

OK

CONSULTA
FD-3389
Ed.rev.

São Paulo
2003

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

MEDICÃO DE ESPESURA E VELOCIDADE DE ONDA EM FILMES LÍQUIDOS UTILIZANDO LASER

FÁBIO STABILE DE OLIVEIRA

FÁBIO STABILE DE OLIVEIRA

**MEDICÃO 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 Ilizo
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 Antônio Luiz Pacifico 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 Matos 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 Embrar - 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

1	INTRODUÇÃO	1
5	2 OBJETIVOS	5
6	3 REVISÃO DA LITERATURA	6
6	3.1 Estudo do escoamento bifásico	6
7	3.2 Caracterização do Escoamento	7
10	3.3 Técnicas Experimentais em Escoamento Bifásico	10
11	3.4 Conceituação da Medição de Velocidade e Espessura de Filme	11
12	3.4.1 Técnicas baseadas em medição de condutância	12
17	3.4.2 Técnica de contato de agulha	17
19	3.4.3 Técnica de fluorescência	19
23	3.4.4 Técnicas baseadas em medição de radiação	23
25	3.4.5 Técnicas de condutância entre arames	25
29	3.4.6 Técnicas baseadas em medição de capacitância	29
31	3.4.7 Técnica de eco ultra-sônico	31
33	3.5 Medição de espessura de filme utilizando técnica laser	33
48	3.6 Conclusão	48
50	4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	50
50	4.1 Luz laser	50
51	4.2 Fibras ópticas e guias de onda	51
56	4.3 Absorção, dispersão e reflexão	56
60	4.4 Modelamento da técnica de medição de espessura de filme	60

5 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	67
5.1 Equipamento óptico.....	67
5.2 Equipamento Mecânico.....	78
5.2.1 Canal metálico.....	79
5.2.2 Calibração do equipamento.....	86
5.2.3 Geração de ondas na interface.....	86
5.3 Equipamento Fotográfico.....	90
5.4 Instrumentos de medição.....	94
5.4.1 Medição do volume através da massa.....	95
5.5 Programas utilizados.....	96
6 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	97
6.1 Ajuste do canal.....	99
6.2 Calibração do sistema.....	101
6.3 Descrição da rotina de ensaio.....	102
6.4 Observações preliminares.....	104
7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES.....	106
7.1 Comparação com o modelo.....	108
7.2 Dados de calibração do sistema.....	117
7.3 Espessura de filme.....	124
7.4 Dados fotográficos.....	130
7.5 Frequência da onda.....	134
7.6 Velocidade de onda.....	139
7.7 Comparação da velocidade de onda com dados teóricos.....	140

8 CONCLUSÃO.....	144
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147
ANEXO A: CÁLCULO DE INCERTEZAS.....	150
A.1 Incerteza na calibração por adição de líquido.....	151
A.2 Incerteza da medição de velocidade da onda na interface.....	155
A.3 Análise de incerteza da frequência.....	156
A.4 Análise de incerteza da espessura fotografada.....	156

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.....16
- 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 Seção 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).....22

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).....23

Fig. 3.11 Detectores de radiação X para a determinação de tração de vazio em uma corda do diâmetro em HEWITT (1978).....24

Fig. 3.12 λ -densidômetro de três feixes mostrado em HEWITT (1978).....25

Fig. 3.13 (a) Eletrodos montados rentes à parede, (b) medidor de dois arames paralelos e (c) eletrodo rente à parede com arame.....26

Fig. 3.14 Medidor de capacitância proposto em GERAEITS; BORST (1988). A configuração helicoidal proposta é a melhor para esse tipo de medidor.....30

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 ultrasom. Quarto pico corresponde à interface entre fluido e gás.....32

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.....35

Fig. 3.17 Efeito do emprego de um obturador em WITTING *et al.* (1996).....38

Fig. 3.18 Esquema do equipamento empregado para medição de velocidade utilizando Velocímetro a Laser de efeito Doppler (VLD) WITTING *et al.* (1996).....38

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.....39

Fig. 3.20 Esquema experimental empregado por HULBURT; NEWELL (1996). O raio do círculo escuro formado determina a espessura de filme.....42

Fig. 3.21 Equipamento empregado para medição com apenas uma fibra. Nota-se a montagem da fibra na parede do escoamento, não interferindo neste.....48

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.....53

Fig. 4.2 Formulação de primeira lei para o volume de controle sujeito a radiação monocromática.....57

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.....61

Fig. 4.4 Esquema geométrico mostrando a origem do feixe no interior da fibra.....62

Fig. 4.5 Resultados de simulação para fibras ópticas com diâmetro do núcleo de 50 μm (a) e 80 μm (b) 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).....65

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.....68

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.....72

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.....	74
Fig. 5.4 Disposição dos amplificadores ao lado do osciloscópio, (a) amplificadores (b) osciloscópio.....	77
Fig. 5.5 Canal metálico em duas vistas. Os apoios são ajustáveis.....	80
Fig. 5.6 Esquema de posicionamento da fibra óptica no fundo do canal.....	81
Fig. 5.7 Determinação da incerteza angular baseada no erro de medição desejado para o sistema.....	83
Fig. 5.8 Dispositivo para geração de ondas unidimensionais na interface do filme líquido.....	87
Fig. 5.9 Dispositivo para geração de ondas unidimensionais na interface do filme líquido.....	88
Fig. 5.10 Ondas geradas no canal.....	88
Fig. 5.11 Dispositivo para destruição de ondas.....	90
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.....	92
Fig. 5.13 Iluminação permitiu a utilização de filme de baixa sensibilidade, proporcionando alta resolução e baixo tempo de exposição.....	93
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).....	94

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.....98

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.....99

Fig. 6.3 Corte longitudinal: esquema de nivelamento do canal utilizando duas fibras.....100

Fig. 6.4 Instrumento de adição de líquido sendo pesado cheio, (a) vista superior da balança e (b) vista do prato da balança.....101

Fig. 6.5 Levantar a haste para preencher o compartimento atrás da chapa.105

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)..109

Fig. 7.2 Curvas levantadas utilizando gonímetro para posicionar o espelho.110

Fig. 7.3 Intensidade subtraída do sinal de fundo e adimensionalizada.....111

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.....113

Fig. 7.5 Curvas de intensidade obtidas numericamente para fibra óptica com abertura de feixe de 23,16° e diâmetro de 500 µm.....115

Fig. 7.6 Pontos de calibração obtidos.....118

Fig. 7.7 Pontos de calibração usados.....119

Fig. 7.8 Curva de calibração ajustada usando função exponencial.....	120
Fig. 7.9 Curva de calibração ajustada com polinômio de segundo grau.....	121
Fig. 7.10 Ajuste com polinômio de segundo grau para determinar a espessura em função do sinal.....	122
Fig. 7.11 Ajuste com polinômio de sexto grau para determinar a espessura em função do sinal.....	123
Fig. 7.12 Corte e saturação dos vários níveis de tensão registrados no canal 1 do osciloscópio.....	125
Fig. 7.13 Gráfico do sinal filtrado com várias médias de três pontos aplicada sobre a conjunto de pontos várias vezes.....	126
Fig. 7.14 Gráfico do sinal filtrado com média de três pontos aplicada quatro vezes no sinal amostrado.....	127
Fig. 7.15 Gráfico mostrando os picos de tensão extraídos do sinal suavizados.....	128
Fig. 7.16 Gráfico da espessura de filme.....	130
Fig. 7.17 Fotografia da onda na posição onde as fibras ópticas estão instaladas.....	131
Fig. 7.18 Fibras ópticas instaladas no canal. Reflexo na parte de baixo da interface possibilita medição.....	132
Fig. 7.19 Foto do filme pela lateral (a). Gráfico da interface reconhecida (b).....	133
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).....	137

Fig. 7.21 Gráfico do coeficiente de correlação obtido para determinação da frequência.....138

Fig. 7.22 Gráfico do coeficiente de correlação em função da defasagem.....139

Fig. 7.23 Gráfico de comparação entre velocidades.....142

LISTA DE TABELAS

Tab. 6.1 Pontos levantados durante as rotinas experimentais.....	104
Tab. 7.1 Comparação entre velocidades (medida e teórica). As frequências obtidas também são mostradas.....	141

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

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

Eficiência da fluorescência	E
Distância focal [mm]	f
Função multivariável	$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)$
Função que fornece o nível de tensão em função da espessura de filme [V]	$f^1(h_{filme})$
Função que fornece a espessura de filme em função da leitura do osciloscópio [m]	$f^2(S_{osciloscópio})$
Aceleração da gravidade [m/s ²]	g
Conductibilidade da secção dividida pela conductibilidade da secção cheia	G^e
Espessura do filme líquido sobre a fibra 1 [m]	h_1'
Espessura do filme líquido sobre a fibra 2 [m]	h_2'
Altura do degrau usinado no calibre [m]	$h_{calibre}$
Espessura de filme da ponta da fibra óptica à interface líquida [m]	h_f
Espessura do filme medido com câmara [m]	$h_{filme (cámara)}$
Espessura local de um ponto sobre a interface líquida dado em elementos de imagem	$h_{filme} [pixel]$
Espessura do filme líquido resultante de medição [m]	h_{filme}
Altura total da lâmina de líquido contida no canal (do fundo do canal até a interface líquida) [m]	$h_{líquido}$
Altura da fibra óptica medida em elementos de imagem	h_{pixel}
Espessura da parede [m]	h_{wall}
Espessura da lâmina de líquido [m]	H

Fragão de vazio	H_i
Corrente do fotodiodo [μA]	i
Ângulo de reflexão total na lateral da fibra óptica [rad]	i_t
Intensidade de radiação monocromática [W/m ²]	I
Fluxo ou intensidade de radiação monocromática de fundo medido quando a fibra óptica é apontada para o infinito [W/m ²]	I_f
Fluxo de radiação monocromática total determinado por integração numérica [W]	I^*
Fluxo de radiação monocromática total medido [W]	I^*
Corrente na situação da instalação A	I_A
Corrente na situação da instalação B	I_B
Fluxo ou intensidade de radiação monocromática no centro do feixe laser à distância z da ponta da fibra óptica [W/m ²]	$I^{ct}(z)$
Fluxo total de radiação monocromática emergente da fibra óptica [W]	I_0
Intensidade de radiação monocromática [W/m ²]	I_0
Fluxo de radiação monocromática total entrando no volume de controle [W]	$I_{entrando}$
Fluxo de radiação monocromática polarizado no plano p [W/m ²]	I_p
Fluxo de radiação monocromática total saindo no volume de controle [W]	I_{saindo}
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 ²]	$I(r, z)$

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^2]	$I^R(r, z)$
Fluxo de radiação monocromática polarizado no plano s [W/m^2]	I_s
Constante de calibração	k
Fator de abrangência dado em número de desvios padrão	k
Coefficiente de absorção para a luz incidente	K_1
Coefficiente de auto-extinção (<i>self-quenching</i>)	K_2
Coefficiente de auto-absorção	K_3
Coefficiente de auto-absorção	K_4
Comprimento de referência ou distância da fibra a superfície líquida [m]	l
Comprimento longitudinal do canal [m]	$L_{\text{comprimento}}$
Largura transversal do canal [m]	L_{largura}
Espessura de filme [m]	m
Número de intervalos de amostra de atraso para o cálculo do coeficiente de correlação	m
Massa equivalente a um volume aproximado de 100ml [kg]	m_{100ml}
Massa de líquido [kg]	m_{liquido}
Índice de refração do ar	n_0
Índice de refração do núcleo de fibra óptica	n_1
Índice de refração da casca da fibra óptica	n_2

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 ³]
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_1	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]

Tensão lida no osciloscópio [V]	T
Incerteza da variável x	$n(x)$
Incerteza combinada da variável y obtida por meio de cálculo com base nas incertezas das variáveis com as quais se calcula y	$n(y)^2$
Incerteza expandida	U
Velocidade de propagação de onda em lâmina de água [m/s]	V_d
Volume próximo de 100ml [m ³]	V_{100ml}
Tensão na situação da instalação A	V_A
Tensão na situação da instalação B	V_B
Velocidade média da fase líquida [m/s]	V_l
Velocidade média da fase gás [m/s]	V_g
Volume de líquido adicionado no canal [m ³]	$V_{liquido}$
Velocidade superficial da fase gás [m/s]	V_{sg}
Velocidade superficial da fase líquida [m/s]	V_{sl}
Coordenada do eixo x [m]	x
Coordenada no eixo x do centro da imagem da fibra óptica [m]	x_c
Coordenada do centro de elemento infinitesimal no domínio de integração	x_m
Componente de flutuação do sinal do canal 1	X_1
Componente de flutuação do sinal do canal 2	X_2
Distância da parede [m]	y

Coordenada do eixo y [m]	y
Resultado de cálculo de uma função multivariável	y
Coordenada no eixo y do centro da imagem da fibra óptica [m]	y_c
Coordenada do centro de elemento infinitesimal no domínio de integração	y_m
Variável resultante de cálculo com dados experimentais e que deve ser apresentada juntamente com sua incerteza expandida	Y
Coordenada no eixo z [m]	z
Coordenada no eixo z do centro da imagem da fibra óptica [m];	z_c
Coordenada do centro de elemento infinitesimal no domínio de integração	z_m

Símbolos Gregos

<p>Coeficiente de absorção de radiação monocromática</p>	α
<p>Incerteza da área da superfície do canal [m²]</p>	δA_{canal}
<p>Incerteza associada ao comprimento do <i>pixel</i> em relação à imagem [m/pixel]</p>	δd_{pixel}
<p>Incerteza da frequência [Hz]</p>	δf
<p>Incerteza da altura do degrau usinado no calibre [m]</p>	$\delta h_{\text{calibre}}$
<p>Incerteza da espessura do filme líquido [m]</p>	δh_{filme}
<p>Incerteza na espessura do filme medido com câmara [m]</p>	$\delta h_{\text{filme (cámara)}}$
<p>Incerteza de um dado ponto pertencente a interface líquida em elementos de imagem</p>	$\delta h_{\text{filme}} [\text{pixel}]$
<p>Incerteza da espessura de filme obtida sabendo-se o volume [m]</p>	$\delta h_{\text{filme (volume)}}$
<p>Incerteza da altura total da lâmina de líquido contida no canal [m]</p>	$\delta h_{\text{líquido}}$
<p>Incerteza do nível do canal sobre a ponta da fibra óptica relativa ao nivelamento do canal [m]</p>	$\delta h_{\text{nível}}$
<p>Incerteza da altura da fibra em elemento de imagem</p>	δh_{pixel}
<p>Incerteza associada ao comprimento de referência [m]</p>	δl
<p>Incerteza do comprimento longitudinal do canal [m]</p>	$\delta L_{\text{comprimento}}$
<p>Incerteza da largura transversal do canal [m]</p>	$\delta L_{\text{largura}}$
<p>Incerteza no número de intervalos de amostragem</p>	δm

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]	
Incerteza da massa equivalente a aproximadamente 100ml [kg]	δm_{100ml}
Incerteza da massa de líquido [kg]	$\delta m_{liquido}$
Incerteza no número de intervalos de amostragem que possui o atraso apresentado entre dois sinais para o cálculo da frequência	δn
Incerteza na espessura de filme local medida em pontos de imagem [pixel]	δn_{local}
Incerteza associada ao número de pontos de imagem correspondentes ao comprimento de referência [pixel]	δn_{pixel}
Incerteza da coordenada da base da fibra óptica em elementos de imagem	δP_{base}
Incerteza da coordenada da ponta da fibra óptica em elementos de imagem	δP_{ponta}
Incerteza da coordenada de um dado ponto sobre a interface líquida em elementos de imagem	δP_{ponto}^2
Incerteza da relação comprimento por elemento de imagem	δR
Incerteza da leitura de tensão associada à incerteza de nível [V]	δS
Incerteza da leitura de tensão associada ao processo de calibração [V]	$\delta S_{calibração}$
Incerteza da leitura de tensão no osciloscópio [V]	$\delta S_{osciloscópio}$
Incerteza associada à velocidade de onda [m/s]	δV

δV_{100ml}	Incerteza do volume de 100ml de água [m ³]
$\delta V_{liquido}$	Incerteza do volume de líquido adicionado ao canal [m ³]
δd	Incerteza da densidade [kg/m ³]
$\delta \Delta s$	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]
Δs	Distância percorrida pela onda [m]
ΔS	Distância do fotodetector ao prisma [m]
Δt	Intervalo de tempo entre duas amostras de sinal [s]
θ	Ângulo de incidência com a normal em superfície de feixe luminoso [rad]
θ	Ângulo de abertura do feixe laser emergente da fibra óptica [rad]
θ'	Ângulo com a normal de feixe luminoso refratado [rad]
θ_{crit}	Ângulo do plano do objeto com o eixo óptico da objetiva de detecção
θ	Ângulo de incidência máximo com o eixo óptico na fibra óptica [rad]
θ	Ângulo de abertura de feixe laser emergente da fibra óptica [rad]
θ	Ângulo de rotação do plano de polarização [rad]

Ângulo de refração do raio incidência na ponta da fibra óptica relativo ao ângulo de incidência máximo com o eixo óptico [rad]	θ'
Ângulo da superfície líquida com o fundo do canal [rad]	$\theta_{nível}$
Comprimento de onda de radiação eletromagnética [nm]	λ
Média do sinal do canal 1	μ_{S_1}
Média do sinal do canal 2	μ_{S_2}
Densidade da água [kg/m ³]	ρ
Densidade da fase líquida [kg/m ³]	ρ_l
Densidade da fase gás [kg/m ³]	ρ_g
Coefficiente de correlação entre sinais discretos	$\rho_{S_1 S_2}$
Intervalo de tempo de propagação de pulso [s]	τ
Ângulo de inclinação da superfície líquida [rad]	ϕ
Ângulo do vetor I_r com o eixo da fibra óptica [rad]	ψ
Ângulo de rotação de eixo de polarização [rad]	ω

Subscritos

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

<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

Referê-se ao quociente adimensional de valor intermediário por valor total	0
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.

I 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 padrões observados 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 otimiza-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 conversão de energia quando do início do desenvolvimento de caldeiras mais eficientes como as aquatubulares e flamatubulares. Problemas como ocorrência de erosão no material das tubulações e rompimentos propiciaram motivos suficientes para um grande desenvolvimento teórico desta área.

era formular modelos, baseados nas equações de transporte utilizando estes velocidades de interface no escoamento anular no interior do bocal. O objetivo foi empregada no referido trabalho para a medição da espessura de filme e nebulizadores do tipo Y-Jet. A técnica óptica, assunto da presente dissertação, processo para obtenção de correlações, visando a otimização do projeto de nebulizadores em PACIFICO (2000). Neste trabalho, levantou-se parâmetros de Um exemplo de aplicação de interesse nacional é o estudo de bocais adequada do elemento combustível.

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

adequadas de nebulização na câmara de combustão, que até aquele momento para o armazenamento. O único inconveniente é que necessitam de condições ocupando um volume menor, e não necessitam de vasos de pressão reforçados combustíveis gasosos, os combustíveis líquidos possuem alto poder calorífico técnicas que o tornava interessante para essa aplicação, pois ao contrário dos líquido em propulsão de foguetes. O combustível líquido possui características interesse que ocorreu nas décadas de 30 e 40 pela utilização de combustível Outro fator que alavancou o desenvolvimento desta área foi o crescente

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

trajção de vazão, 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 PACIFICCO (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 luminosa 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 operam 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, a fim 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 Escamento

A diferença entre os vários tipos de escamento 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 escamento.

Em escamentos com interface deformável, o efeito da tensão superficial causa a tendência de deformação em superfícies arredondadas como bolhas e gotas. O escamento 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 escamento bifásico associando-o a padrões típicos como mostra a figura 3.1.

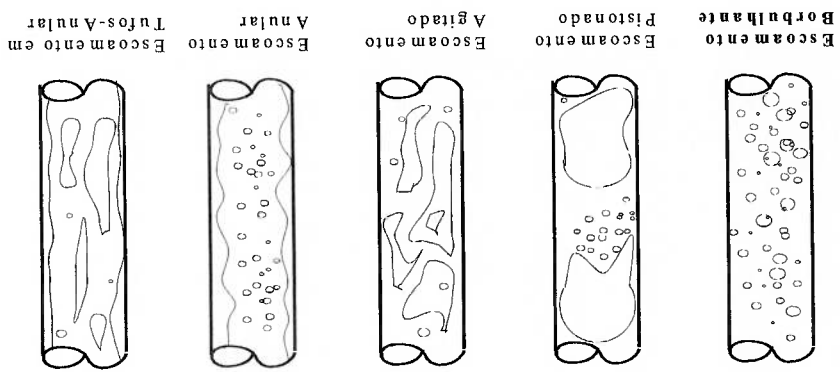
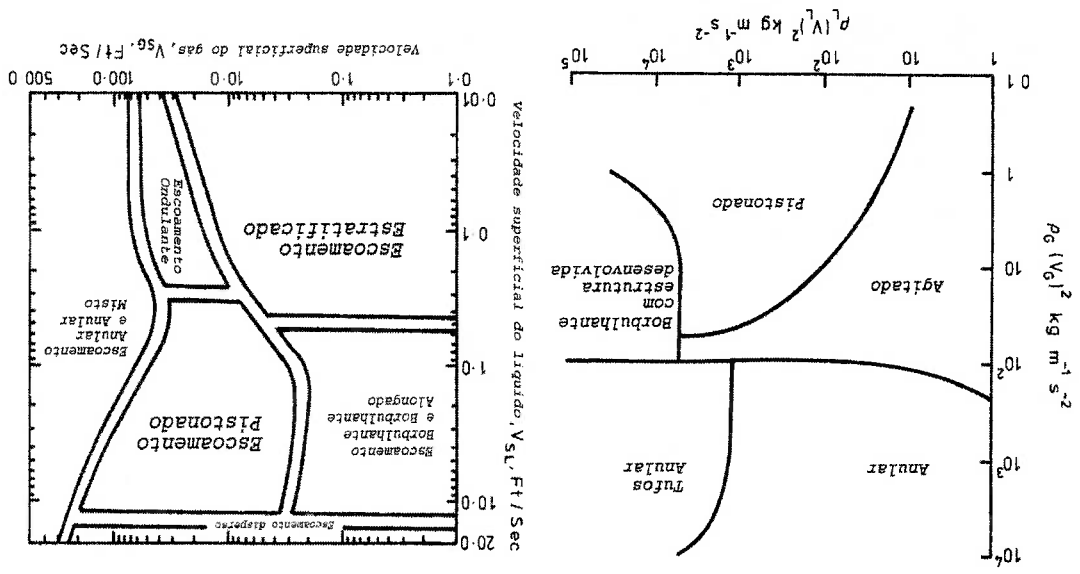


Fig. 3.1 Padrões de escamento bifásico vertical para cima em tubulação.

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. Escamentos horizontais sofrem ação da gravidade e a fase de maior densidade

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

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.



como os demonstrados na figura 3.2.

padrões de escoamento, e o resultado desse trabalho são os mapas de escoamento escoando no centro. Grandes esforços são feitos no sentido de identificar os vários distribuir uniformemente ao longo da superfície interna da tubulação com o gás medida que a velocidade superficial do gás aumenta, a fase líquida tende a se possui a tendência de se concentrar na parte inferior da tubulação, sendo que,

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 Escocamento Bifásico

HEWITT (1978) separa os parâmetros de escocamento 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 tração 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 propostos 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,

do filme máximo que pode ser medida e o líquido deve ser dopado com condutoras" do canal. Quanto mais próximos os eletrodos, menor a espessura condutância entre dois eletrodos, passados através das paredes "não HEWITT (1978) explica que o Método de Condutância mede a

3.4.1 Técnicas baseadas em medição de condutância

mais apropriado.

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

métodos baseados em ultra-som, reflexão de luz pela interface;

absorção de feixe fino de raio X, método de corrente contínua pontual, como a do contato de agulha, absorção de luz, método de fluorescência,

- Medição pontual: é determinada a espessura de filme utilizando técnicas ou emissão de radioisótopo dissolvido no filme líquido;

- Métodos localizados: é determinada a espessura de filme através da medição

tubulação baseando-se em corrente contínua ou alternada;

- Método de filme médio: é determinada a espessura de filme através da medição da condutância, indutância ou capacitância em segmento de

segundo HEWITT (1978), podem ser agrupadas em três grupos principais:

Várias técnicas podem ser empregadas para essa medição, as quais

propriedades de transporte.

como será detalhado adiante, as características do filme influenciam as

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.

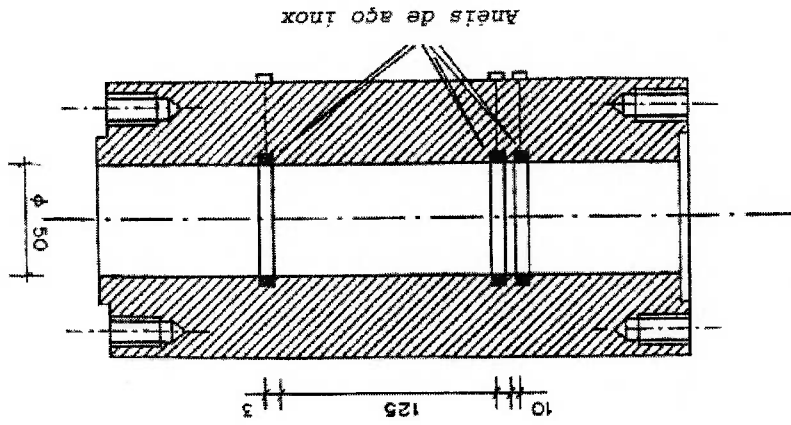


Fig. 3.3 Medição de filme médio através de medição de impedância em ANDREUZZI *et. al.* (1988). Este sensor serve não apenas para medir espessura de filme mas fração de vazão.

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 relações:

$$G_0^e = \frac{2 \cdot H_l}{3 - H_l} \quad (3.1)$$

(3.1)

$$G_0^e = H_l^{\frac{3}{2}} \quad (3.2)$$

(3.2)

Nas equações acima G_0^e 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 depende 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 consequentemente a linearidade entre a espessura de filme e a saída é boa.

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.

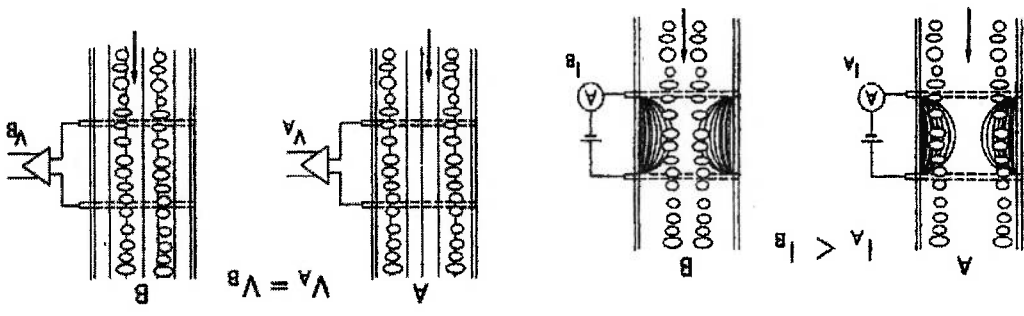


Fig. 3.4 (a) Bolha passando no centro da tubulação não pode ser detectada pelas técnicas normais que empregam corrente alternada. (b) Bolha passando no centro pode ser detectada pela técnica CECM. (c) Desenho esquemático do sensor.

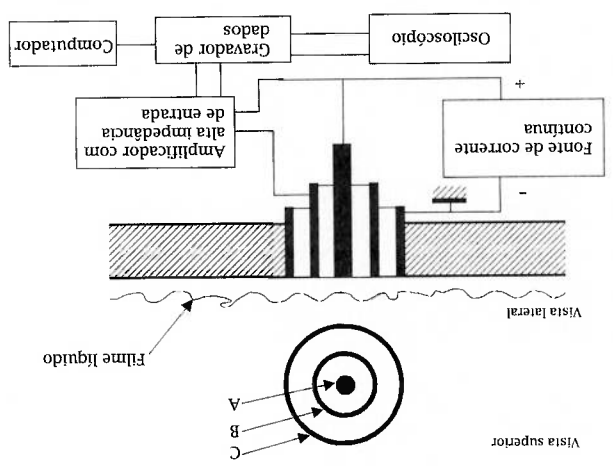


Fig. 3.5 Vista esquemática do sensor CECM pontual mostrado em FUKANO (1998). O eletrodo central A e o eletrodo C compõem a fonte de corrente contínua enquanto a leitura de condutância é feita entre o eletrodo A e B.

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

3.4.2 Técnica de contato de agulha

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.

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 (interiores a 0,5 mm), o custo de construção deste tipo de sensor inviabilizaria sua utilização.

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.

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.

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, desceja-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.

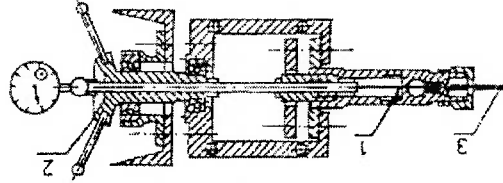


Fig. 3.6 Esquema do sensor de contato de agulha (1) agulha, (2) mecanismo movimentador e (3) eletrodo a ser posicionado na parede conforme HEWITT (1978).

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:

$$I = \int_0^m E \cdot a \cdot I_0 \cdot K^1 \cdot C \cdot \gamma \cdot e^{-K_1 \cdot C \cdot \gamma - K_2 \cdot \sqrt{C_1 - K_1 \cdot C \cdot \gamma}} \cdot \frac{1 + K^2 \cdot c}{1 + K^2 \cdot c} dy \quad (3.3)$$

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

figura 3.7.

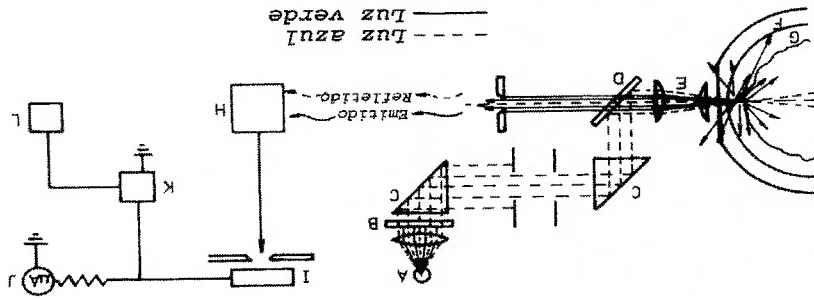


Fig. 3.7 Técnica de fluorescência para a medição de espessura de filme. Os componentes do sistema acima são: (A) lâmpada de vapor de mercúrio, (B) filtros, (C) prismas, (D) espelho semi-refletor, (E) lentes objetivas, (F) parede da tubulação, (G) filme líquido, (H) espectrômetro, (I) fotomultiplicador,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

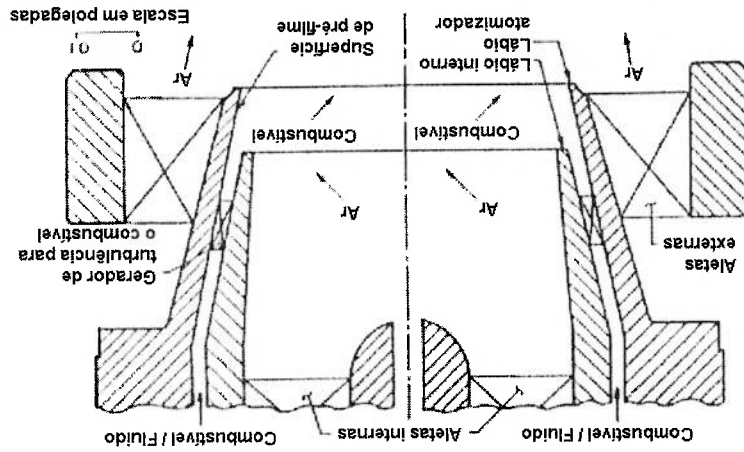


Fig. 3.8 Seção em corte do atomizador estudado em DRISCOLL *et. al.* (1992). O combustível é injetado na área anular.

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 labio 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.

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.

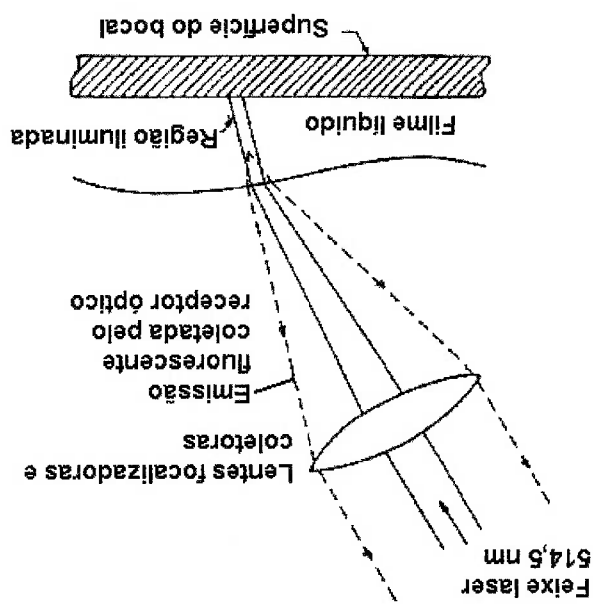
O esquema abaixo mostra como o filme é iluminado com o laser. Como pode-se notar, efeitos de interface e de refração são determinantes do resultado e devem ser levados em conta na formulação do problema.

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.

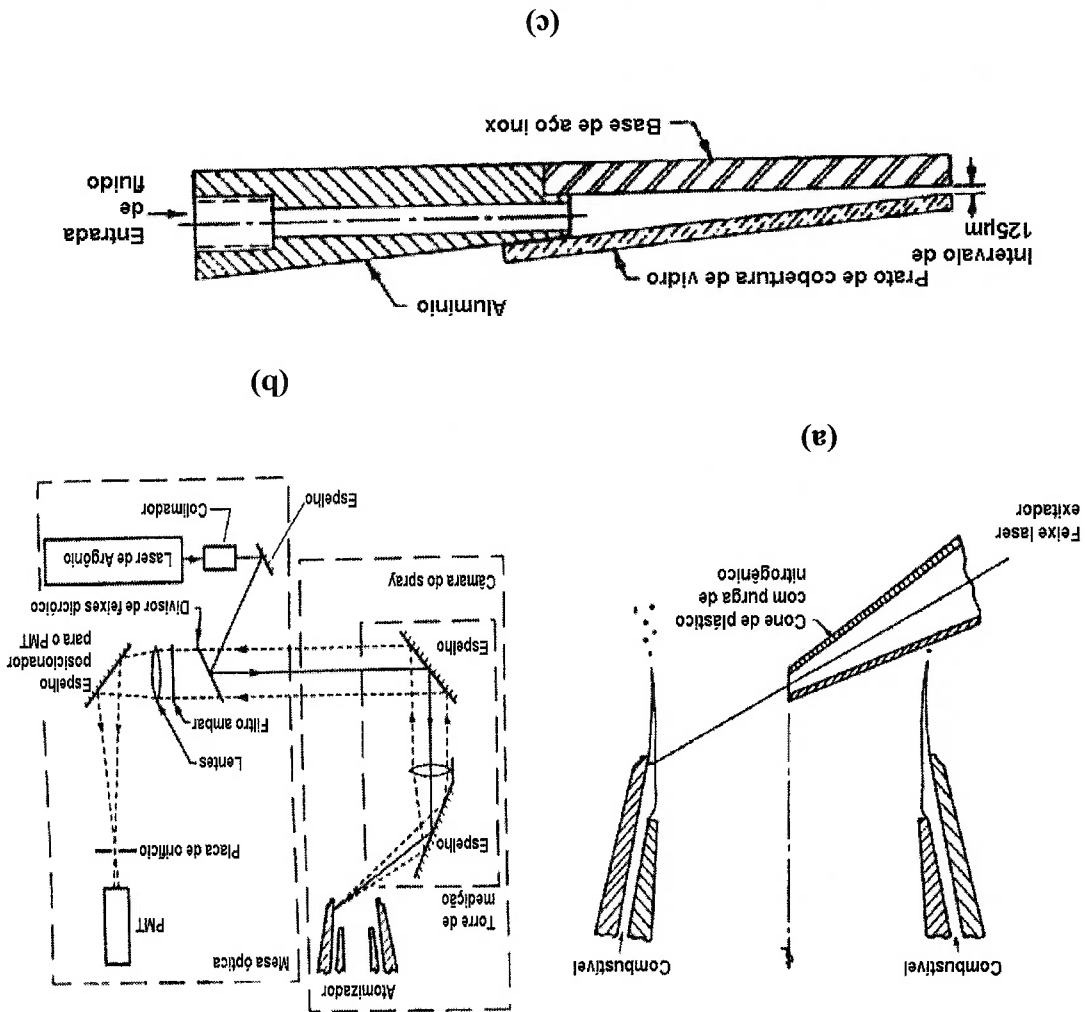
Fig. 3.9 Esquema de iluminação do filme dopado com material luminescente em DRISCOLL *et. al.* (1992).



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 tração de vazio, ou seja, sabe-se apenas que a leitura é proporcional a uma tração de vazio naquela secção, mas não se pode determinar a posição da interface. Somente a caracterização do

3.4.4 Técnicas baseadas em medição de radiação

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).



escamento proporcionará uma correta identificação do padrão de escoamento.

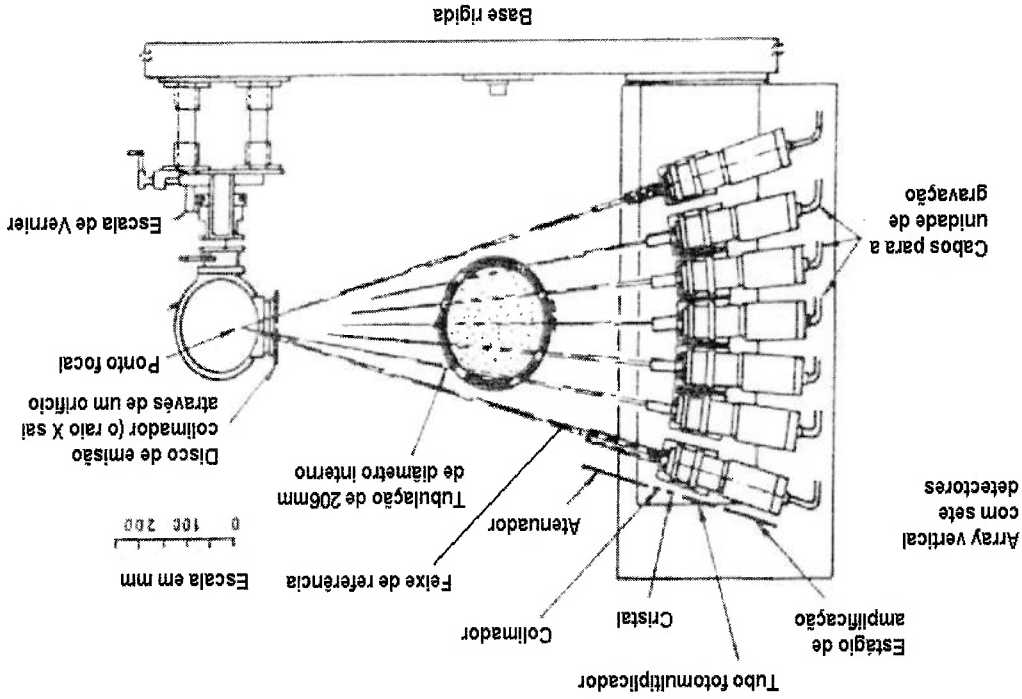


Fig. 3.11 Detectores de radiação X para a determinação de fração de vazio em uma corda do diâmetro em HEWITT (1978).

Uma maneira não invasiva de medir a fração de vazio em uma tubulação é

a λ -densidometria 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 λ -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 λ -densidômetro. No caso do artigo citado, foi utilizado Iodeto de sódio cintilante.

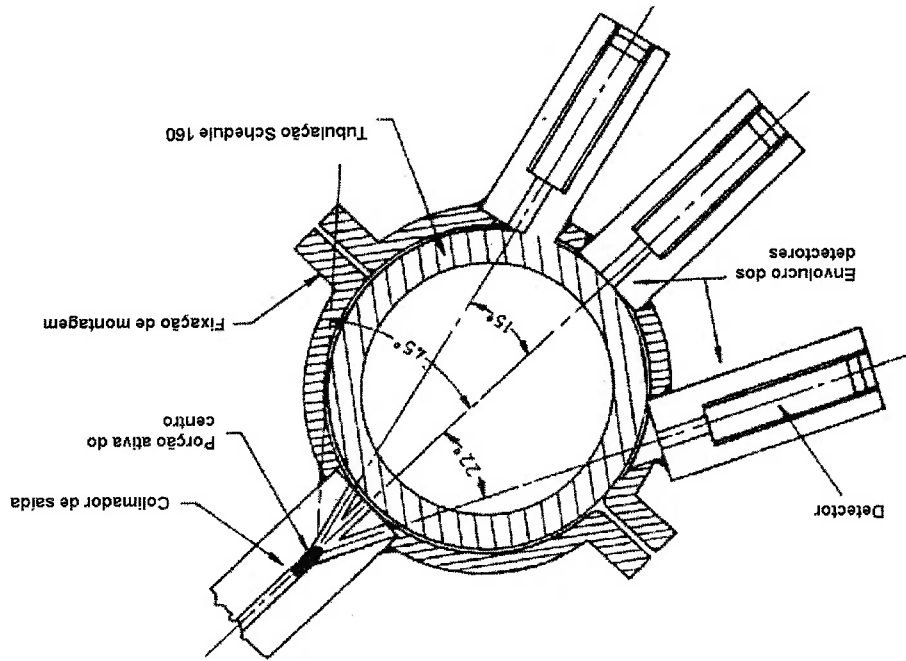


Fig. 3.12 λ -densidômetro de três feixes mostrado em HEWITT (1978).

3.4.5 Técnicas de condutância entre arames

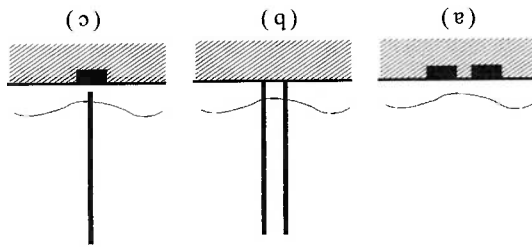
Outras técnicas empregadas na medição de espessura de filme são as baseadas em arames. Destacam-se entre elas a de dois arames paralelos, a de eletrodos montados rentes à parede e a de eletrodo rente e arame como pode ser visto na figura 3.13.

Os medidores de dois arames paralelos são montados em posição normal à parede, sendo que KOSKIE *et. al.* (1989) propõem uma montagem que aumenta

medidores de dois arames paralelos. segundo KANG; KIM (1992), quando começaram a ser empregados os medidores desses medidores de condutância foi ampliada a partir de 1966, ótima resolução espacial para espessuras de filme inferiores a 2 mm. A faixa de Os medidores de condutância de eletrodos montados rentes à parede têm sinal de entrada é maior que 100 KHz.

ANDREUZZI *et. al.* (1988), possui ângulo de fase zero quando a frequência do A condutância em um medidor de corrente alternada, conforme problemas relativos a fenômenos de superfície como a formação de meniscos. filme na região de medição, além de serem extremamente susceptíveis a utilizar. Por outro lado, eles davam pouca informação sobre a existência do hidráulica. Tais sensores possuíam baixa incerteza e eram fáceis de montar e medidores de nível por contato, os quais são normalmente empregados na agulha não sendo nada mais do que uma variante dos bem conhecidos Os primeiros medidores de condutância eram baseados em contato de

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



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

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

vibração induzida por vórtice e formação de menisco em torno do arame meio fluido, a presença do arame acaba ocasionando problemas, como o da De qualquer forma, esse método é claramente invasivo, uma vez que no pequeno o suficiente a ponto de não perturbar significativamente o escoamento. suficientemente grande (diâmetro grande) para possuir baixa resistência, e calibração não apresenta comportamento linear. Dessa forma, o arame deve ser arame deixa de ser desprezível face à condutibilidade do filme, a curva de para a boa linearidade de operação do mesmo, pois quando a resistência do KOSKIE *et al.* (1989) ainda mencionam que a escolha do arame é crucial mostradas no referido trabalho.

espacial, resultados estes, que estão de acordo com várias simulações numéricas afirmam que a redução do espaçamento entre os arames aumenta a definição os arames tensionados por uma carga de tração externa. No mesmo artigo a precisão de paralelismo entre os arames. Tal montagem baseia-se em manter

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 de sensores de contato de agulha não é tão confiável quanto essa técnica, pois fenômenos de tensão superficial e inclinação da superfície

capacitância e leitura e sugerem que a configuração helicoidal é aparentemente autores também indicam algumas condições para a perfeita linearidade entre para evitar que efeitos de borda de campo elétrico influenciem na leitura. Os chegam é que existem certas dimensões mínimas que devem ser planejadas, comportamento de medidores de capacitância helicoidais. A conclusão a qual Em GERAETS; BORST (1988) estuda-se numericamente o

quando a temperatura aumenta. menos susceptíveis a erros quando há mudança de impedância, como acontece eletrolito. Dessa forma, os medidores de tração de vazão por capacitância são do fato de que a permissividade da água varia pouco com a concentração de Esses medidores, conforme salientam GERAETS; BORST (1988), nascem curvas de calibração dos instrumentos ou adotam-se medidores de capacitância. ocorre essa variação, duas coisas podem ser feitas: ou adimensionalizam-se a água varia muito com a temperatura. Portanto, em experimentos nos quais Das técnicas de condutância acima citadas sabe-se que a impedância da

3.4.6 Técnicas baseadas em medição de capacitância

quantidade de movimento trocada com o escoamento. apreciável, além de haver a probabilidade de deflexão do arame devido à não deforma apreciavelmente a superfície mas em altas vazões a deformação é do tipo dois arames em paralelo. Por outro lado, para baixas vazões, o sensor mente que ocorrem os mesmos problemas relacionados à utilização dos sensores Sendo essa técnica baseada em arames e portanto, invasiva, deve-se ter em podem mascarar a real posição da interface.

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.

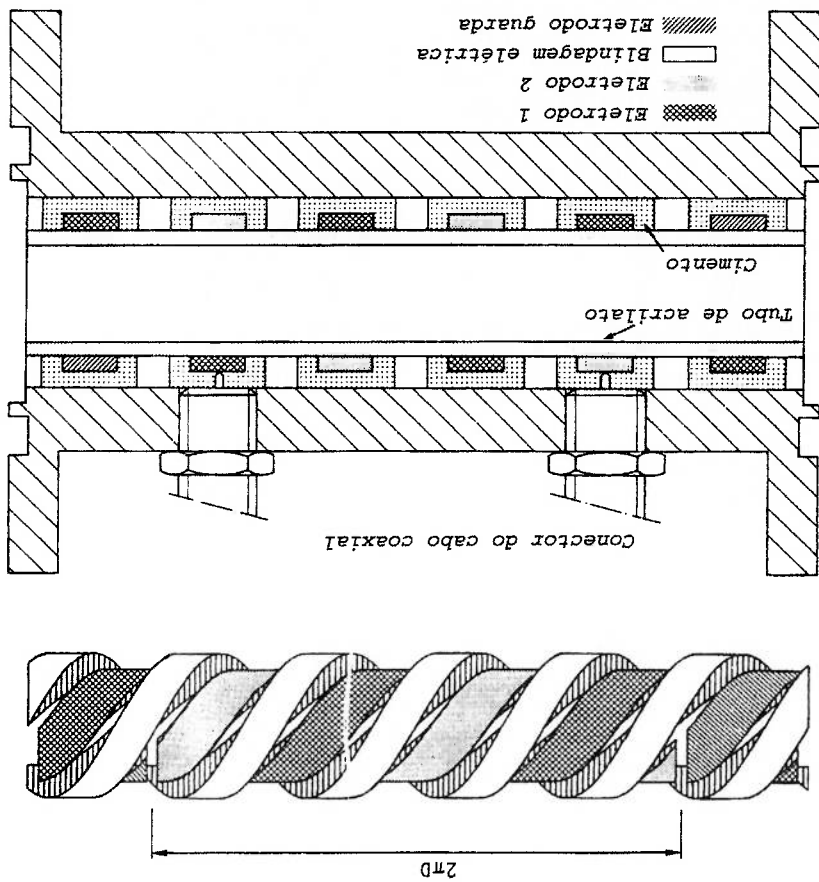


Fig. 3.14 Medidor de capacitância proposto em GERAETS; BORST (1988). A configuração helicoidal proposta é a melhor para esse tipo de medidor.

3.4.7 Técnica de eco ultra-sônico

A tomografia de raios-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.

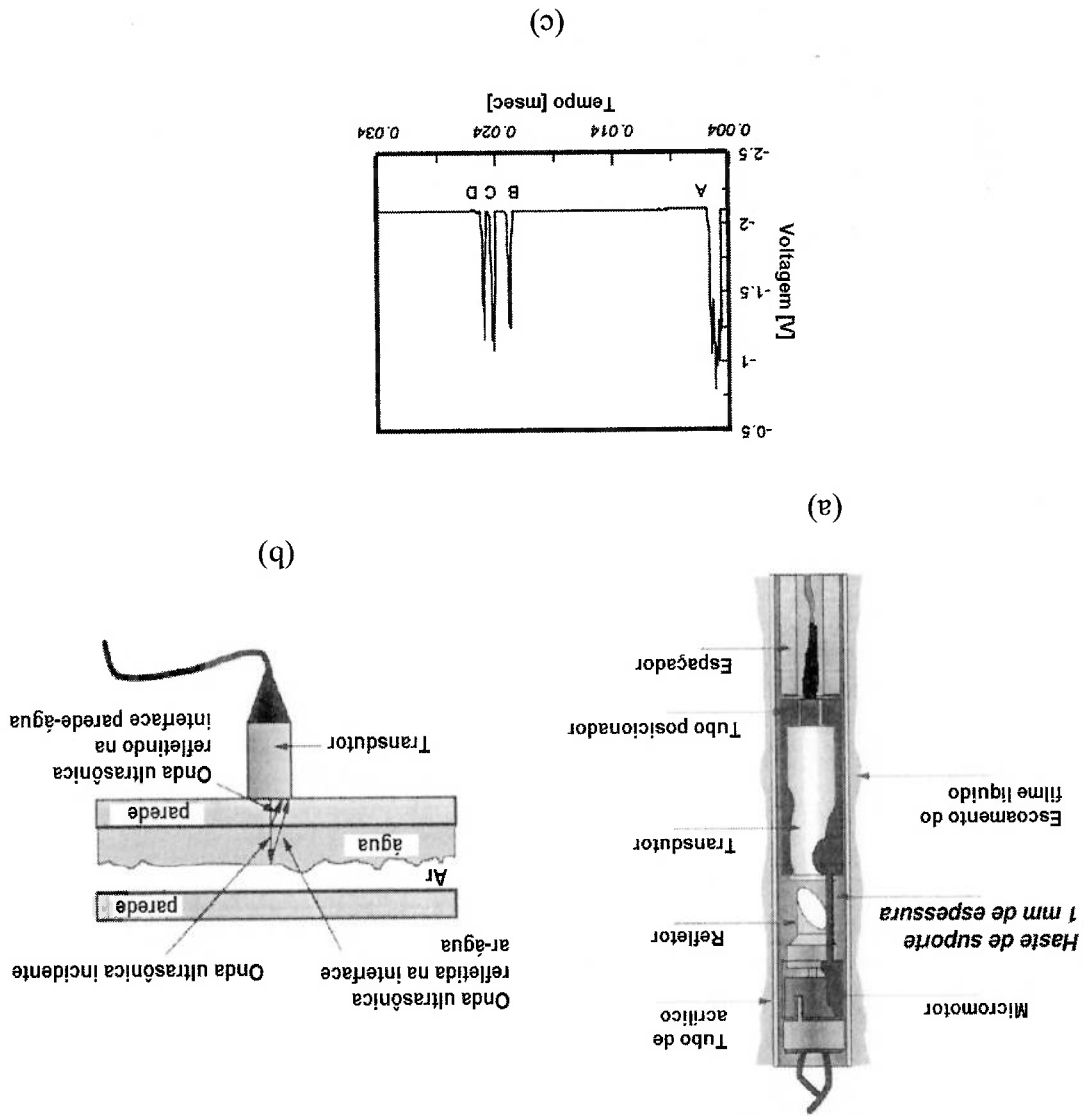
KAMEI; SERIZAWA (1998) propõem que a técnica de eco ultra-sônico, anteriormente empregada para medir espessura de filme em posição fixa de um canal, seja empregada para mapear o filme líquido no tempo.

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 voo 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 μm (assumindo velocidade do som na água de 1500 m/s), ou seja, a incerteza associada é de 75 μm (metade do comprimento de onda) o que pode

Fig. 3.15 (a) Esquema do equipamento para medição de espessura de filme líquido, montado em KAMEI; SERIZAWA (1998) (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.



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

3.5 Medição de espessura de filme utilizando técnica laser

armazenagem.

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

limitavam o tempo de ensaio.

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

a técnica em questão não possui.

medição, a técnica laser citada possui limitações, que serão vistas adiante e que
eco ultra-sônico. Mesmo sendo superior em termos de menor incerteza de
espessura de filme com técnica laser de 22 μm , o que é claramente superior à do
Comparativamente, PACIFICO (2000) obtém incertezas de medição de
ser considerada alta para a faixa de medição de espessura abaixo de 0,5 mm.

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.

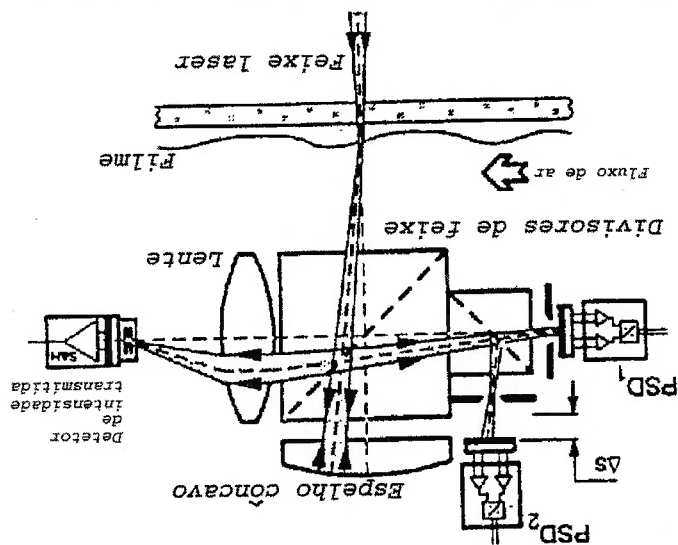
Para os dispositivos que serão abordados e que utilizam o laser, vários arranjos construídos são propostos. SAMENFINIK *et. al.* (1996), propõem uma montagem onde o aparato óptico mede tanto a espessura do filme quanto a inclinação da interface.

canal, que é quadrado e facilita a instalação de elementos ópticos, o que não
 A figura 3.16 mostra esquematicamente o sistema. A figura não mostra o
 cima do canal quadrado.

do escoamento, pode não atingir o sistema de detecção instalado na parede de
 possa ser feita, dado o fato de que o feixe transmitido, sob certas circunstâncias
 Mesmo a medição de espessura, sob grandes vazões de massa, talvez não
 desta podem possuir ângulos mais inclinados que o limite.

Fluxo de massa, não é possível determinar o ângulo de interface, pois as ondas
 na direção do escoamento ou perpendicular a este. Entretanto, para grande
 numa faixa de 10° a -20° na orientação escolhida. A inclinação medida pode ser
 divisores de feixe com espelho côncavo possibilita que esse ângulo seja medido
 Para medir a inclinação da superfície do filme, um arranjo simples de

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.



de calcular grandezas temporais, tais como média e flutuação. Uma das velocidades permite que o sinal de velocidade na posição seja reconstruído a fim de espessura, é possível reconstruir o formato original da interface. A leitura de Através das duas informações, obtidas pelo sistema de medição de espessura, passa no volume de controle de medição.

possível medir a velocidade quando uma partícula do pó que dopa o líquido por meio de um LDV, ou seja, é completamente aleatória, sendo que só é Esse sincronismo é necessário, pois a medição de velocidade local é feita entre tomada de velocidade e espessura.

rapidez (grande quantidade de informação e alta velocidade) e sincronismo desvantagens desse sistema, que possui reduzida incerteza de medição (10 µm), SAMENFINK *et al.* (1996) também relacionam as vantagens e utilizado um feixe derivado do feixe de medição como referência.

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

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

espessura de filme pela seguinte relação:

A intensidade transmitida pelo filme é facilmente relacionada com a haveria desvio de feixe.

ocorreria se o canal fosse redondo, como em uma tubulação e, nesse caso,

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 cizalhamento. 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.

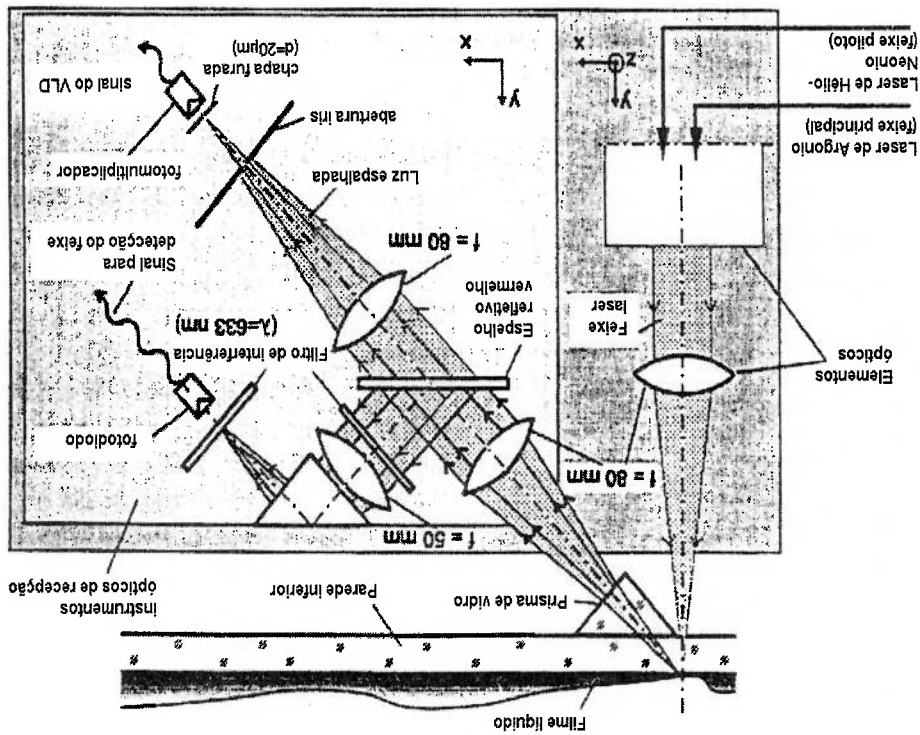


Fig. 3.17 Efeito do emprego de um obturador em WITTING *et al.* (1996).

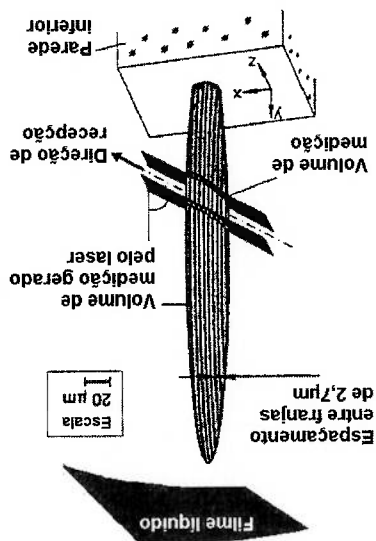


Fig. 3.18 Esquema do equipamento empregado para medição de velocidade utilizando Velocímetro a Laser de efeito Doppler (VLD) WITTING *et al.* (1996).

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 consequentemente, 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.

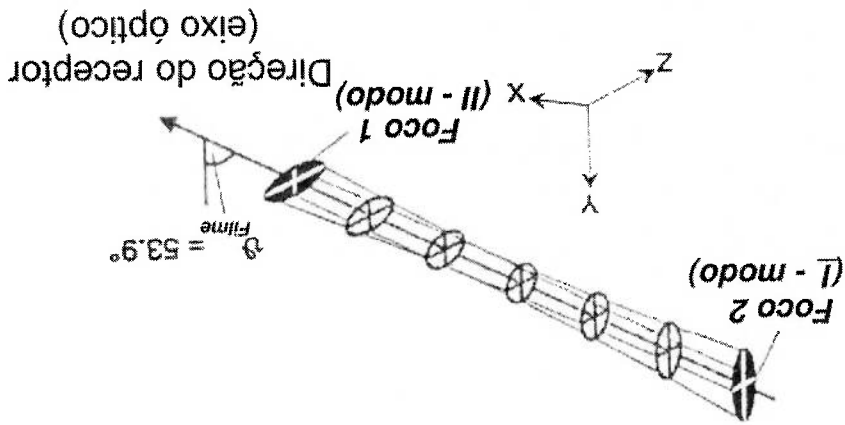


Fig. 3.19 Como WITTING *et al.* (1996) relatam, quando a leitura é realizada em ângulo, os eixos da imagem emergem distorcidos sendo necessário o pós-processamento.

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 SAMENINK *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

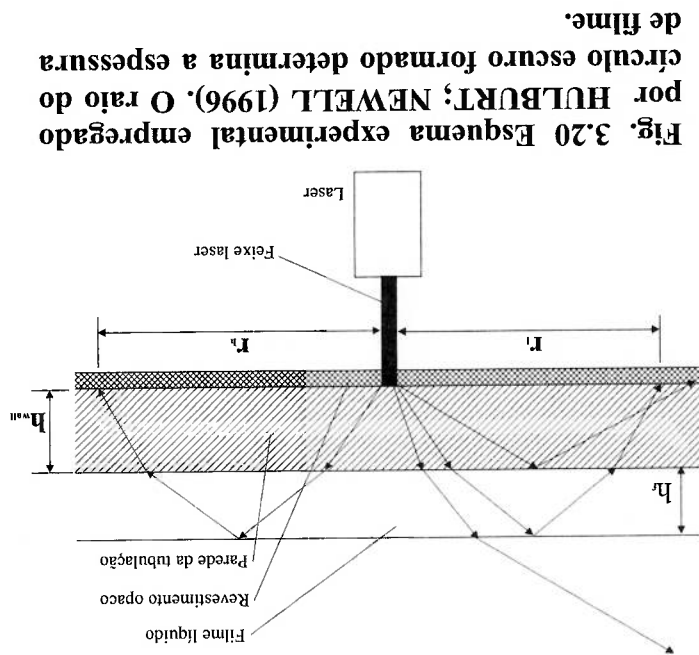
ângulo crítico de refração sofrerão reflexão total e retornarão para a película. O

que se observará na parte externa será uma circunferência escura com sua

periferia iluminada com radiação do laser.

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

Determinando r é possível obter uma correspondência com h , 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.



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°, 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 as propriedades da água permanecem 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

deteção.

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 é atenuada pelo filme líquido e 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 o feixe na direção de outra lente objetiva microscópica. Esta lente focaliza o feixe sobre um fotodiodo semicondutor.

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 mantêm 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.

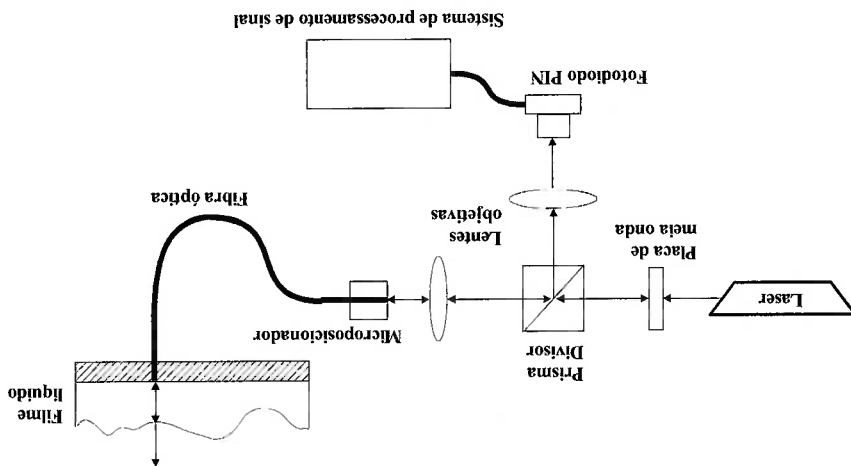
O fotodiodo responde em corrente, que é amplificada por um amplificador de alto ganho, possibilitando que a leitura seja transmitida a um osciloscópio.

As técnicas a laser, embora complexas, oferecem vantagens sobre as outras das técnicas mais sofisticadas. com respeito a precisão e rapidez de resposta. Por outro lado as dimensões e complexidade superam as das técnicas baseadas em condutância. Quando o

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

3.6 Conclusão

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



fluido não é bom condutor como por exemplos os fluidos refrigerantes, a técnica a laser é uma alternativa.

O trabalho de SAMENFINIK *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. SAMENFINIK *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° a 20° 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 SAMENFINIK *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 SAMENFINIK *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 radiação luminosa de um material ou de um gás. 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

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 constituído com diversos tipos de materiais, mas

4.2 Fibras ópticas e guias de onda

entre as ondas, de forma que a figura de interferência não se forma nitidamente. muito grandes, as diferenças de caminho óptico ocasionaram diferenças de fase bem nítidas, pois, se as dimensões da fonte da experiência de interferência forem apenas a formação de uma figura difusa e não franjas de interferência uma fonte coerente irradia uma onda, estando eles muito afastados entre si, interferência não poderão ser observadas. Isto ocorre por que se cada átomo em fonte em uma experiência de interferência exceder um certo valor, as franjas de as franjas de interferência sejam bem contrastadas, ou seja, se o tamanho da adequada da fonte luminosa para que uma experiência de interferência ocorra e O termo coerência espacial, segundo YOUNG (1998), designa a dimensão coerência temporal, maior será a nitidez de uma figura de interferência.

podem tirar a nitidez das franjas de interferência. Portanto, quanto maior a variação $\Delta\lambda$, o qual é capaz de introduzir diferenças de caminho óptico, que variação de $\Delta\lambda$ em torno deste, a fonte será tão coerente quanto menor for a palavras, se uma fonte de luz emite em um comprimento de onda λ com uma suficientemente nítidas em uma experiência de interferência. Em outras destrutivamente nos outros de tal forma que seja possível observar franjas suficiente para que um comprimento de onda extremo não interfira

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.

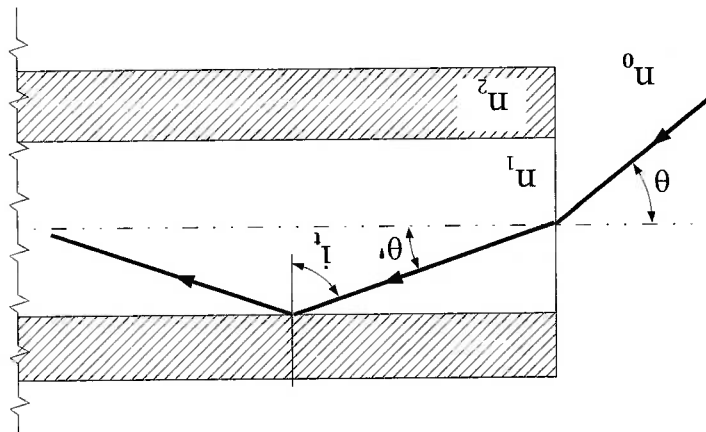


Fig. 4.1 O ângulo de aceitação de uma fibra óptica é obtido considerando-se que a luz sofre reflexão total na interface entre núcleo e casca.

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:

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

O Ângulo i_1 , mostrado na figura 4.1, é o ângulo de incidência com a normal

na lateral da fibra para que ocorra reflexão total no interior da fibra óptica. Por

relação geométrica simples sabe-se que $\text{sen}(\theta') = \cos(i_1)$, obtêm-se assim:

$$n_0 \cdot \text{sen}(\theta) = n_1 \cdot \cos(i_1) \quad (4.2)$$

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

equação:

$$n_2 \cdot \text{sen}(90^\circ) = n_1 \cdot \text{sen}(i_1) \quad (4.3)$$

onde 90° refere-se a condição de reflexão total, ou seja:

$$\text{sen}(i_1) = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.4)$$

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.

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

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

escrevendo-se:

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

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

Substituindo a equação acima na equação 4.2 obtém-se:

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

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

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

Ou seja, para i , tem-se:

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

Aplicando o Teorema de Pitágoras, sabemos que:

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 a largura da banda de frequência

A evolução da tecnologia na direção das fibras de óxido de silício de alta

pureza vem melhorando cada vez mais a transmitância das fibras.

τ , mas sim à raiz quadrada do comprimento.

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

transmitida pela fibra em questão.

onde τ é o intervalo de tempo de propagação de um pulso na direção do eixo da 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

$$\Delta\tau = \frac{\tau}{1 - \cos(\theta)} \quad (4.10)$$

pela relação:

numérica, podemos calcular o atraso entre um raio oblíquo e uma raio axial da fibra. Como o máximo ângulo de incidência é definido pela abertura

características elétricas dos átomos e moléculas que compõem o meio, estes transmiti-la em uma outra direção com um espectro diferente. Dependendo das feixe incidente. O material por sua vez pode absorver a radiação original e invés de transmitir, pode refletir em outra direção reduzindo a intensidade do Já a dispersão é diferente da absorção, uma vez que o material no meio, ao luminosa transmitida. O meio absorve parte da luz reduzindo sua intensidade.

A absorção do material tem como efeito a redução da intensidade interface.

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

4.3 Absorção, dispersão e reflexão

da mesma.

fibra óptica, e poderá ocorrer interferência construtiva e destrutiva no interior Não há relação de fase fixa entre os raios refletidos no interior de uma reduzidas, muito embora ofereçam tais vantagens técnicas.

possuem restrições ao acoplamento de potência, devido às suas dimensões nesses diâmetros, a óptica geométrica não tem precisão suficiente. Essas guias comportamento somente pode ser descrito pela óptica ondulatória, uma vez que, oblíquos e axiais é nula. Transmitem grande largura de banda, sendo que seu onda monomodo, sendo que nelas a diferença entre tempos de trânsito de raios As fibras ópticas com diâmetro inferior a 10 μm são denominadas guias de possível de ser transmitidas aumenta consideravelmente.

podem receber radiação de um tipo de espectro e transmitir em outro.

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 decresce a medida que a radiação penetra no referido meio devido à sua absorção. 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 transferido pelo volume de controle ao meio.

Desta forma o calor transferido 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.

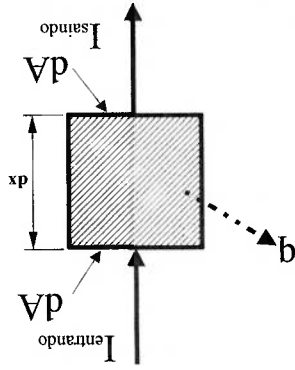


Fig. 4.2 Formulação de primeira lei para o volume de controle sujeito a radiação monocromática.

A energia do feixe de radiação eletromagnética (fluxo total) que incide no

volume de controle é dada por:

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

A energia do feixe de radiação eletromagnética que é transmitida pelo

volume de controle é dada por:

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

Fazendo o balanço de energia para o volume de controle obtém-se:

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

Substituindo as fórmulas 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:

se:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -\alpha I \quad (4.16)$$

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:

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

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

aproximada muito bem por uma reta, sendo desnecessária a utilização dessa PACIFICO (2000) notou-se que a curva de calibração obtida poderia ser intensidade do feixe laser de forma muito mais significativa que o ar. Em relação para ajustar os dados de calibração, uma vez que a água atenua a aplicada ao fenômeno de medição de espessura de filme para obtenção de uma A equação acima é também denominada de lei de Beer-Lambert e pode ser meio, tais como temperatura e concentração de sais minerais e gases dissolvidos. radiação se propaga, e deve, também, ser função de outras características do meio. O coeficiente de atenuação é uma característica do meio em que a meio como função da intensidade incidente e da penetração da radiação no A equação acima fornece a intensidade da radiação em qualquer ponto do

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

que também pode ser escrito da seguinte forma:

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

ou

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

Efetuando-se a integração obtém-se:

4.4 Modelamento da técnica de medição de espessura de filme

A 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 reflète toda a luz que incide 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 ao cálculo.

A posição da imagem é determinada 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.

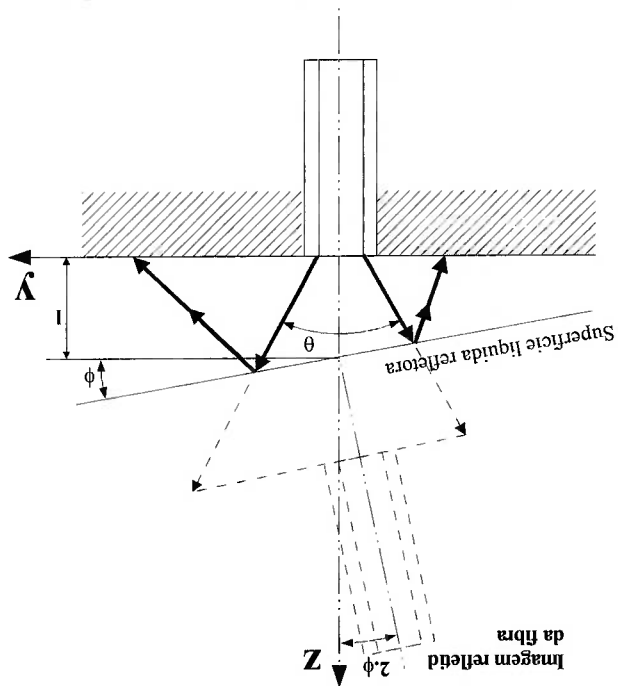


Fig. 4.3 Esquema geométrico para modelagem do sensor óptico. Utilizando simetria é possível determinar a posição e a quantidade de radiação que incide na imagem.

O plano de localização da imagem da área da ponta da fibra óptica em relação ao sistema de coordenadas descrito pelos eixos y e z na figura 4.3, cuja a origem foi adotada como o centro da fibra óptica emissora, é dado pela seguinte equação:

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

A posição do centro da ponta da fibra óptica na imagem é o ponto dado pelas coordenadas $(0, -l \cdot \sin(\phi), l \cdot (1 + \cos(2 \cdot \phi)))$. Nesse ponto do plano dada 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 descreve a origem 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.

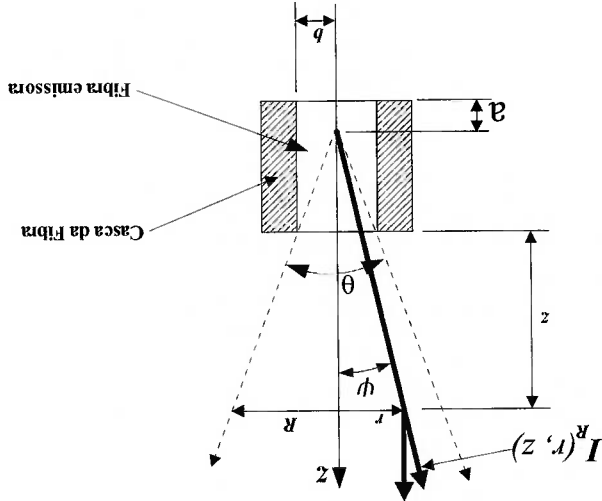


Fig. 4.4 Esquema geométrico mostrando a origem do feixe no interior da fibra.

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 possuem fase inicial alterada.

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

$$I(r, z) = I_{0L}(z) \cdot e^{-\frac{4r^2}{R(z)^2}} \quad (4.24)$$

onde r é a coordenada radial do ponto em relação ao eixo z da fibra óptica 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 $e^{-4} \cdot I_{0L}(0, 0, 183 \cdot I_{0L}(z))$ e

$I_{0L}(z)$ é o fluxo no centro do feixe, que é função da cota e é dado pela

equação:

$$I_{0L}(z) = \frac{4 \cdot I_0}{\pi \cdot R(z)^2 \cdot (1 - e^{-4})} \quad (4.25)$$

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

O fluxo recebido pela superfície da imagem da fibra óptica se propaga em uma direção que forma o ângulo ψ com o eixo da fibra emissora, e a origem do feixe gaussiano ocorre em um ponto no interior da fibra como mostra a figura 4.4.

Dada a geometria vista nesta figura, observa-se que a componente do fluxo que incide na imagem da superfície da ponta da fibra óptica é descrita pela

equação:

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

onde ψ é o ângulo indicado na figura 4.4.

Conhecendo-se o ângulo de abertura do feixe podemos determinar o raio

do feixe em qualquer posição z acima da fibra emissora. Sendo assim obtenhamos:

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

Pela figura 4.4 observa-se que:

$$\frac{R(z)}{(z+a)} = \frac{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\theta} \quad (4.28)$$

e

$$\tan(\psi) = \frac{z+a}{r} \quad (4.29)$$

Substituindo a na equação 4.29 obtenhamos:

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

Elevando ao quadrado ambos os lados da equação acima obtenhamos:

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

E sabendo que:

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

obtemos finalmente:

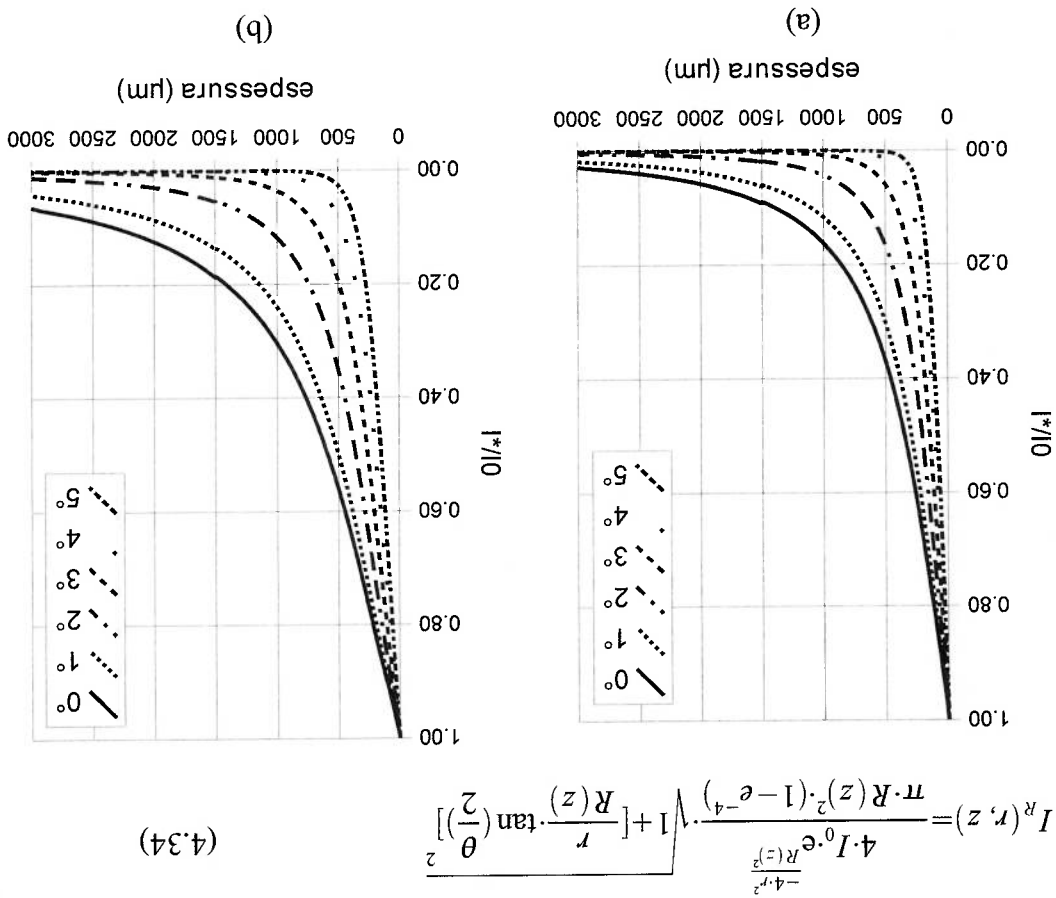
$$\frac{1}{\cos^2(\psi)} = \left[1 + \left[\frac{R(z)}{r} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \right] \quad (4.33)$$

Sendo assim pode-se obter $I^R(r, z)$ substituindo na equação 4.26, a

equação 4.24, a equação 4.25 e a equação 4.33, obtêm-se a equação abaixo:

Para determinar a intensidade detectada em várias posições da interface refletora e várias inclinações de espelho, variamos a posição z , o ângulo de rotação do espelho ϕ e integramos o fluxo sobre a imagem da superfície da ponta da fibra óptica. 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

Fig. 4.5 Resultados de simulação para fibras ópticas com diâmetro do núcleo de 50 μm (a) e 80 μm (b) 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).



Repetindo essa operação para toda a superfície da imagem da ponta da fibra óptica e somando-se os fluxos individuais, obtemos o fluxo total que incide sobre a superfície da imagem da ponta da 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

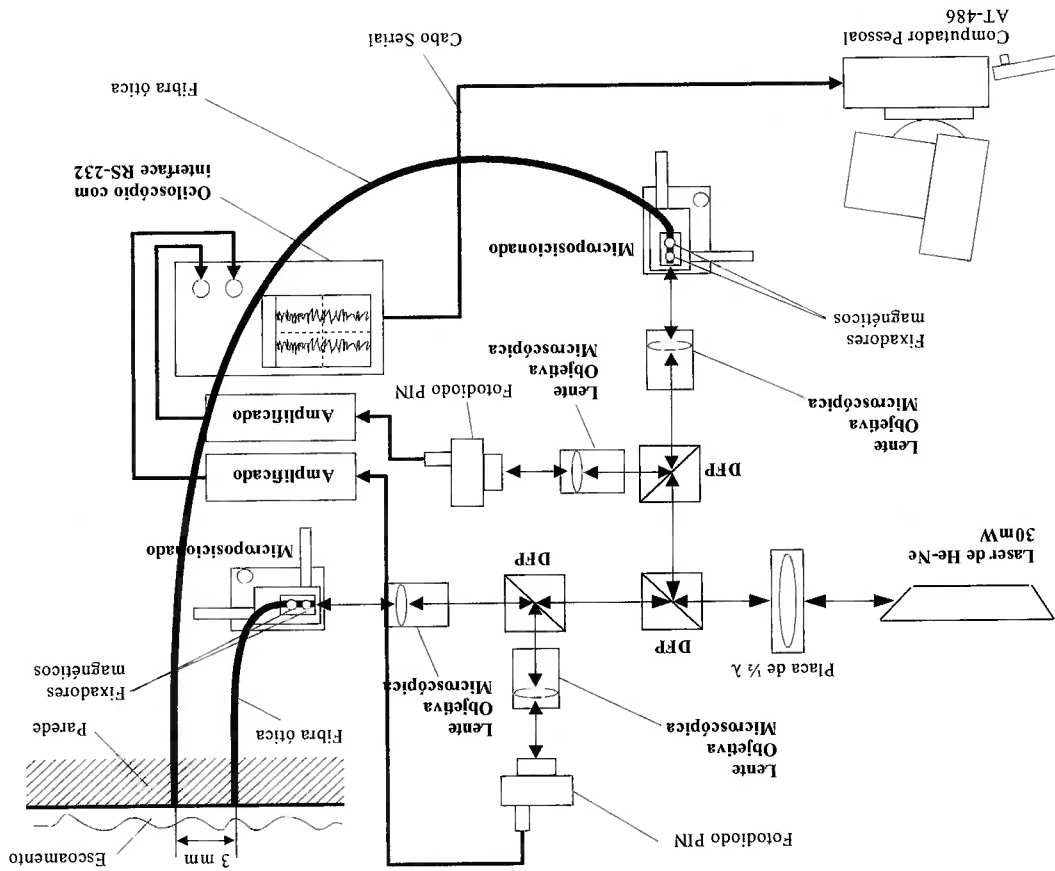
O equipamento óptico empregado para leitura de sinais de intensidade de laser foi construído a partir do circuito proposto por PACIFICO (2000). Esse esquema baseia-se em apenas uma fonte laser que tem seu feixe dividido em dois feixes secundários de intensidades aproximadamente iguais, através de um 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 anular propriamente dito, a instalação é rente à parede para não prejudicar o escoamento, pois a velocidade do escoamento reduz a influência do menisco na medição.

No escoamento anular propriamente dito, o laser sofre reflexão na interface e retorna pela fibra ao circuito óptico, onde é feita a leitura do sinal. Na figura 5.1 encontra-se o esquema óptico empregado.

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. A fonte laser de 30 mW é polarizada e é instalada com seu eixo óptico alinhado aproximadamente a 45° com a normal. O ajuste fino é feito com o polarizador que possui um ajuste rotativo de elevada precisão.

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.



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, os elementos ópticos foram aproximados com o objetivo de reduzir a perda de intensidade causada pela divergência do feixe laser.

O laser empregado é de Hélio-Nêônio (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 uma única fonte laser implicou na necessidade de dividir o feixe originário em dois por meio de uma placa de meia onda e um Divisor de Feixes Polarizador.

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 eletromagnético do laser 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 eletromagnético do laser 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 eletromagnético do laser 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 nm/°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 material 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 atraso de múltiplos de meio comprimento de onda, para apenas um único comprimento de onda específico.

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 θ na posição do eixo óptico ocasiona uma mudança de 2θ 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.

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 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.

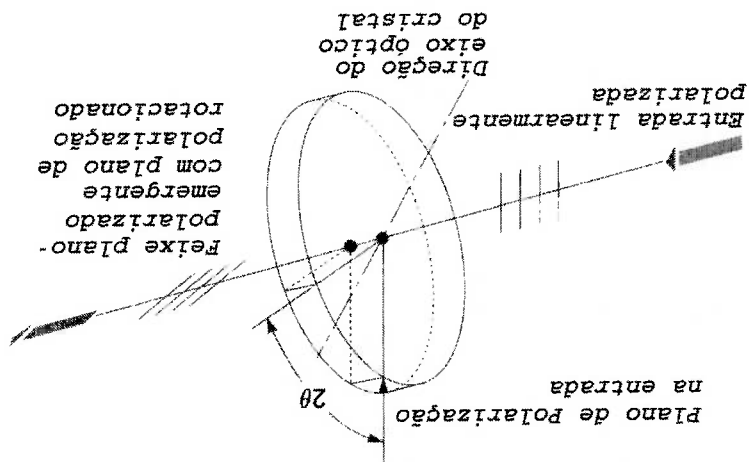


Fig. 5.2 Efeito da placa de meia onda em um feixe de luz monocromática. O plano de polarização é girado o dobro do ângulo de rotação da placa.

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 (ou ângulo de aceitação, ou ângulo de transmissão) 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.

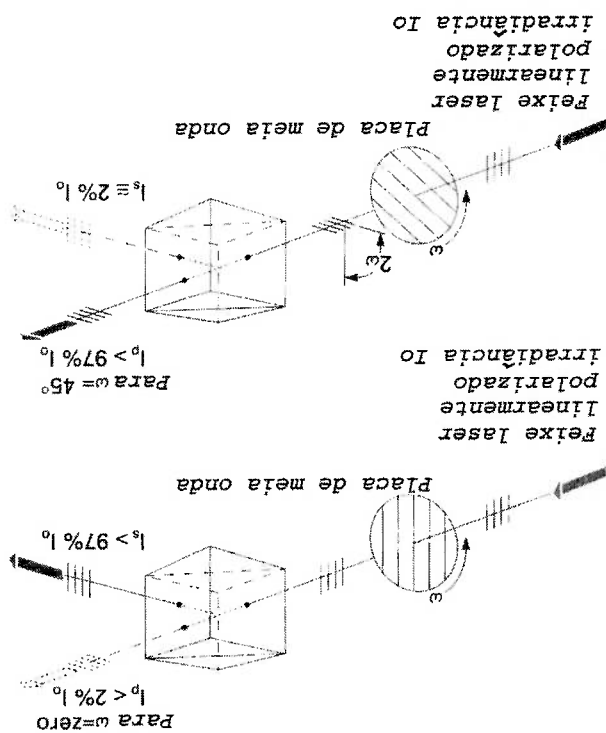
O detector de intensidade empregado consiste em um fotodiodo de silício montado em uma pequena câmara metálica, coberta por uma lâmina de vidro para proteção mecânica. Este componente é fabricado por processo de difusão controlada, de modo a exibir baixa corrente de fundo e grande linearidade de operação.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

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

entre a junção pn é de 5,5 pF e o tempo de resposta máximo é de 0,35 ns é de $2,2 \cdot 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$, a corrente de fundo máxima é de 1 nA, a capacitância 3,5 ns, a potência equivalente em ruído (NEP do inglês *Noise Equivalent Power*) A área ativa do fotodiodo é de 0,8 mm², o tempo de subida máximo é de as frequências que se pretende medir.

manter a coerência com as características operacionais do circuito óptico e com Na presente aplicação é desejável baixo tempo de resposta, de forma a

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.



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 este 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 possuem 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 restrito 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.

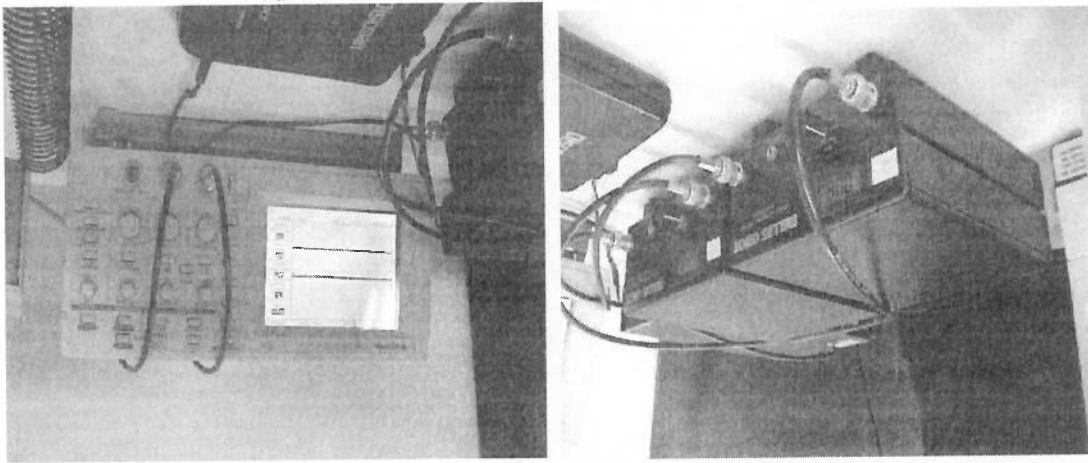
Os fotodiodos utilizados (fotodiodos PIN) operam em modo condutivo, como descrito anteriormente. Dessa forma, a leitura do sensor é feita pela variação da condutibilidade, medindo-se, portanto, a corrente. A corrente resultante de uma medição é baixa e precisa ser amplificada para que possa ser lida 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)
Fig. 5.4 Disposição dos amplificadores ao lado do osciloscópio, (a) osciloscópio, (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

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 com uma certa distância conhecida do fundo do canal. A fibra óptica é inserida no interior de

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

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

5.2.1 Canal metálico

propostos. que permitiu que fossem feitas modificações para realização dos ensaios inserir as fibras ópticas para calibração e ensaio. As laterais são parafusadas, o com dimensões com incertezas conhecidas, cujo fundo possui entradas para O canal instrumentado consiste em um recipiente metálico, construído pois deseja-se obter uma interface ondulante para testar o sistema. deverão ser destruídas para evitar a ocorrência de fenômenos de interferência, unidimensionais. Estas ondas transitam pela interface e no final do percurso ondas na interface é feita por um batedor projetado para criar ondas

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.

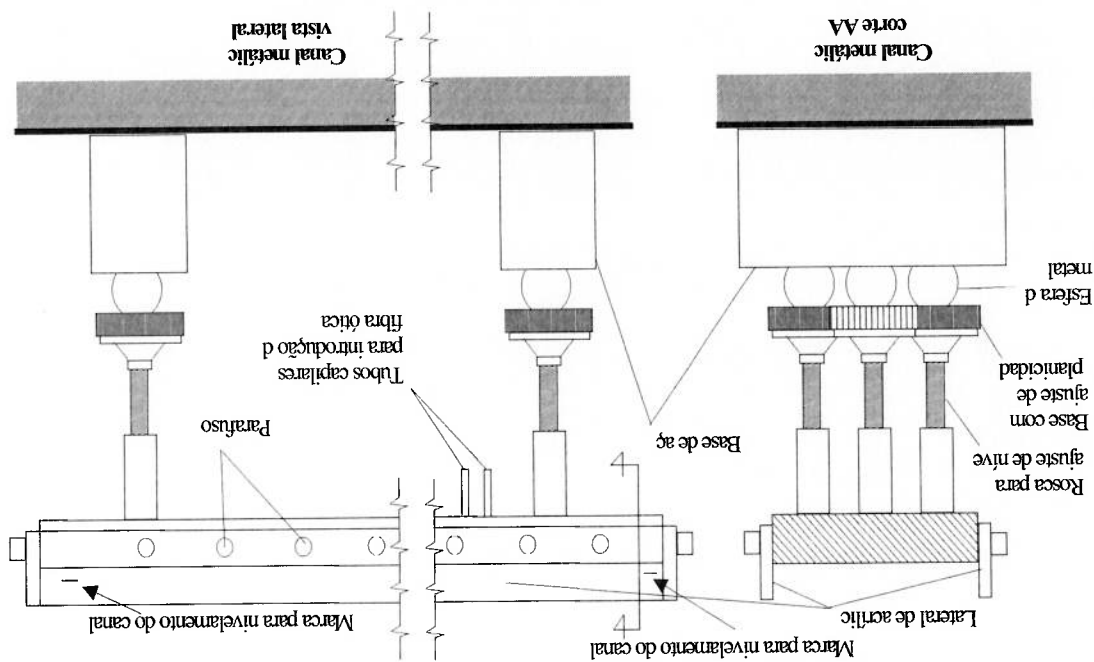


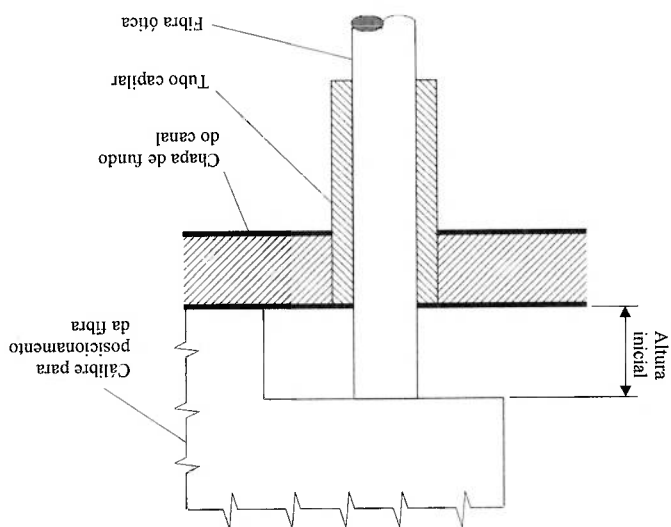
Fig. 5.5 Canal metálico em duas vistas. Os apoios são ajustáveis.

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 µm), devido à inclinação do canal, angular de posicionamento do canal.

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

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

Fig. 5.6 Esquema de posicionamento da fibra óptica no fundo 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:

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

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. Como o fole da máquina fotográfica pode ampliar a imagem das marcas até 36 vezes para facilitar a visualização e ajuste e com isso espera-se minimizar incerteza de posicionamento angular.

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.

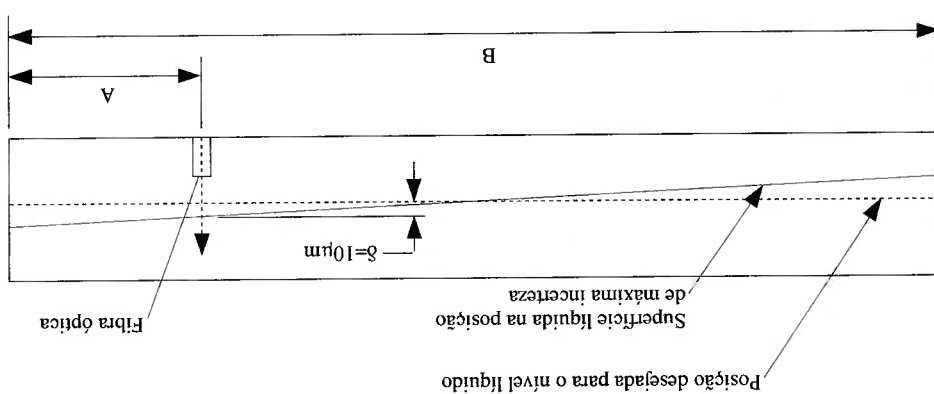
Para a água empregada no ensaio é necessário antes conhecer a densidade da mesma. Faz-se isso com um recipiente de volume conhecido tomando cuidado de eliminar bolhas de ar que ficam presas nas paredes do recipiente

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

calibração. Dentre os instrumentos disponíveis não foi possível obter uma incerteza de medição para este instrumento que não influencie a incerteza de instrumento de inserção do líquido. Dessa forma, deve ser escolhida uma conhecida, o único dispositivo que pode elevar a incerteza de calibração é o pela qualidade da calibração e, uma vez que as dimensões do canal já são Nesta alternativa, a incerteza do instrumento é diretamente responsável bureta. O que nos interessa é a sua incerteza.

adição do líquido. Este instrumento pode ser uma pipeta, um becker ou uma A segunda forma requer a utilização de um instrumento graduado para a

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



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:

$$h_{filme} = h_{liquido} - h_{calibre} \quad (5.2)$$

A incerteza da altura do filme líquido é dada por:

$$\delta h_{filme} = \delta h_{liquido} + \delta h_{calibre} \quad (5.3)$$

A altura do líquido é dada por:

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

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:

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

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:

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

Substituindo a equação 5.5 na equação 5.3 obtém-se:

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

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:

$$V_{\text{líquido}} = \frac{d}{m_{\text{líquido}}} \quad (5.9)$$

onde $m_{\text{líquido}}$ é a massa de líquido medida adicionada no canal e d é a

densidade da água utilizada no ensaio obtida antes por:

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

A incerteza da densidade é dada por:

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

Essa medição da densidade é feita com um becker de 100 ml ($V_{100\text{ml}}$)

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 ($\delta V_{100\text{ml}}$). A

incerteza da balança é de 0,0005 ml ($\delta m_{100\text{ml}}$). Calculando a incerteza da

densidade obtemos um valor de 5 kg/m³.

A incerteza do volume de líquido adicionado no canal por meio de adição

de massa é dada por:

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

Calculando a incerteza do volume de líquido que foi colocado no canal

pela fórmula 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. Introdúz-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. Procede-se várias vezes da mesma forma até que sejam levantados dados suficientes para que tenhamos uma curva de tensão por espessura.

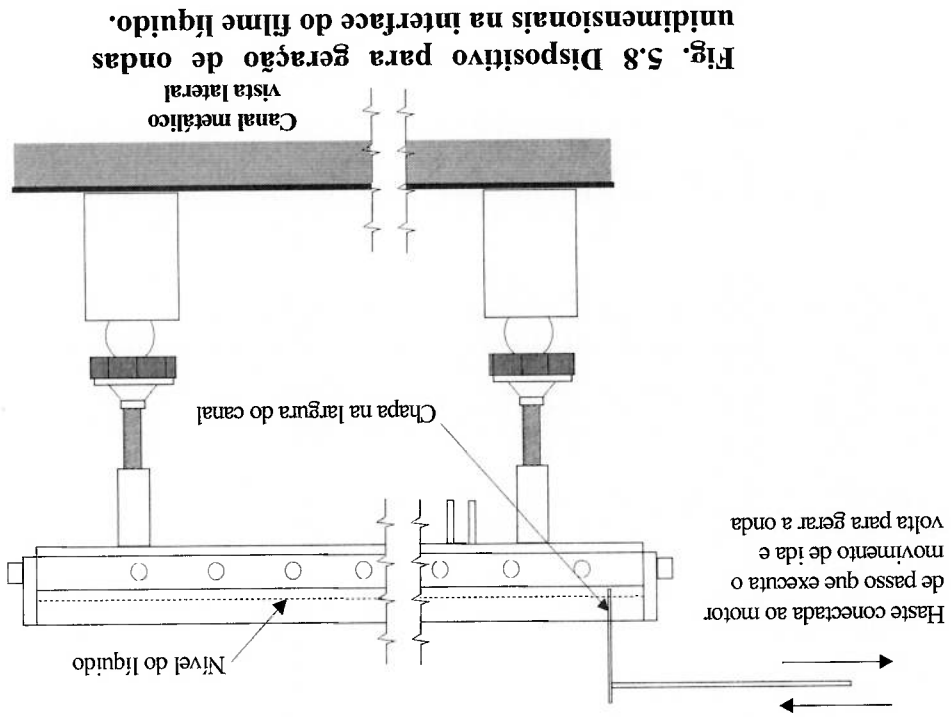
A análise do sinal do osciloscópio fornece a média da tensão e a incerteza do sinal obtida do desvio padrão calculado da amostra. A incerteza da espessura do líquido é obtida conforme mostrado nas equações 5.2 a 5.12.

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.



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 câmara instalada na lateral do canal e sua forma e frequência não necessitam ser excessivamente controladas.

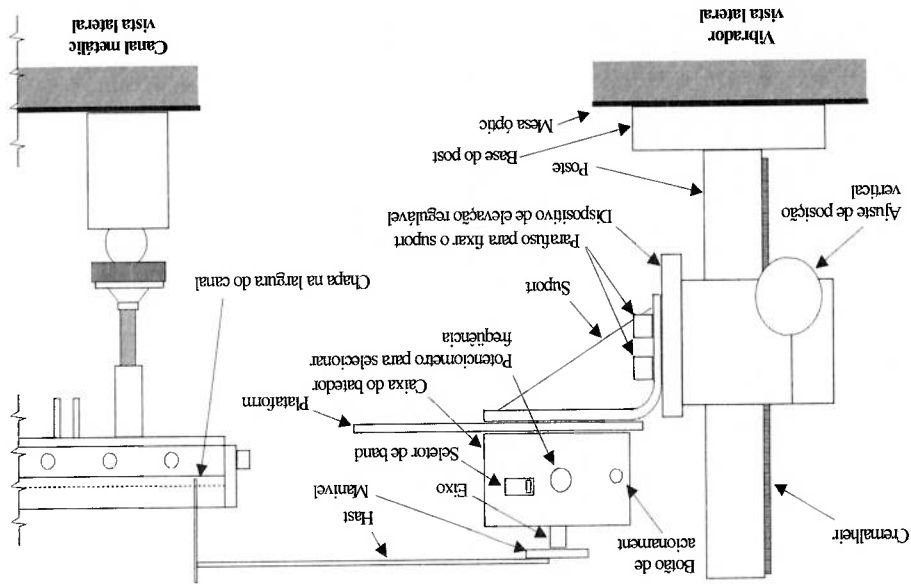


Fig. 5.9 Dispositivo para geração de ondas unidimensionais na interface do filme líquido.

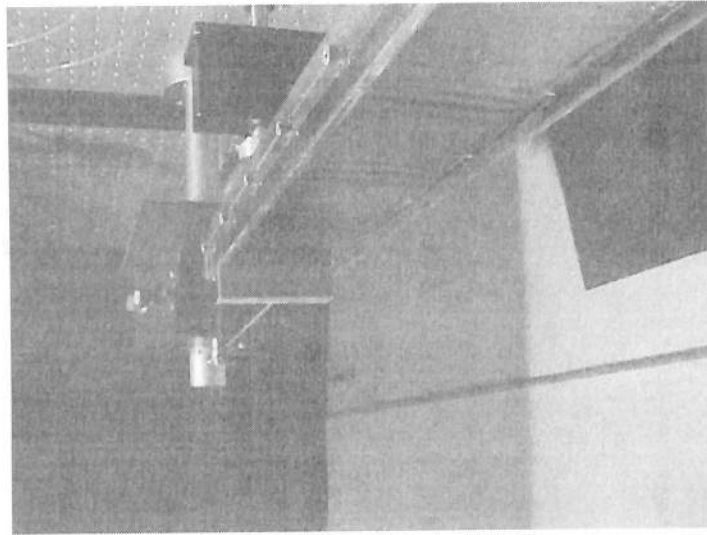


Fig. 5.10 Ondas geradas no canal.

Para as ondas serem registradas na lateral do canal por uma câmara 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° a 20° 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.

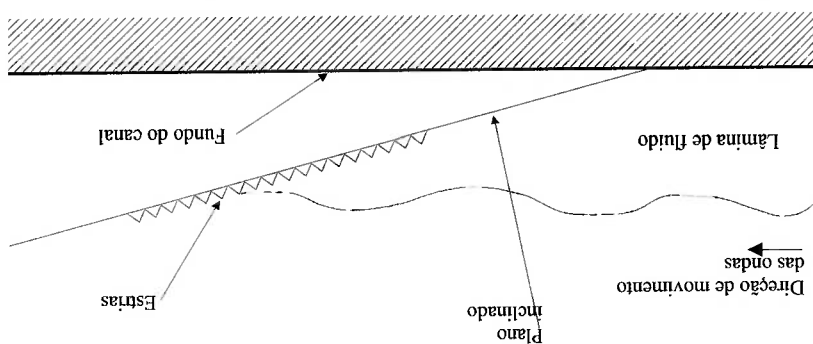
motor drives permitem que o sistema fotográfico seja disparado a 10 quadros por à velocidade dos *motor drives* que poderiam ser empregados para isso. Esses é que tal sistema não pode realizar leituras dinâmicas em frequências superiores respeito à velocidade de exposição, que situa-se por volta de 1/1000 s. A segunda A utilização de fotografia possui várias restrições. A primeira delas diz

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

5.3 Equipamento Fotográfico

dispositivo tenha sido construído e testado, não foi utilizado. interferindo pouco com as ondas que eram geradas. Dessa forma, embora esse No entanto, observou-se que a reflexão no final do canal era pequena

Fig. 5.11 Dispositivo para destruição de ondas.



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

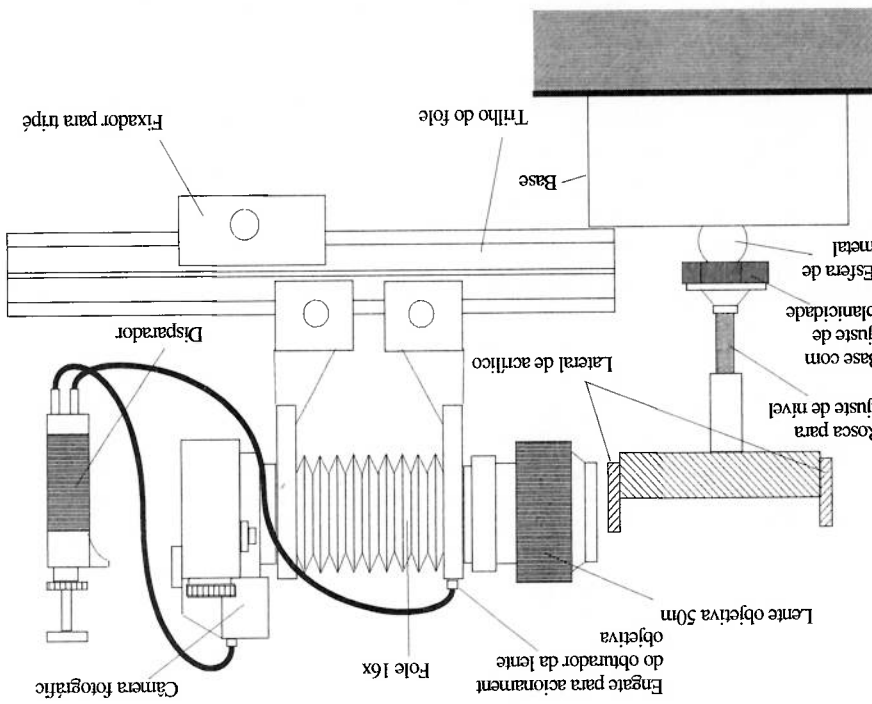
elimina o fundo, facilitando o processamento da imagem no computador. Optou-se por grande abertura de diafragma pois esta, a princípio, de diafragma para registrar a imagem, sendo que, à medida que aumentamos a abertura, o campo focal é sensivelmente reduzido, prejudicando a definição da imagem. Sendo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

ampliação suficiente para que a imagem seja fotografada, digitalizada e pode ser observado em esquema na figura 5.12. Tal sistema fornece uma que permite que a imagem do alvo seja ampliada em até 32x. Esse dispositivo aplicação. Tal ampliação é obtida por meio de um acessório denominado fole, óptico para fotografar o filme líquido, o que chega a ser satisfatório para essa A terceira restrição diz respeito à capacidade de ampliação do sistema experimento em questão.

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

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

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.



satisfatoriamente.

mas o uso prático revela que o problema ainda não foi solucionado dizer que novas tecnologias foram desenvolvidas para solucionar esse problema, da imagem fica grande. Os fabricantes de películas fotográficas insistem em área muito grande. A definição da fotografia fica prejudicada, pois a granulação

multo 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

câmara a aproximadamente 1,5 m de distância e apontada para a câmara. 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.

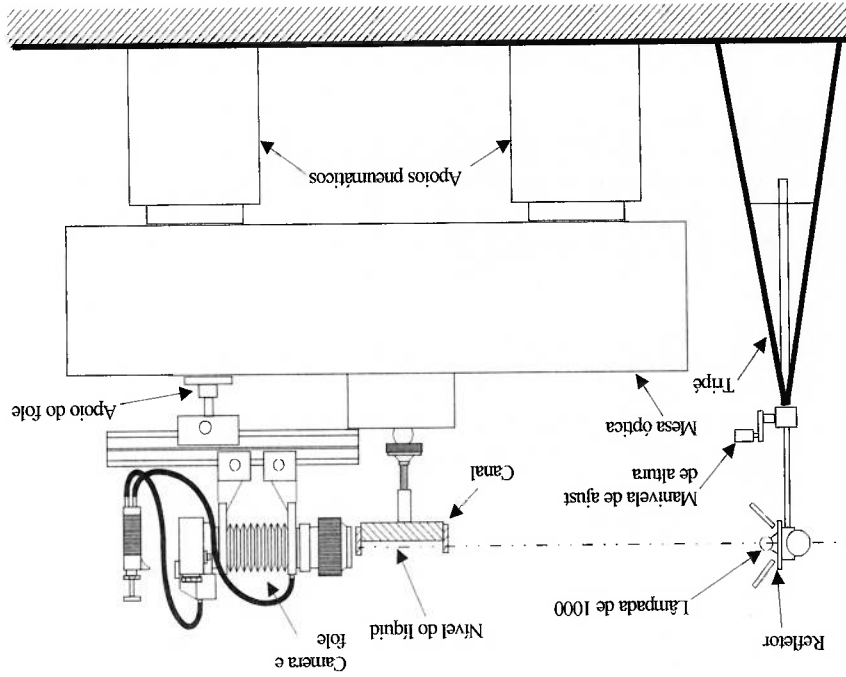


Fig. 5.13 Iluminação permitiu a utilização de filme de baixa sensibilidade, proporcionando alta resolução e baixo tempo de exposição.

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.

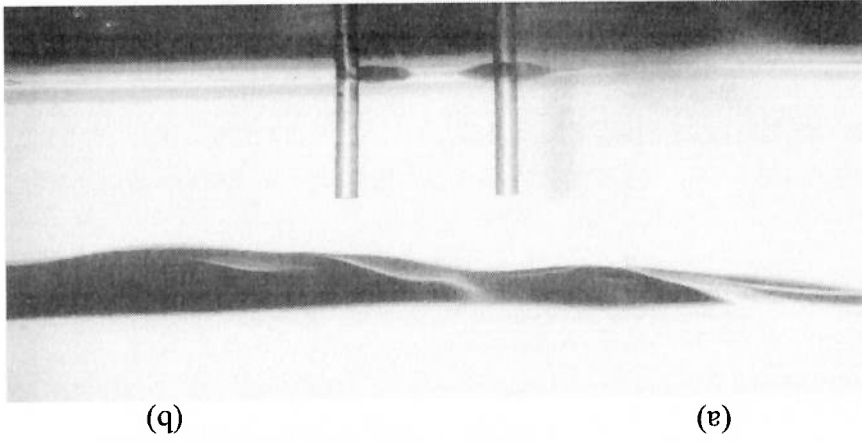
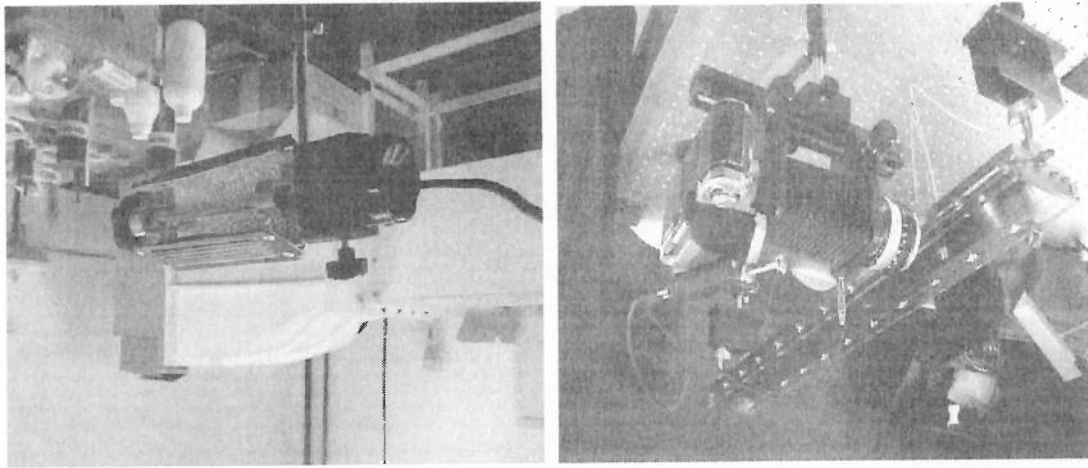


Fig. 5.14 Fotos mostram a montagem do sistema fotográfico sobre a mesa (a), a lâmpada de 1000 W empregada (b) e uma foto demonstrando o resultado desse esquema (c).

5.4 Instrumentos de medição

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

alterasse a densidade do fluido. utilizar sempre água do mesmo recipiente para evitar contaminação que que foi determinada a densidade do fluido (água) e tomou-se o cuidado de A temperatura externa manteve-se sempre próxima da temperatura em especiais foram tomados para evitar a influências dessas fontes de incerteza. poeira do ambiente que se depositam sobre o prato da balança. Cuidados incerteza, a contribuição de resíduos externos, como a gordura da mão e a do recipiente utilizado para adicionar líquido. Há também, no caso desse tipo de A adição de fluido no canal foi determinada através da variação da massa com sua incerteza combinada avaliada.

O volume foi obtido utilizando-se a densidade anteriormente determinada, no que se refere à massa. obtenção de incertezas padronizadas combinadas de medição muito pequenas com os outros instrumentos de medição empregados. Isso possibilitou a A balança empregada possui incerteza bem inferior quando comparada determinada, e após isso todas as medidas foram feitas com base na massa. se medir o volume indiretamente através da massa. A densidade do líquido foi Devido à alta imprecisão dos instrumentos de medição de volume, decidiu-

5.4.1 Medição do volume através da massa

mm).

O comprimento foi medido com paquímetro de incerteza conhecida (0,02 casas decimais (incerteza de 0,00005 g). No caso da massa, utilizou-se uma balança de laboratório com quatro

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.

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. A figura 6.1 mostra duas curvas de aquecimento do canal a laser levantadas em dias diferentes. Pode ser observado que as duas estabilizam-se em pontos diferentes.

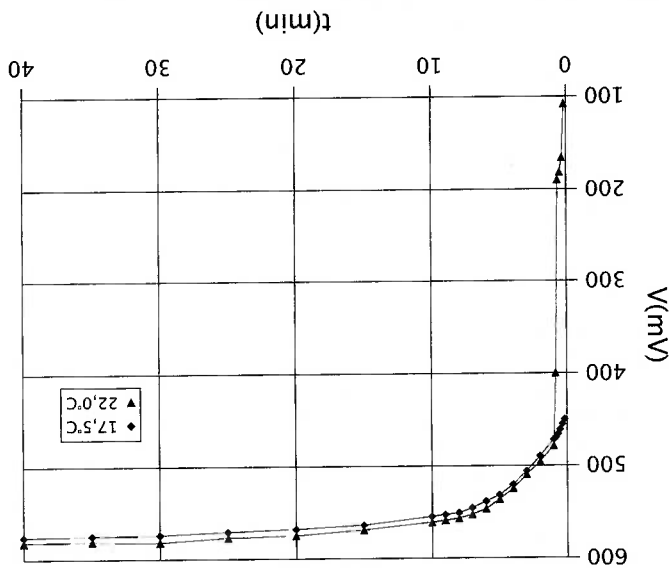
6 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

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

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

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

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.



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.

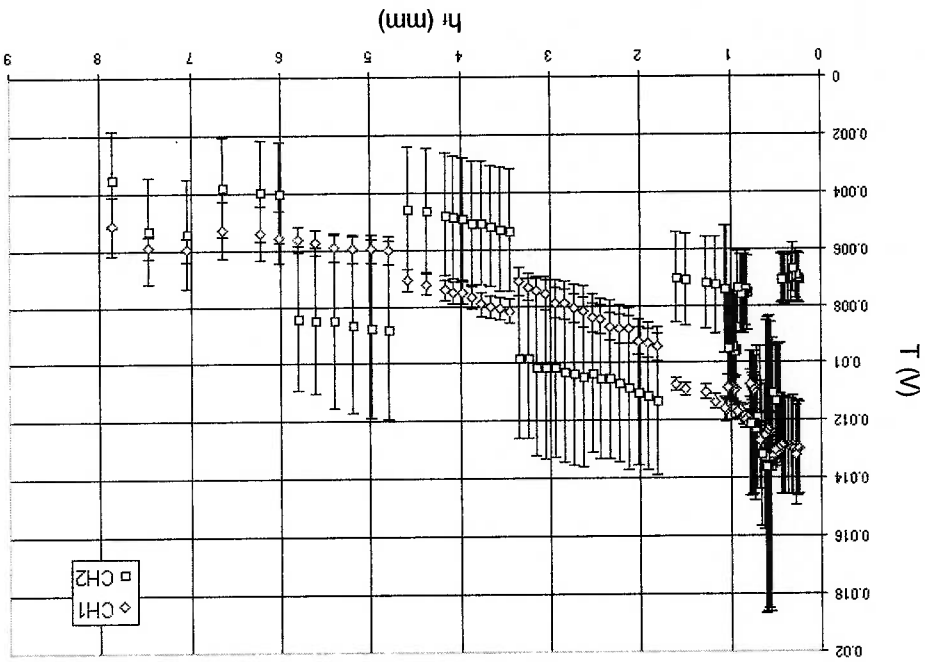


Fig. 6.2 Valores diferentes de ajuste (*offset*) levam a faixas de pontos em diferentes curvas de calibração. O auto-ajuste do osciloscópio não pode ser utilizado para o levantamento da curva de calibração.

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 minimizando-se a incerteza de posicionamento angular, 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.

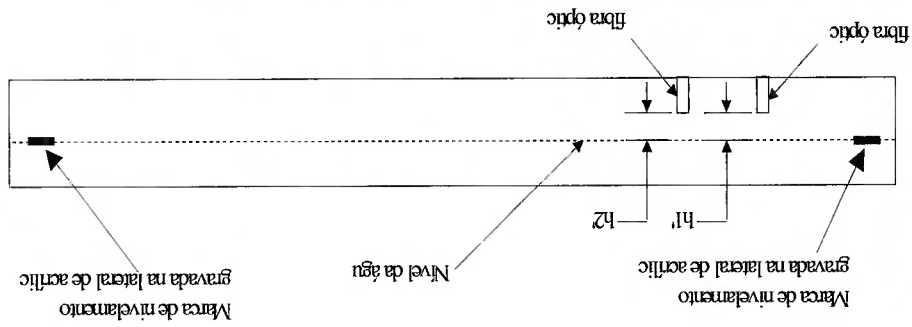


Fig. 6.3 Corte longitudinal: esquema de nivelamento do canal utilizando duas fibras.

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.

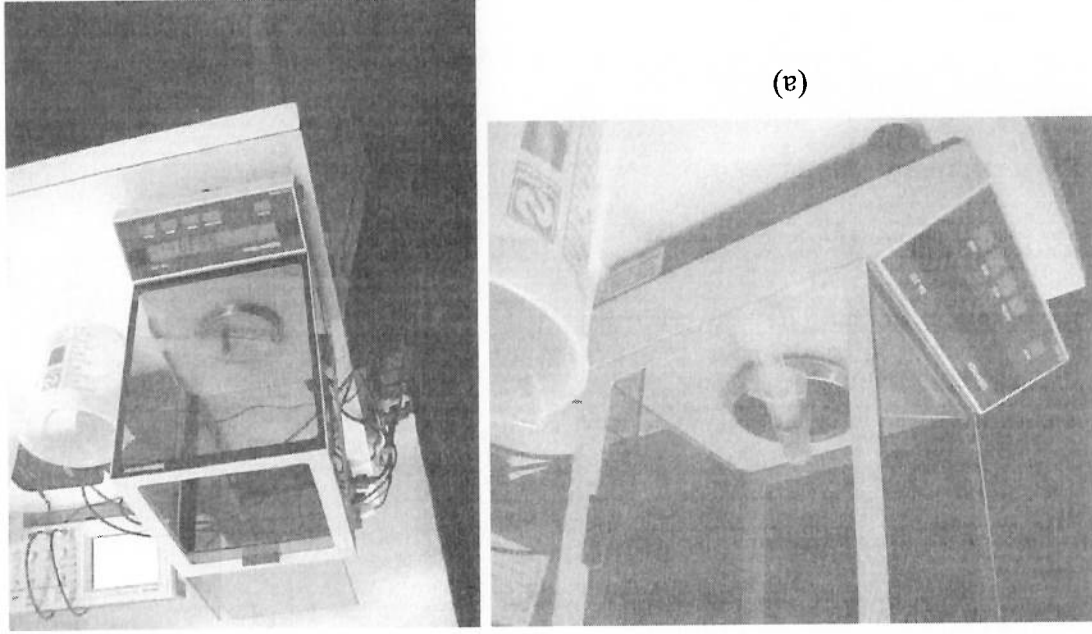


Fig. 6.4 Instrumento de adição de líquido sendo pesado cheio, (a) vista superior da balança e (b) vista do prato da balança.

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, minimizando a 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:

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

6.4 Observações preliminares

Tab. 6.1 Pontos levantados durante as rotinas experimentais.

(*) Os índices F4, F6 e F8 representam marcas na escala do potenciómetro 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.

Volume Aproximado (ml)	Frequências (*)	Amostra com 1 ms (arquivo de dados)	Amostra com 0,1 ms (arquivo de dados)	Fotos (arquivo fotográfico)
280	F8	280f8f.nbk	280f8v.nbk	28.jpg
	F6	280f6f.nbk	280f6v.nbk	22.jpg
	F4	280f4f.nbk	280f4v.nbk	20.jpg
260	F8	260f8f.nbk	260f8v.nbk	
	F6	260f6f.nbk	260f6v.nbk	
	F4	260f4f.nbk	260f4v.nbk	
240	F8	240f8f.nbk	240f8v.nbk	18.jpg
	F6	240f6f.nbk	240f6v.nbk	14.jpg
	F4	240f4f.nbk	240f4v.nbk	11.jpg
220	F8	220f8f.nbk	220f8v.nbk	
	F6	220f6f.nbk	220f6v.nbk	
	F4	220f4f.nbk	220f4v.nbk	
200	F8	200f8f.nbk	200f8v.nbk	8.jpg
	F6	200f6f.nbk	200f6v.nbk	5.jpg
	F4	200f4f.nbk	200f4v.nbk	2.jpg

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.

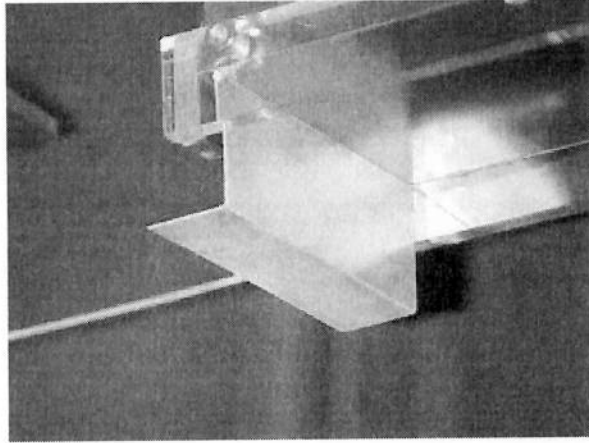


Fig. 6.5 Levantar a haste para preencher o compartimento atrás da chapa.

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, 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

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

no cálculo da incerteza de cada medida.

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

boa aproximação, a espessura do filme.

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

obtenção da velocidade da onda.

0,0001 segundos (25/250 ms) entre amostras para leitura de sinais destinados à amostras para a leitura de sinais destinados a obtenção de frequência da onda e vezes. Dessa forma, utilizou-se 0,001 segundos (250/250 ms) de intervalo entre uma amostra e outra. Optou-se por reduzir o intervalo de amostragem em dez

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.

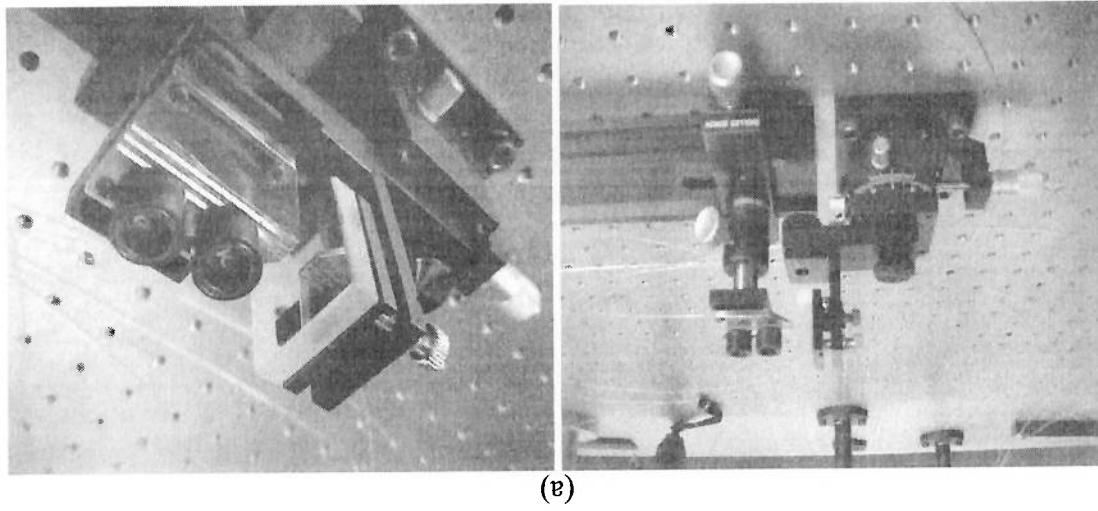
O procedimento experimental empregado foi simples. Inicialmente a ponta da fibra foi encostada no espelho e foi medida a intensidade no osciloscópio. Cuidados foram tomados para que a fibra óptica ficasse perfeitamente encostada no espelho e não sofresse nenhum tipo de flexão na ponta que introduzisse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

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

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).



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

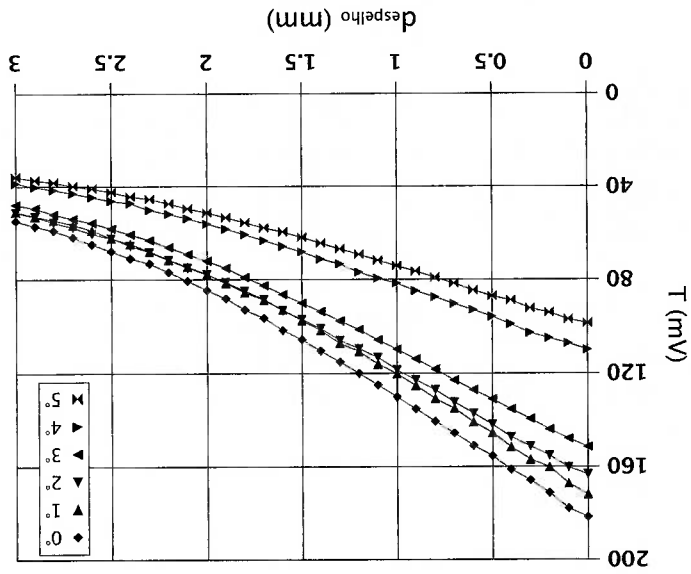
signal e facilitam a leitura. Como esses ruídos são de alta frequência, um filtro de

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 gonímetro 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.

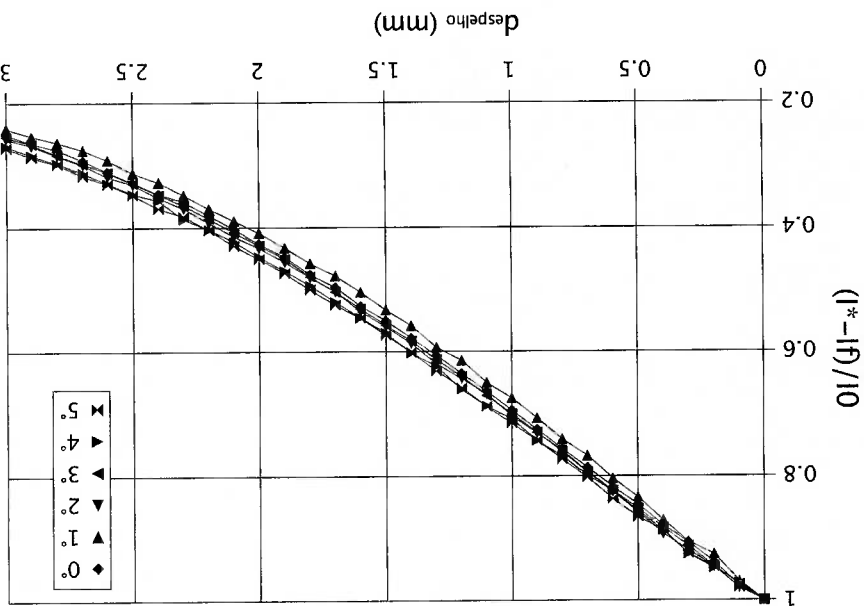


Fig. 7.3 Intensidade subtraída do sinal de fundo e adimensionalizada.

Notam-se discrepâncias com relação às curvas observadas em OHBA *et al.* (1992) que utilizou o mesmo procedimento porém com fibras ópticas de menor diâmetro (50 µm e 80 µm).

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 consequentemente detectará maiores intensidade para cada ponto da curva. O fato do material dessa fibra empregada no presente estudo (acrílico) ser diferente da fibra utilizada por OHBA *et. al.* (1992) (vidro) também contribui, pois cada tipo de fibra óptica é construída com materiais diferentes e portanto possuem aberturas numéricas distintas. No caso específico da fibra empregada na montagem experimental proposta, a abertura numérica é bem maior que a da fibra utilizada por OHBA *et. al.* (1992).

Outro fator que pode influenciar o resultado é a característica de atenuação que para a fibra óptica de acrílico é maior que para a de vidro.

Embora os resultados não sejam os mesmos, observa-se na figura 7.2 que as primeiras curvas da figura 7.2 (0° e 1°) são muito próximas. Levando-se em conta a incerteza final de medição, pode-se afirmar que estas fibras com grandes aberturas numéricas trabalhando com feixes laser com grandes ângulos de abertura, possuem, para pequenos ângulos de inclinação da superfície, reduzida variação de sinal. Esta pequena variação de sinal implica que pequeno erros angulares de instalação não afetam significativamente o resultado de medição.

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 deixar “vazar” muita o luz de 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 7.2, 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°, a fibra de acrílico possui uma abertura de feixe de 23,16° (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).

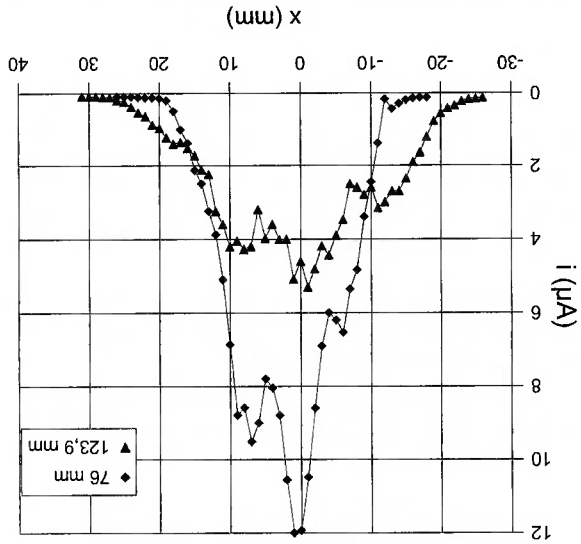


Fig. 7.4 Distribuição de intensidade no feixe emergente da fibra óptica de acrílico. São mostradas duas curvas, a primeira com 76 mm de distanciamento do fotodiodo e a segunda com 123,9 mm.

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-Metacrilato 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 μm , sendo que o diâmetro total com casca é de 750 μm . Na figura 4.5 observa-se que quanto maior o diâmetro da fibra óptica mais as curvas se aproximam da diagonal do gráfico. Sendo assim comparando o resultado de simulação da figura 7.5 com o da figura 7.3, a fibra óptica utilizada se comporta como se possuísse um diâmetro de núcleo muito maior do que possui.

No caso de se empregar fibras ópticas com aberturas numéricas menores e

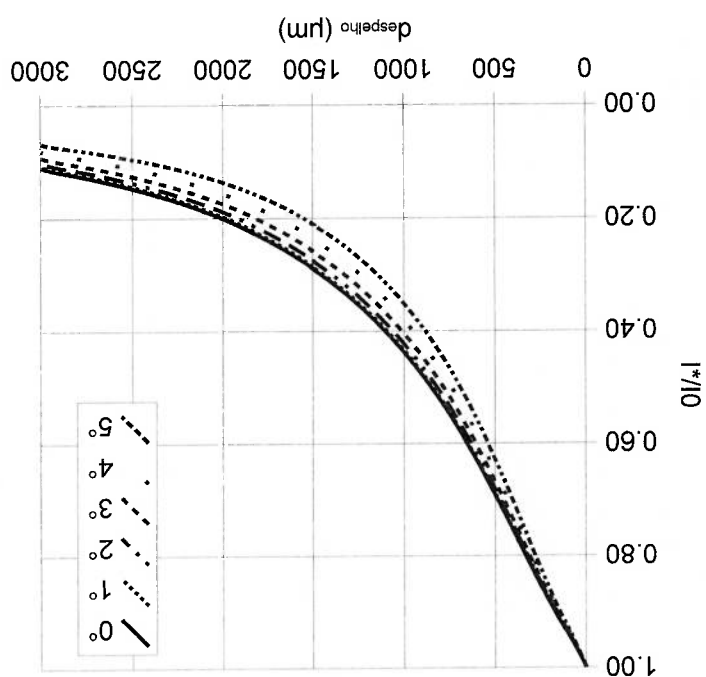
(2000).

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

sendo muito tolerante a estes erros.

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

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



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 de núcleo e grande abertura numérica possibilitam que a curva de calibração forneça a medida de espessura para pequenos ângulos de variação em torno da interface paralela a ponta da fibra óptica (ângulos inferiores a 1°). 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 de intensidade do meio devido à absorção e à redução de intensidade devido à abertura do feixe laser de distribuição de intensidade gaussiana 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 a 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

Pode-se notar no gráfico da figura 7.6, observando-se os primeiros três calibração (figura 7.6).

intensidade, conforme pode-se observar no gráfico obtido após o processo de menisco na ponta da fibra óptica, resultando em um sobresalto na curva de elevado muito além da altura da ponta da fibra óptica, observou-se formação de Nos pontos iniciais de calibração enquanto o nível ainda não havia se calibração.

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

adição de fluido antes e depois forneceram a massa adicionada que seria usada A calibração foi feita por adição de líquido. As pesagens do instrumento de

7.2 Dados de calibração do sistema

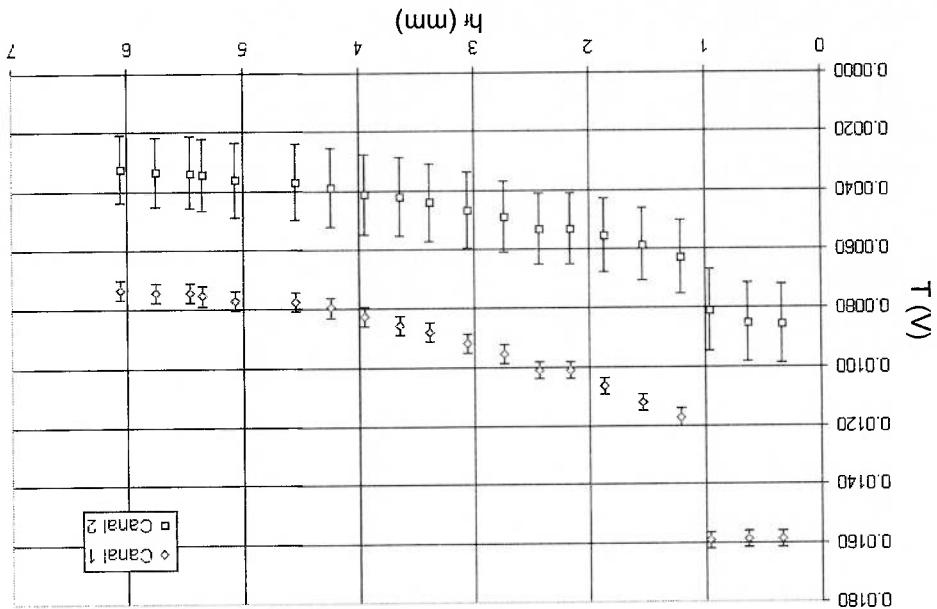
abertura do feixe laser explicam as diferenças entre o cálculo e a medição. utilização de fibra óptica de acrílico e a redução de intensidade devido a Dessa forma, os efeitos de alta atenuação na água, a atenuação devido a dissolvida.

campo eletromagnético que o ar que contém quantidade reduzida de água uma vez que a água é um composto polar e deve interagir muito mais com o adimensionais, devem mostrar características de atenuação muito maiores, claramente a interação da radiação propagando nesse meio. Essas, uma vez

Como observado a curva de calibração medida não segue a lei de Beer-Lambert. 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

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.

Fig. 7.6 Pontos de calibração obtidos.

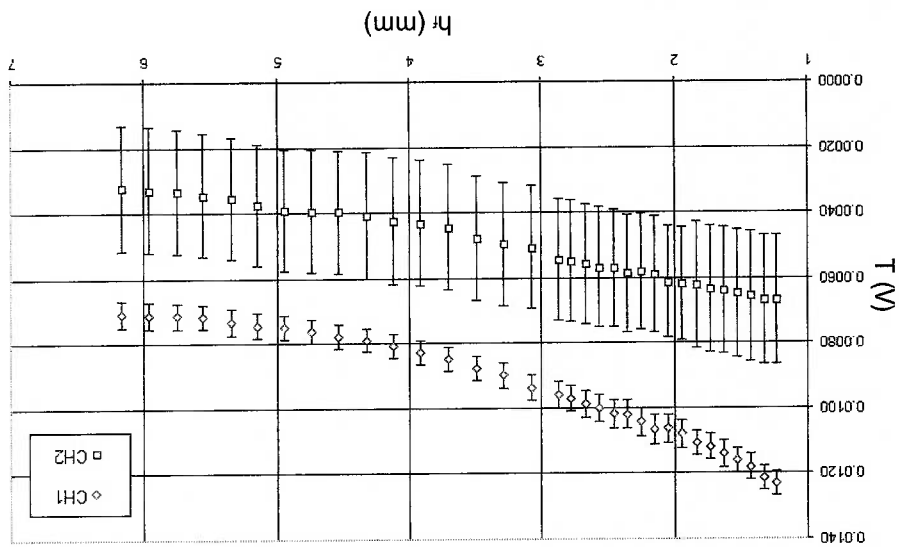


Os pontos, que estes possuem uma resposta em tensão que apresenta uma tendência diferente do restante da curva. Nestes pontos a intensidade refletida pela ponta da fibra é muito maior do que com ela imersa na água, pois as condições de acoplamento óptico mudam, uma vez que a água possui um coeficiente de refração diferente do ar (maior), o ângulo de abertura numérica da fibra também sofre alteração.

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 (apresentou baixa sensibilidade mesmo quando ligado a fibra óptica instalada no canal 1), que apresentou sensibilidade menor comparada com o canal 1. Este fato foi comprovado em experimento com os canais trocados.

Como mencionado-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

Fig. 7.7 Pontos de calibração usados.



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:

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).

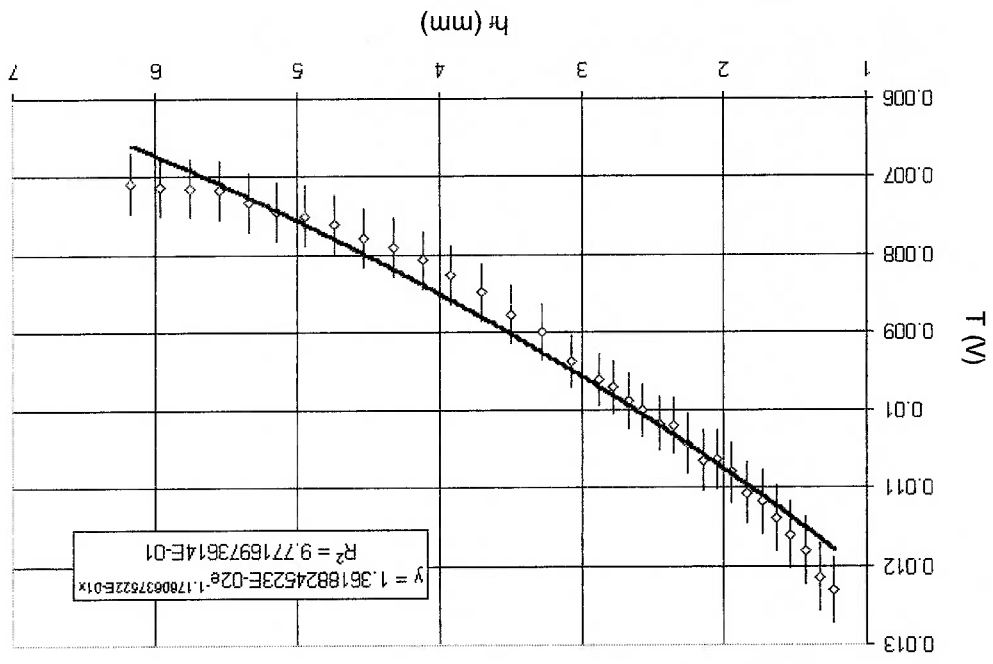


Fig. 7.8 Curva de calibração ajustada usando função exponencial.

Como o meio em questão é a água a atenuação é relevante. Por outro lado a redução de intensidade devido a abertura geométrica do feixe é relevante também. 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.

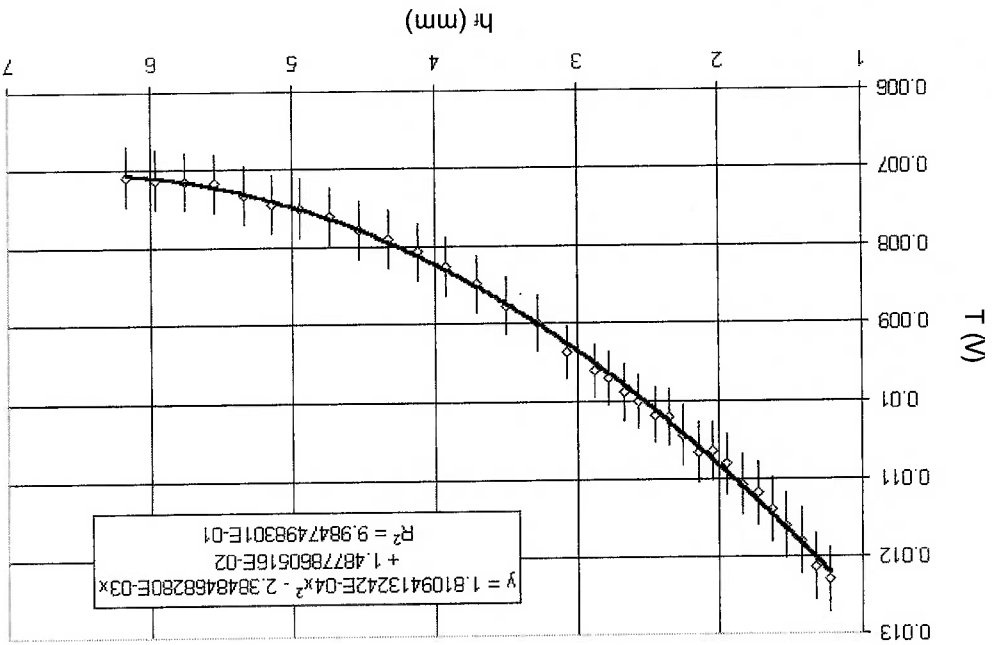


Fig. 7.9 Curva de calibração ajustada com polinômio do segundo grau.

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

Beer-Lambert e demonstra uma melhor aproximação para o fenômeno pontos de calibração melhor que o feito utilizando a forma matemática da lei de

estudado.

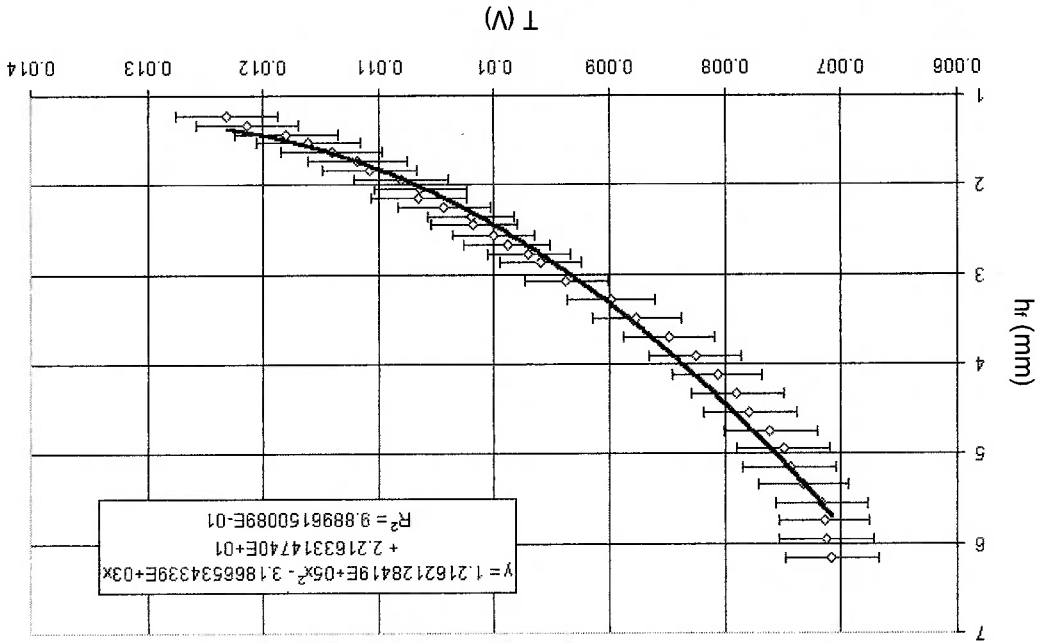


Fig. 7.10 Ajuste com polinômio de segundo grau para determinar a espessura em função do sinal.

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, obtêm-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 de 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 de sexto grau é possível aproximar os pontos experimentais com menor incerteza, como pode ser observado na figura 7.11.

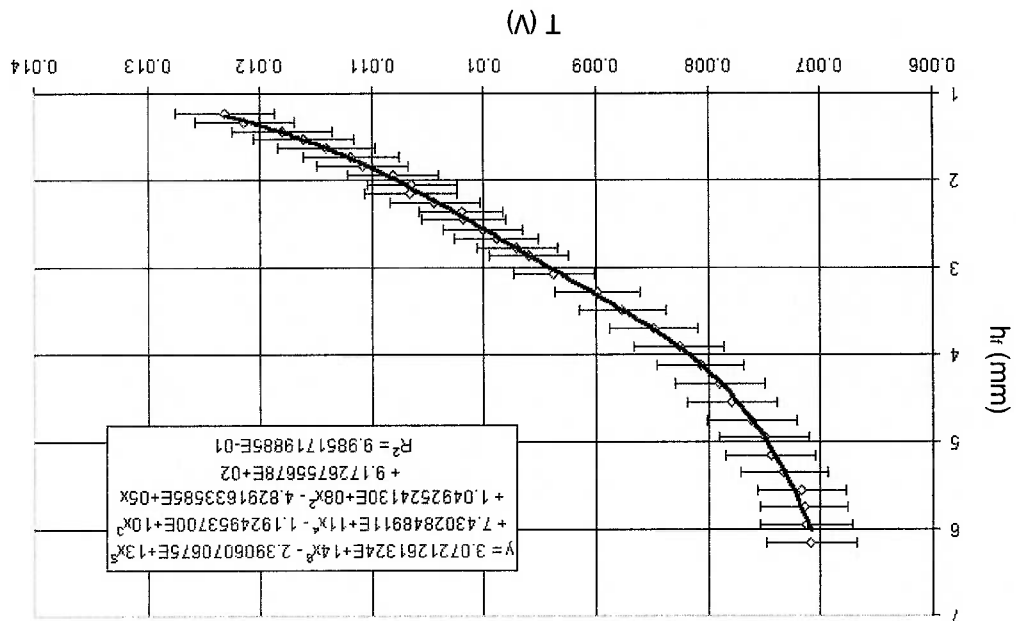


Fig. 7.11 Ajuste com polinômio de sexto grau para determinar a espessura em função do sinal.

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 possui ruído característico. 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.

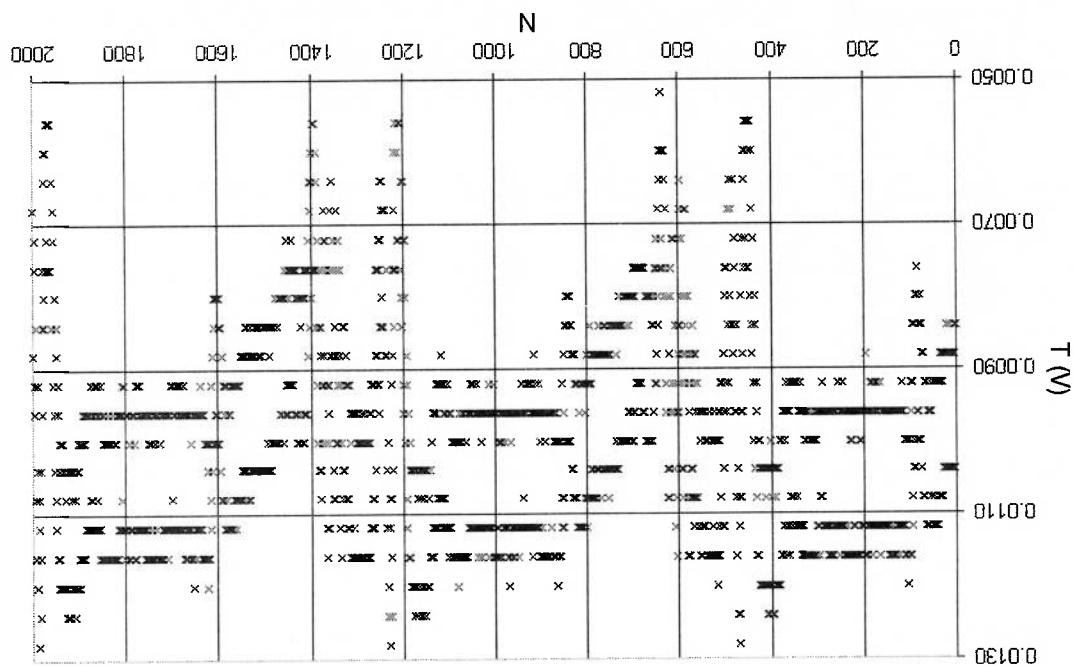


Fig. 7.12 Corte e saturação dos vários níveis de tensão registrados no canal 1 do osciloscópio.

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 média 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.

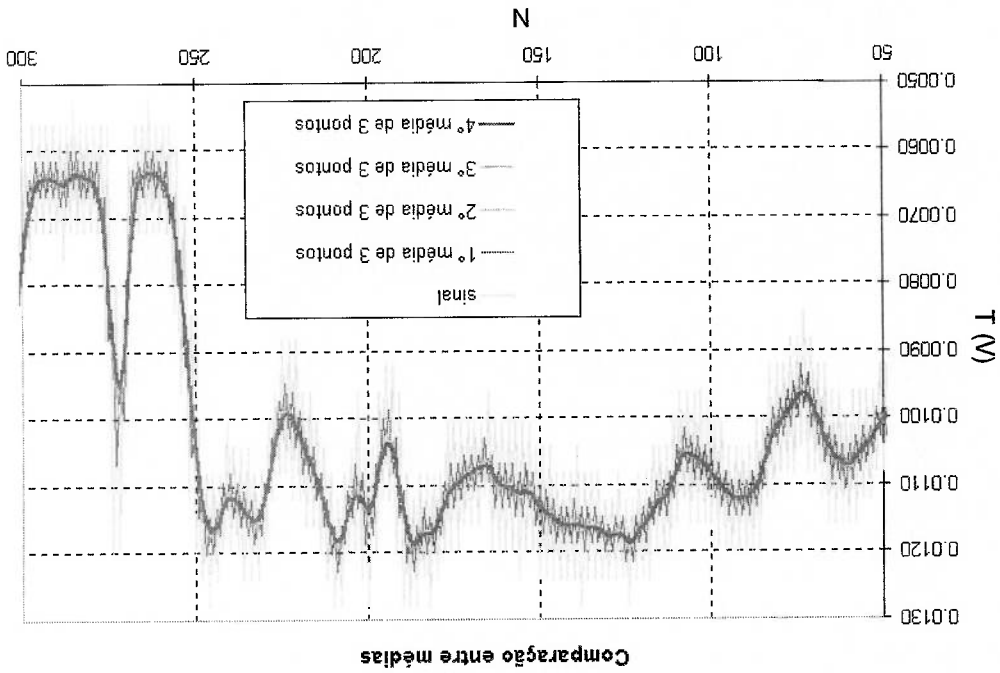


Fig. 7.13 Gráfico do sinal filtrado com várias médias de três pontos aplicada sobre a conjunto de pontos várias vezes.

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° 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.

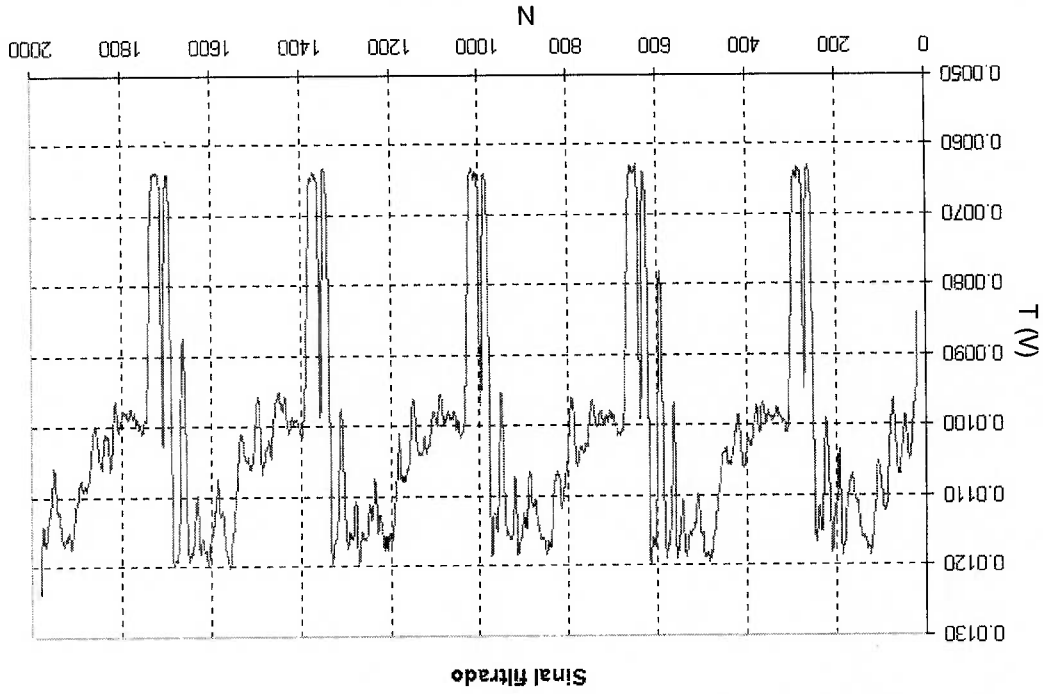
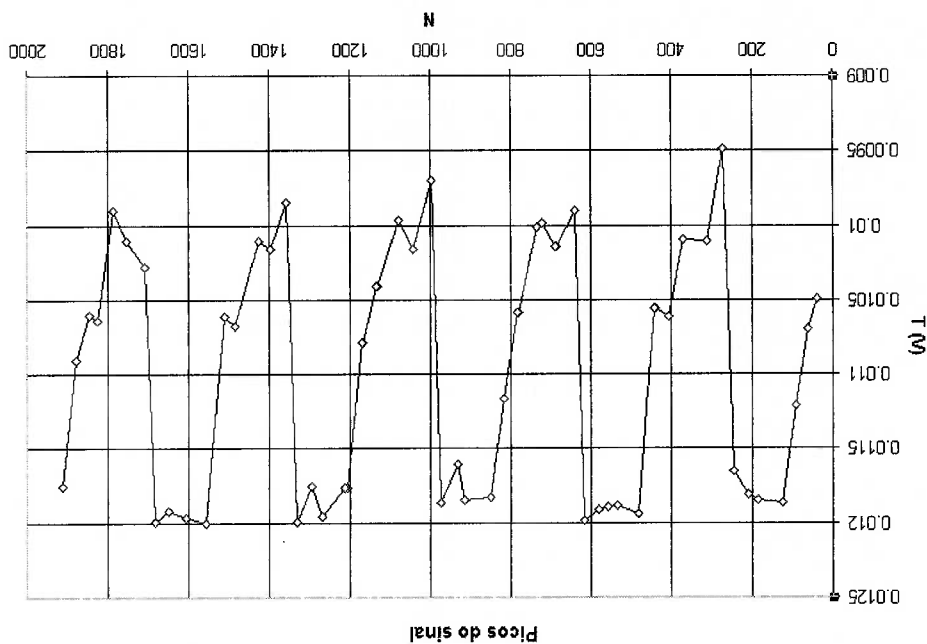


Fig. 7.14 Gráfico do sinal filtrado com média de três pontos aplicada quatro vezes ao sinal amostrado.

O que será feito será a procura de todos os picos no sinal, pois quando a interface é paralela à ponta da fibra, estaremos na mesma condição de calibração e o sinal medido pode ser associado a espessura de filme. 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, uma vez filtrados resultariam em um retrato das máxima e mínima espessuras durante o

Fig. 7.15 Gráfico mostrando os picos de tensão extraídos do sinal suavizados.



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, pois o sinal é maior quando a interface maximiza a reflexão para a fibra óptica e isso somente ocorre quando a interface esta paralela a superfície da fibra óptica.

experimento.

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.

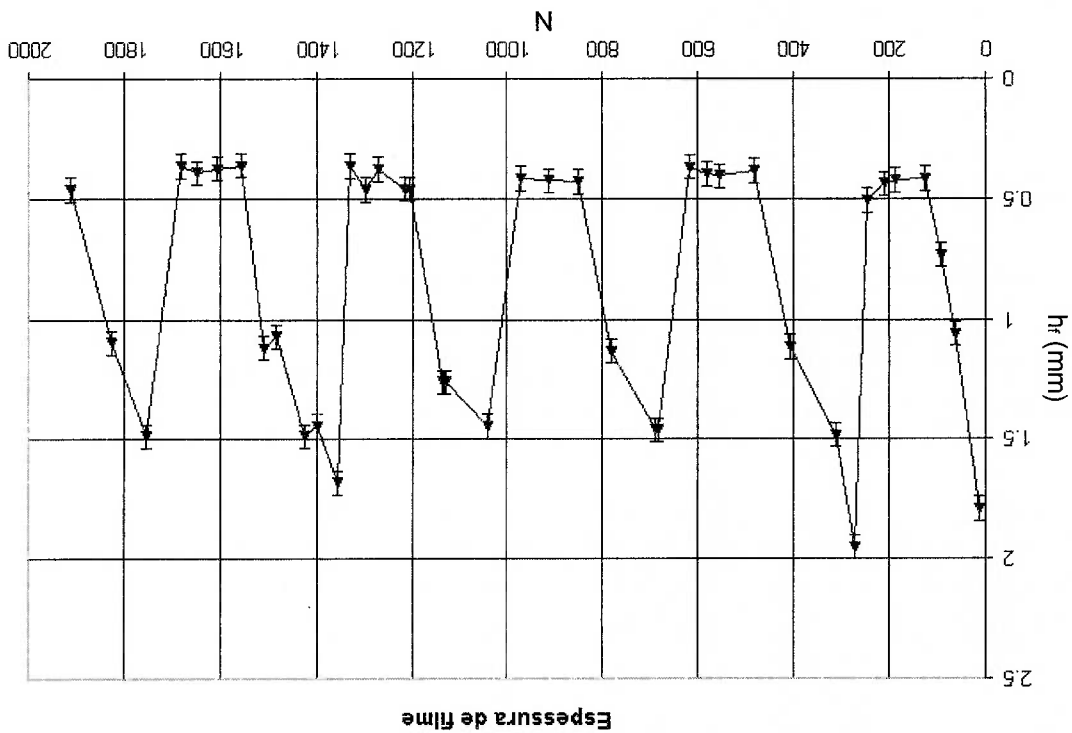
Como os picos de sinal estão espaçados por uma distância média de 40 pontos, escolhendo vinte pontos de cada lado, não corremos o risco de coincidir um pico de interesse com outro e deixar de separar picos importantes para a análise. A figura 7.15 mostra um gráfico de espessuras obtidos após a rotina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

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 trafege da esquerda para a direita, no referencial da foto. Observando-se a figura 7.17, a fibra óptica da direita 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,

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

7.4 Dados fotográficos

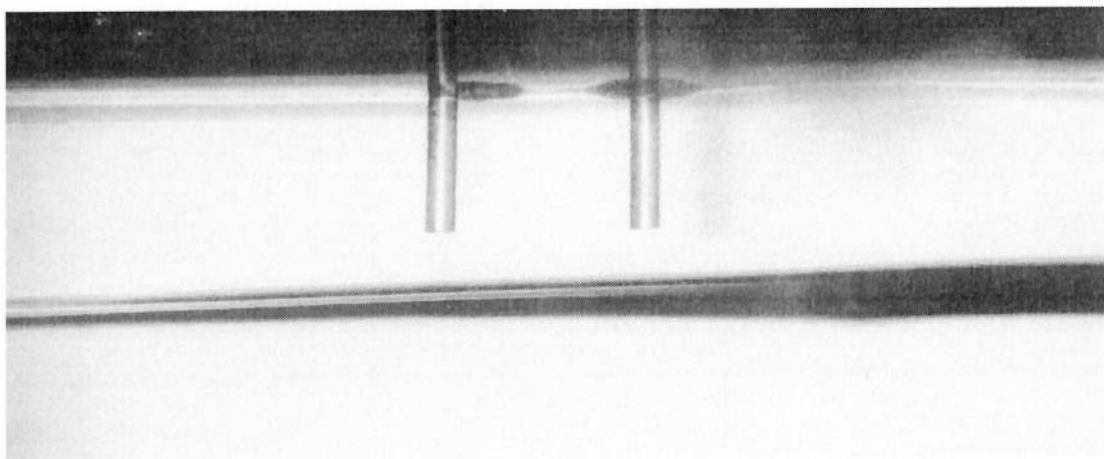
Fig. 7.16 Gráfico da espessura de filme.



linha reta que será a linha da base, ou seja, a linha a partir da qual as distâncias com relação à ponta da fibra óptica. Os pontos da base das fibras fornecem uma essa relação, é possível calcular a distância vertical de cada ponto da interface elemento de imagem e comprimento, bem como sua incerteza associada. Com Com os pontos da base e da altura, é possível calcular a relação entre uma arquivo texto para ser posteriormente analisado.

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

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



relação entre elemento de imagem (*pixel*) e medida de comprimento. (utilizando a altura da fibra óptica na imagem como referência) calcular a computador a um tamanho maior do que o mostrado na figura 7.17, pode-se cuja incerteza é conhecida. Uma vez fotografadas, codificadas e ampliadas no

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.

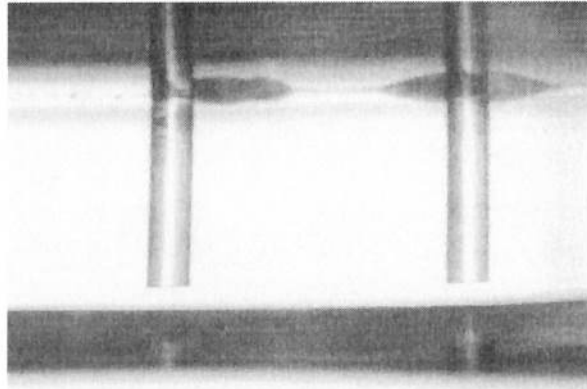


Fig. 7.18 Fibras óptica instaladas no canal. Reflexo na parte de baixo da interface possibilita medição.

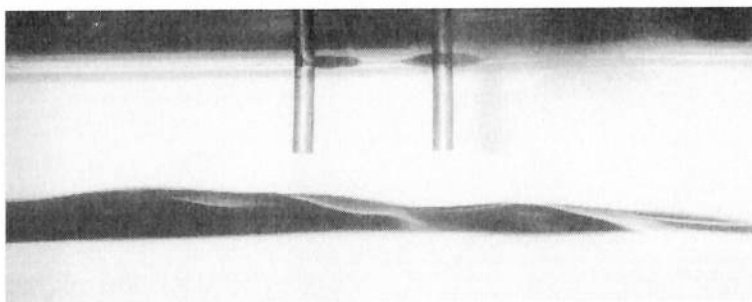
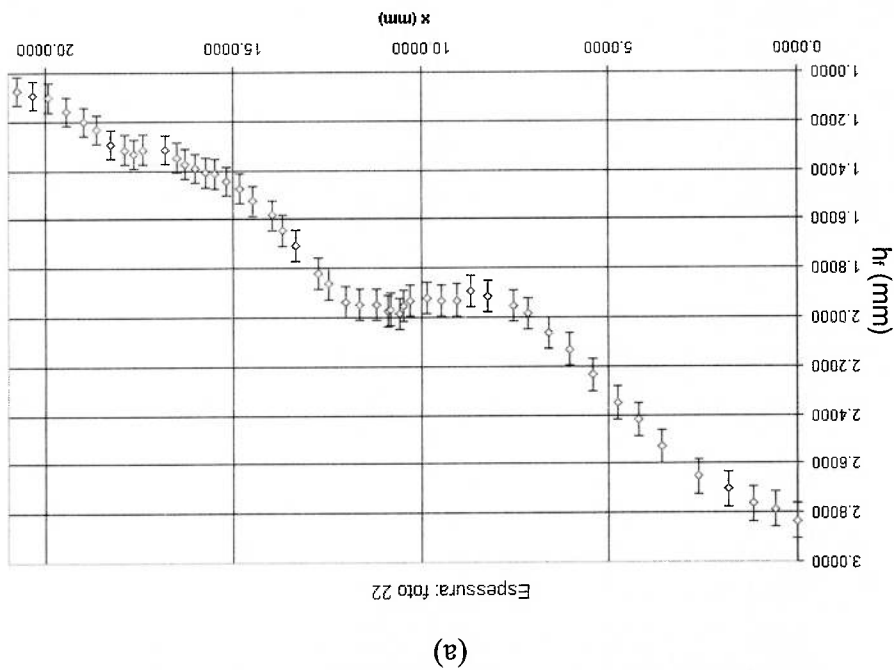
Para o processamento da imagem, foram identificadas três situações distintas para o cálculo da espessura de filme com fotos da interface. Na primeira, observa-se a ponta da fibra refletida na interface. Neste caso, o cálculo da espessura é simples, pois a metade da distância entre imagem e objeto pode 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.

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.

Fig. 7.19 Foto do filme pela lateral (a). Gráfico da interface reconhecida (b).



amostrado pelo canal 1 e o outro sinal amostrado pelo canal 2 foi a maximização
A forma empregada para determinar a defasagem entre um sinal

sinais destinados ao cálculo da frequência de onda foi de 0,001s.

Como ressaltado anteriormente, a taxa de amostragem utilizada para

portanto o período e consequentemente, a frequência.

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

7.5 Frequência da onda

muito grande.

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

A defasagem entre sinais é manipulada em m . $X_1(n)$ e $X_2(n)$ que são os vetores que contêm 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

$$D_{S_1 S_2} = \frac{\sum_{m=-N}^n \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=-m}^m X_1(n) \cdot \sum_{n=-m}^m X_2(n)}{\sum_{m=-N}^n \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=-m}^m X_1(n) \cdot \sum_{n=-m}^m X_2(n)} \quad (7.1)$$

de 0,5. A fórmula do coeficiente de correlação é mostrada abaixo.

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

possível calcular a velocidade da onda.

Conhecendo-se a distância entre as pontas das fibras ópticas, é possível calcular a velocidade da onda. Conhecendo-se a distância entre as pontas das fibras ópticas, é possível calcular a velocidade da onda. Conhecendo-se a distância entre as pontas das fibras ópticas, é possível calcular a velocidade da onda.

o sinal.

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

$$X^2(n) = |S^2(n) - n S^2|$$

(7.3)

$$X^1(n) = |S^1(n) - n S^1|$$

(7.2)

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 primeiro informação seria o primeiro pico que mostra o atraso entre uma onda e outra, ou seja, um intervalo de tempo 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.

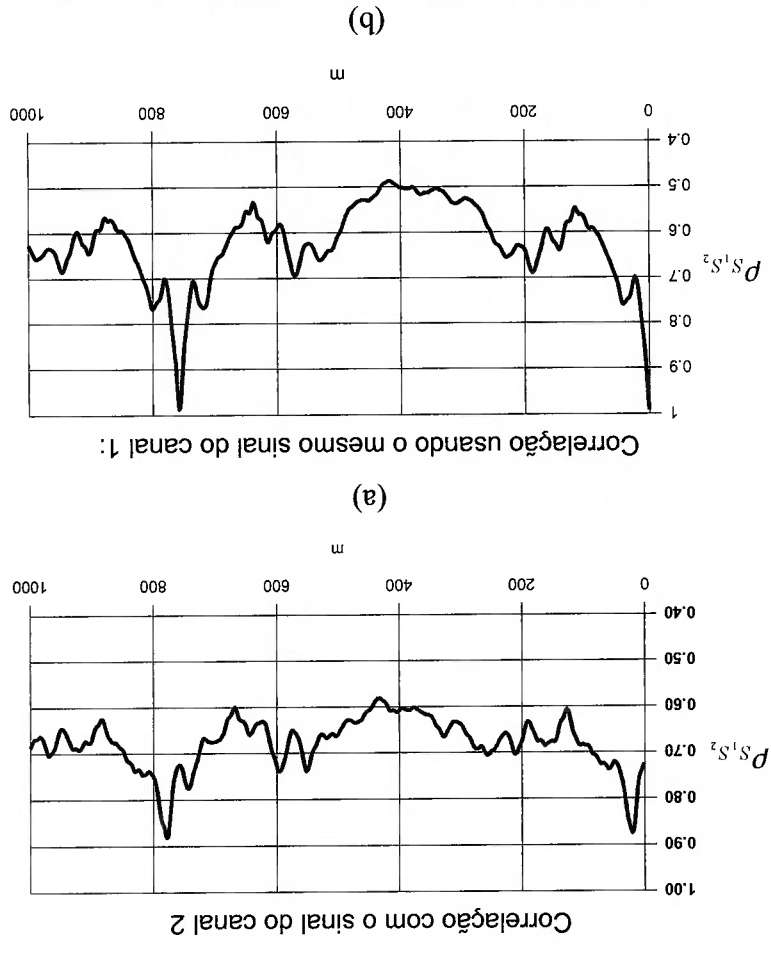


Fig. 7.20 Coeficiente de correlação obtido da correlação do canal 1 com o canal 2 em (a) e obtido da correlação do canal 1 com ele mesmo em (b).

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 opção-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.

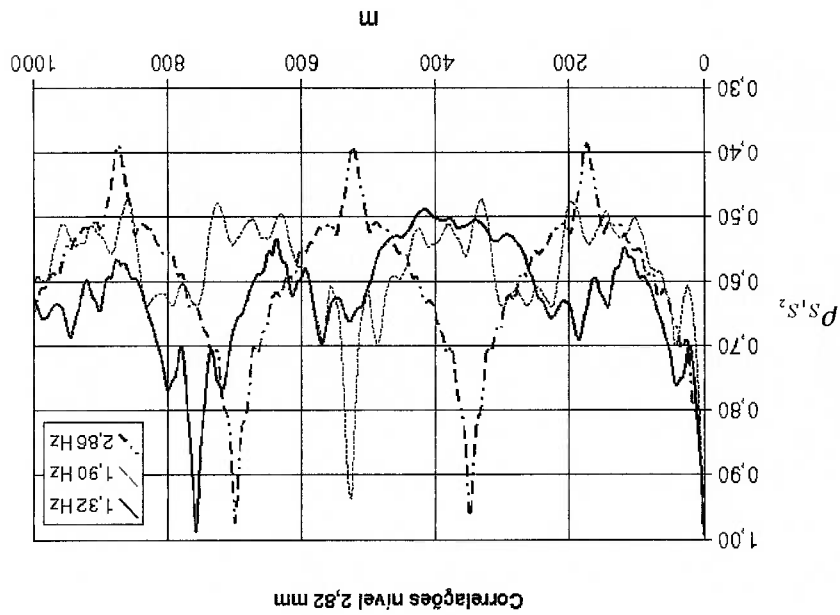


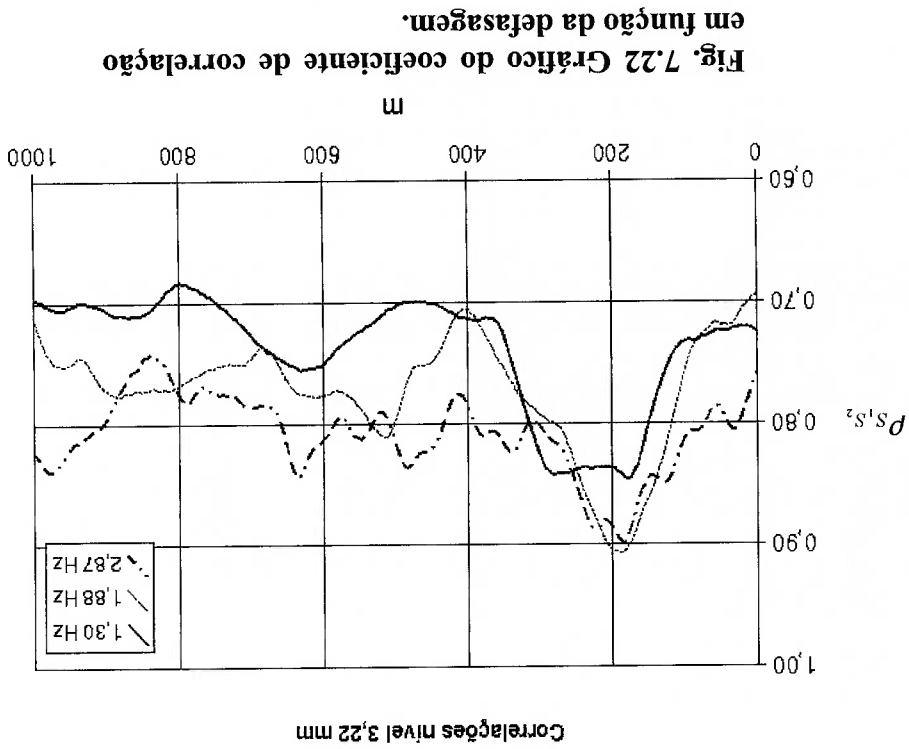
Fig. 7.21 Gráfico do coeficiente de correlação obtido para determinação da frequência.

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 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.



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

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	1,8519	0,2198	0,2236
	1,9945	1,3158	0,2327	0,2236
	1,9945	2,8249	0,2065	0,2236

análise dos dados experimentais.

A tabela 7.1 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 potenciómetro do batedor. As frequências ajustadas nesse potenciómetro puderam ser selecionadas apenas por marcas na carcaça do referido equipamento, sendo que o valor real pôde ser determinado apenas após a

$$v^p = \sqrt{H \cdot g} \quad (7.4)$$

perturbação em uma lâmina de água de espessura H é dada por:

De acordo com MOODY (1990), a velocidade de propagação de uma

7.7 Comparação da velocidade de onda com dados teóricos

registra-se na obtenção da frequência de onda.

diferentes, observa-se que o coeficiente de correlação não atinge os mesmos níveis

Como o cálculo baseia-se na correlação entre sinais tomados em fibras

reduzir a incerteza na obtenção da velocidade.

cálculo da velocidade foram tomados com intervalo de amostra de 0,0001 s, para

intervalos de amostragem menores, como foi o caso. Os sinais destinados ao

Observou-se qualitativamente que a formação de menisco atua no sentido de absorver a energia da onda, uma vez que estas praticamente não eram refletidas no fim do canal devido a interface permanecer estática em relação ao

igualar o nível dos dois lados. Entretanto, o fluxo através desta passagem não era suficientemente rápido para reservatórios separados pelo batedor através de uma passagem sobre o dois lados do batedor. Embora, houvesse comunicação entre os dois muda. A movimentação do batedor leva o nível no interior do canal variar dos contrariando a hipótese do modelo que supõe um canal infinito cujo volume não experimental é a quantidade de fluido dentro do canal utilizada ser limitada, Outro fator para explicar a diferença entre resultado teórico e formulação proposta por MOODY (1990) na obtenção da equação 7.4.

relativamente baixas e podem ser explicadas pelas simplificações utilizadas na tendência de elevação conforme a espessura média é elevada. As diferenças são Nota-se diferenças entre os valores teóricos calculados e medidos, além da

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

Nível	Espessura (mm)	Frequência calculada (Hz)	Velocidade calculada (m/s)	Velocidade teórica (m/s)
5	3,2210	2,8571	0,2635	0,2490
	3,2210	1,8868	0,2524	0,2490
	3,2210	1,3055	0,1735	0,2490
4	2,8213	2,8571	0,2373	0,2410
	2,8213	1,8939	0,2397	0,2410
	2,8213	1,3193	0,2497	0,2410
3	2,4009	2,8090	0,2282	0,2323
	2,4009	1,8797	0,2327	0,2323
	2,4009	1,3369	0,2472	0,2323

canal no ponto de contato entre interface e fluido. 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 uma 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.

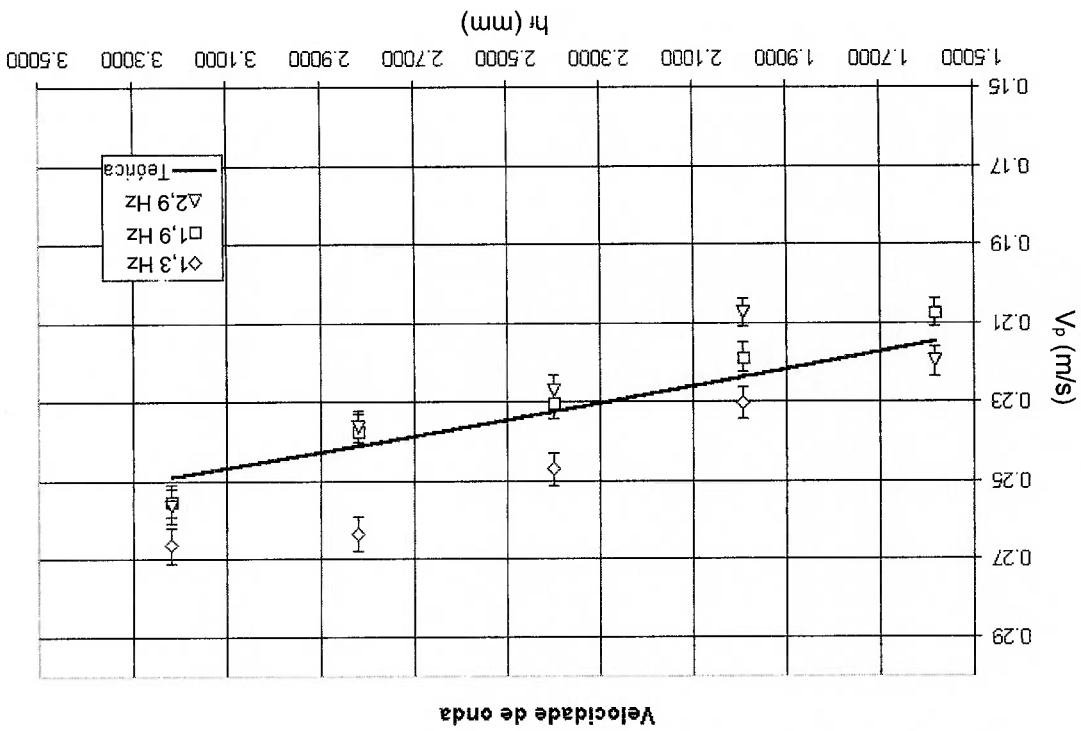


Fig. 7.23 Gráfico de comparação entre velocidades.

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.

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 bateador, 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 à 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 seção (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°), 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 μm).

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 polinômiais para aproximar todos os pontos dentro do intervalo de calibração.

Os resultados do experimento com o canal, simulando ondas unidimensionais, mostraram a necessidade de 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^o 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^o 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. 6th 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 Escoramento 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^o 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 Techniques to Fluid Mechanics*, July 8th to 11th 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 Techniques to Fluid Mechanics*, July 8th to 11th 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 t wo-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 várias 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

utilizado.

etapas do processo. Inicialmente é medida a densidade do fluido (água) que será

Para avaliar a incerteza associada à calibração, deve-se considerar as

A.1 Incerteza na calibração por adição de líquido

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

no seguinte formato:

O resultado final com a apresentação da incerteza expandida deve ser feito

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

incerteza padronizada combinada pelo fator de abrangência:

Sendo assim, a incerteza expandida é obtida a partir da multiplicação da

(95% de confiança) é aceita sem maiores considerações.

combinada obtida. Normalmente, a adoção de fator de abrangência igual a 2

Tipo B, o fator de abrangência deve ser aplicado à incerteza padronizada

no caso de avaliação Tipo A. Como a avaliação neste trabalho é toda feita por

número inteiro de desvios padrões em torno da dispersão de valores resultantes,

corresponda a um intervalo de confiança adequado, ou seja, um intervalo de um

A incerteza expandida é tomada com um fator de abrangência k que

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

É dada por:

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

por uma função qualquer f , tal que:

Com uma balança de cinco casas decimais (incerteza de 0,0005g), 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:

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

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:

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

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:

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

Considerando-se que a incerteza final do volume total de líquido colocado

no canal seja $\delta h_{liquido}$, sabendo-se que a máxima espessura de filme calibrada

é dada por:

$$h_{filme} = h_{liquido} - h_{calibre} \quad (A.8)$$

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

equação:

que h_{filme} possui sua incerteza associada e, portanto, S também possuirá. Dessa equação A.15 pelo método dos mínimos quadrados. Observa-se nessa equação Onde a_n são constantes obtidas a partir da curva de calibração ajustada à

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

pela equação descrita abaixo:

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

$$\delta h_{filme} = \sqrt{\left(\frac{A_{canal}}{1}\right)^2 \cdot \delta V_2^{liquido} + \left(\frac{A_{canal}}{V_{liquido}}\right)^2 \cdot \delta A_2^{canal} + \delta h_2^{calibre}} \quad (A.14)$$

anteriormente, obtêm-se:

Substituindo a equação A.11 na equação A.9, conforme visto

$$\delta A_{canal} = L_2^{comprimento} \cdot \delta L_2^{largura} + L_2^{largura} \cdot \delta L_2^{comprimento} \quad (A.13)$$

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

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

A área do canal é:

$$\delta h_{liquido} = \sqrt{\left(\frac{A_{canal}}{1}\right)^2 \cdot \delta V_2^{liquido} + \left(\frac{A_{canal}}{V_{liquido}}\right)^2 \cdot \delta A_2^{canal}} \quad (A.11)$$

abaixo:

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

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

Sendo que, a altura do líquido é dada por:

$$\delta h_2^{filme} = \delta h_2^{liquido} + \delta h_2^{calibre} \quad (A.9)$$

forma, a incerteza associada ao sinal lido, referente à incerteza na espessura de

filme, é dada por:

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

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:

$$\delta S_{calibração} = \sqrt{\delta S_2^2 + \delta S_2'^2} \quad (A.17)$$

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:

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

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

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 cilindricidade 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.

As incertezas associadas ao cálculo da velocidade são as referentes ao

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

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:

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

intervalo de defasagem, dado em m intervalos de aquisição é dado por:

O fator de correlação para dois sinais tomados no sistema, com um dado discutido.

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

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

$$\delta h_{filme} = \sqrt{\left(\frac{\partial h_{filme}}{\partial S} \right)_{osciloscópio}^2 + \left(\frac{\partial h_{filme}}{\partial S_2} \right)_{calibração}^2} \quad (\text{A.19})$$

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:

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

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:

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

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:

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

A incerteza foi calculada através da equação abaixo:

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

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:

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

A incerteza dessa relação foi obtida pela equação abaixo:

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

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.

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

A incerteza associada à essa espessura é dada por:

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

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:

$$\delta h_{filme} = \sqrt{R^2 \cdot \delta h_{filme} [pixel]^2 + h_{filme} [pixel]^2 \cdot \delta R^2}$$

(A.32)