/m<sup>3</sup>.

A incerteza do volume de líquido adicionado no canal por meio de adição de massa é dada por:

$$\delta V_{\text{liquido}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 \cdot \delta m_{\text{liquido}}^2 + \left(\frac{m_{\text{liquido}}}{\rho^2}\right)^2 \cdot \delta \rho^2} \quad (5.12)$$

Calculando a incerteza do volume de líquido que foi colocado no canal pela formula 5.12 e substituindo na equação 5.8, obtém-se a incerteza da altura por esse processo de adição de líquido.

### 5.2.2 Calibração do equipamento

A calibração pode ser efetuada pelo método descrito por PACIFICO (2000), onde é empregada uma pipeta para adicionar água ao canal. Introduce-se um volume conhecido de líquido e, através do conhecimento das dimensões do recipiente, pode-se determinar a altura do filme.

Como a incerteza de instrumentos que manipulam volume é alta, optou-se por utilizar a medição da massa como foi relatado no item anterior. Como a medição da massa utilizando balança de laboratório possui incerteza baixa, a incerteza final do próprio volume acaba sendo baixa.

Para cada quantidade de líquido adicionada no canal registra-se a tensão média medida no osciloscópio. Procedem-se várias vezes da mesma forma até que sejam levantados dados suficientes para que tenhamos uma curva de tensão por espessura.

A análise do sinal do osciloscópio fornece a média da tensão e a incerteza do sinal obtida do desvio padrão calculado da amostra. A incerteza da espessura do líquido é obtida conforme mostrado nas equações 5.2 a 5.12.

### 5.2.3 Geração de ondas na interface

A geração de ondas na interface é realizada por um sistema vibratório, baseado em um motor de passo acionado, por dois transistores que operam em corte e saturação. Os transistores acionam as bobinas do motor de passo sequencialmente, uma em sentido contrário da outra. O ritmo de acionamento é dado por um microprocessador (*clock*) que gera ondas quadradas em uma frequência determinada pelo valor de leitura de um potenciômetro manipulado pelo operador. Para aumentar ou diminuir a frequência é necessário girar o potenciômetro.

O eixo do motor de passo está conectado a uma manivela que faz o movimento de ida e volta de uma placa plana instalada no canal perpendicular à superfície líquida e imersa nesta. A placa, que possui a largura do canal, está parcialmente imersa no filme líquido. Quando o motor é ligado, toda a placa na extensão da largura do canal oscilará, produzindo uma onda unidimensional que é transportada através da interface.

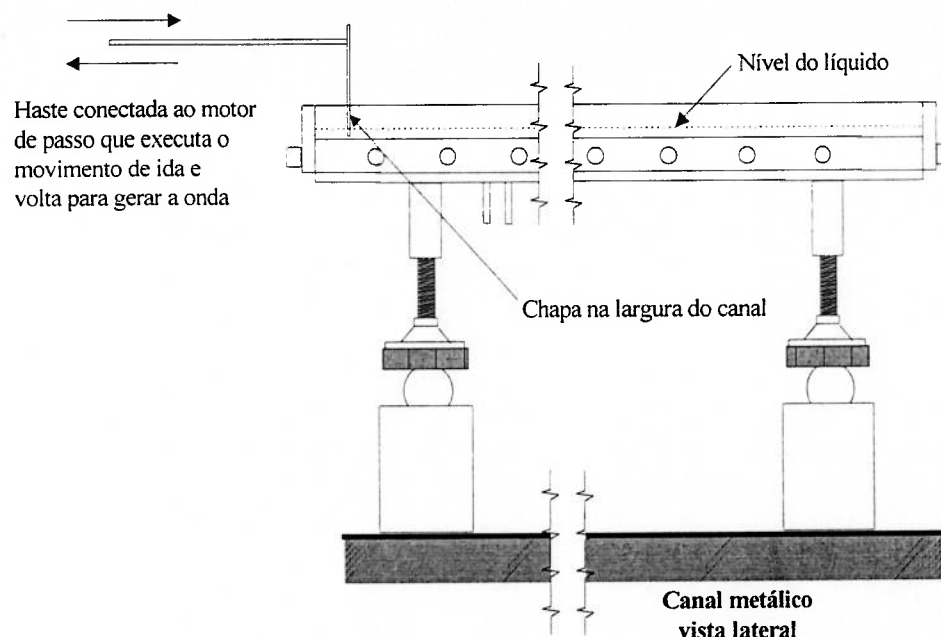


Fig. 5.8 Dispositivo para geração de ondas unidimensionais na interface do filme líquido.

O dispositivo para ajustar a altura do batedor é mostrado na figura 5.9. Esse dispositivo deve gerar ondas que possam ser lidas pelo sistema óptico. Essas ondas devem ser unidimensionais, passíveis de serem registradas por uma câmera instalada na lateral do canal e sua forma e frequência não necessitam ser excessivamente controladas.

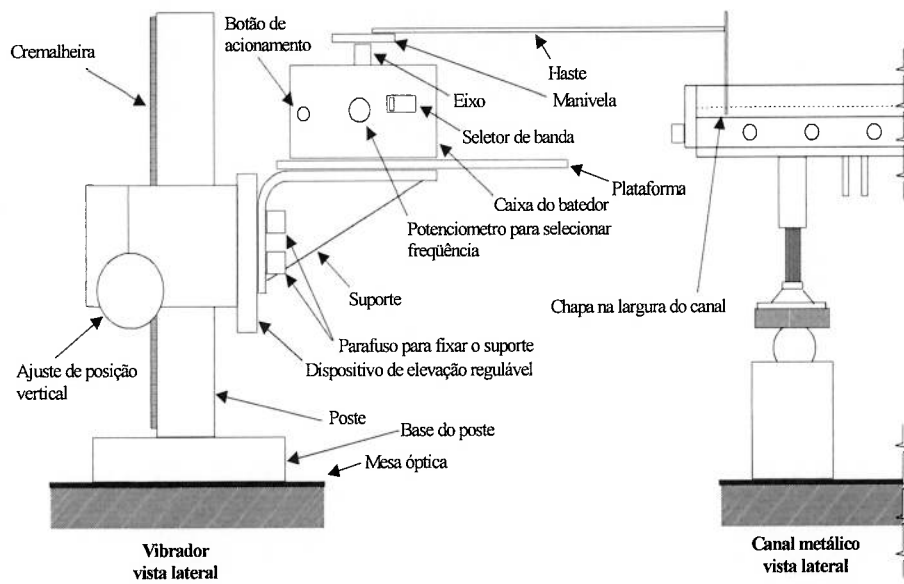


Fig. 5.9 Dispositivo para geração de ondas unidimensionais na interface do filme líquido.

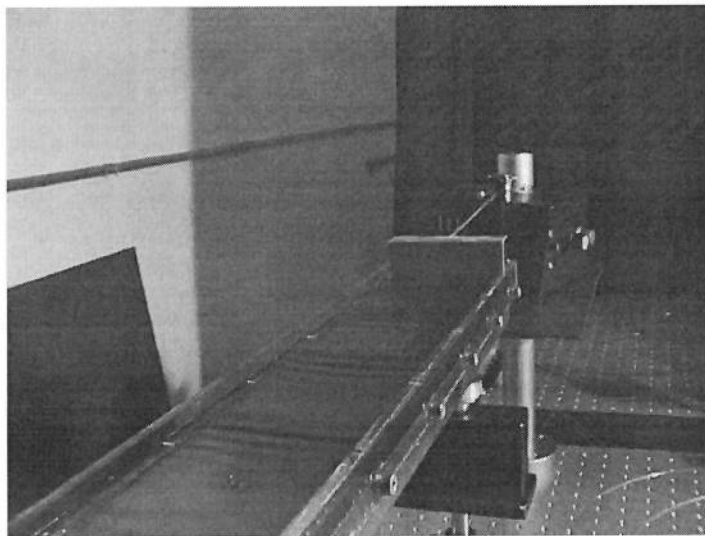


Fig. 5.10 Ondas geradas no canal.

Para as ondas serem registradas na lateral do canal por uma câmera instalada nesse local, é necessário que não sofram distorções na direção perpendicular a de sua propagação, ou seja, vista em planta, a frente de onda sempre seria uma reta.

A maioria das situações prováveis de aplicação da técnica experimental a laser ocorrem em escoamentos onde as perturbações são transportadas por convecção com

o fluxo, sendo que, normalmente, não caminham contrárias a ele. Dessa forma, é necessário que, de alguma forma, nos ensaios propostos, evite-se que as ondas transitem em sentidos opostos, pois não há sentido em utilizar correlação de sinais para se calcular o atraso se os sinais forem diferentes. Em outras palavras, a interface deve possuir uma direção preferencial de propagação.

Inicialmente sugeriu-se um dispositivo de dissipação no final do canal para impedir que as ondas criadas pelo mecanismo oscilatório fossem refletidas e retornassem para a origem. Esse anteparo é uma chapa inclinada de  $15^\circ$  a  $20^\circ$  com o fundo do canal. Na posição em que a onda incide são colocadas estrias que reduzem a reflexão.

Essa chapa inclinada é utilizada em canais de ensaio de modelos de embarcações (modelos navais) constituindo, juntamente com as estrias mencionadas anteriormente, numa prática comum quando é necessário dissipar ondas na superfície de meios fluidos.

Esse dispositivo é muito similar às praias litorâneas, sendo que essa é, aparentemente, a forma observada que a natureza encontrou para dissipar a energia das ondas.

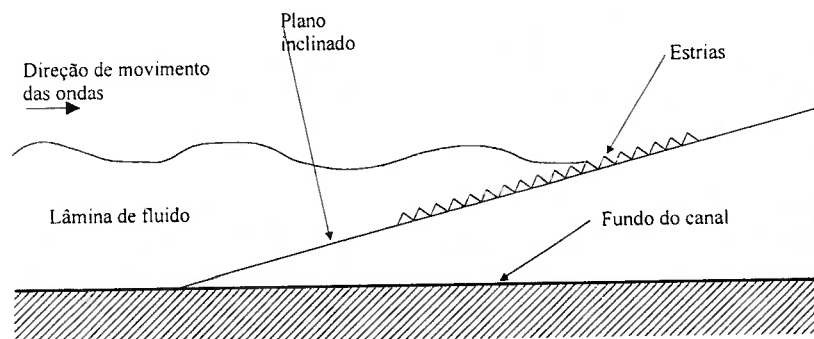


Fig. 5.11 Dispositivo para destruição de ondas.

No entanto, observou-se que devido às forças de tensão superficial a reflexão era quase inexistente. Dessa forma, embora esse dispositivo tenha sido construído e testado, não foi utilizado.

### 5.3 Equipamento Fotográfico

Para visualizar a onda na interface líquida por um outro método, diferente do anterior, foi proposta uma técnica baseada em equipamento fotográfico simples, como pode ser observado na figura 5.12. A máquina fotográfica é instalada na lateral do canal apontada para a fibra óptica. Por meio de um dispositivo de ampliação é possível se fotografar a posição da fibra óptica ampliada muitas vezes, tantas quanto forem necessárias para se ter uma boa imagem. A fotografia é revelada, digitalizada e analisada por programa de computador.

A utilização de fotografia possui várias restrições. A primeira delas diz respeito à velocidade de exposição, que situa-se por volta de  $1/1000$  s. A segunda é que tal sistema não pode realizar leituras dinâmicas em frequências superiores à velocidade dos *motordrives* que poderiam ser empregados para isso. Esses *motordrives* permitem que o sistema fotográfico seja disparado a 10 quadros por segundo no máximo, sendo que, nesse caso não foi utilizado esse dispositivo. A solução para a restrição da câmera seria a utilização de uma filmadora ou uma câmera digital, solução que mostrou ter custo elevado e ser fora do propósito do experimento em questão.

A terceira restrição diz respeito à capacidade de ampliação do sistema óptico para fotografar o filme líquido, o que chega a ser satisfatório para essa aplicação. Tal ampliação é obtida por meio de um acessório denominado fole, que permite que a



imagem do alvo seja ampliada em até 32x. Esse dispositivo pode ser observado em esquema na figura 5.12. Tal sistema fornece uma ampliação suficiente para que a imagem seja fotografada, digitalizada e analisada em um computador.

O primeiro problema relacionado ao emprego desse equipamento é que, quanto maior a ampliação, menor a quantidade de radiação luminosa para sensibilizar a película do filme. Sendo assim, são necessárias grandes aberturas de diafragma para registrar a imagem, sendo que, à medida que aumentamos a abertura, o campo focal é sensivelmente reduzido, prejudicando a definição da imagem. Optou-se por grande abertura de diafragma pois esta, a princípio, elimina o fundo, facilitando o processamento da imagem no computador.

Os primeiros testes revelaram que, para sensibilizar a película de filme fotográfico, seriam necessários grandes intervalos de exposição, o que inviabilizou a fotografia da interface ondulante, a menos que fossem utilizadas películas de alta sensibilidade (ASA 1600, 3200 ou 6400). Em contrapartida, películas muito sensíveis são também muito espessas, e o raio de luz, ao sensibilizá-la, provoca uma reação ao longo de toda a espessura, que atinge uma área muito grande. A definição da fotografia fica prejudicada, pois a granulação da imagem fica grande. Os fabricantes de películas fotográficas insistem em dizer que novas tecnologias foram desenvolvidas para solucionar esse problema, mas o uso prático revela que o problema ainda não foi solucionado satisfatoriamente.

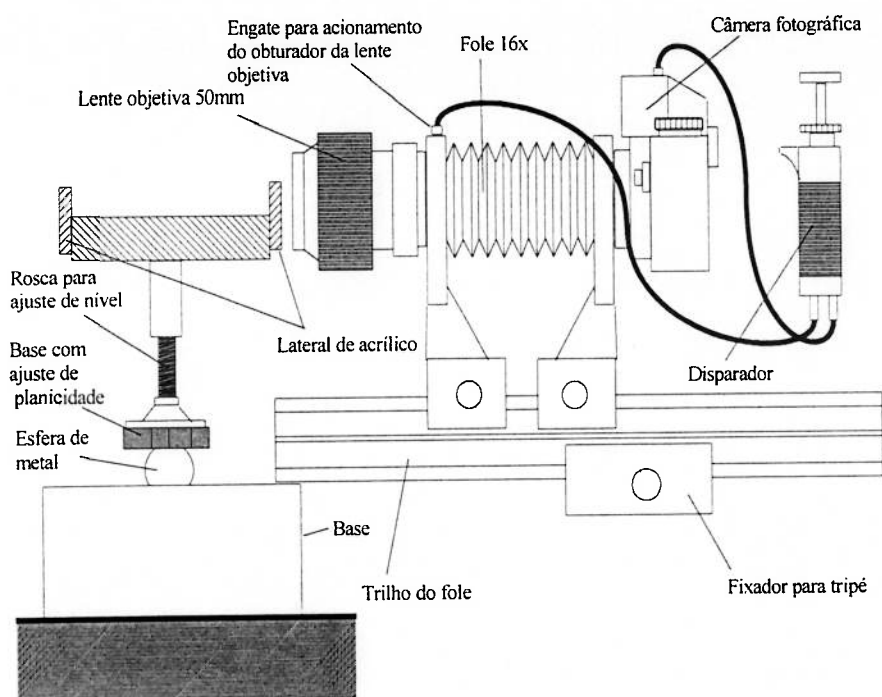


Fig. 5.12 Visualização do filme. Uma câmera fotográfica é acoplada a uma extremidade do fole e a objetiva à outra. A câmera é apontada para a lateral de acrílico.

Outro problema que ocorre é que o tripé para a máquina fotográfica não oferece rigidez suficiente, pois, dada a amplitude da ampliação necessária e com o movimento da cortina da máquina fotográfica, o conjunto vibra e a câmera sai micrometricamente da posição durante a exposição, prejudicando a definição da imagem. Pode-se resolver esse problema retirando o tripé e apoiando o conjunto em cima da mesa óptica, que possui uma inércia maior e a fixação é muito mais rígida e robusta.

A falta de luminosidade foi contornada utilizando-se lâmpadas de 1000 W capazes de produzir luz suficiente para sensibilizar um filme comercial simples de ASA 100 com velocidade de 1/1000 s. A lâmpada foi instalada na frente da câmera a aproximadamente 1,5 m de distância e apontada para a câmera. A imagem observada

pela câmara passou a ser basicamente uma imagem de sombras.

A posição da lâmpada foi ajustada através da sombra que se formou na parede atrás da máquina de forma a alinhar a lâmpada perfeitamente com a interface.

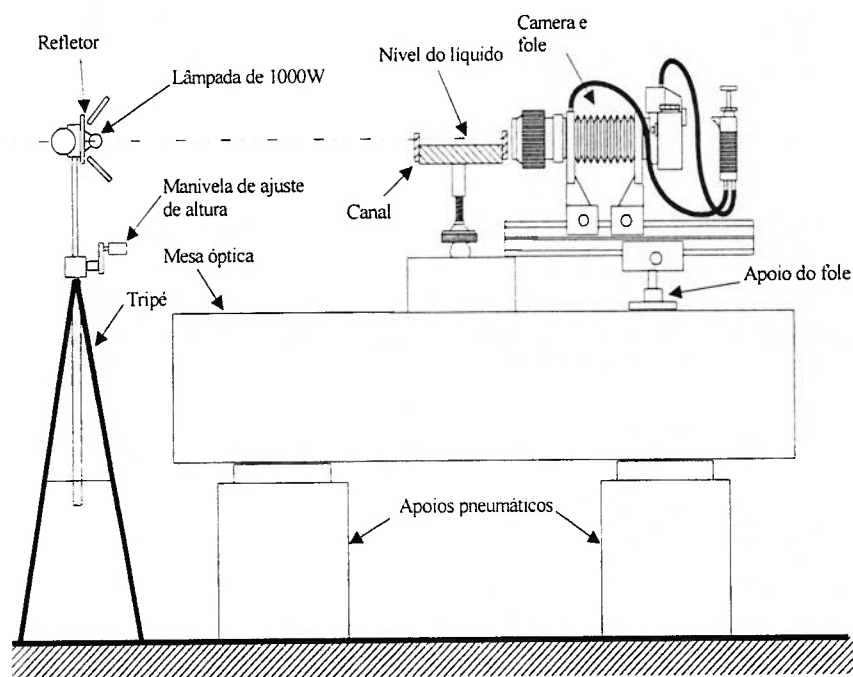


Fig. 5.13 Iluminação permitiu a utilização de filme de baixa sensibilidade, proporcionando alta resolução e baixo tempo de exposição.

As fotos na figura 5.14 mostram a instalação bem como o resultado obtido com a montagem descrita acima.

Procurou-se distanciar a lâmpada da objetiva da máquina de forma a “simular” um efeito de luz colimada atingindo o filme líquido e sensibilizando a película do filme fotográfico. Como a luz proveniente da lâmpada de 1000 W possui uma intensidade muito superior à da sala, esta última não interfere no resultado final.

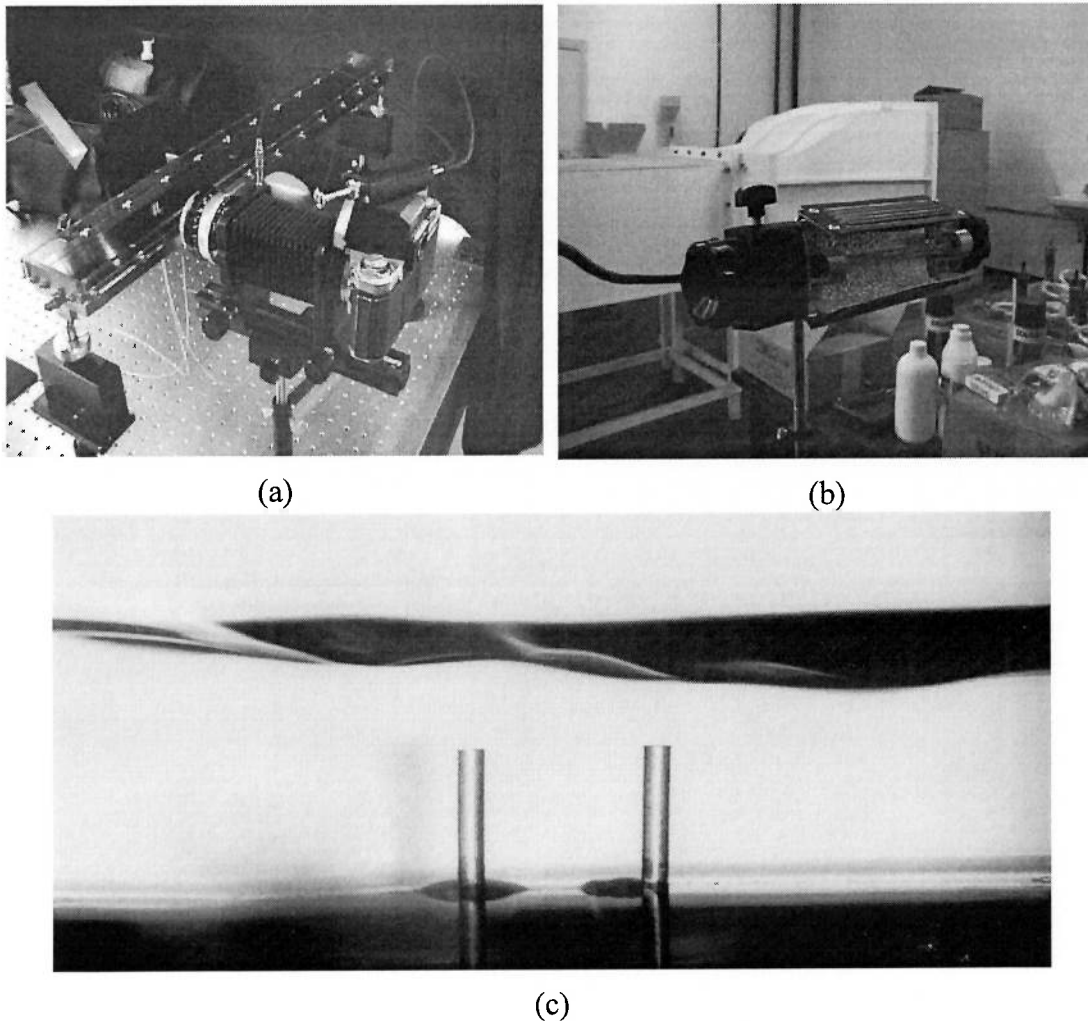


Fig. 5.14 Fotos mostram a montagem do sistema fotográfico sobre a mesa (a), a lâmpada de 1000 W empregada (b) e uma foto demonstrando o resultado desse esquema (c).

#### 5.4 Instrumentos de medição

Utilizou-se instrumentos para medir volume, massa e comprimento. No caso do volume, utilizou-se provetas graduadas.

No caso da massa, utilizou-se uma balança de laboratório com quatro casas decimais (incerteza de 0,00005 g).

O comprimento foi medido com paquímetro de incerteza conhecida (0,02 mm).

#### 5.4.1 Medição do volume através da massa

Devido à alta imprecisão dos instrumentos de medição de volume, decidiu-se medir o volume indiretamente através da massa. A densidade do líquido foi determinada, e após isso todas as medidas foram feitas com base na massa.

A balança empregada possui incerteza baixa. Isso possibilitou a obtenção de incertezas padronizadas combinadas de medição muito pequenas no que se refere à massa.

O volume foi obtido utilizando-se a densidade anteriormente determinada, com sua incerteza combinada avaliada.

A adição de fluido no canal foi determinada através da variação da massa do recipiente utilizado para adicionar líquido. Há também, no caso desse tipo de incerteza, a contribuição de resíduos externos, como a gordura da mão e a poeira do ambiente que se depositam sobre o prato da balança. Cuidados especiais foram tomados para evitar a influências dessas fontes de incerteza.

A temperatura externa manteve-se sempre próxima da temperatura em que foi determinada a densidade do fluido (água) e tomou-se o cuidado de utilizar sempre água do mesmo recipiente para evitar contaminação que alterasse a densidade do fluido.

Após o término do ensaio, a água que ficava no canal era cuidadosamente recolhida para o interior do recipiente original. Após o término dos ensaios propostos, uma nova determinação da densidade foi feita e não foi verificado mudança significativa da densidade capaz de alterar os resultados, mantendo-se dentro da faixa de incerteza da medição anterior.

## 5.5 Programas utilizados

Para a realização do experimento utilizou-se um programa que realiza a leitura e armazenamento dos dados provenientes da memória do osciloscópio. O osciloscópio utilizado possui 2500 pontos de memória para armazenamento da tela e uma saída RS-232, que possibilita a transferência desses dados para um microcomputador com entrada serial. A leitura da memória foi feita pelo microcomputador utilizando-se um programa. Após congelar a tela do osciloscópio a leitura foi feita durando aproximadamente dez segundos para que a transmissão de dados fosse completada.

Esses dados foram armazenados em arquivo para posterior leitura por outro programa. Utilizou-se a transferência destes dados para arquivo texto, que mais tarde foi aberto em planilha de cálculo para realização das análises.

Posteriormente, para a análise dos resultados fotográficos, utilizou-se um programa criado para leitura de elementos de imagem (*pixels*) que gera um arquivo de pontos em formato texto, para ser lido e processado em planilha de cálculo. O operador abriu imagem por imagem nesse programa e, através do dispositivo de digitalização manual do computador (*mouse*), selecionou os pontos da interface para montar o arquivo de pontos para análise posterior.

## 6 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram feitos ensaios para determinar o comportamento da técnica a laser quanto à variação de parâmetros, tais como frequência e espessura, dentro de uma faixa onde seja possível fazer o registro por imagem. Foram criadas ondas no filme com o batedor anteriormente descrito, variando-se a frequência. A espessura foi variada pela adição de líquido no canal.

A utilização da câmera tem o objetivo de, durante os ensaios, visualizar o filme líquido para compará-lo com a espessura obtida pelo sistema laser, a fim de detectar eventuais discrepâncias entre as leituras ou validar os resultados.

O ensaio foi planejado de modo que a calibração sempre fosse feita antes da medição. O motivo disto é que o laser possui uma curva característica de aquecimento, sendo que cada vez que ele é acionado, estabiliza-se em um ponto que nunca é igual ao anterior. Dessa forma, a intensidade de equilíbrio do feixe para uma dada calibração do sistema não se repetiria novamente se o sistema fosse desligado e ligado posteriormente.

Supõe-se que o laser tenha esse comportamento devido ao fato que, cada vez que é ligado, entra em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente em uma intensidade. A figura 6.1 mostra duas curvas de aquecimento do canhão laser levantadas em dias diferentes. Pode ser observado que as duas estabilizam-se em pontos diferentes.

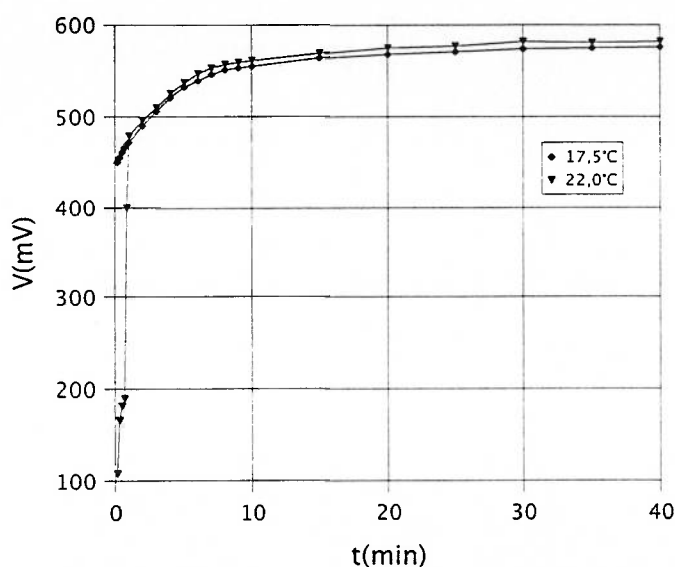


Fig. 6.1 Curvas de aquecimento para o laser de He-Ne empregado. Nota-se que o patamar de equilíbrio é alcançado após 40 min, em média.

Esperou-se uma hora antes de iniciar os procedimentos experimentais para que o laser estabilizasse sua emissão. Dessa forma, após uma hora da partida do laser, a sequência experimental foi iniciada com um procedimento de calibração. Após a calibração, realizou-se o experimento propriamente dito.

Outro motivo para fazer a calibração antes do ensaio sem desligar o equipamento é o fato de que o osciloscópio possui um ajuste não constante, ou seja, cada vez que a função de ajuste é requisitada, a leitura se estabiliza com um *offset* diferente. A curva descrita abaixo é um exemplo claro disso. Nessa curva, a função autoajuste do osciloscópio foi pressionada várias vezes durante o levantamento da curva de calibração. O resultado prático é que em cada momento, cada faixa de pontos era tomada com valores diferentes de ajuste (*offset*).

Esse problema é comum nesse fabricante de osciloscópio e já ocorreu em outras aplicações experimentais.

Dessa forma, após uma hora do acionamento do laser com o sinal estabilizado,



é feito o ajuste do osciloscópio, que deve ser usado até o fim do experimento. O equipamento não pode ser desligado nem ter seu ajuste alterado até o fim do experimento.

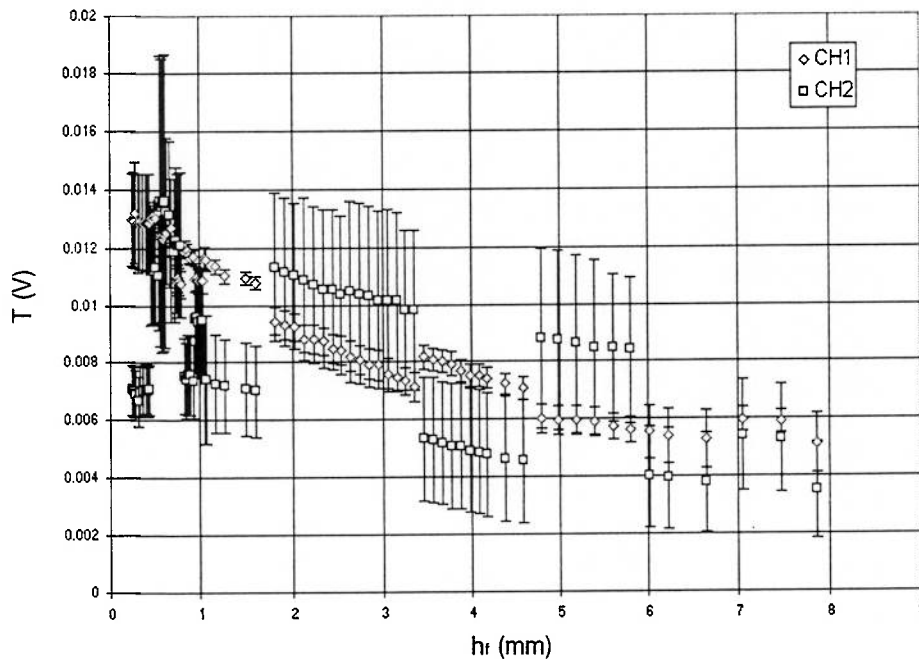


Fig. 6.2 Valores diferentes de ajuste (*offset*) levam a faixas de pontos em diferentes curvas de calibração. O auto-ajuste do osciloscópio não pode ser utilizado para o levantamento da curva de calibração.

### 6.1 Ajuste do canal

O ensaio deve ser feito sem que a inclinação residual do canal introduza incertezas significativas na medição. Dessa forma, é necessário que o canal seja nivelado com baixa incerteza, tanto no eixo longitudinal quanto no transversal.

O nivelamento é feito adicionando-se quantidade de água suficiente para que o nível atinja as marcas laterais. Em seguida os apoios do canal são manipulados de forma que as marcas fiquem o mais próximo possível do nível líquido.

A figura 6.3 mostra a concordância entre marcas de nivelamento e interface líquida onde  $h_1'$  deve ser igual a  $h_2'$ . Uma vez que o volume de líquido é dado pela multiplicação da área do canal pela altura das marcas (pois ambas foram feitas com o mesmo padrão), obtém-se o volume de líquido que deve ser colocado no canal. Multiplicando-se pela densidade, obtém-se a massa de líquido que deve ser colocada. Medindo essa massa com a balança de precisão e despejando sobre o canal obtemos o nível de líquido desejado para indicar o processo de ajuste dos apoios.

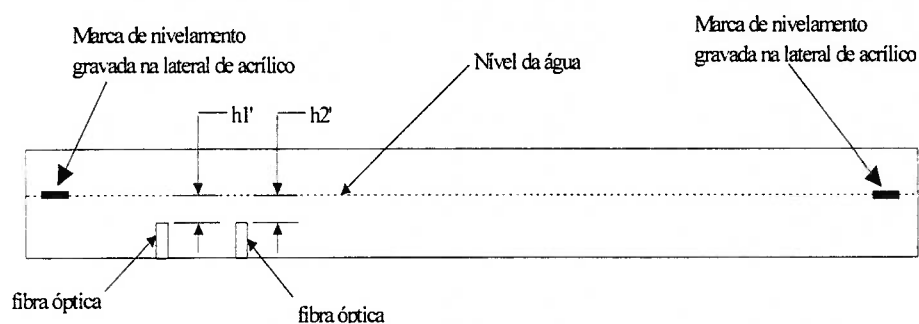


Fig. 6.3 Corte longitudinal: esquema de nivelamento do canal utilizando duas fibras.

Depois de colocar o líquido no canal, é feito o nivelamento visual até que ambas as fibras possuam a mesma distância  $h_1'$  e  $h_2'$  sobre sua ponta.

O mesmo é feito com as marcas na lateral de acrílico oposta, nivelando assim o canal metálico nos dois eixos. Em ambos os casos, utilizou-se o fole de câmera para observar a distância da interface da ponta da fibra. Através da ampliação oferecida pelo fole foi possível visualizar com precisão as marcas nas laterais de acrílico enquanto se ajustava os apoios.

## 6.2 Calibração do sistema

Após o nivelamento do canal através dos apoios ajustáveis, foi realizada a calibração do sistema óptico. Tal calibração foi feita adicionando-se massas incrementais de líquido conhecidas e registrando-se o sinal resultante. O sinal do osciloscópio é composto de 2500 pontos. Dessa forma, além de obter a informação da média do sinal, pode-se obter a informação do desvio padrão como medida da incerteza padronizada.

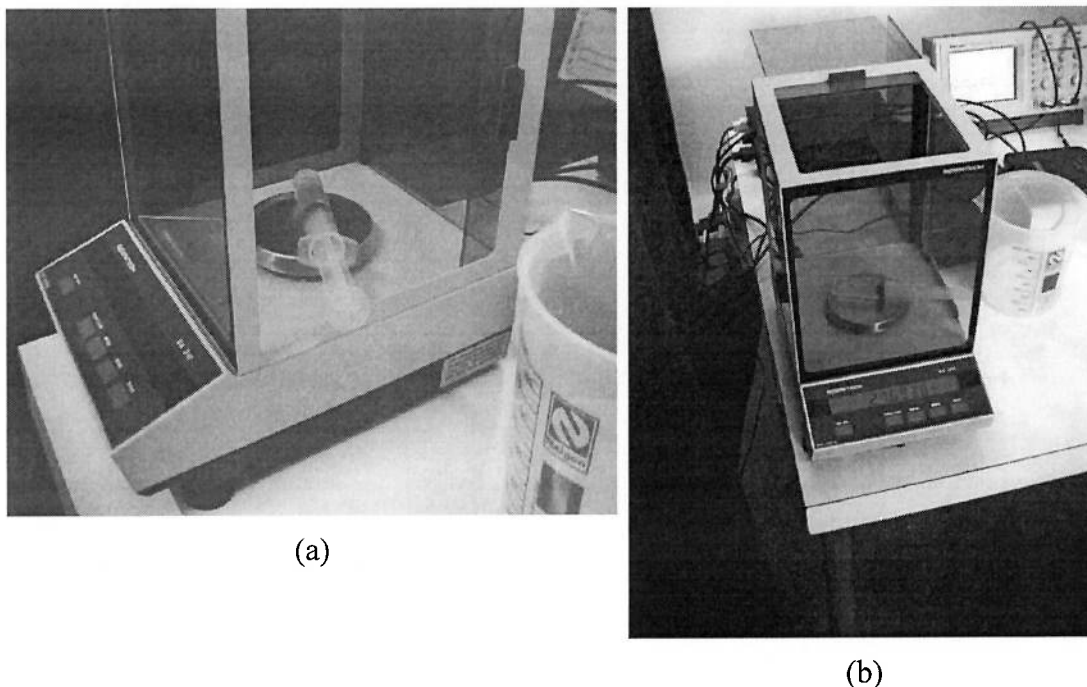


Fig. 6.4 Instrumento de adição de líquido sendo pesado cheio, (a) vista superior da balança e (b) vista do prato da balança.

Para registrar um ponto, inicialmente encheu-se o instrumento de inserção de líquido (empregou-se uma seringa de injeção) com o líquido de trabalho (água). O conjunto foi pesado, sendo em seguida foi derramado no canal um dado volume desejado e, após essa operação, o instrumento de inserção é novamente pesado.

Com isso, é possível saber, com baixa incerteza, a massa que foi adicionada no

canal. Sendo a temperatura da sala aproximadamente a mesma de quando a densidade do líquido foi determinada, não é necessário determinar novamente a densidade.

### 6.3 Descrição da rotina de ensaio

Após a calibração, o canal é drenado sem alterar seu nivelamento utilizando o próprio instrumento de adição de fluido. Após a drenagem é colocada uma certa quantidade de líquido estabelecendo-se um nível inicial. Três frequências foram selecionadas através de marcas colocadas no potenciômetro do batedor. Para cada frequência selecionada foram retiradas três fotos e uma leitura da onda foi feita com o osciloscópio em duas taxas de amostragem distintas, a primeira com 1 milissegundo (destinada ao cálculo posterior da frequência) e a segunda com 0,1 milissegundos (destinada ao cálculo da velocidade).

Após a término de tomada do primeiro ponto experimental para o nível, selecionou-se outra frequência e outras três fotos foram tiradas mais a leitura do osciloscópio em duas taxas de amostragem distintas.

A leitura do osciloscópio deve ser feita com a tela do mesmo congelada, pois dessa forma é possível ler a memória do mesmo. Após congelar a tela, foi feita a leitura da memória através do microcomputador acoplado à saída RS-232 do osciloscópio, sendo que o resultado foi armazenado em arquivo identificado com o código do ponto experimental.

Após a tomada de dados das três frequências, sem desligar o batedor, adicionou-se mais uma quantidade conhecida de líquido para elevar o nível.

Procedeu-se novamente a leitura de sinal para as três frequências marcadas na

chave seletora do batedor. As fotos não foram tiradas para todos os níveis, apenas para três níveis, totalizando 27 fotos que foram analisadas para comparar com as leituras do equipamento.

O filme fotográfico foi identificado com a própria identificação da chapa no negativo. Dessa forma sabe-se a que ponto experimental corresponde cada fotografia.

As frequências para a leitura foram escolhidas tendo em vista as restrições impostas pelas características do experimento. Escolhendo-se uma frequência elevada, ocorria o lançamento de água para fora do canal. Para se evitar isso, optou-se por frequências em que não havia gotas de água sendo lançadas para fora do canal pelo batedor.

Os níveis possíveis de serem ensaiados foram escolhidos levando-se em conta a sensibilidade determinada durante a calibração e a capacidade do canal utilizado.

A tabela abaixo mostra todos os pontos experimentais que foram avaliados:

<i>Volume Aproximado (ml)</i>	<i>Frequências (*)</i>	<i>Amostra com 1 ms (arquivo de dados)</i>	<i>Amostra com 0,1 ms (arquivo de dados)</i>	<i>Fotos (arquivo fotográfico)</i>		
200	F4	200f4f.nbk	200f4v.nbk	1.jpg	2.jpg	3.jpg
	F6	200f6f.nbk	200f6v.nbk	4.jpg	5.jpg	6.jpg
	F8	200f8f.nbk	200f8v.nbk	7.jpg	8.jpg	9.jpg
220	F4	220f4f.nbk	220f4v.nbk			
	F6	220f6f.nbk	220f6v.nbk			
	F8	220f8f.nbk	220f8v.nbk			
240	F4	240f4f.nbk	240f4v.nbk	10.jpg	11.jpg	12.jpg
	F6	240f6f.nbk	240f6v.nbk	13.jpg	14.jpg	15.jpg
	F8	240f8f.nbk	240f8v.nbk	16.jpg	17.jpg	18.jpg
260	F4	260f4f.nbk	260f4v.nbk			
	F6	260f6f.nbk	260f6v.nbk			
	F8	260f8f.nbk	260f8v.nbk			

<i>Volume Aproximado (ml)</i>	<i>Frequências (*)</i>	<i>Amostra com 1 ms (arquivo de dados)</i>	<i>Amostra com 0,1 ms (arquivo de dados)</i>	<i>Fotos (arquivo fotográfico)</i>		
280	F4	280f4f.nbk	280f4v.nbk	19.jpg	20.jpg	21.jpg
	F6	280f6f.nbk	280f6v.nbk	22.jpg	23.jpg	24.jpg
	F8	280f8f.nbk	280f8v.nbk	26.jpg	27.jpg	28.jpg

(\*) Os índices F4, F6 e F8 representam marcas na escala do potenciômetro do batedor, sendo que não têm correspondência com frequências pré-estabelecidas e seu valor em termos de frequência será determinado após a análise dos dados.

Tab. 6.1 Pontos levantados durante as rotinas experimentais.

#### 6.4 Observações preliminares

Tanto antes da calibração quanto antes do ensaio, os prismas, lentes e pontas de fibra foram limpos com álcool isopropílico, sendo que antes de cada experimento, durante a hora em que o laser entrava em regime, era evitada a movimentação na sala com o objetivo de evitar que a poeira levantasse e ficasse em suspensão no ambiente.

Foi notada uma pequena diferença no que se refere ao desvio padrão dos pontos de calibração em todas as quatro curvas de calibração que foram levantadas antes do experimento propriamente dito, conforme pode ser observado na figura 6.2. Nota-se que para um mesmo ajuste existem desvios padrão diferentes, significando que internamente o osciloscópio seleciona filtros de ruído diferentes. Dessa forma, durante o acionamento do osciloscópio, antes de iniciar a calibração, tomou-se o cuidado de selecionar filtro de baixo ruído, ou seja, pressionou-se o *autoset* até se obter uma leitura com baixo ruído.

Devido aos fenômenos de tensão superficial, tornou-se necessário agitar com o batedor a interface líquida durante a calibração para que o menisco se acomodasse a 90° com as bordas de acrílico.

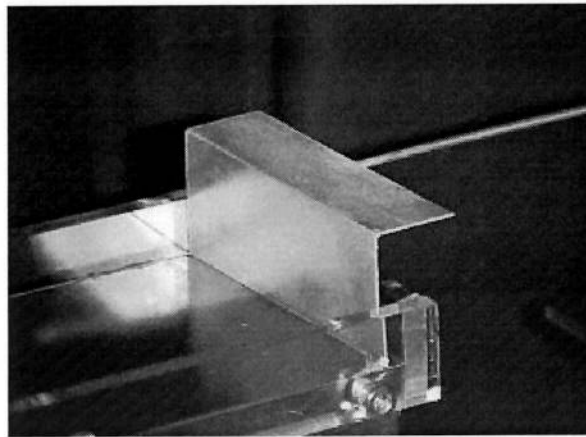


Fig. 6.5 Levantar a haste para preencher o compartimento atrás da chapa.

Durante a adição de água no canal, a haste do batedor teve que ser levantada para que a região em sua parte posterior fosse preenchida pela água. A chapa, como pode ser observado na figura 6.5, foi feita com uma pequena abertura no canto inferior para que os dois reservatórios se comunicassem (anterior e posterior), sendo que este não foi eficaz durante a adição de líquido por causa da tensão superficial.

## 7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

A comparação de resultados experimentais com o modelo descrito no capítulo 4 extraído de OHBA *et al.* (1992) revelaram algumas diferenças que podem ser facilmente compreendidas pela forma como o modelo foi gerado. A execução de um experimento simples com espelho é abordada nesse capítulo e os seus resultados são discutidos. Logo após são apresentados os resultados das rotinas experimentais feitas no canal metálico variando frequência e espessura de filme.

A execução das rotinas experimentais mostrou, através de análises preliminares, que algumas mudanças deveriam ser feitas. A primeira observação revelou que uma das fibras ópticas não estava corretamente instalada no canal. Uma fotografia revelada demonstrou que havia uma pequena inclinação na fibra utilizada no canal dois do osciloscópio.

A leitura do canal dois também revelou que esse possuía uma baixa sensibilidade na leitura de intensidade, não respondendo a muito mais que dois níveis de tensão. Dessa forma, essa fibra não estava adequada para a medição de espessura. Embora não fosse adequada para a medição de espessura, seu sinal poderia ser utilizado para correlacionar com o sinal do canal um (fibra um) para obtenção da velocidade de onda. Dessa forma, a fibra um (canal um do osciloscópio) seria utilizada para a medição de espessura, e sua correlação com o canal dois seria empregada para obtenção da velocidade e frequência.

A correlação dos dois sinais também mostrou que eram necessários intervalos de amostragem diferentes para se determinar a frequência da onda e a velocidade.



Para reduzir a incerteza combinada (aumentar a resolução) na determinação da velocidade foi necessário reduzir o intervalo de tempo entre uma amostra e outra. Optou-se por reduzir o intervalo de amostragem em dez vezes. Dessa forma, utilizou-se 0,001 segundos (250/250 ms) de intervalo entre amostras para a leitura de sinais destinados a obtenção de frequência da onda e 0,0001 segundos (25/250 ms) entre amostras para leitura de sinais destinados à obtenção da velocidade da onda.

A fotografias tiradas da lateral do canal, além de revelarem o mau posicionamento da fibra dois, mostraram certas limitações do processo fotográfico de medição de espessura na maioria dos pontos experimentais. Por outro lado, em alguns, apresentou ótimos resultados. Nestes, a espessura foi determinada com baixa incerteza através da visualização do reflexo da fibra na interface. Sabendo a distância entre objeto e imagem, a metade dela será, com boa aproximação, a espessura do filme.

A não existência de sincronismo entre fotografia e leitura do osciloscópio não permitiu uma comparação exata entre as medidas fotográficas e ópticas, apenas aproximada. As fotos, em sua maioria, possuem regiões de incerteza superior quando comparada com a medição laser, ou por estarem fora do campo de foco, ou por outras indefinições, e cobrem uma região pequena do sinal amostrado com o sistema laser. Por outro lado, pode-se verificar a correspondência para fins comparativos. Em algumas, como no caso onde houve reflexo da ponta da fibra na interface, a incerteza foi surpreendentemente pequena, para apenas um ponto da onda, enquanto que o sistema laser mapeia 2500 pontos. Em outras, há uma faixa onde provavelmente situa-se a interface, e que será levada em conta na hora do cálculo da incerteza de cada medida.

Essa faixa de incerteza, ora pode-se apresentar reduzida, ora pode se apresentar

grande, dependendo da definição com que se observa a interface através da foto. Dessa forma, algumas fotos não foram aproveitadas. Por esse motivo é que, quando foram feitos registros fotográficos, foram registradas pelo menos três fotos de cada ponto experimental.

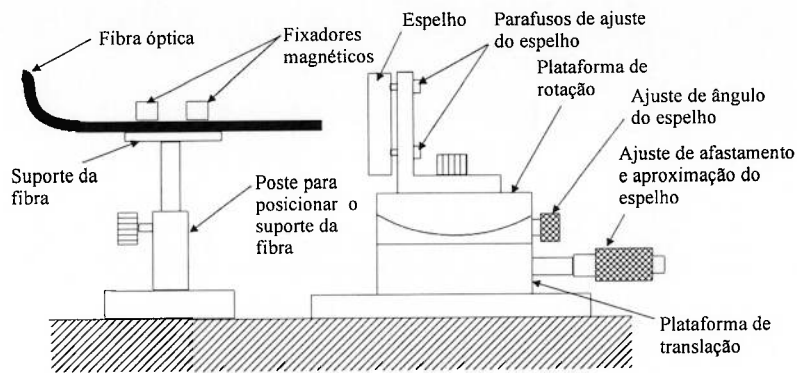
### 7.1 Comparação com o modelo

As curvas obtidas numericamente no capítulo 4 podem ser comprovadas através de um experimento simples com um pequeno espelho.

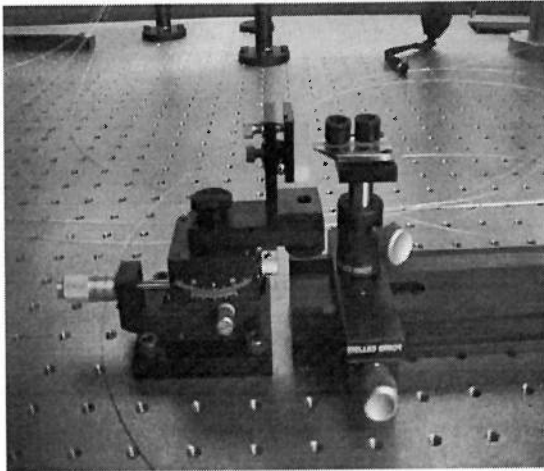
Para obter essas curvas, realizou-se um experimento simples que pode ser visualizado na figura 7.1. A fibra óptica foi apontada para um pequeno espelho posicionado sobre um goniômetro. Este goniômetro permite que a distância do espelho seja controlada com incertezas da ordem de centésimos de milímetro e que o ângulo com a face da ponta da fibra seja posicionado com incerteza inferior a décimos de graus.

O procedimento experimental empregado foi simples. Inicialmente a ponta da fibra foi encostada no espelho e foi medida a intensidade no osciloscópio. Cuidados foram tomados para que a fibra óptica ficasse perfeitamente encostada no espelho e não sofresse nenhum tipo de flexão na ponta que introduzisse outros tipos de incertezas nas leituras.

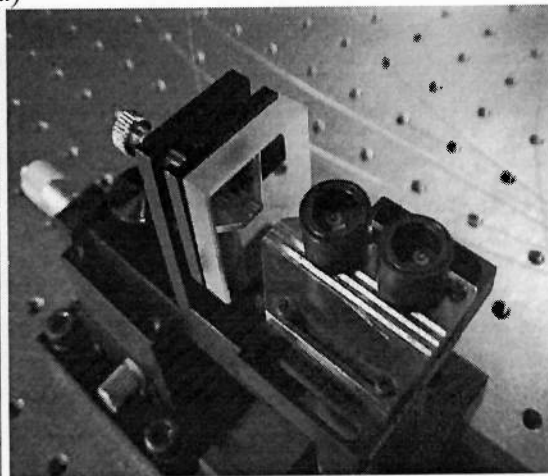
Afastou-se a fibra óptica com a plataforma de translação a uma distância conhecida e foi registrada a nova intensidade. Procedeu-se assim até concluir o levantamento de vários pontos. Em seguida, foi rotacionada a plataforma de um ângulo conhecido, encostou-se a fibra óptica novamente no espelho e levantou-se uma nova curva para aquele ângulo.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7.1 Esquema experimental para levantamento de curvas de intensidade variando o ângulo e a distância do espelho em relação à ponta da fibra óptica conforme esquema (a), fotografia lateral (b) e detalhe da fixação da fibra em frente ao espelho com botões magnéticos (c).

As leituras de intensidade foram feitas no osciloscópio. No entanto, este não forneceu intensidades propriamente ditas, mas leituras de tensão que vêm dos amplificadores conectados aos fotodiodos. Essas leituras de tensão correspondem à intensidade luminosa total detectada pelo fotodiodo e, quanto maior a intensidade, maior a tensão.

O osciloscópio foi ajustado para fornecer a leitura na tela com filtragem por médias de modo a fornecer a média de várias leituras da placa digitalizadora do osciloscópio, com o objetivo de atenuar as flutuações e ruídos elétricos.

Os ruídos elétricos derivam da amplificação de perturbações eletromagnéticas na sala e na rede elétrica que alimenta os equipamentos, interferência no feixe laser pela poeira do ambiente e vibrações na estrutura do prédio. Tais ruídos não podem ser completamente eliminados mas filtrados. Os filtros de médias, que estão entre as várias opções do osciloscópio, suavizam o sinal e facilitam a leitura. Como esses ruídos são de alta frequência, um filtro de médias pode ser empregado para eliminar o ruído.

O resultado desse procedimento foi o levantamento das curvas da figura 7.2:

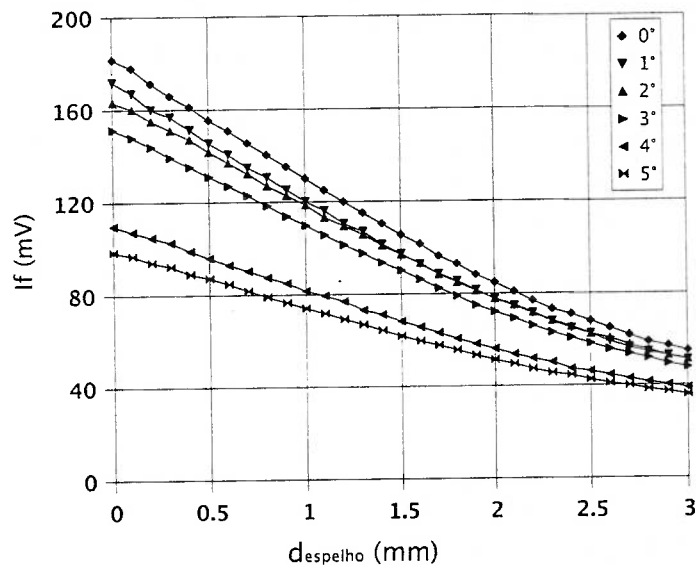


Fig. 7.2 Curvas levantadas utilizando goniômetro para posicionar o espelho.

Após o levantamento de dados, constatou-se que há uma tensão de fundo que deve ser subtraída dos pontos levantados, a fim de anular a intensidade no infinito, ou seja, após a medição a ponta da fibra foi apontada para qualquer direção que

minimize a reflexão e esse sinal foi registrado. Esse sinal residual ocorre devido à reflexões em defeitos internos da fibra, espalhamento nas interfaces, os quais são refletidos pela própria fibra até o fotodiodo, onde é registrado um nível de tensão e a polarização do circuito. A polarização do circuito (bias) cria uma corrente residual no fotodiodo que também contribui nessa tensão de fundo. Essa tensão residual pode ser anulada no parafuso de ajuste do amplificador de corrente.

Após a subtração da intensidade de fundo e a adimensionalização das curvas pela máxima intensidade para cada ângulo, foram obtidas as seguintes curvas, ilustradas na figura 7.3.

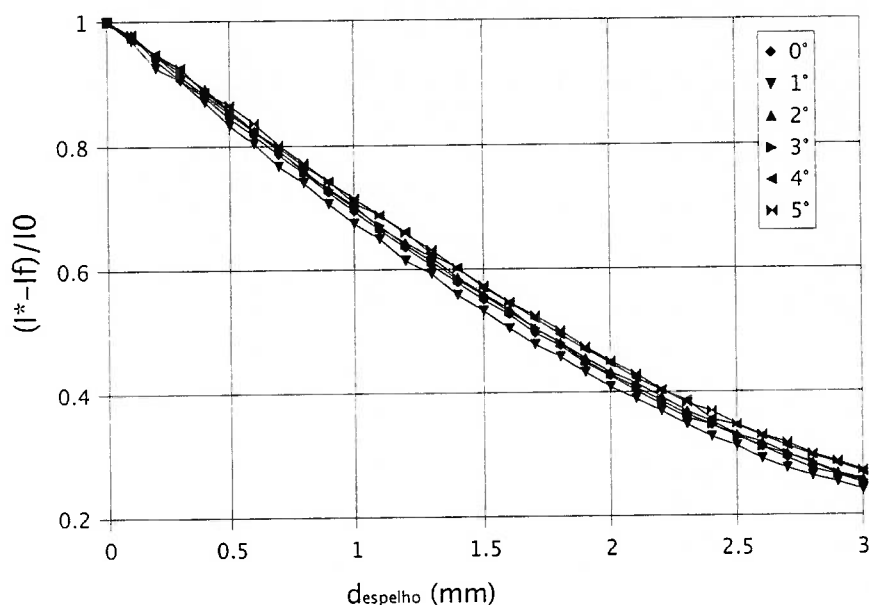


Fig. 7.3 Intensidade subtraída do sinal de fundo e adimensionalizada.

Notam-se discrepâncias com relação às curvas observadas em OHBA *et al.* (1992).

A diferença pode ter origem no tipo de fibra óptica empregada para o levantamento das curvas na figura 7.2. Caso a fibra óptica seja maior, ela terá uma

área de detecção maior para a mesma espessura de filme e conseqüentemente detectará maiores intensidade para cada ponto da curva. O fato do material dessa fibra empregada no estudo ser diferente da fibra utilizada por OHBA *et al.* (1992) também contribui, pois a diferença de materiais da casca e do núcleo alteram a abertura numérica da fibra. No caso específico da fibra em questão, a abertura numérica é bem maior que a utilizada por OHBA *et al.* (1992).

Outro fator que pode influenciar o resultado são as características de atenuação que, para a fibra empregada, são elevadas.

Embora os resultados não sejam idênticos, a figura 7.2 permite apresentar uma característica interessante dessa fibra óptica. Como é possível observar, as primeiras curvas da figura 7.2 ( $0^\circ$  e  $1^\circ$ ) são próximas se comparadas com a incerteza final de medição, revelando que para fibras com grandes aberturas numéricas e feixes laser com grandes ângulos de abertura, podemos considerar a intensidade, para pequenos ângulos de inclinação da superfície, como sendo a espessura.

O estado da superfície da ponta da fibra óptica, bem como a qualidade de fabricação, também são fatores que influenciam a posição dessas curvas, pois fibras com muitas imperfeições internas podem atenuar e espalhar muito o luz em seu interior. Se a ponta da fibra não for polida adequadamente, ou se possuir pequenas inclinações, pode prejudicar a performance de operação do sistema.

Após o levantamento da curva da figura 7.3, levantou-se a curva de distribuição de intensidade do feixe laser emergente da fibra óptica, mostradas na figura 7.4.

Nota-se que a distribuição de intensidade se aproxima de uma gaussiana, mas possui imperfeições.

Outro fato que pode ser constatado, calculando-se a partir das curvas levantadas na figura 7.4, é que diferentemente da fibra óptica empregada em OHBA

*et al.* (1992), que possuía uma abertura de feixe de  $5,28^\circ$ , a fibra de acrílico possui uma abertura de feixe de  $23,16^\circ$  (conforme estimado a partir da figura 7.4). Em outras palavras, não apenas o diâmetro do núcleo da fibra óptica e as características de atenuação são diferentes mas também a abertura do feixe laser e o formato da distribuição de intensidade não correspondem ao experimento descrito em OHBA *et al.* (1992).

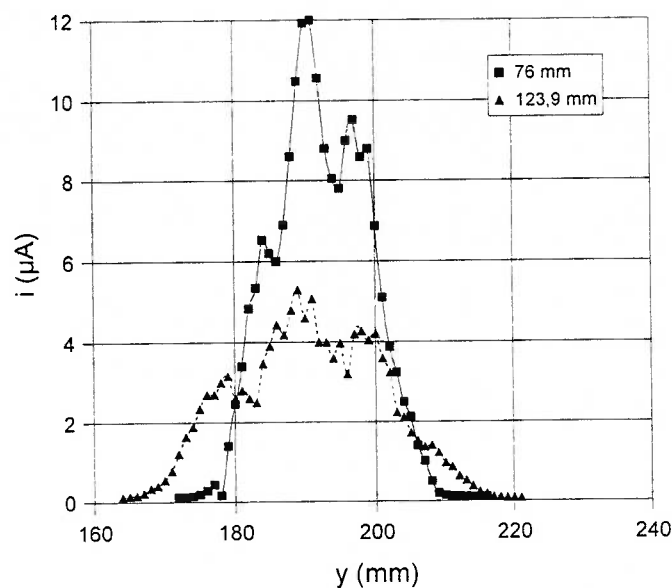


Fig. 7.4 Distribuição de intensidade no feixe emergente da fibra óptica de acrílico. São mostradas duas curvas, a primeira com 76 mm de distanciamento do fotodiodo e a segunda com 123,9 mm.

Considerando-se a abertura de feixe e o diâmetro do núcleo da fibra de acrílico, pode-se simular numericamente o comportamento da mesma para a medição de intensidade, obtendo-se as curvas mostradas na figura 7.5. Observa-se que essas curvas são mais próximas daquelas obtidas na figura 7.3.

A fibra empregada nesses testes é uma fibra de Polimetil-Metaacrilato com índice de refração constante no núcleo de 1,492 e casca de polímero Fluorad com índice de refração de 1,405. O ângulo de aceitação calculado é de aproximadamente

de  $60,27^\circ$  e a abertura numérica é de 0.5.

O diâmetro do núcleo da fibra é de  $500 \mu\text{m}$ , sendo que o diâmetro total com casca é de  $750 \mu\text{m}$ . Como se pode observar na figura 7.3, a fibra óptica se comporta como se possuísse um diâmetro de núcleo muito maior do que realmente possui.

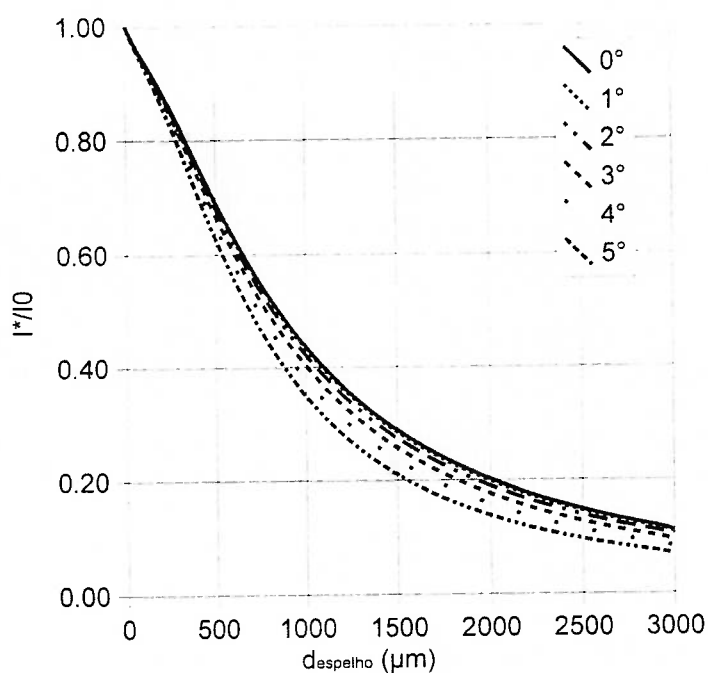


Fig. 7.5 Curvas de intensidade obtidas numericamente para fibra óptica com abertura de feixe de  $23,16^\circ$  e diâmetro de  $500 \mu\text{m}$ .

Uma vantagem da utilização de fibras com diâmetro e abertura numérica grande é a facilidade de acoplamento com elementos ópticos no circuito, pois pode-se cometer erros grandes no lançamento do feixe na fibra, e esta acaba sendo muito tolerante a estes erros.

Esta fibra é própria para emprego em experimentos de laboratório onde é necessária a repetição de experimento substituindo a fibra que é ligada ao circuito óptico. Se tivermos dois pontos de medição e tivermos que medir um, depois o outro, podemos simplesmente tirar uma fibra e por a outra sem a necessidade de fazer um



ajuste demorado, conforme utilizado em PACIFICO (2000).

No caso de se empregar fibras ópticas com aberturas numéricas menores e diâmetros menores, embora as curvas experimentais fiquem mais próximas das teóricas, pode ocorrer a dificuldade em se posicionar o feixe laser na ponta da fibra, bem como lançá-lo na abertura numérica da mesma. As fibras de alta pureza (óxido de silício), em geral, possuem diâmetros menores e características de atenuação baixas.

Como pode ser notado, fibras ópticas de grande diâmetro e grande abertura numérica fornecem a leitura de espessura para pequenos ângulos de inclinação da interface (ângulos inferiores a  $1^\circ$ ). Esse resultado é particularmente bom para a faixa de leitura dessas fibras, uma vez que esse tipo de instrumentação é essencialmente feita para medir picos de intensidade que corresponderiam a superfícies próximas e paralelas à ponta da fibra óptica.

Outro ponto importante é que existem dois fenômenos que contribuem para a existência de uma curva que correlacione a intensidade e a espessura: a atenuação do meio devido à absorção e à atenuação devido à abertura do feixe emergente da fibra óptica.

Dessa forma, a não correspondência entre o que foi medido e o resultado numérico sustenta-se no fato de que os dois efeitos estão ocorrendo simultaneamente e não apenas um como foi considerado no modelo numérico. No caso do ar, a atenuação ocorreria devido à umidade presente e espalhamento, pois o oxigênio e o nitrogênio presentes no ar são apolares e a interação desses gases com o campo eletromagnético pode ser considerada desprezível. As curvas de calibração levantadas na água devem mostrar mais claramente a interação da radiação propagando nesse meio. Essas, uma vez adimensionalizadas, devem mostrar

características de atenuação muito maiores, uma vez que a água é um composto polar e deve interagir muito mais com o campo eletromagnético que o ar que contém quantidade reduzida de água dissolvida.

No caso da água os dois efeitos são muito mais evidentes, tanto da atenuação como da abertura de feixe.

Aparentemente o fenômeno de reflexão interna e atenuação, bem como interações com a casca, podem ser a explicação mais plausível para as diferenças entre resultados de simulação numérica e medição. Não há por que considerar a atenuação do ar superior a esses fatores.

## 7.2 Dados de calibração do sistema

A calibração foi feita por adição de líquido conforme detalhado anteriormente. As pesagens do instrumento de adição de fluido antes e depois forneceram a massa adicionada que seria usada para obter a espessura. Devido ao problema de formação de menisco, que deforma a superfície líquida em contato com as paredes, acionou-se o batedor para que esse propiciasse um ângulo de contato da superfície líquida com a parede o mais próximo possível de  $90^\circ$ .

Para cada nível foi amostrado um sinal após a adição de líquido, aguardando um determinado tempo para que a interface estabilizasse. Congela-se a tela do osciloscópio o transfere-se a informação da memória do osciloscópio para o computador, gravando-se em um arquivo com o nome do ponto de calibração.

Nos pontos iniciais de calibração enquanto o nível ainda não havia subido razoavelmente, o menisco "colou" na ponta da fibra resultando em um sobressalto na curva de intensidade, conforme pode-se observar no gráfico obtido após o processo de calibração (figura 7.6).

Pode-se notar no gráfico da figura 7.6 que a intensidade refletida pela ponta da fibra é muito maior do que com ela imersa na água, pois as condições de acoplamento óptico mudam, uma vez que a água possui um coeficiente de refração diferente do ar (maior), o ângulo de abertura numérica da fibra também sofre alteração.

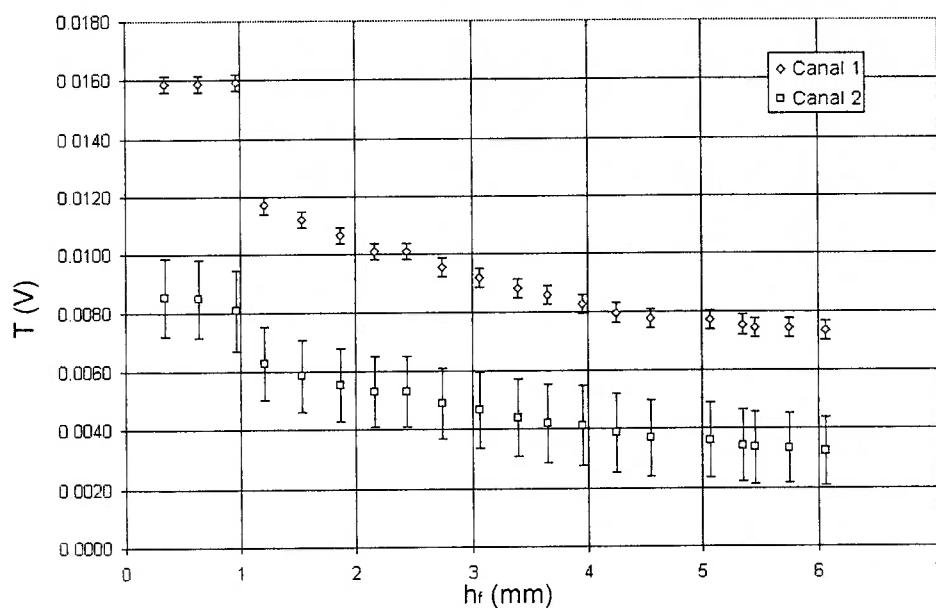


Fig. 7.6 Menisco adere na ponta da fibra óptica ocasionando um degrau no gráfico de calibração.

Outro ponto interessante a ser observado é a espessura na qual o menisco resiste ao descolamento, que conforme observado quase chegou a 1 mm. Uma forma de evitar esse problema seria jogar o líquido diretamente sobre a fibra óptica para que essa perturbação ocasionasse o descolamento.

Como a curva de calibração não segue a lei de Beer-Lambert e não há uma forma algébrica para essa curva. Sendo assim, não é possível iniciar a calibração de um certo nível (acima do nível em que ocorre o menisco) e pressupor que os pontos que estarão até a 1 mm da fibra podem ser perfeitamente extrapolados partindo-se da curva obtida com a calibração.

Retirando-se os pontos referentes ao descolamento do menisco e portanto, considerando apenas os pontos onde a fibra óptica está imersa no líquido, obtém-se a seguinte disposição dos pontos medidos durante a calibração:

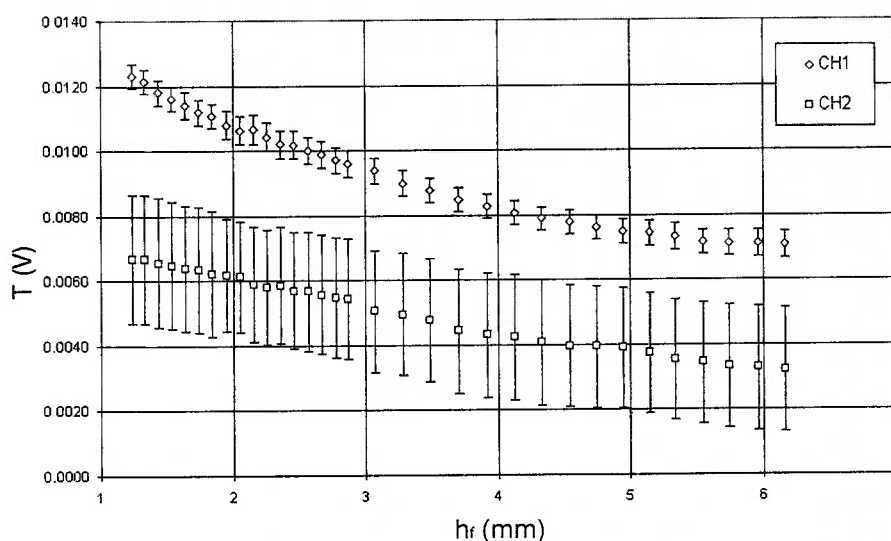


Fig. 7.7 Gráfico mostra os pontos obtidos no processo de levantamento da curva de calibração desconsiderando os pontos fora do líquido durante a fase em que o menisco descola da ponta da fibra.

Como pode-se notar, o canal 2 possui uma incerteza padronizada maior que o canal 1. Isso foi identificado como um problema relacionado ao canal dois do osciloscópio, que apresentou sensibilidade menor comparada com o canal 1. Este fato foi comprovado em experimento com os canais trocados.

Como mencionou-se anteriormente, isso não gera implicações maiores nos resultados, pois o canal 1 foi utilizado para medir a espessura de filme e o canal 2 como sinal para a determinação dos coeficientes de correlação entre as curvas que são utilizadas para a obtenção da velocidade e da frequência de onda gerada pelo batedor.

A curva levantada no canal 1, mostrada na figura anterior, conforme mencionado anteriormente, não segue nem a lei de Beer-Lambert nem o fenômeno geométrico descrito em OHBA *et al.* (1992).

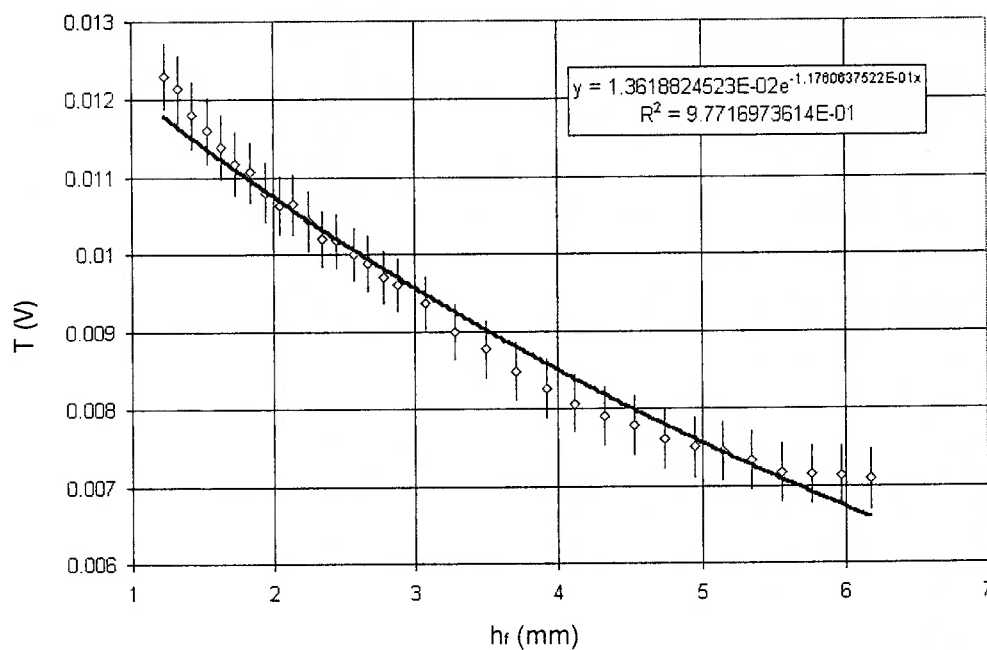


Fig. 7.8 Lei de Beer-Lambert não aproxima a curva obtida no canal 1.

Como o meio em questão é a água a atenuação é relevante. Por outro lado o fenômeno geométrico também é relevante.

Em outras palavras, a curva mostrada pela figura anterior não reflete nem a lei de Beer-Lambert nem as curvas teóricas levantadas anteriormente que levam em

conta apenas aspectos geométricos do feixe gaussiano.

Observa-se que a curva ajustada na figura 7.8 apresenta desvios pequenos no centro do domínio, que estão dentro do intervalo de incerteza dos dados experimentais, e desvios grandes nas extremidades do domínio os quais, nos pontos extremos, fogem do intervalo de incerteza dos dados experimentais.

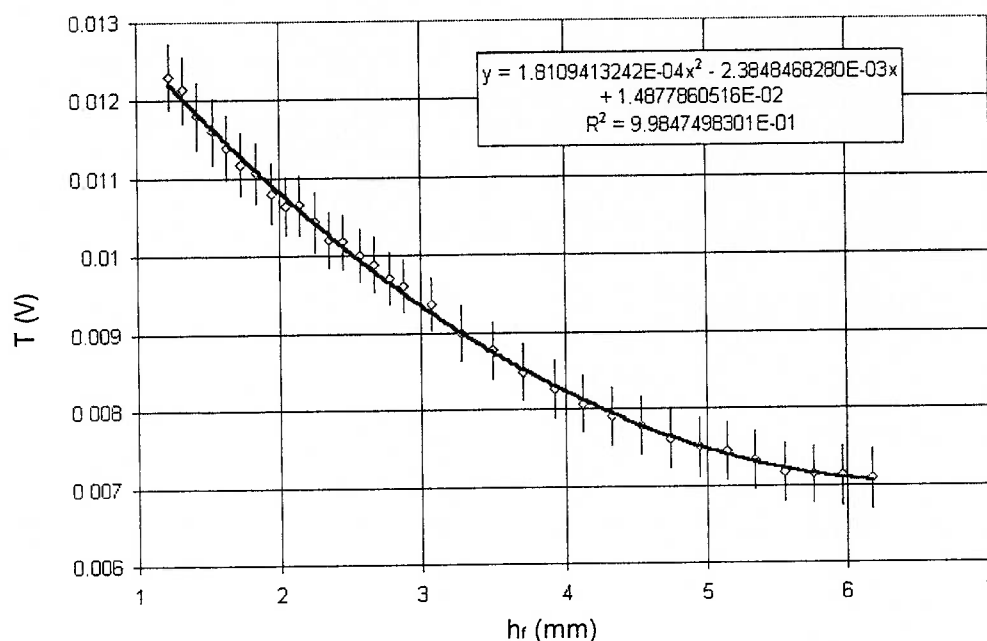


Fig. 7.9 Curva ajustada com polinômio do segundo grau.

Essas diferenças grandes nas extremidades da faixa de calibração demonstram a hipótese anterior de que não é possível usar a Lei de Beer-Lambert, levantando a curva apenas para pontos interiores e extrapolando para pontos próximos à região onde se observou a formação do menisco durante a calibração, pois como a figura acima mostra, estaríamos cometendo erros relativos à escolha do formato algébrico para o ajuste de curva.

Ajustando os pontos experimentais por um polinômio do segundo grau,

observa-se um ajuste de curva melhor que o anteriormente utilizado, conforme se observa na figura 7.9.

A curva apresentada na figura 7.9 possui um ajuste que aproxima todos os pontos de calibração melhor que o feito utilizando a forma matemática da lei de Beer-Lambert e demonstra uma melhor aproximação para o fenômeno estudado.

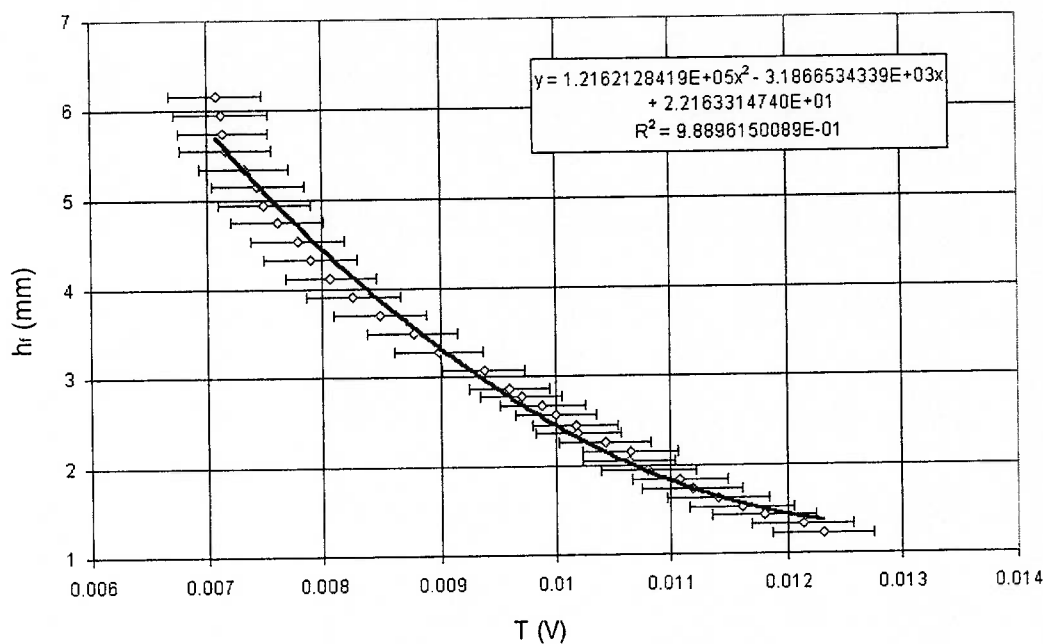


Fig. 7.10 Ajuste com polinômio de segundo grau para determinar a espessura em função do sinal.

Por outro lado a curva da figura 7.9 não é prática, pois o que se deseja saber é a espessura de filme em função do sinal. Dessa forma, invertendo a abcissa e a ordenada, obtém-se o conjunto de pontos que deverão ser ajustados para se utilizar no processamento dos sinais gerados com batedor. O gráfico da figura 7.10 mostra o ajuste feito sobre os dados de calibração utilizando polinômio do segundo grau.

Para o intervalo de calibração, a alteração de eixos parece produzir erros nas extremidades e no centro da curva. No caso das extremidades, a curva deixa de

aproximar alguns pontos. Essa dificuldade de ajustar pontos nas extremidades já era perceptível da figura 7.9. No caso do centro da curva, parte dos pontos se concentram abaixo da curva de um lado e parte se concentra acima do outro lado.

Embora a curva abaixo ajustada esteja dentro da área de incerteza dos pontos experimentais, esta parece não ser a melhor indicada para ajustar os pontos experimentais, sendo necessário utilizar um polinômio de grau maior.

Utilizando polinômio do sexto grau é possível aproximar os pontos experimentais com menor incerteza, como pode ser observado na figura 7.11.

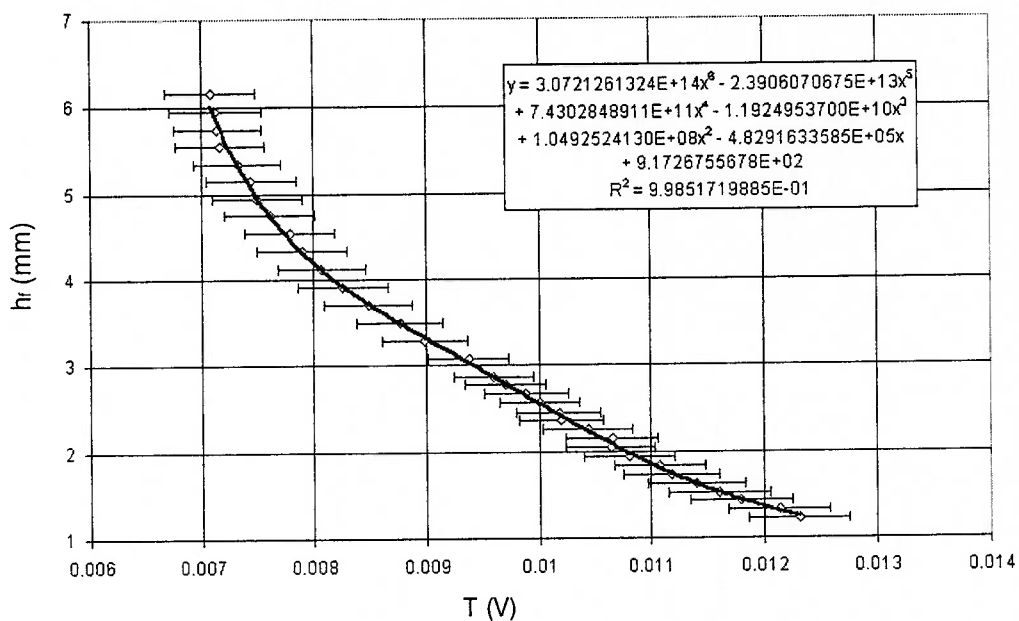


Fig. 7.11 Ajuste com polinômio de sexto grau para determinar a espessura em função do sinal.

A utilização desse grau de polinômio ajusta tanto os pontos internos quanto os pontos de calibração extremos, ficando apenas um ponto não aproximado pela curva. O gráfico da figura 7.11 mostra uma região interna onde o comportamento dos pontos é aproximadamente linear.



Esse ajuste será utilizado na transcrição dos dados obtidos na forma de tensão nos experimentos com batedor. Os dados na forma de tensão são utilizados na equação ajustada no gráfico da figura 7.11 para a obtenção da espessura.

Conforme discutido anteriormente, este é um fenômeno que mistura atenuação com redução de intensidade devido à abertura de feixe gaussiano. Portanto, considera-se que a equação obtida na figura 7.11 é adequada para ser empregada no processamento dos dados experimentais na faixa de 1 mm a 6 mm.

### 7.3 Espessura de filme

O sinal do osciloscópio, obtido em tensão lida dos amplificadores conversores, foi transcrito para espessura de filme líquido utilizando a curva de calibração obtida anteriormente.

O sinal, lido no osciloscópio, não é contínuo conforme foi observado nas leituras. Observa-se a existência de ruído no sinal. A existência desse ruído torna necessária a utilização de filtros para suavizar a forma do sinal. O ruído é uma característica de todo equipamento eletrônico que possui elevada amplificação, sendo que seu tratamento em geral é feito por intermédio de filtros que cortam as altas frequências presentes nestas perturbações que são amplificadas. Estes filtros podem ser implementados utilizando circuitos eletrônicos ou via programação de computador.

No experimento atual inicialmente foi proposto o filtro de médias programado no computador para suavizar o sinal e permitir uma visualização limpa.

A placa do circuito, que amostra os níveis de tensão, trabalha em corte e saturação dentro de cada intervalo de tensão registrada. No canal 2, por exemplo,

devido ao sinal ser extremamente fraco, foi registrado durante todo o experimento apenas dois níveis de tensão. A figura abaixo mostra um sinal típico obtido pelo canal 1 do osciloscópio. Nele pode ser notado que apenas vinte níveis de tensão foram utilizados.

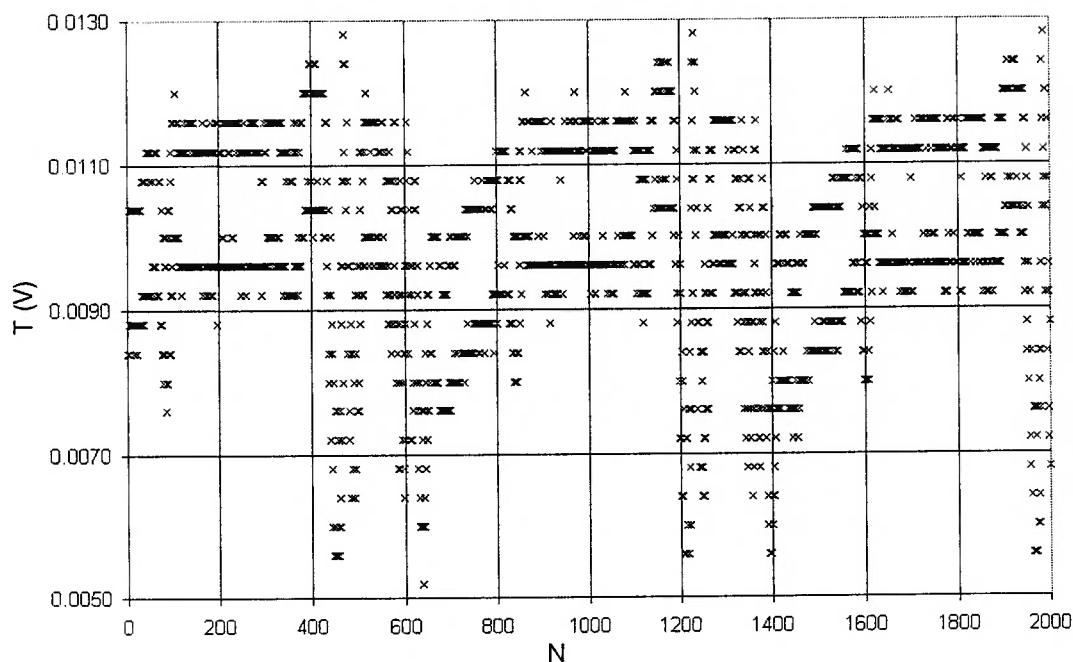


Fig. 7.12 Corte e saturação dos vários níveis de tensão registrados no canal 1 do osciloscópio.

Manipulando-se o osciloscópio pode-se utilizar mais níveis de tensão para amostrar a espessura de filme. Por outro lado, as flutuações do sinal (ruído) aumentam proporcionalmente.

Para suavizar o sinal utilizou-se filtro de médias. Optou-se por aplicar várias vezes o filtro de média de três pontos para não se perder informações contidas no sinal, não alterando o formato do mesmo e não atenuando picos isolados.

Se caso fosse adotado um filtro de muitos pontos, aplicado uma única vez, este atenuaria os picos e vales do sinal. Como a técnica tem como objetivo a procura de

picos de intensidade no sinal que corresponderiam a vales e picos no filme líquido, adotar muitos pontos não faz sentido pois ocorreria perda de informação.

Aplicando um filtro de poucos pontos várias vezes, o ruído de alta frequência é eliminado do sinal, suavizado-o sem alterar o seu formato. Dessa forma, não ocorre perda de informação.

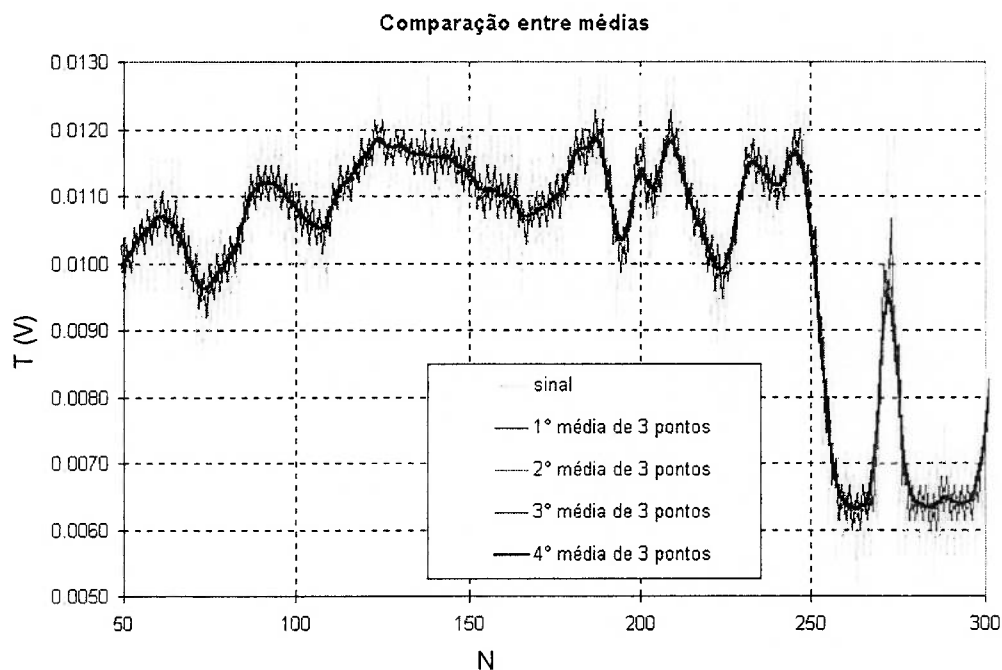


Fig. 7.13 Sinal filtrado com várias médias de três pontos aplicada sobre a conjunto de pontos várias vezes.

É possível notar que o pico mostrado na figura 7.13 (canto direito da onda) não é perdido ao mesmo tempo que o sinal é suavizado sem flutuações residuais se aproximando da realidade física do sinal medido pelo sistema.

Com o sinal filtrado, pode-se obter, através da curva de calibração, as espessuras equivalentes ao sinal. A figura 7.14 mostra um sinal filtrado com média de três pontos aplicada quatro vezes.

Conforme observou-se nas curvas de calibração no ar realizadas com espelho

plano, para a abertura numérica em questão, para inclinações até  $1^\circ$  a incerteza entre espessura e sinal é pequena e está inserida no envelope de incertezas do processo. Sendo assim, nas proximidades das maiores tensões da figura 7.14, estaremos lendo a espessura do filme com uma baixa incerteza em relação à incerteza combinada do processo, considerando as incertezas combinadas de calibração e medição. Esse fato não será utilizado na avaliação dos dados, apenas a informação dos picos de tensão.

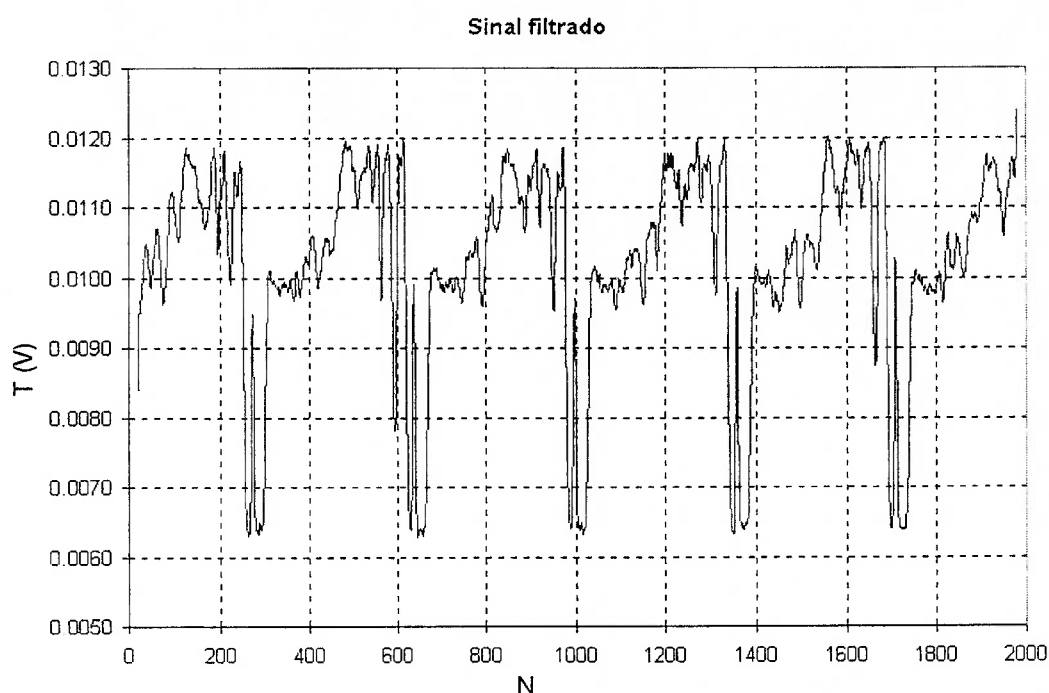


Fig. 7.14 Sinal filtrado com média de três pontos aplicada quatro vezes no sinal amostrado.

Dessa forma, o que deve ser extraído desses gráficos são os maiores registros de tensão, pois estes correspondem a picos e vales da onda lida pelo equipamento, sendo que as menores tensões correspondem a grandes inclinações da interface líquida.

O que será feito será a procura de todos os picos no sinal, pois quando a interface é paralela à ponta da fibra, estamos lendo a espessura. Dessa forma, o

algoritmo de procura deve localizar picos. Uma característica dos picos é ter quedas de sinal dos dois lados, dessa forma, o algoritmo em questão é um algoritmo de procura de máximos locais. Esses máximos procurados e filtrados resultariam em um retrato das máxima e mínima espessuras durante o experimento.

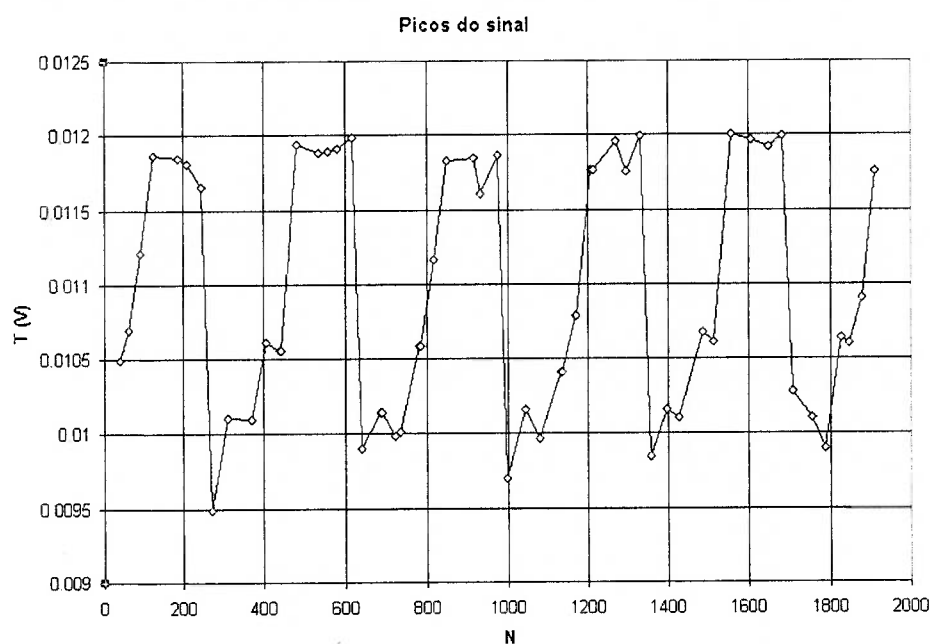


Fig. 7.15 Picos de tensão extraídos do sinal suavizados.

Conforme observado na figura 7.14, existem poucos picos de interesse. Se forem contados os picos na referida figura, serão contabilizados 49 picos nos 2000 pontos amostrados. Posto isso, dividindo-se o número de amostras pelo número de picos, observa-se que a distância média (medida em amostras) entre um pico e outro é de 40 amostras. Nesse caso, o algoritmo de procura proposto para separar os picos do sinal deve localizar, em um intervalo de quarenta pontos, um máximo e guardá-lo. O algoritmo proposto compara o valor desse máximo com o valor do ponto no centro do intervalo de 41 (um ponto a mais para o vigésimo primeiro ponto ser o centro do intervalo) pontos, se eles forem iguais, o ponto e sua localização no sinal são

guardados. Caso não seja o máximo, não é armazenado e a sequência de pontos avança de um ponto e torna a fazer novamente a comparação descrita.

Como os picos de sinal estão espaçados por uma distância média de 40 pontos, escolhendo vinte pontos de cada lado, não corremos o risco de coincidir um pico de interesse com outro e deixar de separar picos importantes para a análise. A figura 7.15 mostra um gráfico de espessuras obtidos após a rotina de procura de picos.

PACIFICO (2000) utilizou apenas o sinal relativo aos picos e vales que constituíam os maiores sinais de tensão detectados. Neste trabalho não foi adotada filtragem de sinal e os picos foram medidos e transcritos em leitura de espessura. Neste caso, o erro cometido pode ser elevado, dado o ruído característico. A melhor forma de tratar o sinal, embora isso não fosse o objeto de estudo em PACIFICO (2000), seria a adoção de um filtro adequado e intervalo de pontos para seleção de picos. Neste caso, o algoritmo proposto aqui poderia ser uma alternativa.

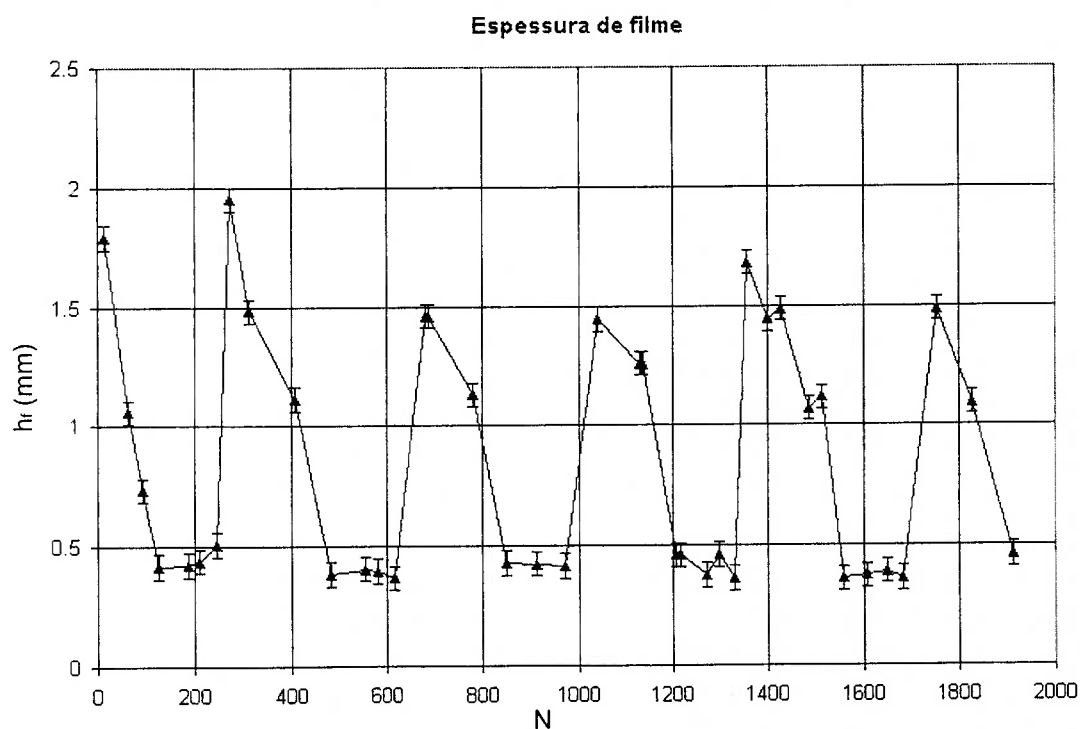


Fig. 7.16 Dados transformados em espessura.

#### 7.4 Dados fotográficos

Para obter a espessura de filme através de fotografia é necessário, após a revelação e codificação da chapa em arquivo de computador, processar a imagem obtida. A figura 7.17 mostra um exemplo de foto tirada do filme líquido no local em que as fibras ópticas estão instaladas. As imagens obtidas devem ser processadas para obter-se a espessura local de filme líquido.

Na figura 7.17, a fibra óptica da esquerda está ligada ao canal 1 do osciloscópio e a fibra da direita está ligada ao canal 2. A onda trafega da esquerda para a direita, no referencial da foto. Como pode ser notado, a fibra óptica da esquerda possui uma pequena inclinação de instalação que contribui na incerteza das medições. Ambas as fibras possuem uma altura de 3,1 mm, dimensão esta que é proveniente do calibre empregado na instalação, cuja incerteza é conhecida. Uma vez fotografadas, codificadas e ampliadas no computador a um tamanho maior do que o mostrado na figura 7.17, pode-se (utilizando a altura da fibra óptica na imagem como referência) calcular a relação entre elemento de imagem (*pixel*) e medida de comprimento.

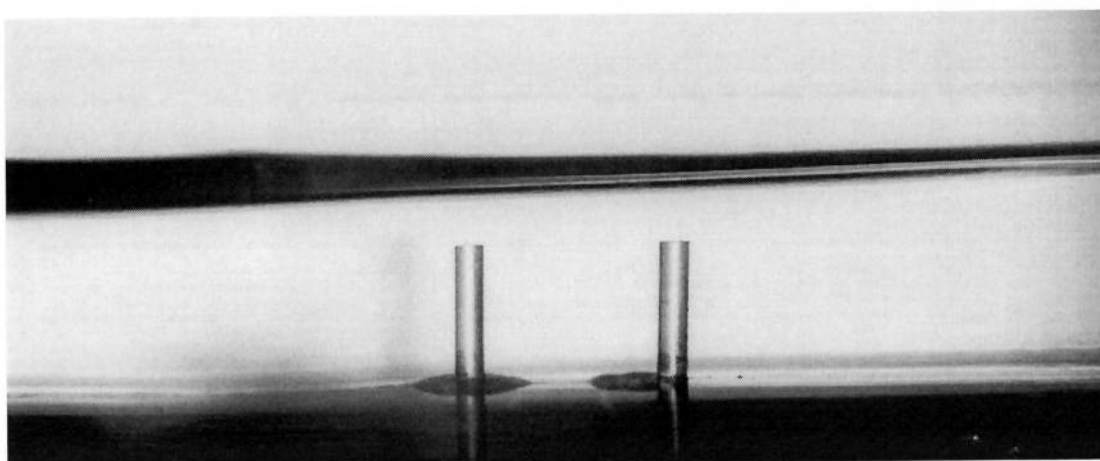


Fig. 7.17 Fotografia da onda na posição onde as fibras ópticas estão instaladas.

A digitalização da imagem é feita através da indicação manual dos pontos da base e da ponta da fibra, sendo que após isso são incluídos os pontos da interface. O programa utilizado detecta o pressionamento do botão esquerdo do apontador digital (*mouse*) e verifica sobre qual ponto da imagem o ponteiro na tela do computador se encontra, guardando as coordenadas  $x$  e  $y$  do ponto em uma arquivo texto para ser posteriormente analisado.

Com os pontos da base e da altura, é possível calcular a relação entre elemento de imagem e comprimento, bem como sua incerteza associada. Com essa relação, é possível calcular a distância vertical de cada ponto da interface com relação à ponta da fibra óptica. Os pontos da base das fibras fornecem uma linha reta que será a linha da base, ou seja, a linha a partir da qual as distâncias perpendiculares de cada um dos pontos selecionados da ponta da fibra e da interface serão calculadas. Essas distâncias perpendiculares da base são subtraídas da distância perpendicular da linha de base à ponta da fibra óptica, para a obtenção da espessura local de filme.

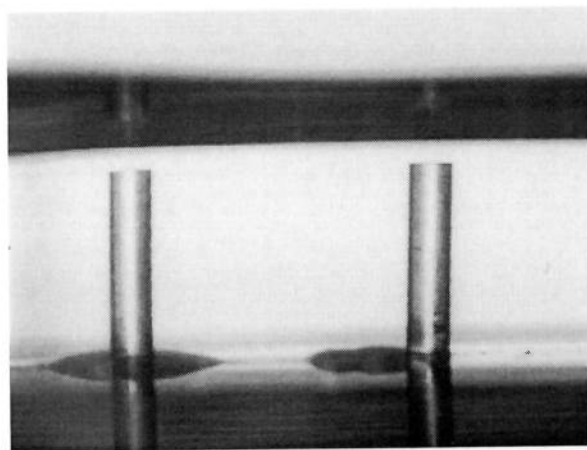


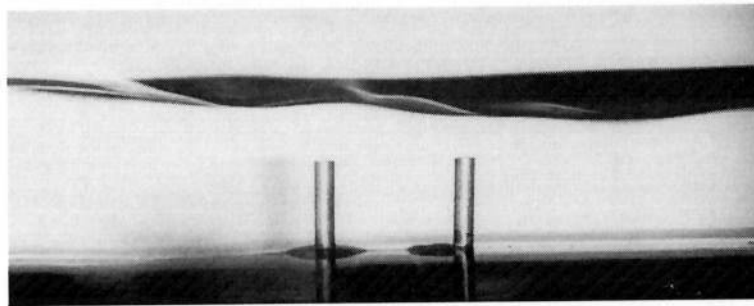
Fig. 7.18 Espessura de filme medida pelo reflexo na interface.

Para o processamento da imagem, foram identificadas três situações distintas para o cálculo da espessura de filme com fotos da interface. Na primeira, observa-se

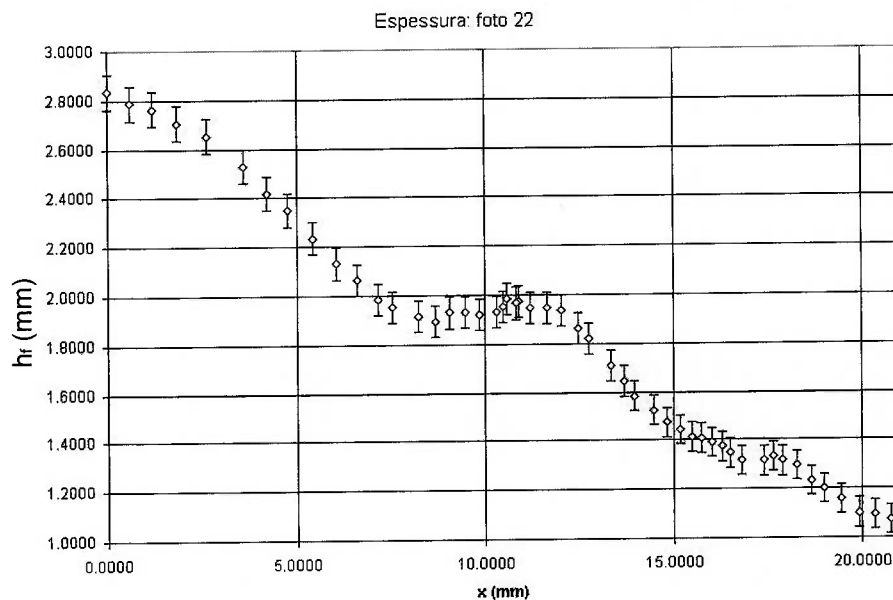


a ponta da fibra refletida na interface. Neste caso, o cálculo da espessura é simples, pois a metade da distância entre imagem e objeto pode ser considerada, com boa aproximação, a espessura. Um inconveniente é que dessa forma obtém-se apenas um ponto, sendo este obtido com uma incerteza bem pequena. A figura 7.18 ilustra essa situação.

No segundo caso, observa-se apenas a sombra da interface, sendo que neste caso, a incerteza associada é grande, da ordem da quantidade de pontos de imagem (*pixels*) que possui a borda da interface.



(a)



(b)

Fig. 7.19 Espessura de filme pela sombra da interface em (a). Gráfico da interface reconhecida pelo programa manual da mesma foto em (b).

Na figura 7.19 é possível observar a borda da interface fazendo sombra do filme. Do lado direito da foto, o vale da onda faz sombra no filme fotográfico e o lado esquerdo mostra uma espessura maior, onde é possível observar vestígios tênues e interferência pelo menisco que reduzem ou aumentam com relação à posição do menisco.

Através da sombra gerada por picos e vales, pode-se identificar a interface com baixa incerteza, porém, no canto esquerdo, não é possível dizer qual a exata posição da interface.

No terceiro caso, observa-se através da foto uma faixa que inclui o menisco. Neste caso, a incerteza é muito grande e a medida se presta apenas como referência, pois não se pode identificar a posição exata da interface, conseqüentemente a incerteza em termos de elementos de imagem (*pixels*) é muito grande.

### 7.5 Frequência da onda

A frequência de onda foi obtida através da correlação entre os dois canais do osciloscópio. A distância entre as pontas das fibras ópticas instaladas no canal foi obtida por meio de fotografia (mesmo tratamento de imagem adotado para processar a interface). A onda passa inicialmente pela fibra óptica 1 e depois pela fibra óptica 2. Sendo assim, os dois sinais amostrados pelas duas fibras ópticas são muito parecidos, diferindo em formato pela dissipação que ocorre enquanto a onda transita da posição onde está instalada a fibra óptica monitorada no canal 1 e a posição onde está instalada a fibra óptica monitorada no canal 2. Embora os sinais sejam parecidos, estão defasados de um determinado tempo, de modo que determinado-se essa defasagem, obtém-se inicialmente a velocidade da onda. O fato é que as ondas

estimuladas são periódicas. Dessa forma, pode-se determinar a defasagem entre uma onda e outra, obtendo-se portanto o período e conseqüentemente, a frequência.

Como ressaltado anteriormente, a taxa de amostragem utilizada para sinais destinados ao cálculo da frequência de onda foi de 0,001s.

A forma empregada para determinar a defasagem entre um sinal amostrado pelo canal 1 e o outro sinal amostrado pelo canal 2 foi a maximização do coeficiente de correlação. Calculando-se o coeficiente de correlação para diferentes defasagens é possível identificar a defasagem que maximiza esse coeficiente. Adotando-se a defasagem em valores de intervalo de amostragem, uma vez que esse é um tempo conhecido e que pode ser determinado através da escala de tempo escolhida no osciloscópio, pode-se calcular o tempo de defasagem. Conhecendo-se a distância entre as pontas das fibras ópticas, é possível calcular a velocidade da onda.

O coeficiente de correlação foi levantado para valores crescentes de defasagem entre os sinais, sendo que o valor de número de intervalos de amostragem que produz o primeiro máximo desse coeficiente é aquele onde ocorre a máxima coincidência entre o formato dos sinais amostrados. Esse valor multiplicado pelo intervalo de amostragem seria o “tempo de transito” da onda de uma fibra óptica até a outra. Observou-se que o gráfico do valor de correlação não atingiu valores superiores a 0,95. Quando os sinais não apresentam nenhuma semelhança um com o outro, o coeficiente flutua próximo de 0,5. A fórmula do coeficiente de correlação é mostrada abaixo.

$$\rho_{S_1, S_2} = \frac{\frac{1}{N-m} \cdot \sum_{n=1}^{N-m} X_1(n) \cdot X_2(n+m)}{\left(\frac{1}{N-m} \cdot \sum_{n=1}^{N-m} X_1(n)^2\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{N-m} \cdot \sum_{n=m}^N X_2(n)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (7.1)$$

A defasagem entre sinais é manipulada em  $m$ .  $X_1(n)$  e  $X_2(n)$  que são os vetores que contém os valores das flutuações de tensão dos sinais amostrados, sendo que  $n$  varia de 1 a 2000 para a determinação da frequência e de 1 a 2500 para determinação da velocidade. Antes de usar os sinais para o cálculo da velocidade aplicou-se o filtro de média de três pontos quatro vezes para suavizar o sinal.

As componentes das flutuações do sinal são calculadas da seguinte forma:

$$X_1(n) = |S_1(n) - \mu_{S_1}| \quad (7.2)$$

$$X_2(n) = |S_2(n) - \mu_{S_2}| \quad (7.3)$$

O cálculo do fator de correlação com o sinal sem ser suavizado pelo filtro de médias gerou flutuações no valor da correlação, sendo que o gráfico resultante do fator de correlação pela defasagem ficava ilegível. Essas flutuações foram eliminadas com a aplicação do filtro de médias no sinal amostrado.

Para o cálculo da frequência é necessário obter o período entre uma onda e outra. Uma vez que as ondas são semelhantes e se repetem periodicamente, o coeficiente de correlação quando calculado para uma defasagem igual ao período da onda deverá apresentar um segundo máximo. Portanto, quando esse segundo máximo for observado, a respectiva defasagem entre os máximos corresponderá ao período da onda.

A frequência da onda pode ser determinada a partir dos sinais amostrados de duas formas distintas. A primeira seria através da correlação entre os dois sinais amostrados das duas fibras ópticas e a segunda através da correlação do sinal com ele mesmo.

As diferenças entre essas duas formas não são significativas, apenas pelo o fato de que correlacionam um sinal com ele mesmo, faz com que o fator de correlação

atinja valores maiores do que correlacionar um sinal com outro obtido em outra posição do escoamento e com uma sensibilidade menor que o primeiro sinal, pois o canal 2 apresentava baixa sensibilidade, conforme mencionado anteriormente.

A correlação entre os dois sinais fornece duas informações. O primeira informação seria o primeiro pico que mostra o atraso entre uma onda e outra, ou seja, um intervalo de tempo que a onda demora para percorrer entre a ponta de uma fibra até a outra. O segundo pico seria a segunda vez em que o formato de onda coincide, ou seja, este intervalo de tempo informaria o período da oscilação.

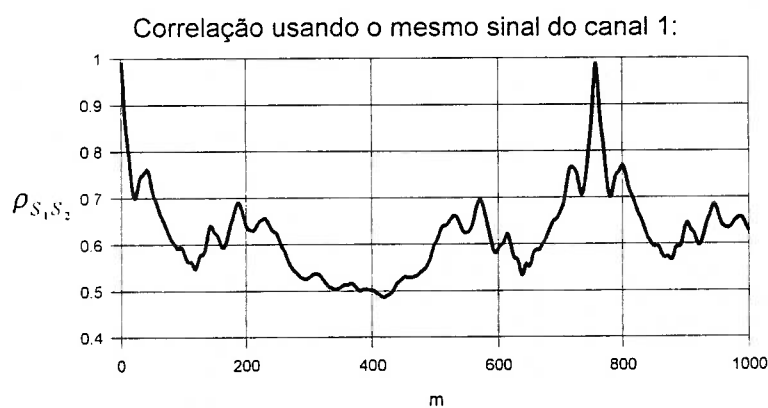
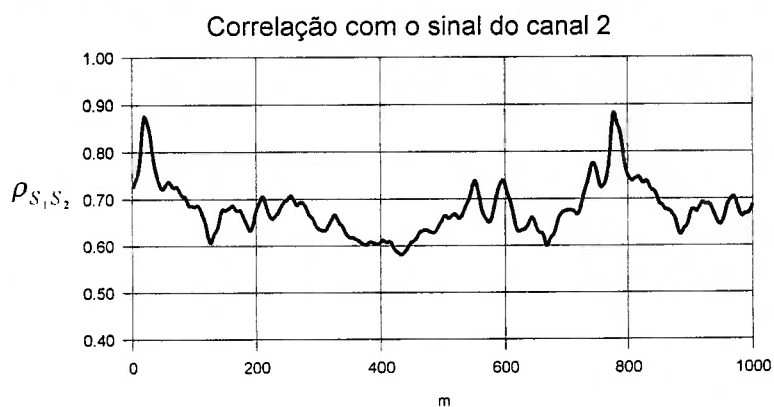


Fig. 7.20 Coeficiente de correlação obtido da correlação do canal 1 com o canal 2 em (a) e obtido da correlação do canal 1 com ele mesmo em (b).

Os gráficos da figura 7.20 mostram as curvas do fator de correlação calculadas

das duas formas discutidas. No primeiro gráfico, a correlação cruzada entre o canal 1 e 2 mostra os dois picos no fator de correlação. O segundo gráfico mostra dois picos, mas o primeiro pico ocorre na origem (mesma fibra).

O cálculo da frequência foi feito utilizando os sinais medidos com a taxa de amostragem de 0,001 s. O fator de correlação é calculado através da equação 7.1 variando  $n$  de 1 a 1000. O primeiro pico do fator de correlação calculado dessa forma poderia ser utilizado para estimar a velocidade, conforme mencionado, mas para obtenção desta optou-se por levantar o sinal com um intervalo de tempo entre amostras 10 vezes menor para reduzir a incerteza da velocidade.

O gráfico abaixo demonstra os vários picos formados para as três frequências de batedor diferentes.

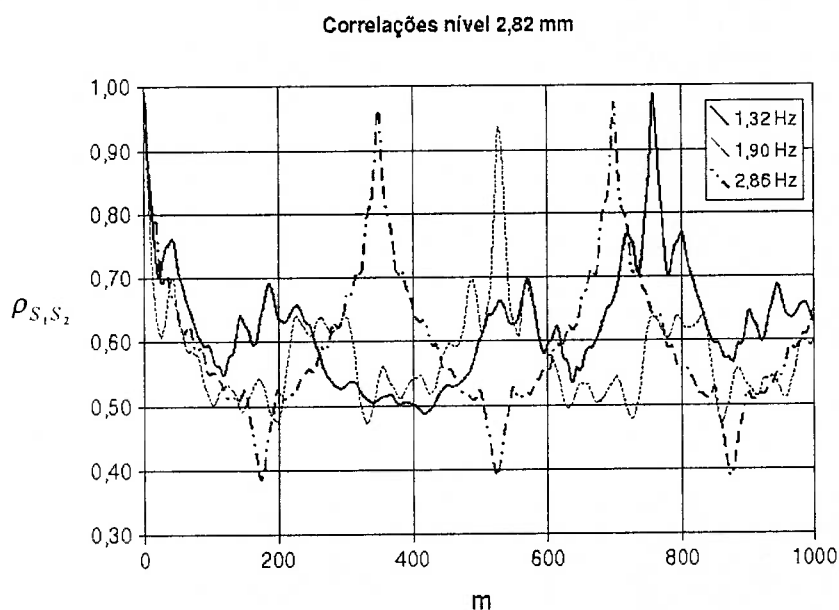


Fig. 7.21 Coeficiente de correlação obtido para determinação da frequência.

Como pode ser observado no gráfico da figura 7.21, a medida que a frequência aumenta, os picos ficam mais próximos um dos outros para o mesmo par de sinais,

amostrados ou não na mesma fibra óptica. Os resultados do cálculo de frequência são mostrados na tabela 7.1. Conforme mencionado, o primeiro pico do gráfico do coeficiente de correlação entre sinais mostra a primeira semelhança entre os sinais de um canal e de outro, e cuja abscissa, multiplicada pelo intervalo de amostragem, corresponde ao tempo necessário para o cálculo da velocidade.

### 7.6 Velocidade de onda

O gráfico da figura 7.22, colocado a seguir, mostra a variação dos coeficientes de correlação para três sinais com frequências de oscilação diferentes do batedor, tomados com intervalo entre amostra de 0,0001 s. Observa-se que as velocidades são aproximadamente as mesmas.

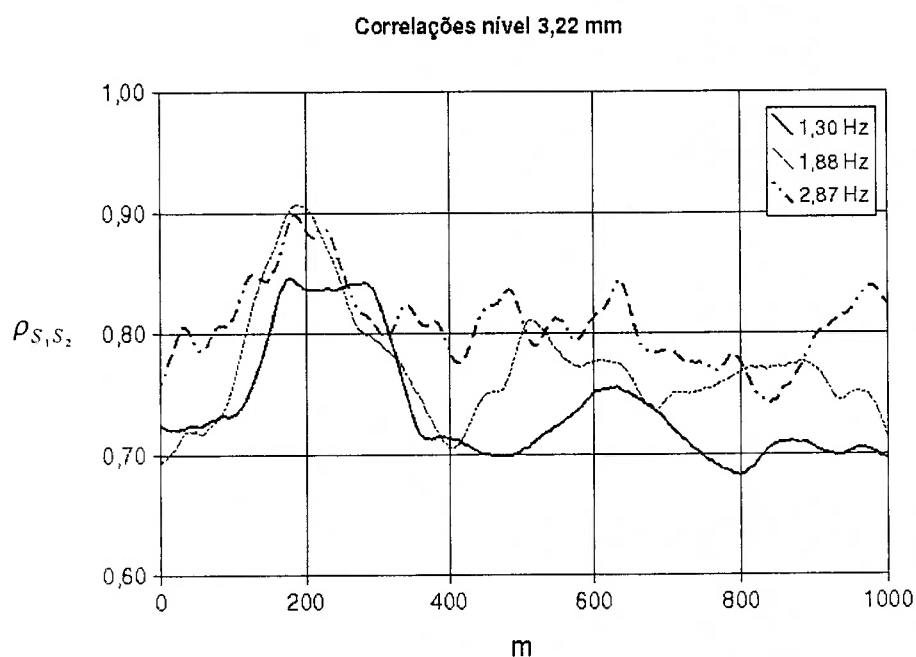


Fig. 7.22 Coeficiente de correlação para três sinais amostrados de ondas, cujo batedor foi acionado em diferentes frequências.

A análise de incerteza do cálculo de velocidade é mostrada em anexo. O que pode ser notado é que a incerteza é reduzida uma vez que se adote intervalos de

amostragem menores, como foi o caso. Os sinais destinados ao cálculo da velocidade foram tomados com intervalo de amostra de 0,0001 s, para reduzir a incerteza na obtenção da velocidade.

Como o cálculo baseia-se na correlação entre sinais tomados em fibra diferentes, observa-se que o coeficiente de correlação não atinge os mesmos níveis registrados na obtenção da frequência de onda.

### 7.7 Comparação da velocidade de onda com dados teóricos

De acordo com MOODY (1990), a velocidade de propagação de uma perturbação em uma lâmina de água de espessura  $H$  é dada por:

$$v_p = \sqrt{H \cdot g} \quad (7.4)$$

A tabela 7.1 colocada a seguir, mostra os dados conforme eles foram levantados no ensaio, sendo comparados com os dados teóricos obtidos a partir da equação 7.4. Conforme mencionado, para cada nível foram ajustadas três frequências no potenciômetro do batedor. As frequências ajustadas nesse potenciômetro puderam ser selecionadas apenas por marcas na carcaça do referido equipamento, sendo que o valor real pôde ser determinado apenas após a análise dos dados experimentais.

Nível	Espessura (mm)	Frequência calculada (Hz)	Velocidade calculada (m/s)	Velocidade teórica (m/s)
1	1,5835	1,3966	0,3816	0,2143
	1,5835	1,9685	0,1900	0,2143
	1,5835	2,9070	0,2158	0,2143
2	1,9945	1,3158	0,2327	0,2236
	1,9945	1,8519	0,2198	0,2236
	1,9945	2,8249	0,2065	0,2236
3	2,4009	1,3369	0,2472	0,2323
	2,4009	1,8797	0,2327	0,2323
	2,4009	2,8090	0,2282	0,2323



Nível	Espessura (mm)	Frequência calculada (Hz)	Velocidade calculada (m/s)	Velocidade teórica (m/s)
4	2,8213	1,3193	0,2497	0,2410
	2,8213	1,8939	0,2397	0,2410
	2,8213	2,8571	0,2373	0,2410
5	3,2210	1,3055	0,1735	0,2490
	3,2210	1,8868	0,2524	0,2490
	3,2210	2,8571	0,2635	0,2490

Tab. 7.1 Comparação entre velocidades (medida e teórica). As frequências obtidas também são mostradas.

Nota-se diferenças entre os valores teóricos calculados e medidos, além da tendência de elevação conforme a espessura média é elevada. As diferenças podem ser explicadas pelas simplificações utilizadas na formulação proposta por MOODY (1990) na obtenção da equação 7.4.

Outro fator para explicar a diferença entre resultado teórico e experimental é a quantidade de fluido dentro do canal utilizada ser limitada, contrariando a hipótese do modelo que supõe um canal infinito cujo volume não muda. A movimentação do batedor leva o nível no interior do canal variar dos dois lados do batedor. Embora, houvesse comunicação entre os dois reservatórios separados pelo batedor através de uma passagem sobre o paramento, o fluxo através desta passagem não era suficientemente rápido para igualar o nível dos dois lados.

Observou-se qualitativamente que as tensões superficiais atuam no sentido de absorver a energia da onda, uma vez que estas praticamente não eram refletidas no fim do canal. A reflexão ocorria, mas por inspeção visual não era possível, durante o experimento, notar as ondas refletidas.

Com o batedor desligado e causando um único pulso era possível notar a onda

caminhando de um lado para outro. Porém, após a quarta reflexão, a amplitude se tornava desprezível ao olho humano. Esta onda foi observada utilizando reflexo de luz na interface, uma vez que a água é transparente e não foi possível notar pequenas variações da inclinação na interface. Quando se observa uma luz sendo refletida pela interface, a mudança da inclinação da superfície causa um deslocamento da imagem refletida, tornando a mudança de inclinação perceptível.

A forma com que a interface é perturbada também contribui para não garantir nenhuma similaridade, pois como pode ser notado na figura 5.10 trata-se de um trem de ondas.

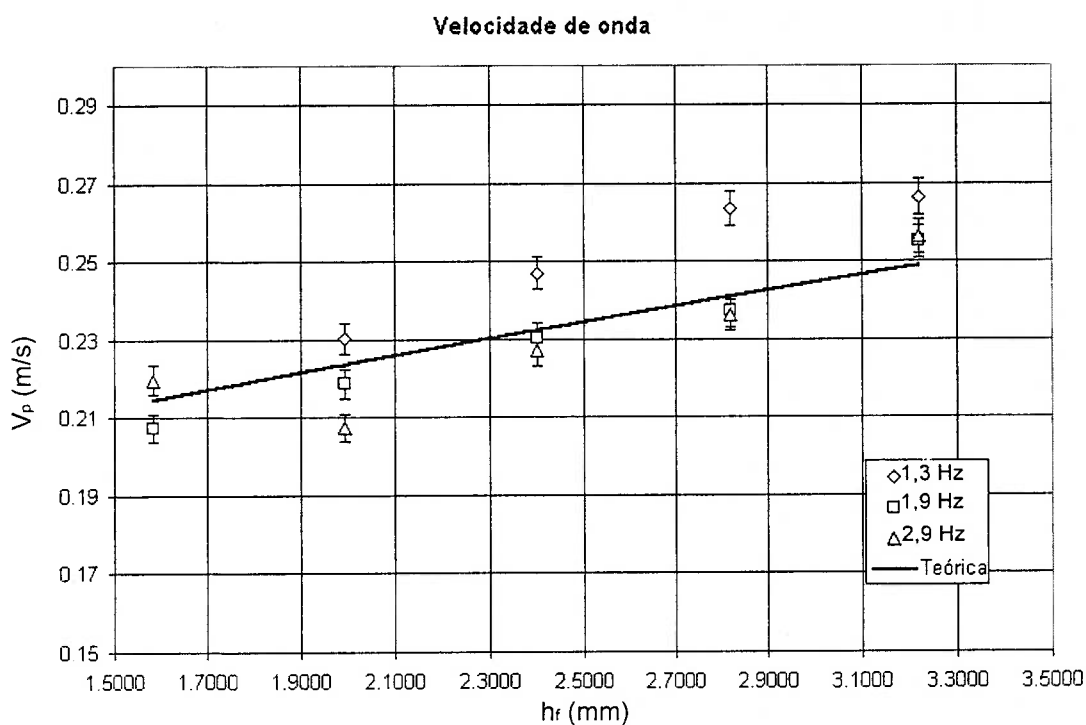


Fig. 7.23 Velocidades medidas e calculadas de acordo com MOODY (1990).

Quando uma onda passa, ela eleva o nível a montante, ocasionado velocidades maiores nas ondas subsequentes, conforme descrito por PRANDTL (1949). O trem de ondas terá a tendência de se tornar um único pulso a medida que se propaga.

O gráfico da figura 7.23 mostra as velocidades medidas comparadas com as velocidades calculadas pela equação 7.4.

Como pode ser observado, os dados experimentais seguem a mesma tendência da curva teórica. Os pontos foram separados por frequência, e conforme se observa, estes não sugerem nenhuma relação da velocidade com a frequência do batedor, o que está de acordo com a teoria.

Entretanto, a velocidade medida se comporta conforme a descrição teórica. As diferenças podem ser explicadas pela escala em que se fez o experimento e pelas simplificações e exclusões de termos adotadas na obtenção da relação teórica.

## 8 CONCLUSÃO

O objetivos deste trabalho foram atingidos e as conclusões obtidas estão relacionadas abaixo.

A medição de espessura e velocidade de filme em escoamento bifásico, utilizando medição de intensidade refletida de laser pela interface, é uma técnica pontual não invasiva que limita-se a medição de picos e vales de onda. Comparada com outras técnicas pontuais como as de condutância, muito empregadas, é independente da variação da condutividade do meio, mas possui as mesmas limitações de detecção no tocante à ondas que quebram. Pode ser utilizada em qualquer sessão (com paredes retas ou curvas) de tubulação com alterações desprezíveis das características geométricas das mesmas. Entretanto, ela depende das características ópticas do fluido de ensaio.

As simulações feitas utilizando-se o computador, mostram que no emprego de fibras de grande diâmetro de núcleo, para pequenas inclinações da interface (inclinações inferiores a  $1^\circ$ ), pode-se associar a leitura à intensidade, dentro da faixa de incerteza experimental. A comparação deste resultado com os obtidos experimentalmente mostrou boa concordância.

Dessa forma, observa-se portanto que as fibras ópticas de grande diâmetro de núcleo quando empregadas nesta técnica possuem grande tolerância a erros de instalação. O mesmo não pode ser afirmado para fibras ópticas de pequeno diâmetro de núcleo (inferiores a  $50 \mu\text{m}$ ).

Outro dado importante, observado durante os experimentos utilizando espelho

para a comparação entre resultado experimental e numérico, é que as fibras ópticas empregadas se comportam como se tivessem um diâmetro de núcleo maior do que realmente possuem. Explicar por que isso acontece pode ser objeto de estudos futuros.

A alteração brusca do sinal detectado pelo sistema de amostragem, quando a fibra deixa de ficar sobre o filme líquido, leva a concluir que esta técnica pode apenas ser utilizada em escoamentos que sempre apresentam filme de líquido, como o escoamento anular.

Outro fato importante observado na calibração da fibra óptica é que a curva de calibração obtida não possui uma forma matemática específica, pois dois efeitos se sobrepõem: a redução de intensidade devido à abertura do feixe e a atenuação de intensidade devido ao meio. Sendo assim, observa-se que a forma matemática mais adequada para ajustar os dados é o emprego de polinomiais para aproximar todos os pontos dentro do intervalo de calibração.

Os resultados do experimento com o canal, simulando ondas unidimensionais, mostraram a necessidade da utilização de filtros matemáticos para suavizar o sinal amostrado referente à leitura de espessura de filme. O filtro de médias de poucos pontos aplicado várias vezes sobre o sinal mostrou ser o mais adequado.

A medição da espessura de filme de líquido foi realizada com sucesso e mostrou resultados coerentes, considerando-se a espessura média de filme presente no recipiente. Quanto a espessura de filme com a presença de ondas, não foi possível realizar uma verificação detalhada por causa da escassez de resultados fotográficos. Entretanto, a comparação com os poucos dados fotográficos disponíveis indicam que os resultados obtidos com essa técnica são adequados.

A observação dos resultados experimentais de velocidade e frequência

confirmou que a velocidade de onda no canal possui apenas relação com a espessura de filme, conforme a relação obtida da literatura sobre o assunto. A velocidade medida pela correlação de sinais mostrou concordância com os valores previstos pela teoria, para o intervalo de espessura estudado.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREUSSI, P.; DONFRANCESCO, A. Di MESSIA. An Impedance Method for the Measurement of Liquid Hold-up in Two-Phase Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 14, 6, 777-785, 1988.
- COLLIER, John G.; THOME, John R.. *Convective Boiling and Condensation*, Oxford Science Publications, 1996, 3<sup>o</sup> ed..
- DRISCOLL, D. I.; SCHMITT, R. L.; STEVENSON, W. H.. Thin Flowing Liquid Film Thickness Measurement by Laser Induced Fluorescence. *Journal of Fluids Engineering*, 114 107-112, 1992.
- FUKANO, T.. Measurement of time varying thickness of liquid film flowing with high speed gas flow by a constant electric current method (CECM). *Nuclear Engineering and Design*, 184, 363-377, 1998.
- GERAETS, J. J. M.; BORST, J. C.. A Capacitance Sensor For Two-Phase Void Fraction Measurement and Flow Pattern Identification. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 14, 3, 305-320, 1988.
- HEWITT, G. F.. *Measurement of Two Phase Flow Parameters*, Academic Press, London, 1978.
- HULBURT, E. T.; NEWEL, T. A.. Optical measurement of liquid thickness and wave velocity in liquid film flows. *Experiments in Fluids*, Vol. 21, 357-362, 1996.
- JENKINS, F. A.; WHITE, H. E.. *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, 1981. 4<sup>o</sup> ed..
- KAMEI, T.; SERIZAWA, A.. Measurement of 2-dimensional local instantaneous liquid film thickness around simulated nuclear fuel rod by ultrasonic transmission technique. *Nuclear Engineering and Design*, 184, 349-362, 1998.
- KANG, H. C.; KIM, M. H.. The Development of a Flush-Wire Probe and Calibration Method for Measuring Liquid Film Thickness. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 18, 3, 423-437, 1992.
- KAWAJI, M.; ANODA, Y.; NAKAMURA, H.; TASAKA, T.. Phase and Velocity Distributions and Holdup in High-Pressure Steam/Water Stratified Flow in a Large Diameter Horizontal Pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol 13, No. 2, 145-159, 1987.

- KOSKIE, J. E.; MUDAWAR, I.; TIEDERMAN, W. G.. Parallel-Wire Probes For Measurement of Thick Liquid Films. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 15, 4, 521-530, 1989.
- LEE, Y. J.; KIM, J. H.; A Review of Holography Applications in Multiphase Flow Visualization Study. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 108, 279-288, 1986.
- MOODY, Frederick J.. *Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics*, John Wiley & Sons, San Jose, 1990.
- OHBA, K.; NAGAE, K.. Characteristics and behavior of the interfacial wave on the liquid film in a vertically upward air-water two-phase annular flow. *Nuclear Engineering and Design*, 141, 17-25, 1993.
- OHBA, K.; TANAKA, H.; KAWAKAMI, N.; NAGAE, K.. Twin-fiber optic liquid film sensor for simultaneous measurement of local film thickness and velocity in two-phase annular flow. *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Symp. Appl. Of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 1992, pp. 39.1.1-39.1.6.
- PACIFICO, A. L.. *Análise Teórico-Experimental do Escoamento em Bocais Nebulizadores do Tipo Y-Jet*. 2000. 216. Tese - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- PARAS, S. V.; KARABELAS, A. J.. Measurements of local velocities inside thin liquid films in horizontal two-phase flow. *Experiments in Fluids*, 13, 190-198, 1992.
- PRANDTL, L.. *Essentials of Fluid Dynamics: With Applications to Hydraulics, Aeronautics, Meteorology and other Subjects*. Blackie & Son Limited, London, 1949, 3<sup>o</sup> ed..
- SAMENFINK, W., ELSÄBER, A., WITTING, S., DULLENKOPF, K., Internal Transport Mechanisms of Shear-Driven Liquid Films. *Proceedings of the Eight International Symposium on Applications of Laser Technics to Fluid Mechanics*, July 8<sup>th</sup> to 11<sup>th</sup> 1996, Lisbon, Portugal, Vol. II, 25.3.
- WITTING, S.; ELSÄBER, A.; SAMENFINK, W.; EBNER, J.; DULLENKOPF, K.. Velocity Profile in Shear-Driven Liquid Films: LDV-Measurements. *Proceedings of the Eight International Symposium on Applications of Laser Technics to Fluid Mechanics*, July 8<sup>th</sup> to 11<sup>th</sup> 1996, Lisbon, Portugal, Vol. II, 25.2.
- YOUNG, M.. *Óptica e Lasers: fibras e guias de onda ópticas*, São Paulo : Editora da Universidade de São Paulo, 1998.
- YU, S. C. M.; TSO, C. P.; LIEW, R.. Analysis of thin film thickness determination in two-phase flow using a multifiber optical sensor. *Appl. Math. Modelling*, Vol. 20, 1996.



YU, S. C. M.; TSO, C. P.. Simulation of fiber optic sensors in determination of thin liquid film thicknesses. *Advances in Engineering Software*, 22, 55-62, 1995.

## ANEXO A: CÁLCULO DE INCERTEZAS

O resultado de uma medição somente é uma aproximação ou estimativa do valor que deve ser acompanhado pela declaração de sua incerteza.

A palavra incerteza padronizada significa *dúvida acerca da validade do resultado de uma medição*. A incerteza corresponde a um desvio padrão da distribuição de resultados de várias medições de uma grandeza. Em outras palavras, incerteza padronizada refere-se ao intervalo estatístico do desvio padrão da média da dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurado.

Neste trabalho, sempre que se falar "incerteza", subentende-se incerteza padronizada.

As incertezas experimentais neste trabalho são apresentadas conforme a norma ISO atualmente aceita. As incertezas experimentais são todas avaliadas como incertezas Tipo B, ou seja, são avaliadas por outros meios que não pela análise estatística de uma série de observações. As incertezas que assim são avaliadas são chamadas *incertezas padronizadas combinadas* porque são obtidas por intermédio de outras incertezas já conhecidas.

A incerteza padronizada combinada de um resultado de medição, quando este valor é obtido por meio dos valores de varias outras grandezas, é igual à raiz da somatória do quadrado de todas as incertezas padronizadas individuais multiplicado pelas respectivas sensibilidades ao resultado.

Dessa forma, a incerteza padronizada combinada de uma variável  $y$  é dada por uma função qualquer  $f$ , tal que:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) \quad (\text{A.1})$$

É dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (\text{A.2})$$

A incerteza expandida é tomada com um fator de abrangência  $k$  que corresponda a um intervalo de confiança adequado, ou seja, um intervalo de um número inteiro de desvios padrões em torno da dispersão de valores resultantes, no caso de avaliação Tipo A. Como a avaliação neste trabalho é toda feita por Tipo B, o fator de abrangência deve ser aplicado à incerteza padronizada combinada obtida. Normalmente, a adoção de fator de abrangência igual a 2 (95% de confiança) é aceita sem maiores considerações.

Sendo assim, a incerteza expandida é obtida a partir da multiplicação da incerteza padronizada combinada pelo fator de abrangência:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (\text{A.3})$$

O resultado final com a apresentação da incerteza expandida deve ser feito no seguinte formato:

$$y = Y \pm U \quad (\text{A.4})$$

### A.1 Incerteza na calibração por adição de líquido

Para avaliar a incerteza associada à calibração, deve-se considerar as etapas do processo. Inicialmente é medida a densidade do fluido (água) que será utilizado.

Com uma balança de cinco casas decimais (incerteza de 0,00005g), é medido 100 ml de água, colocada em um tubo de ensaio com capacidade para 100 ml (incerteza de 0,5)ml.

A incerteza combinada da densidade pode ser obtida pela equação abaixo:

$$\delta \rho = \sqrt{\left(\frac{1}{V_{100ml}}\right)^2 \cdot \delta m_{líquido}^2 + \left(\frac{m_{líquido}}{V_{100ml}^2}\right)^2 \cdot \delta V_{100ml}^2} \quad (\text{A.5})$$

Com a densidade e sua respectiva incerteza calculadas pode-se agora adicionar líquido utilizando a medição de massa para determinar o volume e a espessura com as respectivas incertezas. A incerteza das várias adições de líquido pode ser calculada pela equação abaixo:

$$\delta m_{líquido}^2 = \delta m_1^2 + \delta m_2^2 + \delta m_3^2 + \delta m_4^2 + \delta m_5^2 + \dots + \delta m_n^2 \quad (\text{A.6})$$

Considerando-se  $n$  adições de massa no canal, a incerteza da massa de líquido adicionado pode ser calculada pela equação acima.

A incerteza do volume de água adicionado no canal é obtida pela equação abaixo:

$$\delta V_{líquido} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 \cdot \delta m_{líquido}^2 + \left(\frac{m_{líquido}}{\rho^2}\right)^2 \cdot \delta \rho^2} \quad (\text{A.7})$$

Considerando-se que a incerteza final do volume total de líquido colocado no canal seja  $\delta h_{líquido}$  e, sabendo-se que a máxima espessura de filme calibrada é dada por:

$$h_{filme} = h_{líquido} - h_{cálitre} \quad (\text{A.8})$$

A incerteza da espessura máxima do filme líquido pode ser obtida pela equação:

$$\delta h_{filme}^2 = \delta h_{liquido}^2 + \delta h_{cálbre}^2 \quad (A.9)$$

Sendo que, a altura do líquido é dada por:

$$h_{liquido} = \frac{V_{liquido}}{A_{canal}} \quad (A.10)$$

A incerteza da altura do líquido pode ser calculada pela seguinte equação abaixo:

$$\delta h_{liquido} = \sqrt{\left(\frac{1}{A_{canal}}\right)^2 \cdot \delta V_{liquido}^2 + \left(\frac{V_{liquido}}{A_{canal}^2}\right)^2 \cdot \delta A_{canal}^2} \quad (A.11)$$

A área do canal é:

$$A_{canal} = L_{comprimento} \cdot L_{largura} \quad (A.12)$$

Sendo que a incerteza associada ao cálculo da área é dada por:

$$\delta A_{canal} = L_{comprimento}^2 \cdot \delta L_{largura}^2 + L_{largura}^2 \cdot \delta L_{comprimento}^2 \quad (A.13)$$

Substituindo a equação A.11 na equação A.9, conforme visto anteriormente, obtém-se:

$$\delta h_{filme} = \sqrt{\left(\frac{1}{A_{canal}}\right)^2 \cdot \delta V_{liquido}^2 + \left(\frac{V_{liquido}}{A_{canal}^2}\right)^2 \cdot \delta A_{canal}^2 + \delta h_{cálbre}^2} \quad (A.14)$$

A incerteza acima corresponde à incerteza de posicionamento da fibra. Após levantada a curva de calibração da fibra óptica, sabe-se que ela é expressa pela equação descrita abaixo:

$$S = f_1(h_{filme}) = a_1 \cdot h_{filme}^n + a_2 \cdot h_{filme}^{n-1} + \dots + a_n \cdot h_{filme} + a_{n+1} \quad (A.15)$$

Onde  $a_n$  são constantes obtidas a partir da curva de calibração ajustada à equação A.15 pelo método dos mínimos quadrados. Observa-se nessa equação que

$h_{filme}$  possui sua incerteza associada e, portanto,  $S$  também possuirá. Dessa forma,

a incerteza associada ao sinal lido, referente à incerteza na espessura de filme, é dada por:

$$\delta S = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial h_{\text{filme}}}\right)^2 \cdot \delta h_{\text{filme}}^2} \quad (\text{A.16})$$

A incerteza calculada acima não corresponde à incerteza de leitura do equipamento, mas à incerteza que a leitura contém, devido ao processo de calibração, ou seja, essa leitura incluirá incertezas ligadas ao processo de calibração descrito. Entretanto, o equipamento empregado na leitura desse sinal também possui sua incerteza de leitura. Sendo assim, as duas fontes de incerteza devem ser combinadas.

A incerteza resultante é dada por:

$$\delta S_{\text{calibração}} = \sqrt{\delta S^2 + \delta S_{\text{osciloscópio}}^2} \quad (\text{A.17})$$

A incerteza assim obtida engloba a incerteza referente às variáveis dimensionais no processo de calibração e à própria incerteza de leitura do osciloscópio.

Quando o ensaio é feito, a leitura do osciloscópio é feita com a incerteza obtida no processo de calibração. Este sinal de osciloscópio relaciona-se com a espessura de filme através da curva de calibração, dada pela equação A.15. A leitura da espessura deve ser feita através de uma função do tipo descrita abaixo:

$$h_{\text{filme}} = f_2(S_{\text{osciloscópio}}) = a_1 \cdot S_{\text{osciloscópio}}^n + a_2 \cdot S_{\text{osciloscópio}}^{n-1} + \dots \\ \dots + a_n \cdot S_{\text{osciloscópio}} + a_{n+1} \quad (\text{A.18})$$

Sabe-se que a incerteza associada à  $S_{\text{osciloscópio}}$  é  $\delta S_{\text{calibração}}$ . Sendo assim, a incerteza da espessura de filme, calculada pela equação A.18, é dada por:

$$\delta h_{\text{filme}} = \sqrt{\left(\frac{\partial h_{\text{filme}}}{\partial S_{\text{osciloscópio}}}\right)^2 \cdot \delta S_{\text{calibração}}^2} \quad (\text{A.19})$$

## A.2 Incerteza da medição de velocidade da onda na interface

A medição de velocidade na interface gás líquido no escoamento anular, estudada neste trabalho, foi feita utilizando-se o cálculo do fator de correlação entre dois sinais tomados em pontos distantes do escoamento, conforme discutido.

O fator de correlação para dois sinais tomados no sistema, com um dado intervalo de defasagem, dado em  $m$  intervalos de aquisição é dado por:

$$\rho_{S_1, S_2} = \frac{\frac{1}{N-m} \cdot \sum_{n=1}^{N-m} X_1(n) \cdot X_2(n+m)}{\left( \frac{1}{N-m} \cdot \sum_{n=1}^{N-m} X_1(n)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{1}{N-m} \cdot \sum_{n=m}^N X_2(n)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{A.20})$$

Conhecido esse tempo de  $m$  intervalos de amostragem e a distância entre as fibras ópticas, pode-se agora calcular a velocidade da onda na interface. A velocidade da interface é dada, portanto, por:

$$V = \frac{\Delta s}{m \cdot \Delta t} \quad (\text{A.21})$$

As incertezas associadas ao cálculo da velocidade são as referentes ao intervalo de tempo e ao espaçamento entre as fibras.

O espaçamento entre as fibras possui uma incerteza de fabricação dada pela escala do instrumento de furação, pela tolerância de cilíndricidade entre o diâmetro externo e interno do tubo capilar empregado para fixação da fibra óptica no canal e das incertezas de fabricação dimensional da fibra óptica. A incerteza associada ao intervalo de tempo de amostragem é a metade desse intervalo. Como o fator de correlação é calculado discretamente, comete-se um erro de meio intervalo de amostragem quando se calcula o fator de correlação.

A incerteza associada ao cálculo da velocidade é dada por:

$$\delta V = \sqrt{\left(\frac{1}{m \cdot \Delta t}\right)^2 \cdot \delta \Delta s^2 + \left(\frac{\Delta s}{m \cdot \Delta t^2}\right)^2 \cdot \delta \Delta t^2 + \left(\frac{\Delta s}{m^2 \cdot \Delta t}\right)^2 \cdot \delta m^2} \quad (\text{A.22})$$

### A.3 Análise de incerteza da frequência

O período da onda é calculado, conforme descrito anteriormente, utilizando o fator de correlação calculado para o mesmo sinal. Com o número de intervalos de amostragem que compõem o período, pode-se calcular a frequência:

$$f = \frac{1}{n \cdot \Delta t} \quad (\text{A.23})$$

A incerteza da frequência pode ser obtida utilizando-se a equação abaixo:

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{1}{n \cdot \Delta t}\right)^2 \cdot \delta \Delta t^2 + \left(\frac{1}{n^2 \cdot \Delta t}\right)^2 \cdot \delta n^2} \quad (\text{A.24})$$

### A.4 Análise de incerteza da espessura fotografada

A incerteza da espessura, medida a partir de processamento de imagem, considera a forma em que é feito o processamento da imagem para obter a espessura. Inicialmente é determinada a posição da ponta da fibra através de vários pressionamentos do apontador digital nessa região. A média da coordenada vertical da ponta será a posição vertical e o desvio padrão a incerteza. O mesmo é feito para se determinar a coordenada da base da fibra. Dessa forma, a altura em elementos de imagem é dada por:

$$h_{\text{pixel}} = P_{\text{ponta}} - P_{\text{base}} \quad (\text{A.25})$$

A incerteza foi calculada através da equação abaixo:

$$\delta h_{\text{pixel}} = \sqrt{\delta P_{\text{ponta}}^2 + \delta P_{\text{base}}^2} \quad (\text{A.26})$$



A relação entre comprimento e elementos de imagem foi obtida pela divisão da altura da fibra óptica pela quantidade de elementos de imagem, determinada pelo processamento da foto. A relação foi determinada por:

$$R = \frac{h_{cálibre}}{h_{pixel}} \quad (A.27)$$

A incerteza dessa relação foi obtida pela equação abaixo:

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{1}{h_{pixel}}\right)^2 \cdot \delta h_{cálibre}^2 + \left(\frac{h_{cálibre}}{h_{pixel}^2}\right)^2 \cdot \delta h_{pixel}^2} \quad (A.28)$$

O valor de cada coordenada é subtraído do valor da coordenada da ponta de fibra óptica, obtendo-se a altura em elementos de imagem da espessura de filme, conforme a equação A.25. A incerteza é calculada segundo a equação A.26.

$$h_{filme} [pixel] = P_{ponto} - P_{ponta} \quad (A.29)$$

A incerteza associada à essa espessura é dada por:

$$\delta h_{filme} [pixel] = \delta P_{ponto}^2 + \delta P_{ponta}^2 \quad (A.30)$$

A espessura de filme pode então ser obtida através da relação entre o comprimento e o elemento de imagem, dada pela equação A.27, através da equação abaixo:

$$h_{filme} = R \cdot h_{filme} [pixel] \quad (A.31)$$

A incerteza da espessura de filme será dada por:

$$\delta h_{filme} = \sqrt{R^2 \cdot \delta h_{filme} [pixel]^2 + h_{filme} [pixel]^2 \cdot \delta R^2} \quad (A.32)$$