

HUGO FABIÁN DECARO SCHETTINI

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE NEBULIZADORES
TIPO “Y-JET”**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo
2005

HUGO FABIÁN DECARO SCHETTINI

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE NEBULIZADORES
TIPO “Y-JET”**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Livre Docente
Otávio de Mattos Silveiras

São Paulo
2005

Aos meus pais, Hugo Walter e Liliana pelo
apoio de sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Otávio de Mattos Silveiras, pelas diretrizes seguras, pela paciência e habilidade em tratar de vários temas de Engenharia e, principalmente, pelos singulares pontos de vista e questionamentos.

Ao amigo Prof. Dr. Euryale Jorge de Godoy de Jesus Zerbini, pelas diretrizes em todo o programa de mestrado, tanto no trabalho quanto nas matérias realizadas no programa de Mestrado, pela elegância das soluções e pelo apoio nos momentos de tomadas de decisões importantes.

Ao amigo e Prof. Marcos de Mattos Pimenta, pela facilidade com que expõe os temas em suas aulas relacionando a teoria à prática da Engenharia nos cursos realizados no programa.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, principalmente ao Engenheiro Laiete Soto Messias, pelo apoio em permitir o trabalho experimental, pelo incentivo em desenvolver temas ligados à área de nebulização e, sobretudo, pela orientação como Engenheiro. Ao companheiro e futuro Físico Sílvio Neves, pela realização dos ensaios, pela ajuda laboratorial e pelo interesse e incentivo à realização do trabalho. Aos amigos Lourival e Nicolau pela construção dos bocais e, finalmente, ao amigo Reinaldo Custódio da Silva, o Biro, pelo auxílio na coordenação do trabalho experimental e pela grande ajuda nos pequenos detalhes.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
LISTA DE SIGLAS	
RESUMO	
ABSTRACT	
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONCEITOS GERAIS SOBRE NEBULIZAÇÃO	3
1.2 NEBULIZADORES Y-JET	5
1.3 OBJETIVO.....	11
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 REFERÊNCIAS BÁSICAS.....	12
2.2 COMENTÁRIOS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
CAPÍTULO 3 DESCRIÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL	33
3.1 A ESTAÇÃO DE AVALIAÇÃO DE SPRAYS	33
3.1.1 Sistema de Coordenadas	38
3.1.2 Medição de Pressões, Temperaturas e Vazões de Ar e Combustível.....	39
3.1.3 Medição de Diâmetro de Gota	42
3.1.4 Medição da Distribuição de Líquido na Seção Transversal.....	45
3.1.5 Medição do Ângulo do Spray	46
3.1.6 Medição da Pressão de Estagnação no Ponto de Mistura	47
3.2 DESCRIÇÃO DOS BOCAIS CONSTRUÍDOS E ENSAIADOS.....	49
CAPÍTULO 4 CONDIÇÕES OPERACIONAIS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	55
4.1 CONDIÇÕES OPERACIONAIS	55
4.2 NEBULIZAÇÃO.....	56
4.3 PRESSÃO DE ESTAGNAÇÃO NO PONTO DE MISTURA.....	61
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	128
CAPÍTULO 6 TRABALHOS FUTUROS	131

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....132

ANEXO 1 RELATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO

ANEXO 2 DESCRIÇÃO DO MEDIDOR TIPO CORIOLIS

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Fenômenos envolvidos nos mecanismos de geração de gotas segundo Song e Lee (1996).....	8
Tabela 3.1 – Descrição da instrumentação para medição de pressões P_a e P_c	41
Tabela 3.2 – Descrição da instrumentação para medição de pressões diferenciais...	41
Tabela 3.3 – Descrição do medidor de vazão tipo Coriolis	42
Tabela 3.4 – Dimensões em mm dos tubos de tomada de pressões	47
Tabela 3.5 – Configurações geométricas dos 6 bocais ensaiados	49
Tabela 4.1 – Condições operacionais dos ensaios	55
Tabela 4.2 – Propriedades do querosene e do óleo lubrificante	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Alguns dos fenômenos presentes em uma câmara de combustão [Messias (1995)]	2
Figura 1.2 – Esquema dos fluxos de ar e combustível de um queimador [Graziadio (2001)].....	3
Figura 1.3 – Nebulizador tipo Y-jet.....	5
[Messias (1995)]	5
Figura 1.4 – Mecanismos de formação de gotas em um bocal Y-jet.....	8
[Song e Lee (1996)]	8
Figura 1.5 – Esquema e sistema de coordenadas para os bocais Y-jet.....	9
Figura 2.1 – Esquema do arranjo experimental de Mullinger e Chigier (1974) [Mullinger e Chigier (1974)].....	13
Figura 2.2 – Pontos de tomadas de pressões	14
[Mullinger e Chigier (1974)]	14
Figura 2.3 – Mecanismos de formação do spray	15
[Mullinger e Chigier (1974)].....	15
Figura 2.4 – Arranjo experimental básico do ENEL	17
[Pacífico (2000)].....	17
Figura 2.5 – Instrumentação para mapeamento do spray.....	18
[Michele et al. (1991)]	18
Figura 2.6 – Colocação de tubos-guias e acoplamento do defletor	19
[Reprodução de Graziadio (2001)]	19
Figura 2.7 – Arranjo experimental de Song e Lee.....	21
[Song e Lee (1996)]	21
Figura 2.8 – Eixo de coordenadas da bancada de ensaios de Song e Lee.....	21
[Song e Lee (1996)]	21
Figura 2.9 – Bocais utilizados por Song e Lee.....	22
[Song e Lee (1996)]	22
Figura 2.10 – Diferentes regimes de escoamento em um bocal Y-jet	23
[Song e Lee (1996)]	23

Figura 2.11 – Perfis do spray a 200 mm do bocal #1 para diferentes relações Φ	24
[Song e Lee (1996)]	24
Figura 2.12 – Comportamento dos diâmetros médios das gotas em função de Φ	25
[Song e Lee (1996)]	25
Figura 2.13 – Arranjo experimental de Pacífico (2000)	26
[Reprodução de Pacífico (2000)].....	26
Figura 2.14 – Partenador ou fracionador.....	27
[Messias e Jen (2001)]	27
Figura 2.15 – Esquema dos nebulizadores ensaiados	28
[Messias e Jen (2001)]	28
Figura 2.16 – Curvas de SMD em função do ALR	29
[Messias e Jen (2001)]	29
Figura 2.17 – Concentrações de CO e NO _x em função da concentração de O ₂ nos produtos da combustão.....	30
[Messias e Jen (2001)]	30
Figura 2.18 – Concentrações de MP na chaminé da caldeira	
[Messias e Jen (2001)]	31
Figura 3.1 - Instalações da Estação de Avaliação de sprays	33
Figura 3.2 – Esquema do arranjo experimental da Estação de Avaliação dos Sprays do AET-IPT	34
Figura 3.3 – Esquema da câmara de nebulização	35
Figura 3.4 – A foto à esquerda mostra o bocal instalado na lança dentro da câmara de nebulização; A foto à direita mostra a mesa de coordenadas e tubos de alimentação.....	35
Figura 3.5 – Compressor e secador de ar	36
Figura 3.6 – Bombas de óleo.....	36
Figura 3.7 – Montagem para a medição de diâmetro das gotas com tubos-guias	37
Figura 3.8 – Sistema de exaustão	37
Figura 3.9 – Painéis de comando	38
Figura 3.10 – Sistemas de coordenadas	39
Figura 3.11 – Placas de orifício para medições de vazão de ar.....	40
Figura 3.12 – Transdutores de pressão.....	40
Figura 3.13 – Medidor de vazão tipo Coriolis.....	41

Figura 3.14 – Emissor e receptor do laser.....	43
Figura 3.15 – Mesa do receptor do laser.....	43
Figura 3.16 – Arranjo ótico do instrumento de medição.....	44
Figura 3.17 – Histograma e distribuição cumulativa do diâmetro das gotas (μm) de uma condição genérica feita pelo software do instrumento.....	45
Figura 3.18 – Medição da distribuição de líquido em uma seção do spray.....	46
Figura 3.19 – Esquema da colocação dos tubos nos pontos P_{Mc} , P_{Mi} e P_{Ms}	48
Figura 3.20 – Nebulizadores utilizados no trabalho.....	49
Figura 3.21 - Esquema dos bocais e sistema de coordenadas.....	50
Figura 3.22 – Desenho do Bocal Y1 (escala 2:1).....	51
Figura 3.23 – Desenho do Bocal Y4 (escala 2:1).....	52
Figura 3.24 – Desenho do Bocal Y2 (escala 2:1).....	53
Figura 3.25 – Desenho do Bocal Y5 (escala 2:1).....	53
Figura 3.26 – Desenho do Bocal Y6 (escala 2:1).....	53
Figura 3.27 – Desenho do Bocal Y3 (escala 2:1).....	54
Figura 4.1 – Curva $W_a \times P_a$ para $W_o = 300 \text{ kg/h}$	57
Figura 4.2 – Vazão de ar para diferentes condições do combustível.....	57
Figura 4.3 – SMD função de P_a para os 6 bocais com óleo.....	58
Figura 4.4 – SMD função de ALR para os 6 bocais com óleo.....	58
Figura 4.5 – Influência de ALR no bocal Y4.....	59
Figura 4.6 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ função de ALR nebulizando óleo.....	59
Figura 4.7 - Comportamento de $D_{V[0,9]}$ função de ALR nebulizando querosene.....	60
Figura 4.8 – Ábaco para o bocal Y1 operando com querosene.....	62
Figura 4.9 – Ábaco para o bocal Y1 operando com óleo.....	63
Figura 4.10 – Comportamento de SMD para o bocal Y1 com querosene.....	64
Figura 4.11 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os ensaios do bocal Y1.....	65
Figura 4.12 – dP_{m0} para o bocal Y1.....	66
Figura 4.13 – Valores de Φ para o bocal Y1.....	67
Figura 4.2 - Esquema dos bocais e sistema de coordenadas.....	68
Figura 4.14 – Distribuição de querosene para o bocal Y1 ($W_q = 100 \text{ kg/h}$).....	68
Figura 4.15 – Distribuição de querosene para o bocal Y1 ($W_q = 300 \text{ kg/h}$).....	69
Figura 4.16 – Distribuição de óleo ao longo do eixo y para $W_o = 100 \text{ kg/h}$	70

Figura 4.17 – Distribuição de óleo ao longo do eixo y para $W_o = 300 \text{ kg/h}$	70
Figura 4.18 – Perfis de SMD para o bocal Y1 nebulizando querosene.....	71
Figura 4.19 – Perfis de SMD para o bocal Y1 nebulizando óleo.....	71
Figura 4.20 – Perfil de velocidades para o bocal Y1.....	72
Figura 4.21 – Vazões de ar de diferentes ensaios.....	73
Figura 4.22 – Ábaco para o bocal Y4 operando com querosene.....	74
Figura 4.23 – Ábaco para o bocal Y4 operando com óleo.....	75
Figura 4.24 – Comportamento de SMD para os ensaios de Y4 e Y1 com óleo.....	76
Figura 4.25 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os ensaios de Y4.....	76
Figura 4.26 - dP_{m0} para os bocais Y4 e Y1.....	77
Figura 4.27 – Valores de Φ para os bocais Y1 e Y4.....	78
Figura 4.28 – Distribuição de querosene para os bocais Y4 e Y1.....	79
Figura 4.29 – Distribuição de óleo para os bocais Y4 e Y1.....	79
Figura 4.30 – Perfis de SMD para o bocal Y4 nebulizando querosene.....	80
Figura 4.31 – Perfis de SMD para o bocal Y4 nebulizando óleo.....	80
Figura 4.32 – Perfis de SMD para os bocais Y1 e Y4.....	81
Figura 4.33 – Perfis de velocidade do ar para os bocais Y1 e Y4.....	82
Figura 4.34 – Ábaco para o bocal Y2 operando com querosene.....	83
Figura 4.35 – Ábaco para o bocal Y2 operando com óleo.....	84
Figura 4.36 – Comportamento de SMD dos bocais Y2 e Y4 com querosene.....	85
Figura 4.37 – Comportamento de SMD dos bocais Y2 e Y4 com óleo.....	85
Figura 4.38 – Comportamento de SMD dos bocais Y2 e Y4 com óleo em função de ALR.....	86
Figura 4.39 – dP_{m0} para o bocal Y2 e Y1.....	87
Figura 4.40 – Valores de Φ para os bocais Y2 e Y4 operando com óleo.....	87
Figura 4.41 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ dos bocais Y2 e Y4 com óleo.....	88
Figura 4.42 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ dos bocais Y2 e Y4 com querosene.....	89
Figura 4.43 – Distribuição de querosene para o bocal Y2 ($W_q = 100 \text{ kg/h}$).....	90
Figura 4.44 – Distribuição de óleo para o bocal Y2 ($W_o = 100 \text{ kg/h}$).....	90
Figura 4.45 – Distribuição de querosene para o bocal Y2 ($W_q = 300 \text{ kg/h}$).....	91
Figura 4.46 – Distribuição de óleo para o bocal Y2 ($W_o = 300 \text{ kg/h}$).....	92
Figura 4.47 – Perfis de SMD para o bocal Y2 nebulizando querosene.....	92

Figura 4.48 – Perfis de SMD para o bocal Y2 nebulizando óleo	93
Figura 4.49 – Perfis de SMD para os bocais Y2 e Y4 nebulizando óleo	93
Figura 4.50 – Perfis de velocidade do ar para os bocais Y4 e Y2	94
Figura 4.51 – Ábaco para o bocal Y5 operando com querosene	95
Figura 4.52 – Valores de Φ para os bocais Y5 e Y2	95
Figura 4.53 – Comportamento de SMD para os bocais Y5 e Y2 com querosene	96
Figura 4.54 – Ábaco para o bocal Y5 operando com óleo	97
Figura 4.55 – Comportamento de SMD para os bocais Y5 e Y2 com óleo	97
Figura 4.56 – Distribuição de óleo para os bocais Y5, Y2 e Y4	98
Figura 4.57 – Distribuição de querosene para os bocais Y5 e Y2	99
Figura 4.58 – Perfis de SMD para os bocais Y5 e Y2 nebulizando óleo	99
Figura 4.59 – dP_{m0c} para os bocais Y5, Y2 e Y4	100
Figura 4.60 - Perfis de velocidade do ar para os bocais Y5 e Y2	100
Figura 4.61 – Distribuição de querosene para o bocal Y5	101
Figura 4.62 – Distribuição de óleo para o bocal Y5	102
Figura 4.63 – Comportamento de SMD em função de ALR dos bocais Y5 e Y4 com óleo	102
Figura 4.64 - Perfis de SMD para os bocais Y5 e Y4 com óleo	103
Figura 4.65 – Perfis de SMD para o bocal Y5 nebulizando querosene	104
Figura 4.67 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os ensaios de Y5 com querosene	104
Figura 4.68 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os bocais Y5 e Y4 com óleo	105
Figura 4.69 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os bocais Y5 e Y2 com óleo	105
Figura 4.70 – dP_{m0} para os bocais Y5 e Y6	106
Figura 4.71 – Valores de Φ para os bocais Y6 e Y5	107
Figura 4.72 – Perfis de velocidade para os bocais Y6 e Y5	107
Figura 4.73 – Ábaco para o bocal Y6 operando com óleo	108
Figura 4.74 – Comportamento de SMD para os bocais Y6 e Y5 com óleo	108
Figura 4.75 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os bocais Y6 e Y5 com óleo	109
Figura 4.76 – Distribuição de óleo para os bocais Y6 e Y5	109
Figura 4.77 – Distribuição de óleo para o bocal Y6 ($W_o = 300$ kg/h)	110
Figura 4.78 – Perfis de SMD para o bocal Y6 nebulizando óleo	111
Figura 4.79 – Perfis de SMD para os bocais Y6 e Y5 nebulizando óleo	111

Figura 4.80 - Ábaco para o bocal Y3 operando com querosene.....	112
Figura 4.81 – Comportamento de SMD para o bocal Y3 com querosene	113
Figura 4.82 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para o bocal Y3 com querosene	113
Figura 4.83 – dP_{m0} para o bocal Y3	114
Figura 4.84 – Perfis de velocidade para os bocais Y3 e Y5.....	115
Figura 4.85 – Valores de Φ para os bocais Y3 e Y2.....	115
Figura 4.86 – Comportamento de SMD para os bocais Y3 e Y2 com óleo.....	116
Figura 4.87 – Comportamento de SMD para os bocais Y3 e Y5 com óleo.....	116
Figura 4.87 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os bocais Y3 e Y2 com óleo.....	117
Figura 4.88 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os bocais Y3 e Y5 com óleo.....	117
Figura 4.89 – Distribuição de querosene para o bocal Y3	118
Figura 4.90 – Distribuição de óleo para o bocal Y3 ($W_o = 100$ kg/h).....	118
Figura 4.91 – Distribuição de óleo para o bocal Y3 ($W_o = 300$ kg/h).....	119
Figura 4.92 – Perfis de SMD para o bocal Y3 nebulizando óleo	119
Figura 4.93 – Perfis de SMD para os bocais Y3, Y2 e Y5 nebulizando óleo.....	120
Figura 4.94 – Perfis de SMD para o bocal Y3 nebulizando querosene	120
Figura 4.95 – Distribuição de óleo para os bocais Y5 e Y2.....	122
Figura 4.96 – SMD_p dos sprays dos bocais operando com querosene.....	123
Figura 4.97 – SMD_p dos sprays dos bocais operando com óleo.....	124
Figura 4.98 – $D_{V[0,9]p}$ dos sprays dos bocais operando com querosene	125
Figura 4.99 – Diferenças entre diâmetros dos sprays dos bocais operando com querosene.....	126
Figura 4.100 – $D_{V[0,9]p}$ dos sprays dos bocais operando com óleo	126
Figura 4.101 – Diferenças entre diâmetros dos sprays dos bocais operando com óleo	127

LISTA DE SÍMBOLOS

ALR	relação entre a vazão mássica de fluido de nebulização (ar) e de vazão mássica de líquido (combustível)
C_1	constante para ajuste de expressões que estimam diâmetro médio de gota
C_2	constante para ajuste de expressões que estimam diâmetro médio de gota
d	distância entre tubos-guia
D_V	diâmetro médio volumétrico de gota (μm)
$D_{[3.2]}$	diâmetro médio de Sauter (μm)
d_m	diâmetro da câmara de mistura (mm). Ver figura 1.4
d_a	diâmetro do orifício de descarga de ar (mm). Ver figura 1.4
d_c	diâmetro do orifício de descarga de combustível (mm). Ver figura 1.4
$D_{V[0.1]}$	diâmetro volumétrico de gota abaixo do qual estão acumulados 10% das gotas em volume (μm)
$D_{V[0.5]}$	diâmetro volumétrico de gota abaixo do qual estão acumulados 50% das gotas em volume (μm)
$D_{V[0.9]}$	diâmetro volumétrico de gota abaixo do qual estão acumulados 90% das gotas em volume (μm)
$D_{V[0.9]i}$	$D_{V[0.9]}$ da coordenada (i) do eixo y
$D_{V[0.9]p}$	$D_{V[0.9]}$ ponderado na fração mássica ou volumétrica de combustível
f_i	fração mássica ou volumétrica de combustível na coordenada (i) do eixo y
$G_{a,m}$	Vazão mássica de fluido auxiliar por unidade de área da seção transversal da câmara de mistura ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
G_c	Vazão mássica de combustível por unidade de área da seção transversal do orifício de descarga de combustível ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
L	um comprimento característico do bocal (m)
l_a	comprimento do orifício de descarga de ar (mm). Ver figura 1.4
l_c	comprimento do orifício de descarga de combustível (mm). Ver figura 1.4

L_c	distância entre o furo para tomada de pressão no ponto central da seção de mistura e o fundo da câmara de mistura (mm)
l_i	comprimento da pré-câmara (mm). Ver figura 1.4
L_i	distância entre o furo para tomada de pressão no ponto inferior da seção de mistura e o fundo da câmara de mistura (mm)
l_m	comprimento da câmara de mistura (mm). Ver figura 1.4
L_s	distância entre o furo para tomada de pressão no ponto superior da seção de mistura e o fundo da câmara de mistura (mm)
MP	material particulado
n_i	número de gotas de diâmetro D_i
Oh	número de Ohnesorge
P_a	pressão de ar a montante do nebulizador (bar). Ver figura 1.4
P_A	ponto do escoamento de ar a montante do bocal
P_{ao}	pressão de ar na saída do orifício de descarga de ar (Pa). Ver figura 1.4
P_c	pressão de combustível a montante do nebulizador (bar). Ver figura 1.4
P_{co}	pressão de combustível na saída do orifício de descarga de combustível (Pa). Ver figura 1.4
P_{ha}	pressão estática do ar para cálculo da vazão de ar (Pa)
P_m	pressão do ar no ponto de mistura (Pa). Ver figura 1.4
P_{m0c}	pressão de estagnação do ar no ponto central da seção mistura (Pa).
P_{m0i}	pressão de estagnação do ar no ponto inferior da seção mistura (Pa).
P_{m0s}	pressão de estagnação do ar no ponto superior da seção mistura (Pa).
P_{Mc}	ponto de mistura central
P_{Mi}	ponto de mistura inferior
P_{Ms}	ponto de mistura superior
P_v	pressão do vapor d'água a montante do bocal (MPa)
r_{ow}	raio da câmara de mistura (cm)
SMD	diâmetro médio de Sauter (μm)
SMD_i	SMD da coordenada (i) do eixo y
SMD_p	SMD ponderado na fração mássica ou volumétrica de combustível
T_a	temperatura do ar a montante do nebulizador (K)
T_{ao}	temperatura do ar na saída do orifício de descarga (K)

T_{am}	temperatura do ar no ponto de mistura (K)
T_c	temperatura do combustível a montante do nebulizador (K)
V_{ac}	velocidade do ar no ponto central da seção de mistura (m/s)
V_{ai}	velocidade do ar no ponto inferior da seção de mistura (m/s)
V_{as}	velocidade do ar no ponto superior da seção de mistura (m/s)
V_{ao}	velocidade do ar no orifício de descarga do ar (m/s)
V_{am}	velocidade do ar no ponto de mistura (m/s)
V_c	velocidade do combustível (m/s)
V_r	velocidade do fluido de nebulização relativa à do combustível (m/s)
W_a	vazão mássica de ar ou fluido auxiliar (kg/h)
W_c	vazão mássica de combustível (kg/h)
W_o	vazão mássica de óleo (kg/h)
W_q	vazão mássica de querosene (kg/h)
W_{cw}	vazão mássica de combustível (g/s)
We	número de Weber
y^+	coordenada do limite positivo do spray sobre o eixo y (mm)
y^-	coordenada do limite negativo do spray sobre o eixo y (mm)
Z	coordenada sobre o eixo z (mm)

Símbolos gregos

α	ângulo do spray gerado por um único orifício de descarga do nebulizador
α^+	ângulo da parte positiva do spray sobre o eixo y
α^-	ângulo da parte negativa do spray sobre o eixo y
β	ângulo do spray gerado por todos os orifícios de descarga do nebulizador
γ	expoente para ajuste de expressões que estimam diâmetro médio de gota
δ	expoente para ajuste de expressões que estimam diâmetro médio de gota
ε	expoente para ajuste de expressões que estimam diâmetro médio de gota
ΔP_a	diferencial de pressão da placa de orifício utilizada para medir a vazão de ar (Pa)
Δz	distância do bocal ao feixe de laser (mm)

Φ	relação entre o fluxo de quantidade de movimento do ar na direção x e o fluxo de quantidade de movimento do combustível na direção y
μ_c	viscosidade dinâmica do combustível (kg/m.s)
ν_c	viscosidade cinemática do combustível (m ² /s)
ν_{cw}	viscosidade cinemática do combustível (cSt)
ρ_a	densidade do ar (kg/m ³)
$\rho_{a,m}$	densidade do ar no ponto de mistura (kg/m ³)
ρ_{aw}	densidade do ar (g/cm ³)
ρ_c	densidade do combustível (kg/m ³)
ρ_{cw}	densidade do combustível (g/cm ³)
σ	tensão superficial do combustível (N/m)
σ_w	tensão superficial do combustível (dynes/cm)
θ	ângulo entre os orifícios de descarga de ar e de combustível

LISTA DE SIGLAS

ENEL	Ente Nazionale per l'Energia Elettrica
HFO	Heavy Fuel Oil
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
PDPA	Phase Doppler Particle Analyzer

RESUMO

Neste trabalho, foram construídos e ensaiados seis bocais tipo Y-jet para estudar a influência das diferentes configurações geométricas e condições operacionais nas características dos sprays por eles gerados.

O objetivo deste trabalho é obter, a partir da análise dos resultados experimentais, meios para estimar diâmetro médio de gotas geradas por um determinado bocal em função das pressões e viscosidades dos fluidos, obtendo-se, assim, uma ferramenta para auxiliar o operador do queimador com o objetivo de obter a melhor operação da instalação. Os seis bocais foram projetados para permitir a realização de análises de sensibilidade da operação relativas as características dimensionais mais relevantes, destacadas por Mullinger e Chigier (1974) e Song e Lee (1996). O trabalho fornece um conjunto de informações e recomendações para projetos de bocais, além de apontar tendências de comportamento de bocais já construídos e em operação.

O diâmetro médio de gota foi medido através de um instrumento ótico baseado na difração de um feixe de laser que atravessa determinada região da seção transversal do spray. Através de um dispositivo colocado na mesma seção, obteve-se a distribuição de combustível no spray. Além disso, foram medidas as vazões do fluido agente da nebulização e do fluido a nebulizar, bem como as pressões e temperaturas a montante dos bocais. Os resultados dos ensaios apresentam a distribuição de diâmetros de gotas e de líquido em uma determinada seção transversal do spray de cada bocal em função das condições operacionais.

Por meio de tomadas de pressão inseridas pelo orifício de entrada de combustível do bocal, foi possível medir a pressão de estagnação do ar na seção de mistura em diferentes pontos. Estes resultados mostram que o escoamento é subsônico e permitiram calcular a relação entre os fluxos de quantidade de movimento dos dois fluidos, Φ . Este adimensional, junto com a relação entre as vazões mássicas dos fluidos, ALR, é fundamental na descrição do escoamento interno do bocal, influenciando fortemente a distribuição de diâmetro de gotas e de combustível no spray.

ABSTRACT

In this work, six "Y-jet" atomizers were tested to understand the influence of geometric configurations and operational conditions on the characteristics of the sprays.

The objective of this work is estimate the mean drop size of a specific atomizer through expressions or diagrams, depending on the operational conditions. These diagrams indicate the best atomizer operation limited on the characteristics of the installation. The six atomizers were designed to analyze important dimensional characteristics, emphasized by Mullinger and Chigier (1974) and Song and Lee (1996). The analysis of the results helps the atomizer design and can indicate the behavior of atomizers that had already constructed.

The mean drop size was measured by an optical instrument based on laser beam diffraction through the spray cross section. The liquid distribution was obtained with a partenator. Liquid and air mass flow rates, pressures and temperatures behind the atomizer were measured too. The results of the experimental investigation show the drop size and liquid distribution in a cross section of the spray of each atomizer as a function of the operational conditions.

The air stagnation pressures in the mixture section were measured through pressure probes inserted in the fuel orifice of the atomizer. The air flow is subsonic at the mixture section. The momentum ratio, Φ , can be calculated through these results. The distribution of drop size and fuel fraction in spray are strongly influenced by the momentum ratio, Φ , and the mass ratio, ALR, inside the mixing chamber of the atomizer.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em processos de combustão industrial, a queima de líquidos na forma de sprays tem considerável importância, uma vez que representam quase a totalidade das chamas industriais geradas a partir de combustíveis líquidos.

O spray gerado por um nebulizador de óleo combustível pode possuir uma grande variação do diâmetro das gotas que se movem em diferentes direções e velocidades ao se encontrarem com o fluxo do ar de combustão.

Os fenômenos físico-químicos que ocorrem em uma câmara de combustão são influenciados pelos diversos fluxos que se estabelecem no seu interior que, por sua vez, são determinados pela geometria da câmara, pela distribuição espacial e pela quantidade de movimento dos jatos introduzidos. Alguns dos fenômenos que ocorrem em uma câmara de combustão estão listados na figura 1.1.

O queimador é parte fundamental no processo de combustão, pois é por ele que se introduzem o combustível através do nebulizador e o comburente por uma ou mais entradas. Desta forma, o nebulizador de combustível, a injeção de comburente e a câmara de combustão devem ser considerados de forma integrada nas análises do processo.

Um exemplo de queimador está esquematizado na figura 1.2. O ângulo α da figura se refere ao ângulo do spray de um bocal isolado, enquanto que 2β se refere ao ângulo do spray do conjunto de bocais.

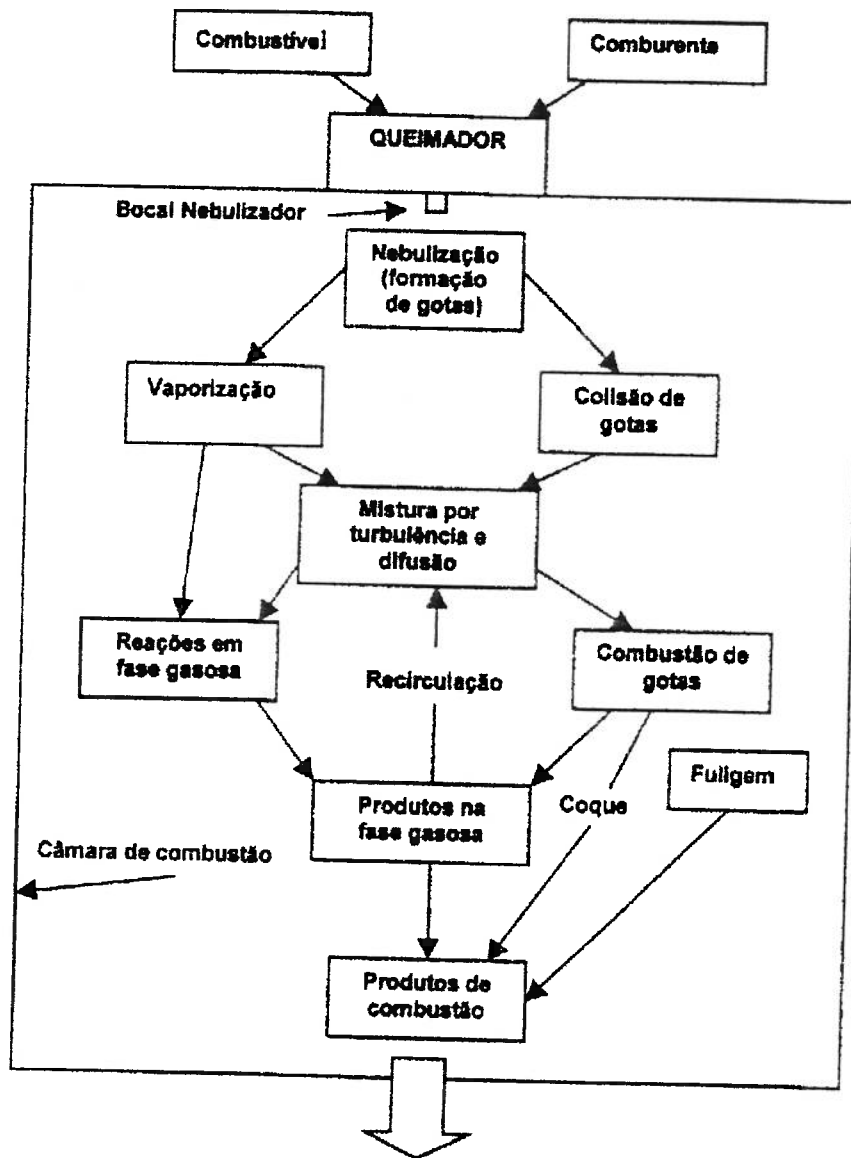
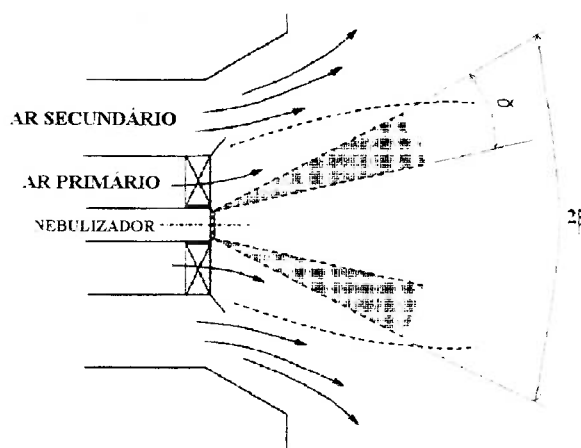


Figura 1.1 – Alguns dos fenômenos presentes em uma câmara de combustão
[Messias (1995)]



**Figura 1.2 – Esquema dos fluxos de ar e combustível de um queimador
[Graziadio (2001)]**

1.1 Conceitos Gerais sobre Nebulização

Nos experimentos realizados neste trabalho, foi utilizado ar como fluido auxiliar. Sendo assim, daqui em diante será utilizado “ar” e seu correspondente índice “a” para se referir ao “fluido de auxiliar” ou “fluido de nebulização” e “c” como índice das grandezas que estejam relacionadas ao combustível.

Os sprays gerados por nebulizadores que utilizam fluido auxiliar (ar ou vapor d’água) são, em geral, fortemente influenciados pela relação entre a vazão mássica do fluido auxiliar, W_a , e a vazão mássica de combustível, W_c , chamada ALR (air/liquid mass ratio).

$$ALR = \frac{W_a}{W_c} \quad (1.1)$$

Vários estudos experimentais sobre nebulizadores estimam o diâmetro médio das gotas, expresso por D_v ou SMD (Sauter Mean Diameter), do spray através de expressões da forma da eq. (1.2), como proposto por Lefebvre (1989).

$$\frac{SMD}{L} = (C_1 We^{-\delta} + C_2 Oh^\epsilon) \left(1 + \frac{1}{ALR}\right)^{\gamma} \quad (1.2)$$

As constantes C_1 , C_2 , δ , ε e γ são determinadas por resultados experimentais. Do lado esquerdo da expressão, L é uma dimensão característica do bocal. Os adimensionais We (número de Weber) e Oh (número de Ohnesorge), calculados para as condições de saída da câmara de mistura, são dados por:

$$We = \frac{\rho_a V_r^2 L}{\sigma} \quad (1.3)$$

$$Oh = \frac{\mu_c^2}{\sigma L \rho_c} \quad (1.4)$$

Onde: ρ_a : densidade do ar na saída do bocal (kg/m^3)

V_r : velocidade do ar relativa ao combustível na saída do bocal (m/s)

L : dimensão característica do bocal (m)

σ : tensão superficial do combustível (N/m)

μ_c : viscosidade cinemática do combustível (kg/m.s)

ρ_c : densidade do combustível (kg/m^3)

Geralmente, obtêm-se valores próximos a 0,5 para os expoentes δ e ε fazendo com que o diâmetro médio de gota seja inversamente proporcional à velocidade relativa entre o fluido auxiliar e o líquido, V_r e diretamente proporcional a μ_c .

O diâmetro médio de gota pode ser calculado com base na massa (ou volume), D_V , ou com base na razão entre o volume e a área superficial das gotas, $D_{[3,2]}$ ou SMD (“Sauter Mean Diameter”), calculados pelas eq. (1.5) e (1.6).

$$D_{[4,3]} = \frac{\sum n_i D_i^4}{\sum n_i D_i^3} \quad (1.5)$$

$$SMD = D_{[3,2]} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \quad (1.6)$$

A primeira expressão está relacionada ao diâmetro médio de gota que representa o spray teórico que possui o mesmo volume (ou a mesma massa) das gotas do spray real. A segunda expressão é geralmente mais utilizada, pois possui o seguinte significado físico: o SMD é o valor do diâmetro de gota de um spray teórico, que possua o mesmo volume por unidade de área superficial das gotas do spray real, relacionando o volume da gota com a sua área de troca de calor e massa.

1.2 Nebulizadores Y-jet

A figura 1.3 mostra um modelo de nebulizador chamado Y-jet, objeto de estudo deste trabalho. O combustível é introduzido pelo orifício (1) e passa no orifício de descarga de combustível (5). O fluido de nebulização, geralmente ar ou vapor d'água, é inserido pelo orifício (2), passa pelo orifício de descarga do ar (6) e se encontra com o combustível na câmara de mistura (7). Geralmente, a peça (3) contém entre 6 e 30 destes conjuntos de bocais em forma de “Y”. A mistura combustível/fluido de nebulização é injetada em forma de spray na câmara de combustão pelo orifício (4).

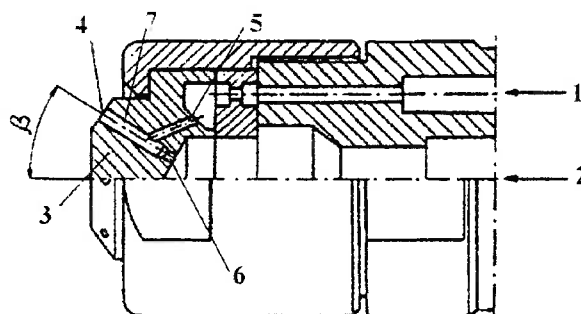


Figura 1.3 – Nebulizador tipo Y-jet

[Messias (1995)]

A alteração de parâmetros geométricos de nebulizadores Y-jet pode influenciar a forma da chama e, portanto, o perfil de transferência de calor.

Na Europa, o estudo de nebulizadores Y-jet foi motivado pela utilização dos óleos combustíveis de alta viscosidade (HFO) em caldeiras de centrais termoelétricas. No Brasil, a maioria dos óleos combustíveis industriais, chamados de ultra-viscosos, possui viscosidade ainda maior, o que piora as condições da nebulização.

Devido a essa particularidade, a queima de óleos nacionais geralmente causa maior emissão de Material Particulado (MP) composto por partículas de fuligem, coque e cinzas que podem se depositar no interior de fornos e caldeiras, reduzindo a eficiência dos equipamentos e piorando a qualidade do ar nas proximidades das instalações quando as emissões são lançadas pela chaminé.

Nebulizadores Y-jet são empregados na queima de combustíveis de viscosidade elevada devido a:

- Os ângulos α e β do spray não variarem significativamente com a vazão de combustível.
- Obtenção de boa qualidade de spray com baixo consumo de fluido auxiliar em comparação com outros modelos de nebulizadores.

O estudo do escoamento interno em um bocal Y-jet é relevante, uma vez que o regime de escoamento influencia o diâmetro das gotas e a distribuição de combustível no spray. Além disso, a assimetria do escoamento na câmara de mistura do bocal se altera com diferentes condições operacionais, provocando assimetria na estrutura do spray.

Por outro lado, sabe-se que a nebulização determina as relações locais entre o ar e o combustível na câmara de combustão, influenciando o perfil de transferência de calor entre a chama e a carga e a formação de material particulado (MP) e poluentes como CO e NO_x.

Muitos trabalhos sobre este modelo de nebulizador procuram desenvolver expressões para estimar o diâmetro médio de gota do spray. A expressão de Wigg, eq. (1.7), muito utilizada por acadêmicos e fabricantes de queimadores, é específica para nebulizadores Y-jet.

$$D_V = 200 \cdot v_{cw}^{0,5} \cdot W_{cw}^{0,1} \cdot \left(1 + \frac{1}{ALR}\right)^{0,5} \cdot \rho_{ow}^{0,1} \cdot \sigma_w^{0,2} \cdot \rho_{aw}^{-0,3} \cdot V_r^{-1,0} \quad (1.7)$$

Esta equação mostra que o diâmetro médio mássico de gota, D_V , é fortemente influenciado pela velocidade relativa entre o ar e o combustível na saída do bocal, V_r .

Quanto às propriedades dos fluidos, a viscosidade do líquido, v_{cw} , possui expoente 0,5, enquanto que a tensão superficial, σ_w , expoente 0,2. Isto se deve ao fato de que as forças de cisalhamento são predominantes sobre as forças devido à tensão superficial na interface entre as duas fases, o que geralmente ocorre quando o fluido auxiliar possui velocidades muito maiores que a fase líquida como nos bocais Y-jet.

Segundo a equação de Wigg, o raio da câmara de mistura tem fraca influência no D_V , já que r_{ow} possui expoente 0,1. Da mesma forma, o diâmetro médio de gota é pouco influenciado pela vazão de combustível, W_{cw} , ao contrário da densidade do ar na saída do bocal, ρ_{aw} , que possui expoente -0,3.

Já o termo que inclui o ALR, relação entre a vazão mássica de fluido auxiliar e a vazão mássica de líquido, é importante nessa equação, pois possui expoente 0,5. De fato, o ALR é uma relação que provoca grandes alterações no diâmetro médio das gotas, conseguindo, em muitos casos reduzir a influência do aumento da viscosidade do combustível.

Um valor de ALR relativamente pequeno faz com que a transferência da quantidade de movimento do ar para o combustível seja insuficiente para superar as forças viscosas e de tensão superficial do líquido, que juntas se opõem à formação das gotas.

No processo de geração de sprays em bocais Y-jet, distinguem-se, basicamente, três regiões em que ocorrem diferentes mecanismos de nebulização, como mostram a figura 1.4 e a tabela 1.1.

- A) Região onde se dá o encontro do líquido com o fluido auxiliar, formando gotas pequenas por colisão direta.
- B) Região onde se forma uma película na parede da câmara de mistura arrastada, junto com as gotas formadas na região A, pela quantidade de movimento do fluido auxiliar.
- C) Região onde ocorre a desintegração da película.

No esquema de um bocal Y-jet da figura 1.5, representa-se o eixo de coordenadas e indica-se a nomenclatura utilizada neste estudo.

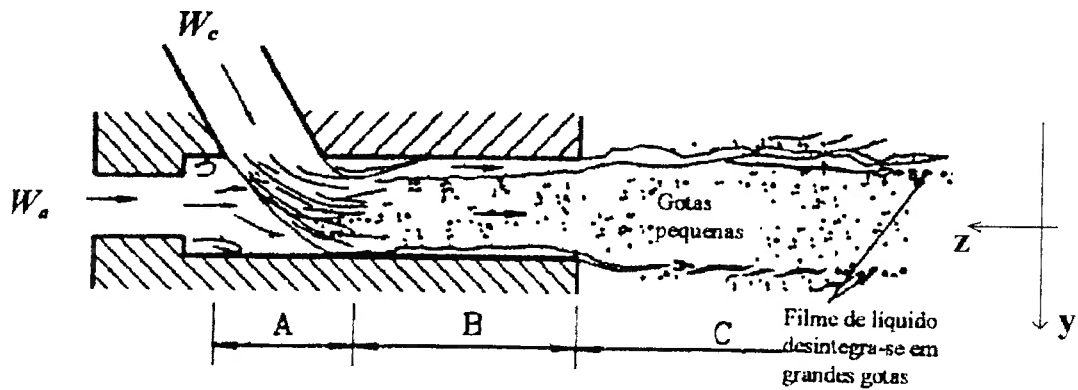


Figura 1.4 – Mecanismos de formação de gotas em um bocal Y-jet
[Song e Lee (1996)]

Tabela 1.1 – Fenômenos envolvidos nos mecanismos de geração de gotas segundo Song e Lee (1996)

Região	Mecanismos de nebulização	Fenômenos envolvidos
A	Colisão direta	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de pequenas gotas devido à colisão direta entre o jato de ar e o de líquido
B	Arraste de gotas e formação da película	<ul style="list-style-type: none"> • Formação de película de líquido na parede interna da câmara de mistura • O cisalhamento da película de líquido pelo ar gera gotas que passam ao fluxo de ar interno • A parcela de líquido na película aumenta devido à coalescência entre as gotas no fluxo interno de ar e ao choque destas gotas com a película
C	Desintegração da película	<ul style="list-style-type: none"> • Desintegração da película em gotas grandes

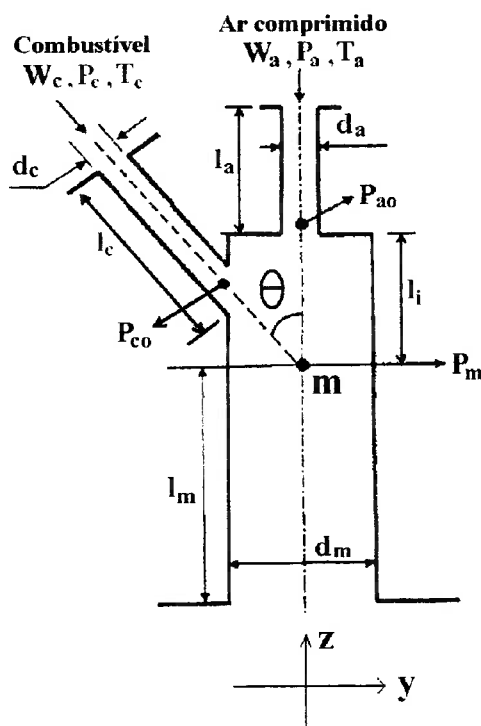


Figura 1.5 – Esquema e sistema de coordenadas para os bocais Y-jet

O processo que ocorre na região A da figura 1.4, onde o fluido auxiliar se encontra com o combustível, é fundamental na distribuição do combustível e do diâmetro das gotas no spray.

Se o fluxo da quantidade de movimento do ar na direção axial do bocal (eixo z) for muito maior que o fluxo da quantidade de movimento do combustível na direção radial (eixo y), na região A da figura 1.4, haverá a formação de uma película de combustível de espessura relativamente grande na parede da câmara de mistura e grande parte da vazão de combustível escoará por esta película. Na região B, a película será acelerada pela quantidade de movimento do ar e parte se transformará em gotas localizadas na região central do spray, devido às forças de cisalhamento na interface entre as duas fases. Na região C, a película, ao sair do bocal, se romperá em filetes de líquido e estes em gotas relativamente grandes que estarão na periferia do spray, no lado negativo do eixo y .

Se o fluxo da quantidade de movimento do ar na direção axial for muito menor que o fluxo da quantidade de movimento de combustível na direção radial no ponto de mistura, os mecanismos de nebulização serão os mesmos do caso anterior.

Neste caso, entretanto, a maior fração de combustível e as maiores gotas do spray se encontrarão na parte positiva do eixo y na região C.

Se a relação entre os fluxos de quantidade de movimento estiver em uma faixa intermediária, uma parte do combustível entrará na região B formando uma película de espessura menor e mais uniforme, junto à parede da câmara de mistura. O restante do combustível será nebulizado por colisão direta, formando um grande número de pequenas gotas que estarão localizadas na região central do spray. Na periferia, a fração de combustível e o diâmetro das gotas serão menores, pois a película formada na região B que sai do bocal é mais fina e mais uniforme.

Desta forma, muitos estudos sobre bocais Y-jet consideram que a relação entre os fluxos de quantidade de movimento do ar na direção axial e do combustível na direção radial, chamada Φ , representa melhor a estrutura do spray do que o ALR. Tal relação é calculada através da eq. (1.8) para o ponto “m” da figura 1.5. Quanto maior a quantidade de movimento do ar na direção axial, menor o valor de Φ .

$$\Phi = \frac{G_c^2}{G_{a,m}^2} \frac{\rho_{a,m}}{\rho_c} \frac{d_c^2}{d_m^2} \text{sen}\theta \quad (1.8)$$

Onde: d_m : diâmetro da câmara de mistura (mm)

d_c : diâmetro do orifício de descarga do combustível (mm)

$\rho_{a,m}$: densidade do ar no ponto de mistura (kg/m^3)

ρ_c : densidade do combustível (kg/m^3)

$G_{a,m}$: vazão mássica de ar por unidade de área da câmara de mistura ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

G_c : vazão mássica de combustível por unidade de área do orifício de descarga de combustível ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

θ : ângulo entre o orifício de descarga de combustível e o orifício de descarga de ar

Sendo assim, com pequenas modificações na configuração geométrica de bocais Y-jet consegue-se provocar alterações significativas no escamento da câmara de mistura, influenciando fortemente a qualidade do spray.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho desenvolvido para nebulizadores Y-jet é fornecer o suporte experimental para:

- Obter expressões ou ábacos que estimem diâmetro médio das gotas geradas para diferentes condições operacionais com a finalidade de obter boa nebulização.
- Elaborar uma análise de sensibilidade dos diferentes parâmetros geométricos e operacionais que determinam o desempenho do nebulizador.
- Fornecer aos operadores de equipamentos com nebulizadores Y-jet meios de regulação dos queimadores para o melhor desempenho.
- Fornecer elementos para os projetistas destes bocais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os nebulizadores podem ser divididos em duas categorias:

- nebulizadores por pressão
- nebulizadores com fluido auxiliar

Os nebulizadores tipo Y-jet pertencem à segunda categoria, ou seja utiliza um fluido auxiliar para promover a nebulização.

Trabalhos experimentais financiados por Universidades, Institutos de Pesquisa ou órgãos ambientalistas estão disponíveis na literatura. No entanto, estudos financiados por fabricantes de queimadores são de acesso restrito devido ao segredo tecnológico envolvido. É provável que esta seja uma das causas da escassez de trabalhos publicados a partir de 2000.

A maioria das publicações sobre nebulização de líquidos em bocais Y-jet são das décadas de 70 e 90 onde são apresentados estudos sobre a influência do escoamento interno destes bocais na forma do spray gerado por eles.

Desde os anos 70, os estudos se baseiam em medições de diâmetro de gotas em uma determinada seção transversal do spray, utilizando técnicas fotográficas ou, mais recentemente, técnicas a laser. A comparação entre sprays formados por diferentes bocais em diferentes condições operacionais permite analisar a influência de alguns parâmetros na formação das gotas e na distribuição de combustível.

2.1 Referências Básicas

A publicação de trabalhos dedicados a bocais Y-jet se iniciou com o artigo de Mullinger e Chigier (1974), frequentemente citado em vários estudos posteriores e permanecendo como referência importante para projetos atuais.

Sob o título “The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin Fluid Atomizers”, aqueles autores tinham o objetivo de desenvolver um roteiro de projeto baseado em experimentos realizados em nebulizadores de dimensões diferentes. O arranjo experimental utilizado está esquematizado na figura 2.1.

Para obter a distribuição do diâmetro de gotas e visualizar a formação das películas e gotas de líquido à saída do bocal os autores utilizaram uma técnica fotográfica em conjunto com uma lente de distância focal 150 mm. A iluminação necessária para as fotografias era fornecida por uma faísca de alta voltagem.

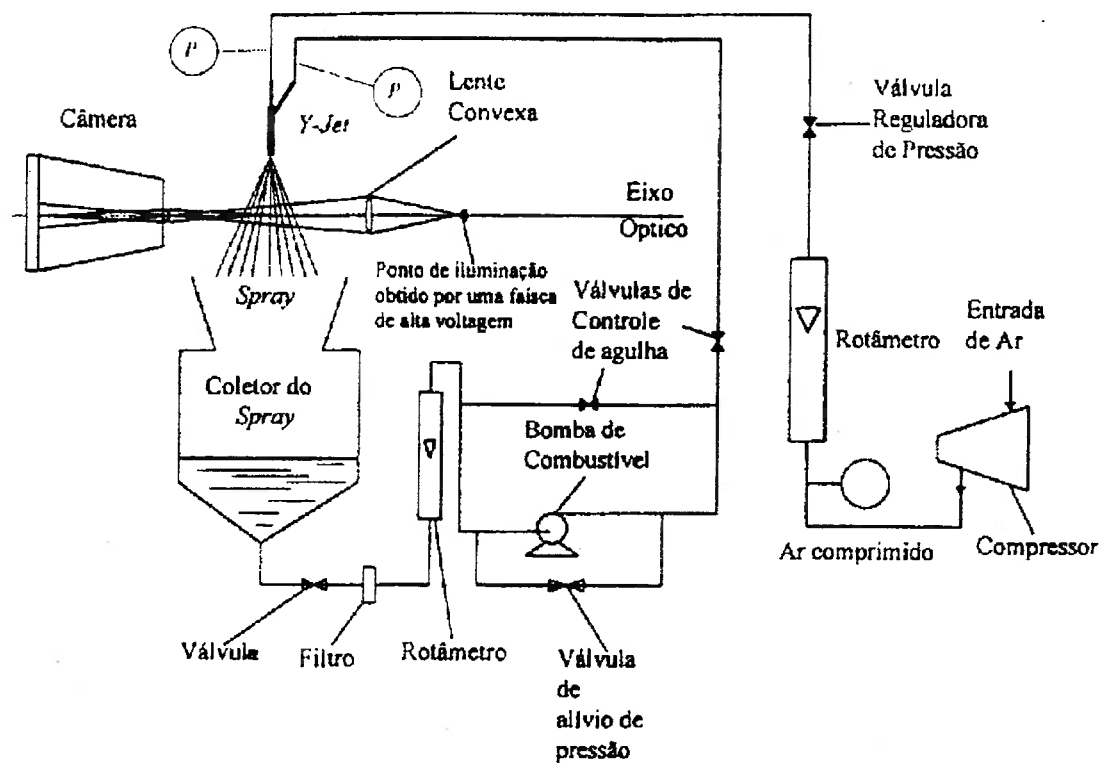


Figura 2.1 – Esquema do arranjo experimental de Mullinger e Chigier (1974)
[Mullinger e Chigier (1974)]

Para cada condição de ensaio, a pressão de suprimento de ar e de combustível são constantes. Uma mesa de coordenadas permite mapear os sprays gerados através das fotografias cujos negativos, mais tarde, eram projetados em uma tela translúcida para determinar os diâmetros e a distribuição das gotas do spray.

Mullinger e Chigier mediram as pressões de suprimento de ar e de combustível, P_a e P_c e as vazões mássicas de ar e combustível, W_a e W_c . As

condições operacionais dos ensaios foram: $6 < W_c < 104$ kg/h e $0,1 < P_a < 1,0$ MPa. Nestas faixas de operação, ALR variou entre 0,01 e 0,12.

Foram instaladas tomadas de pressão na parede interna dos nebulizadores nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 como ilustra a figura 2.2.

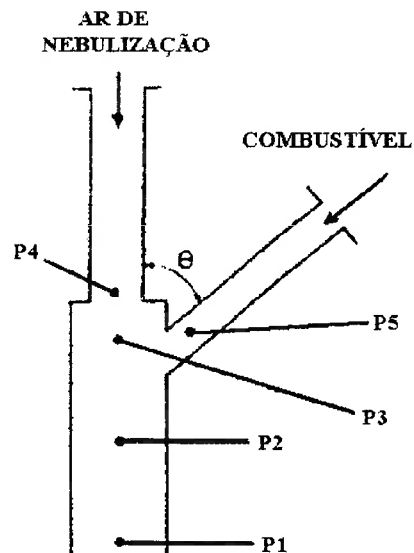


Figura 2.2 – Pontos de tomadas de pressões
[Mullinger e Chigier (1974)]

Através das fotografias, os autores concluíram que:

- Aumentando o ALR, a quebra da película formando as gotas de combustível gerada na parede da câmara de mistura ocorre mais próxima ao bocal, o que diminui o diâmetro médio das gotas.
- Tanto o aumento da vazão de combustível quanto da vazão de ar diminuem o diâmetro médio das gotas.

Na figura 2.3, reproduzida do artigo, está esquematizado o escoamento interno ao bocal e a formação das gotas, geradas a partir da película anular de combustível existente na parede da câmara de mistura.

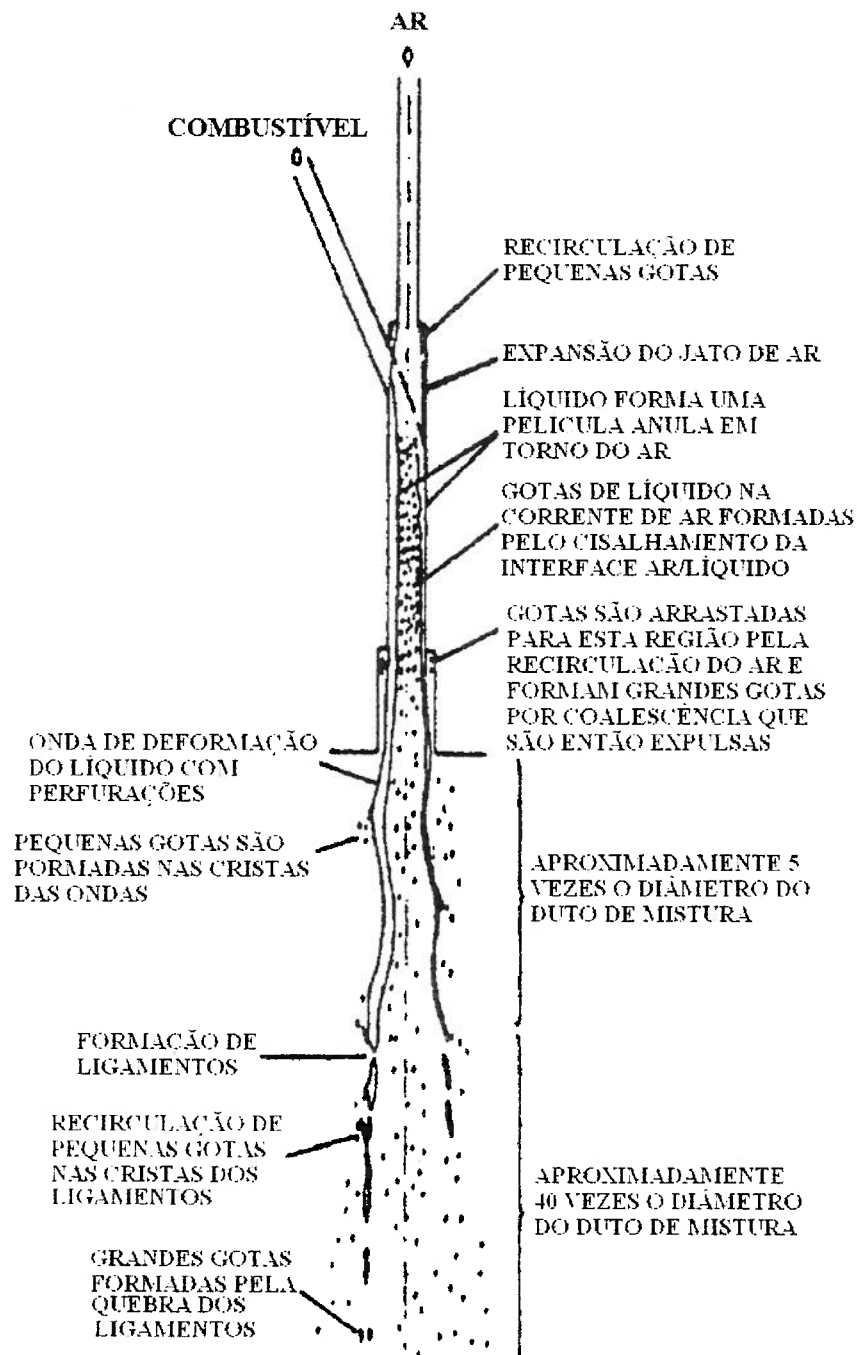


Figura 2.3 – Mecanismos de formação do spray

[Mullinger e Chigier (1974)]

As medições de pressão P_1 , P_2 , P_3 , P_4 e P_5 mostraram que a perda de carga ao longo do orifício de descarga de combustível não varia significativamente com a variação de P_a ou W_a , ou seja, o coeficiente de descarga deste orifício se mantém constante para a mesma vazão de combustível. Concluiu-se também que um aumento em W_c reduz W_a se P_a for mantida constante.

Quanto aos parâmetros geométricos dos nebulizadores, os autores afirmaram que:

- Aumentando o diâmetro da câmara de mistura, d_m , mantidas W_a e W_c , ocorre uma diminuição sensível em P_a e P_c , o que aumenta o diâmetro médio das gotas.
- A relação d_m/d_a dos bocais apresenta diâmetro médio de gota menor se estiver entre 1,4 e 1,8.
- A relação d/d_a dos bocais apresenta diâmetro médio de gota menor se estiver entre 1,0 e 1,4 para θ próximo a 50° .
- O comprimento da “pré-câmara” l_i deve ser, pelo menos, $\frac{3}{4}$ do diâmetro de entrada de ar, d_a para que se obtenha operação estável.
- As relações l_a/d_a e l_c/d_c devem ser no mínimo, 2 para que se obtenha operação estável.
- Aumentando a relação l_m/d_m , permite-se que o tempo em que o ar transfere quantidade de movimento ao combustível aumente, melhorando o diâmetro da gota. O valor ideal, segundo o artigo está em torno de 4. Valores maiores não causam efeitos significativos.

No tratamento dos dados experimentais, os autores conseguem boa correlação entre o diâmetro médio de gota obtido experimentalmente e o estimado pela equação de Wigg (1.7) em várias condições operacionais.

Um grupo importante de pesquisadores na área de nebulização, localizados no ENEL (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica), na Università di Pisa e na Università di Udine, publicou vários artigos nas décadas de 80 e 90 motivados pela necessidade de entender melhor o comportamento dos nebulizadores Y-jet utilizados nas caldeiras de centrais termoelétricas européias.

O arranjo experimental, esquematizado na figura 2.4 foi utilizado em vários trabalhos do grupo do ENEL, dentre os quais se destacam as publicações de Michele et al. (1991) e Andreussi et al. (1992 e 1994).

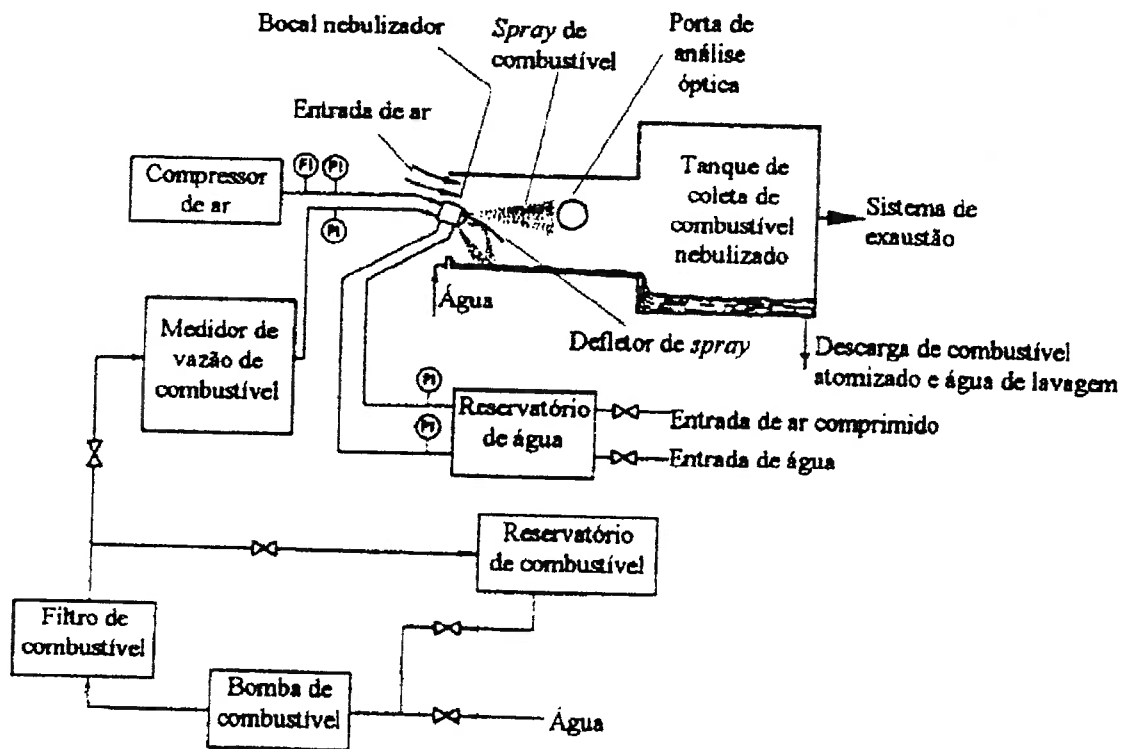


Figura 2.4 – Arranjo experimental básico do ENEL
[Pacífico (2000)]

Michele et al. (1991) nebulizaram óleo semelhante aos HFOs utilizando ar comprimido. Foram medidos o diâmetro médio das gotas utilizando a técnica laser e a velocidade média local das gotas com a técnica PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer). Com esta instrumentação, esquematizada na figura 2.5, foi possível mapear os sprays gerados a partir de diferentes condições operacionais.

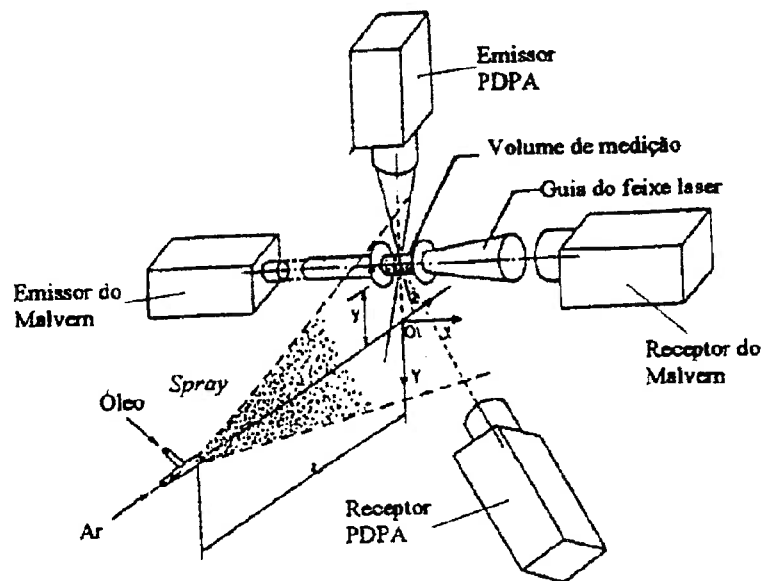


Figura 2.5 – Instrumentação para mapeamento do spray
[Michele et al. (1991)]

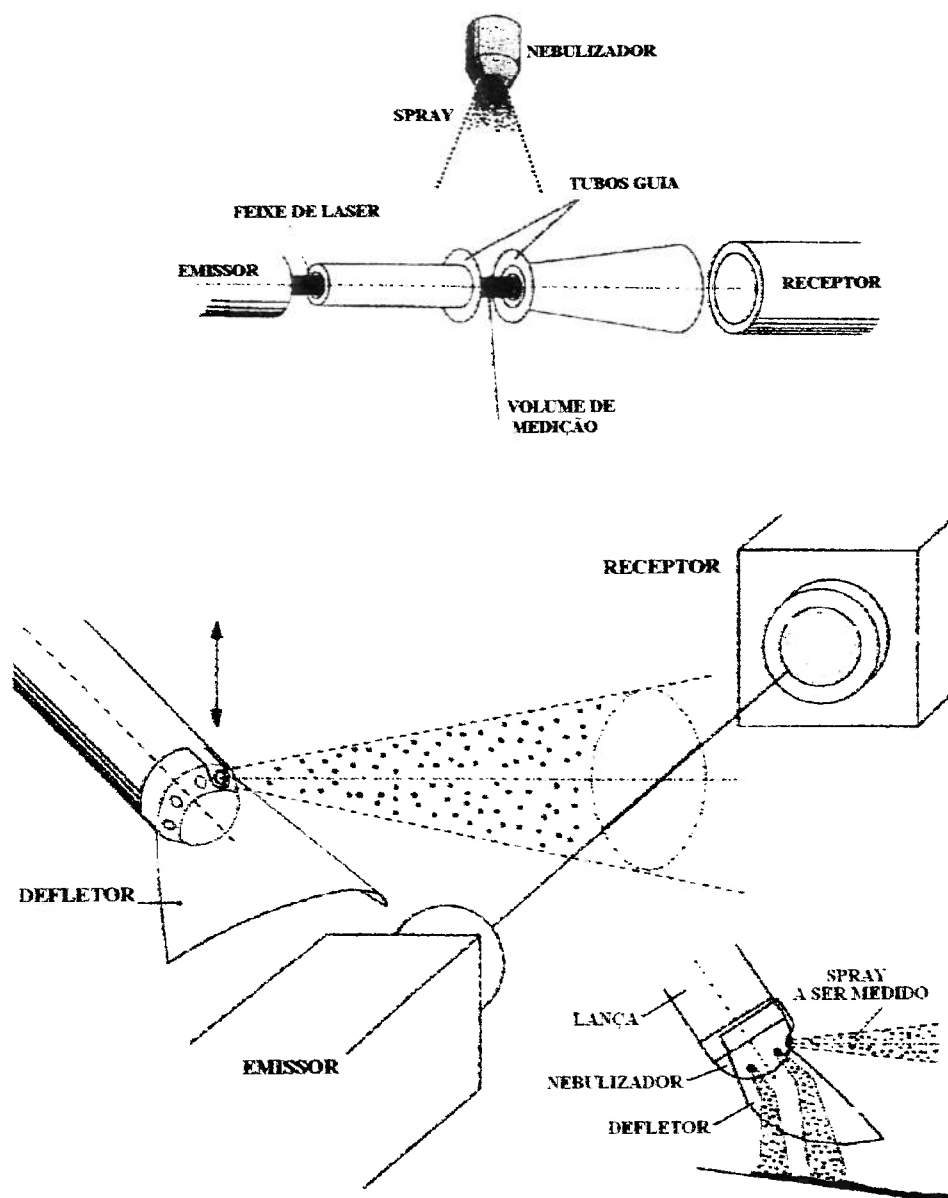
O nebulizador ensaiado era utilizado em uma caldeira de uma central termoelétrica. Suas dimensões eram: $l_a = 3,8$ mm, $l_m = 9,0$ mm, $\theta = 45^\circ$, $l_c = 17,4$ mm, $d_m = 2,1$ mm e $d_c = 1,05$ mm. A alta vazão de óleo necessária para simular o spray gerado na caldeira inviabilizava o ensaio em laboratório, devido a problemas decorrentes da elevada densidade do spray cuja medida recebe o nome de obscurecimento.

Para a aplicação das técnicas a laser para medição do diâmetro das gotas, o obscurecimento provocado pelo spray não pode ser nem muito denso nem muito diluído.

Para diminuir o obscurecimento nas condições em que a vazão de combustível era elevada, foram colocados tubos-guias externos ao feixe de laser para reduzir o volume de medição “enxergado” pelo receptor de laser. Além disso, acoplou-se um defletor ao nebulizador para isolar apenas um de seus orifícios, como mostra a figura 2.6.

Desta forma, foi possível utilizar a técnica laser para medição do diâmetro de gotas em uma pequena parte da seção transversal do spray, alcançando valores adequados de obscurecimento. Através de uma mesa de coordenadas, movimentou-se o nebulizador de forma a obter um mapa completo do spray.

Este trabalho determinou condições operacionais ótimas (vazões e pressões de combustível e ar) para obter menores diâmetros de gotas e analisou qualitativamente a influência dessas condições na qualidade do spray.



**Figura 2.6 – Colocação de tubos-guias e acoplamento do defletor
[Reprodução de Graziadio (2001)]**

No artigo de Andreussi et al. (1992), foi utilizado o mesmo arranjo experimental da figura 2.4, onde 2 bocais Y-jet foram ensaiados utilizando água ou óleo para simulação dos HFOs.

Além de medir o diâmetro das gotas, também foram medidas pressões internas ao longo da câmara de mistura, assim como fizeram Mullinger e Chigier (1974).

Mais tarde, Andreussi et al. (1994) estudaram a influência das condições operacionais em dois nebulizadores Y-jet diferentes com o objetivo posterior de entender como a qualidade do spray altera a formação de poluentes como NO_x .

Neste artigo, os autores mediram a espessura da película de óleo formada na parede da câmara de mistura através do método da impedância para analisar como as condições operacionais e as dimensões do bocal alteram a fração de óleo nebulizada a partir desta película.

A partir dos resultados experimentais, constatou-se a grande influência da relação entre os fluxos de quantidade de movimento do fluido agente da nebulização e o fluido a ser nebulizado, Φ , na espessura da película, na distribuição de líquido e no diâmetro das gotas do spray.

Graziadio (2001) reuniu os trabalhos feitos pelo ENEL, nas Universidades de Pisa e Udine, na Itália.

Nas seções dedicadas aos bocais Y-jet, há uma grande preocupação em determinar faixas de pressões e vazões de ar e óleo em que se obtenham condições estáveis, evitando pulsações.

Reunindo trabalhos anteriores, Graziadio mostra que a relação Φ deve estar entre 7 e 12 para se obter valores menores de diâmetro médio de gota e distribuição mais uniforme de líquido no spray.

O autor também desenvolve expressões semelhantes à sugerida por Lefebvre (1978), como a eq. (1.2) colocada na seção 1.1 para estimar o diâmetro das gotas, além de elaborar um roteiro de projeto similar ao de Mullinger e Chigier (1974).

O artigo de Song e Lee (1996), “Study of atomization mechanism of gas/liquid mixtures flowing through Y-jet atomizers”, analisou os mecanismos de nebulização dos bocais Y-jet e suas diferentes formas de spray utilizando água em vez de óleos de simulação.

Medindo o diâmetro médio das gotas através da técnica a laser do instrumento “Malvern Particle Sizer” e técnicas fotográficas ultra-rápidas, visualizou-se o escoamento interno de dois bocais transparentes e a forma do spray

gerado logo à saída do bocal. O arranjo experimental está esquematizado nas figuras 2.7 e 2.8.

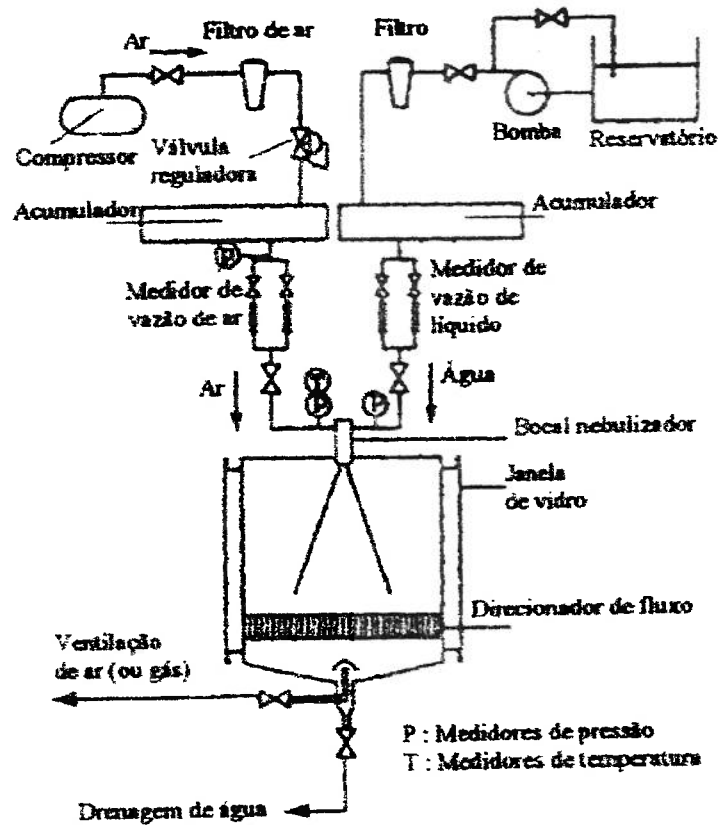


Figura 2.7 – Arranjo experimental de Song e Lee
[Song e Lee (1996)]

Bocal nebulizador Y-Jet

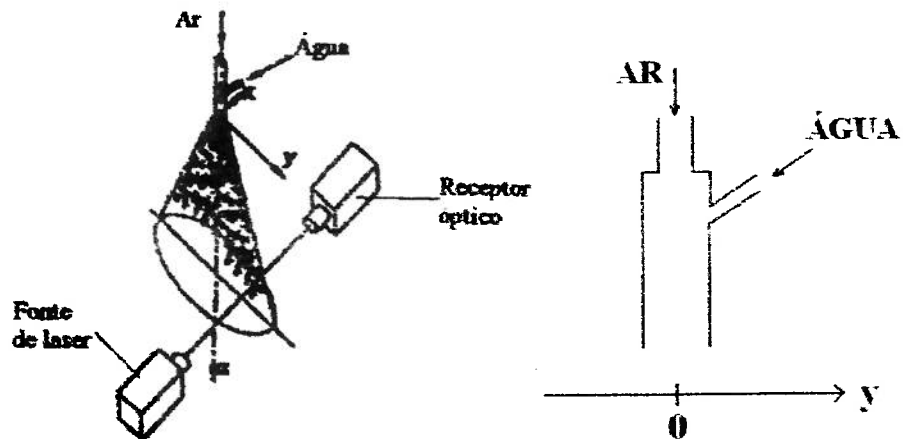
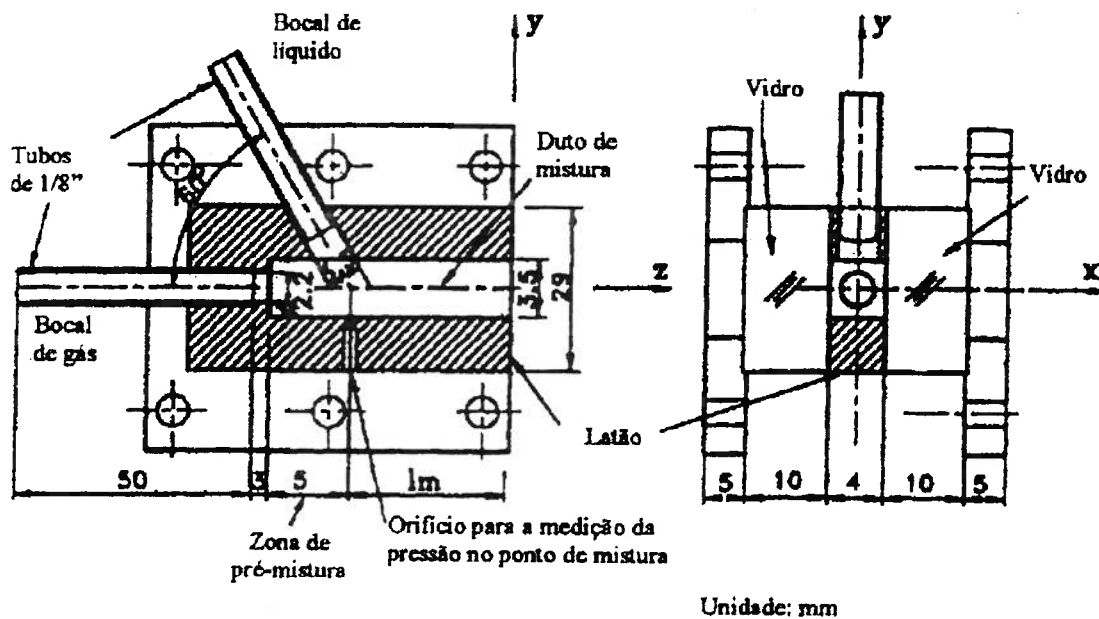


Figura 2.8 – Eixo de coordenadas da bancada de ensaios de Song e Lee
[Song e Lee (1996)]

As dimensões geométricas dos bocais com câmara de mistura de seção retangular ensaiados eram idênticas, a menos do comprimento da câmara de mistura. O bocal número 1 possuía l_m/d_m igual a dois, enquanto que no número 2, essa relação era quatro. Os autores não explicam, no artigo, o por quê das seções transversais da câmara de mistura serem retangulares.



Unidade: mm

Bocais nebulizadores	#1	#2
Comprimento do duto de mistura (l_m)	7,0	14,0

Figura 2.9 – Bocais utilizados por Song e Lee

[Song e Lee (1996)]

As técnicas fotográficas utilizadas nos ensaios por Song e Lee permitiram observar a formação do spray de gotas por três diferentes processos de nebulização esquematizados na figura 1.4 e na tabela 1.1, no Capítulo 1. Além disso, os autores visualizaram recirculações na pré-câmara, como mostra a figura 2.10, mais fortes nas condições em que os valores de Φ eram relativamente baixos. Nesta região, pequenas gotas podem ser formadas a partir da desintegração do filme de combustível na parede.

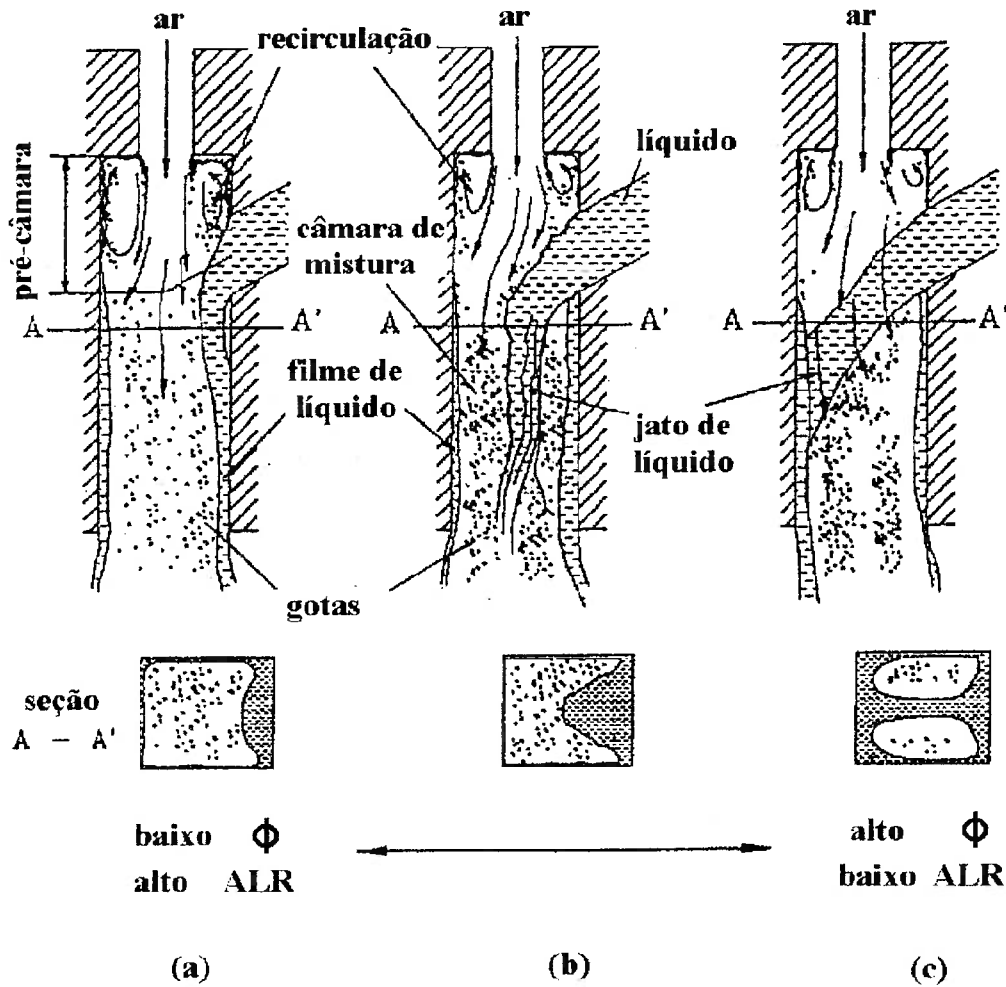


Figura 2.10 – Diferentes regimes de escoamento em um bocal Y-jet [Song e Lee (1996)]

Enquanto as gotas da zona central do spray em geral são menores, pois são geradas, principalmente, pela colisão direta entre os jatos de ar e de combustível, as gotas da periferia são maiores uma vez que são geradas pelo rompimento da película formada na região B do bocal (ver figura 1.4 do Capítulo 1).

Song e Lee (1996) obtiveram, então, curvas de fração de líquido e de diâmetro de gota representado por $D_{V[0,5]}$ a 200 mm de altura da saída do bocal em diferentes condições operacionais. A figura 2.11 apresenta, do lado esquerdo, os perfis de $D_{V[0,5]}$ (μm) e, do lado direito, os perfis de fração de líquido ao longo do eixo y para diversos valores de Φ , resultados dos ensaios do bocal #1.

Nota-se, através da figura 2.8 que o sistema de coordenadas de Song e Lee (1996) é diferente do utilizado neste trabalho. O orifício de óleo se situa no lado positivo do eixo y e representado no eixo horizontal em milímetros.

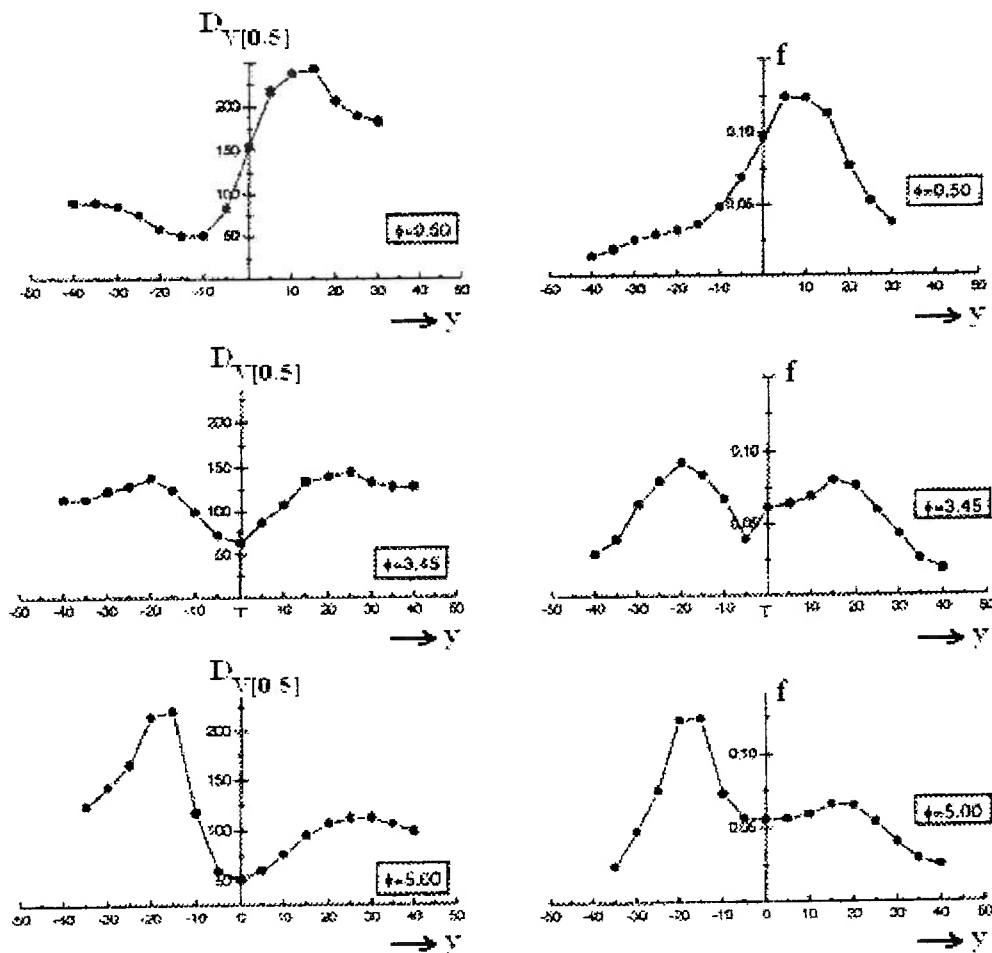


Figura 2.11 – Perfis do spray a 200 mm do bocal #1 para diferentes relações Φ [Song e Lee (1996)]

Os autores constataram a influência de Φ no diâmetro médio de gotas do spray ponderado na fração de líquido, $(D_{V[0.5]})_m$, como mostra a figura 2.12.

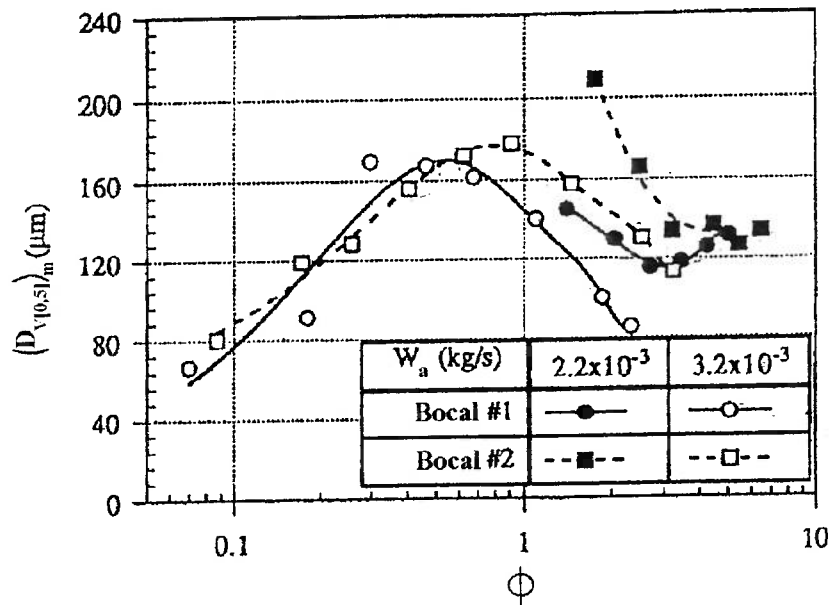


Figura 2.12 – Comportamento dos diâmetros médios das gotas em função de Φ
 [Song e Lee (1996)]

Entre as conclusões, o artigo destaca:

- O diâmetro médio de gota ponderado na fração de líquido, $(D_{V(0.5)})_m$, é mínimo para $3 < \Phi < 5$ em ambos os bocais, como mostra a figura 2.12.
- O parâmetro l_m/d_m influencia o diâmetro das gotas na periferia do spray, formadas a partir da desintegração da película de líquido na parede da câmara de mistura.

Os trabalhos de Song e Lee (1996) e Graziadio (2001) determinam faixas ótimas bem distintas para a relação adimensional Φ , fato que gera dúvidas na forma com que cada um dos autores obtém esta relação.

Pacífico (2000), em sua tese de doutorado, ensaiou 8 diferentes bocais Y-jet de orifício único na Estação de Avaliação de Sprays do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo). O objetivo principal do trabalho foi propor um modelo unidimensional, bifásico e compressível para a simulação do escoamento no interior do bocal, comparando seus resultados com os experimentais.

Para isto, foram medidas as pressões do escoamento bifásico (ar e água) na câmara de mistura (P_M, P_1, P_2), como mostra o esquema do arranjo experimental da figura 2.13.

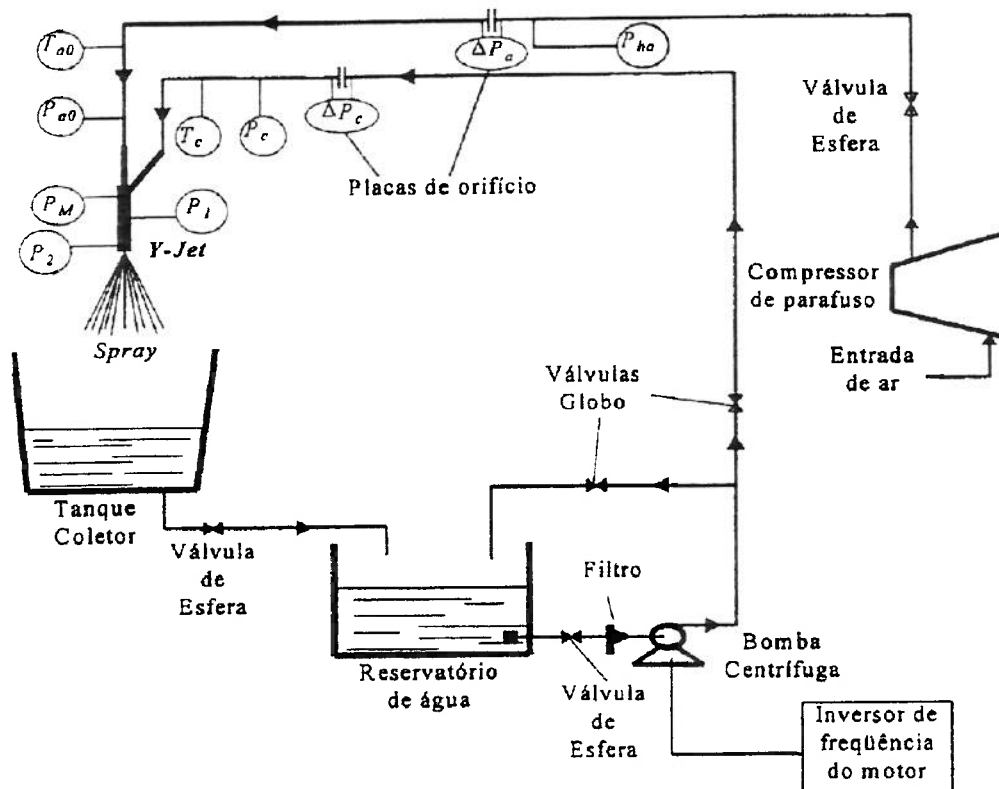


Figura 2.13 – Arranjo experimental de Pacífico (2000)
[Reprodução de Pacífico (2000)]

A espessura da película de líquido foi medida através de fibras óticas colocadas ao longo da parede da câmara de mistura. Não foram feitas medições de diâmetro de gotas.

Com os resultados experimentais, Pacífico (2000) propõe uma expressão para calcular a pressão do ar no ponto de mistura, P_m em função da pressão de suprimento de ar, P_{a0} na eq. (2.1), de relações como ALR e outras relações geométricas. Obter o valor de P_m para cada condição operacional através da eq. (2.1) é importante para o cálculo da relação Φ .

$$\frac{P_m}{P_{a0}} = 0,169 + 0,81 \cdot \exp \left[-0,675 \cdot \left(\frac{l_m}{d_m} \right)^{-0,38} \cdot \left(\frac{d_m}{d_a} \right)^4 \cdot \theta^{-0,22} \cdot ALR^{-0,87} \right] \quad (2.1)$$

Ao final do extenso trabalho experimental, o autor conclui que:

- O ângulo θ possui forte influência no coeficiente de descarga do orifício de líquido. Nesta expressão, θ está expresso em radianos.
- O parâmetro geométrico l_m/d_m é importante no perfil de pressões ao longo do comprimento da câmara de mistura, mas praticamente não provoca alterações na relação Φ .
- O parâmetro geométrico d_m/d_a é fundamental para definir o escoamento na câmara de mistura.

Messias e Jen (2001) realizaram um estudo cujo objetivo era reduzir as emissões de poluentes como CO, NO_x e material particulado (MP), gerados na combustão de óleo ultra-viscoso (em torno de 30 cSt) em uma caldeira através de modificações na configuração geométrica dos nebulizadores Y-jet originais, fornecidos pelo fabricante do queimador.

As medições de tamanho de gotas foram realizadas na Estação de Avaliação de Sprays do IPT, utilizando técnica baseada na difração de laser (Malvern Sizer). A distribuição de combustível foi medida através de um dispositivo chamado partenador ou fracionador, mostrado na figura 2.14.

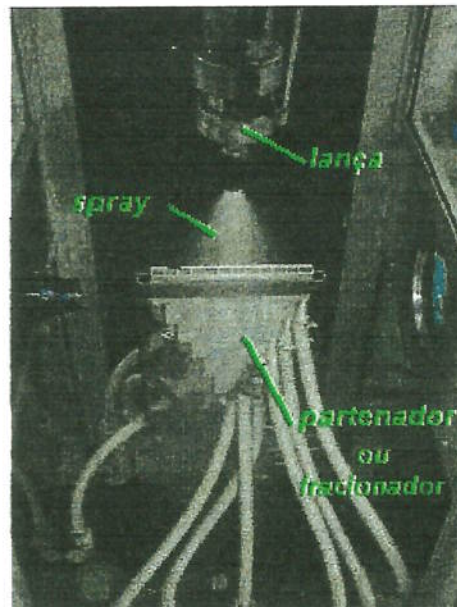
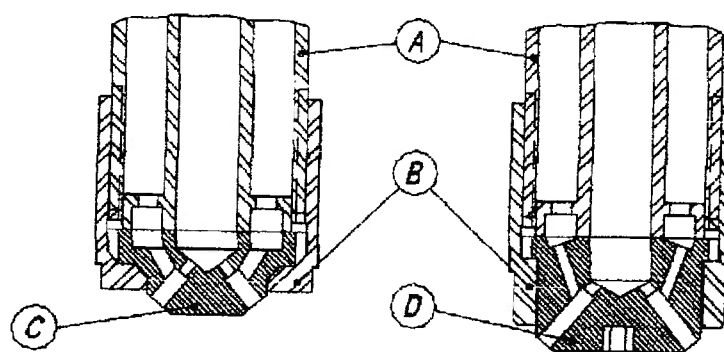


Figura 2.14 – Partenador ou fracionador

[Messias e Jen (2001)]

A infra-estrutura da Estação de Avaliação de Sprays está detalhada no item 1 do Capítulo 3, “Descrição do Arranjo Experimental”, uma vez que neste trabalho a mesma infra-estrutura foi utilizada.

O nebulizador Y-jet proposto por Messias e Jen (2001) foi projetado e construído baseado no nebulizador original, mas com alterações geométricas que permitiram valores maiores de ALR para as mesmas condições de pressões de óleo combustível e fluido de nebulização, no caso, vapor d’água. Além disso, aumentou-se o comprimento das câmaras de mistura com relação ao nebulizador original, como mostra a figura 2.15.



- A: lança de óleo combustível
- B: porca de fixação
- C: nebulizador original
- D: nebulizador modificado

Figura 2.15 – Esquema dos nebulizadores ensaiados
[Messias e Jen (2001)]

A partir dos ensaios realizados no IPT, verificou-se que o SMD do spray do nebulizador modificado (D) pelos autores, esquematizado à direita na figura 2.15, é significativamente menor que o SMD do nebulizador original (C), esquematizado à esquerda na figura 2.15, principalmente na região do gráfico da figura 2.16 onde o ALR é maior. A linha tracejada representa o SMD das gotas geradas pelo nebulizador original (C) operando com óleo lubrificante, enquanto que a linha cheia representa o SMD das gotas geradas pelo nebulizador modificado (D) operando com óleo lubrificante.

Os ensaios na Estação de Avaliação de Sprays nebulizaram 1680 kg/h de óleo lubrificante com viscosidade cinemática em torno de 30 cSt. Utilizou-se ar comprimido como fluido de nebulização.

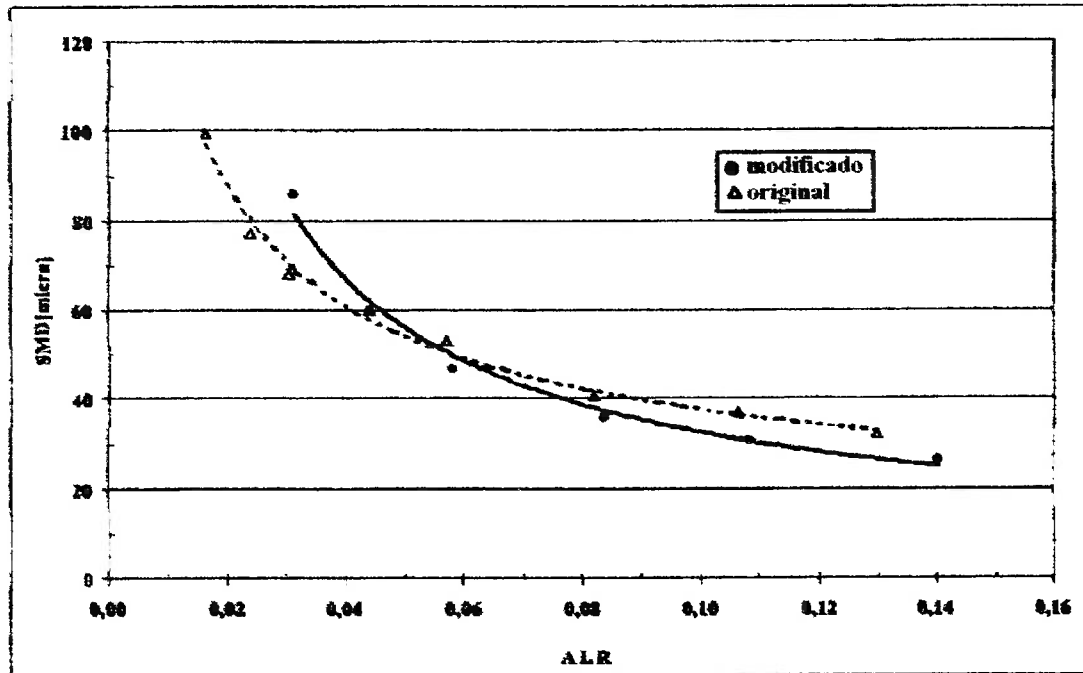


Figura 2.16 – Curvas de SMD em função do ALR

[Messias e Jen (2001)]

Após os ensaios na Estação de Avaliação de Sprays, os nebulizadores foram instalados em uma caldeira, onde foi possível obter as concentrações de MP, CO e NO_x na chaminé provenientes da combustão de 1556 kg/h de óleo combustível com viscosidade cinemática próxima a 30 cSt.

Variando o excesso de ar de combustão, medido através da concentração de O₂ na chaminé, Messias e Jen (2001) construíram curvas de CO, NO_x e MP para ambos os nebulizadores, como mostram as figuras 2.17 e 2.18.

Os ensaios com o nebulizador original permitiram alcançar ALR em torno de 0,06, enquanto que com o nebulizador modificado, atingiram-se valores de até 0,09 sob as mesmas condições de pressão de fluido de nebulização e combustível, o que resulta em SMD menores, segundo o gráfico da figura 2.16.

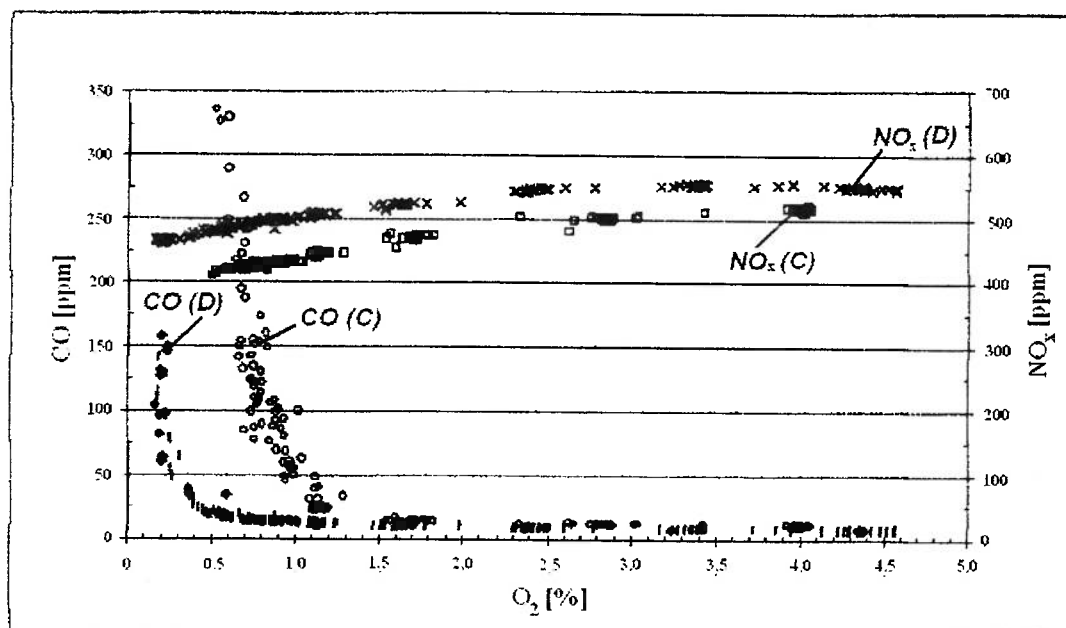


Figura 2.17 – Concentrações de CO e NO_x em função da concentração de O₂ nos produtos da combustão
[Messias e Jen (2001)]

A partir da figura 2.17, os autores concluem que a queda na concentração de CO do nebulizador modificado (D) ocorre em concentrações de O₂ menores, próximas a 0,4%, enquanto que a queda da concentração de CO no nebulizador original (C), ocorre para concentrações de O₂ maiores, em torno de 1,5%. Por outro lado, as concentrações de NO_x para o nebulizador modificado (D) resultaram maiores que as concentrações para o nebulizador original (C).

A figura 2.18 mostra uma redução de 25% na concentração de MP obtida com a modificação proposta pelos autores. As primeiras 4 coletas indicadas de 1 a 4, se referem à concentração de MP na chaminé da caldeira operando com o nebulizador original (C), com ALR em torno de 0,06. Os resultados das coletas restantes, de 5 a 11, se referem à mesma vazão de óleo e pressão de fluido de nebulização a montante do nebulizador modificado (D), mas com ALR em torno de 0,09.

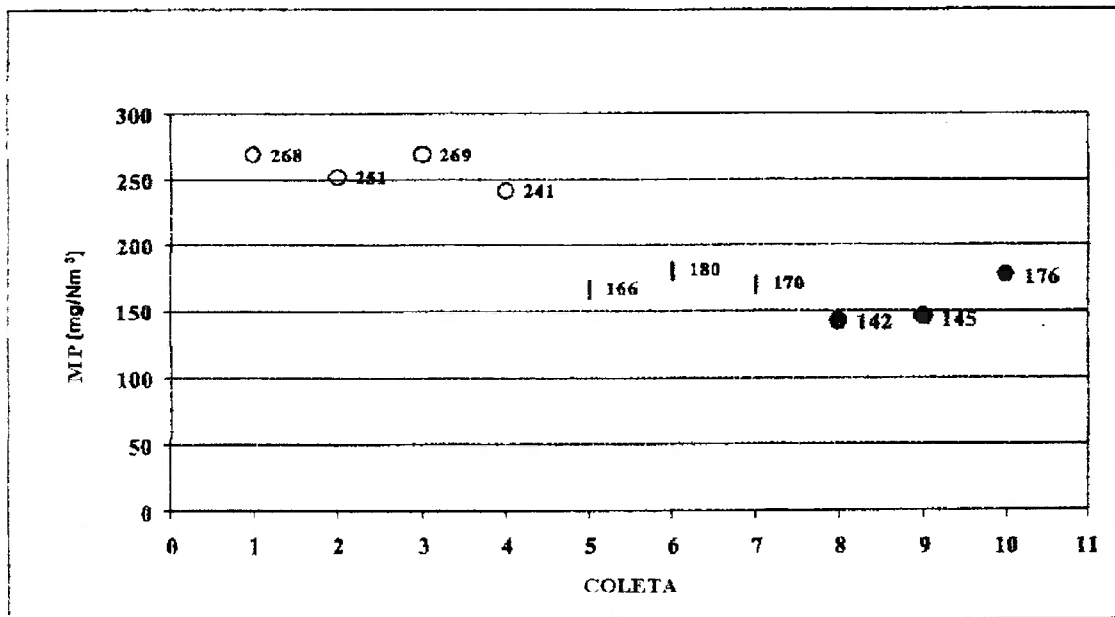


Figura 2.18 – Concentrações de MP na chaminé da caldeira
[Messias e Jen (2001)]

2.2 Comentários sobre a revisão bibliográfica

A partir do conjunto de trabalhos analisados e revistos, podem-se resumir suas principais conclusões:

- Apesar de não haver consenso entre diferentes autores sobre faixas ótimas para a relação Φ , este adimensional é importante na medida em que determina qual mecanismo de nebulização é preponderante na câmara de mistura, o que é fundamental para a qualidade do spray.
- Em geral, o aumento de ALR reduz o diâmetro das gotas, principalmente na periferia do spray.
- Aumentando-se P_a ou P_c com ALR constante, consegue-se diminuir o diâmetro das gotas devido ao aumento das pressões na câmara de mistura.
- O Cd_c é praticamente constante para a mesma W_c .
- Há 3 mecanismos de nebulização: por colisão direta, por arraste de líquido da película e pela quebra da película em gotas fora do bocal.

- Quanto maior a fração de líquido nebulizada por colisão direta, menor o diâmetro médio das gotas, uniformizando a distribuição das gotas e do líquido no spray.
- Quanto maior a relação l_m/d_m , maior o tempo em que o ar transfere quantidade de movimento ao combustível dentro da câmara, diminuindo o diâmetro das gotas na periferia do spray.
- Mullinger e Chigier (1974) chegam a valores ideais para alguns parâmetros geométricos.
- Alterações das relações geométricas dos nebulizadores Y-jet podem influenciar a formação de MP e poluentes como CO e NO_x.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL

3.1 A Estação de Avaliação de Sprays

A Estação de Avaliação de sprays do Agrupamento de Engenharia Térmica (AET) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) permite caracterizar o desempenho de nebulizadores através da medição da distribuição de diâmetros e do diâmetro médio das gotas de um spray. Nesta instalação, os nebulizadores são testados a frio, sem que ocorra a reação de combustão, permitindo avaliar especificamente a qualidade do processo de nebulização.

O procedimento para avaliação do bocal quanto à qualidade do processo de nebulização compreende a obtenção das seguintes informações:

- Distribuição de diâmetros e diâmetro médio de gota.
- Distribuição do líquido na secção transversal.



Figura 3.1 - Instalações da Estação de Avaliação de sprays

Normalmente, a instalação utiliza óleos lubrificantes como fluido de trabalho, simulando as propriedades mais importantes dos óleos combustíveis no processo de nebulização: viscosidade, tensão superficial e densidade.

A figura 3.2 mostra o esquema do arranjo experimental utilizado neste trabalho.

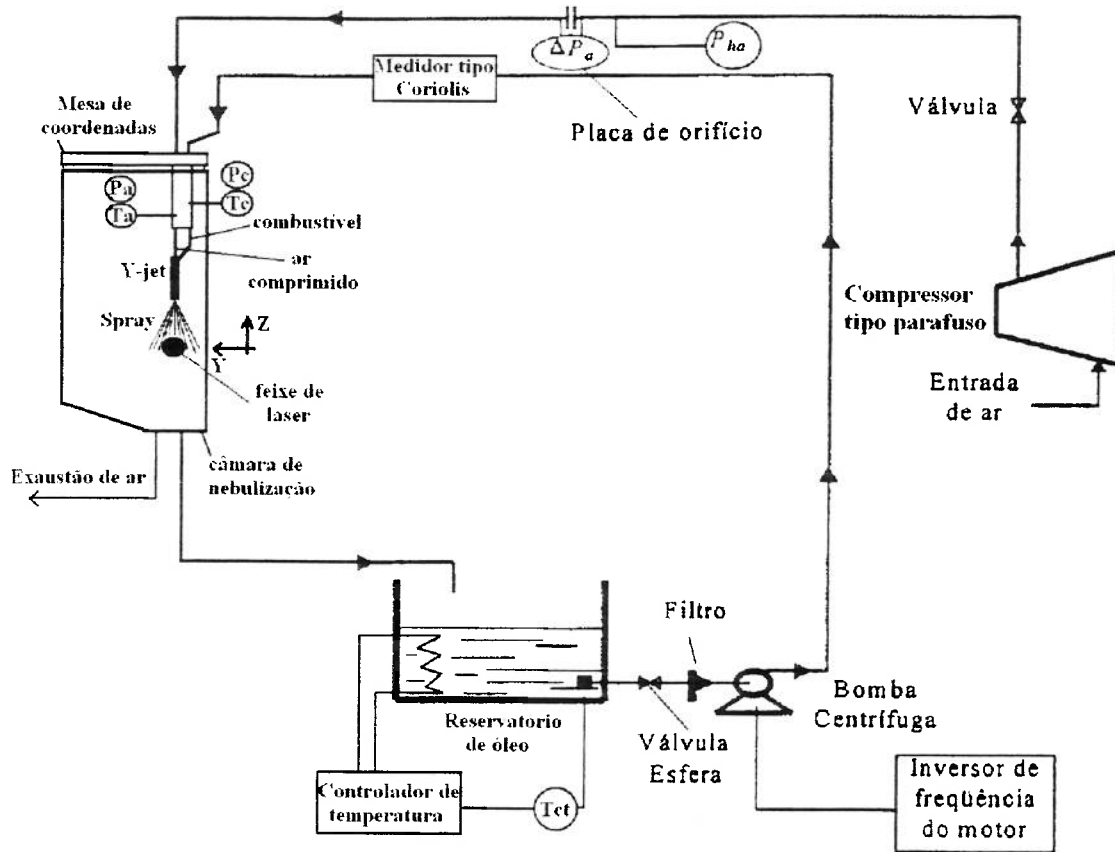


Figura 3.2 – Esquema do arranjo experimental da Estação de Avaliação dos Sprays do AET-IPT

Os bocais a serem testados são instalados no interior de uma câmara transparente de seção quadrada (0,6 x 0,6 m), sendo montados na extremidade de uma lança sustentada por uma mesa de coordenadas de três eixos. Através da lança é feita a alimentação de óleo e fluido de nebulização ao bocal. O procedimento de medição de pressão e temperatura dos fluidos a montante do bocal será mostrado na seção 3.1.2. As medidas de pressão e temperatura dos fluidos são obtidas com sensores montados na lança mostrada na Figura 3.4.

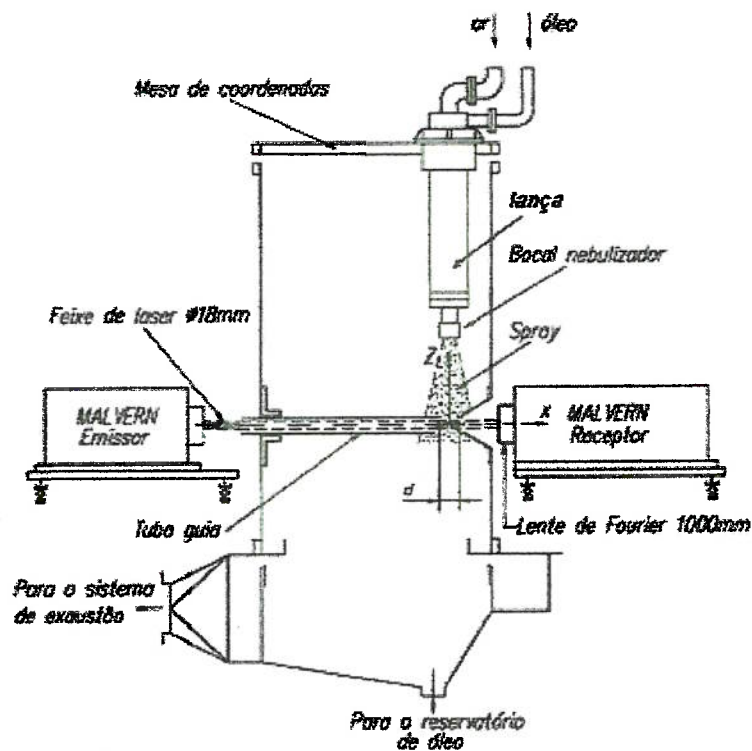


Figura 3.3 – Esquema da câmara de nebulização

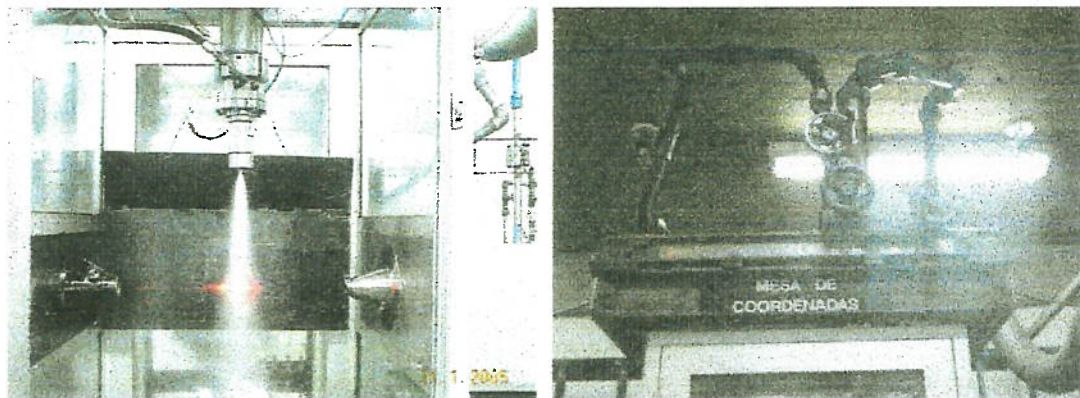


Figura 3.4 – A foto à esquerda mostra o bocal instalado na lança dentro da câmara de nebulização; A foto à direita mostra a mesa de coordenadas e tubos de alimentação

A alimentação de ar é feita por um compressor tipo parafuso, modelo GA50-VSD, em série com um secador de ar, ambos da Atlas Copco, mostrados na figura 3.5. A pressão máxima fornecida pelo compressor é 13 bar.



Figura 3.5 – Compressor e secador de ar

Em bocais tipo duplo-fluido, utiliza-se ar comprimido como fluido auxiliar de nebulização. Quando o nebulizador opera com vapor d'água em caldeiras ou fornos, é possível calcular, através de adimensionais apropriados, a equivalência de pressão e vazão entre diferentes fluidos de nebulização.

A alimentação do fluido a ser nebulizado é feita através de uma bomba de engrenagens mostrada na figura 3.6.

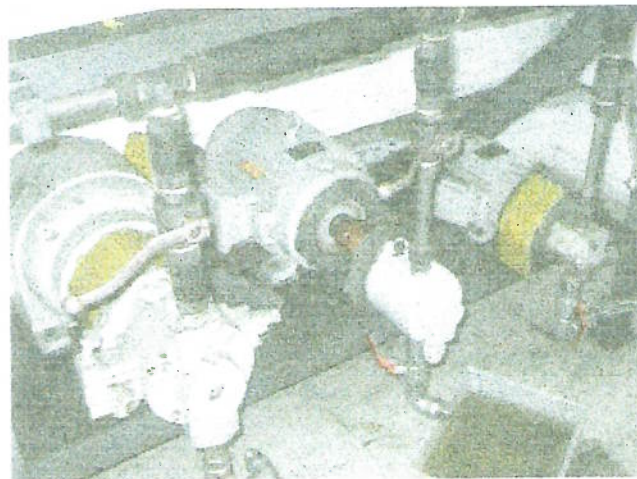


Figura 3.6 – Bombas de óleo

Nos ensaios, foi necessário utilizar tubos-guias, para reduzir o volume de medição do spray por onde passa o feixe de laser, para manter os valores de obscurecimento dentro dos limites estabelecidos pelo instrumento de medição do diâmetro médio de gota. A figura 3.7 mostra o bocal Y4 em uma determinada

condição operacional e a montagem para a medição do diâmetro médio das gotas por meio do feixe de laser usando tubos-guia.

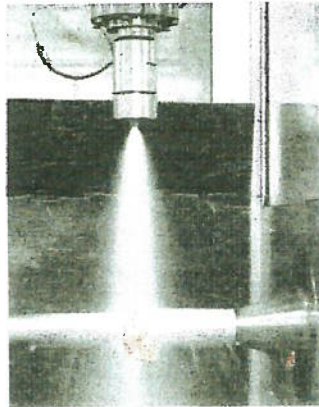


Figura 3.7 – Montagem para a medição de diâmetro das gotas com tubos-guias

A parcela de líquido do spray que forma gotas maiores na câmara de nebulização é arrastada, por gravidade, para o reservatório de óleo, onde estão submersas resistências elétricas para controlar a temperatura e, portanto, a viscosidade do óleo. As gotas menores são retiradas pelo sistema de exaustão, mostrado na figura 3.8, composto por um “dumper”, um ventilador de exaustão e dois “demister”, onde as pequenas gotas são separadas da corrente de ar.



Figura 3.8 – Sistema de exaustão

Os acionamentos dos motores, dos inversores de frequência e os controladores de vazão e temperatura do óleo estão reunidos nos painéis de comando, mostrados na figura 3.9.

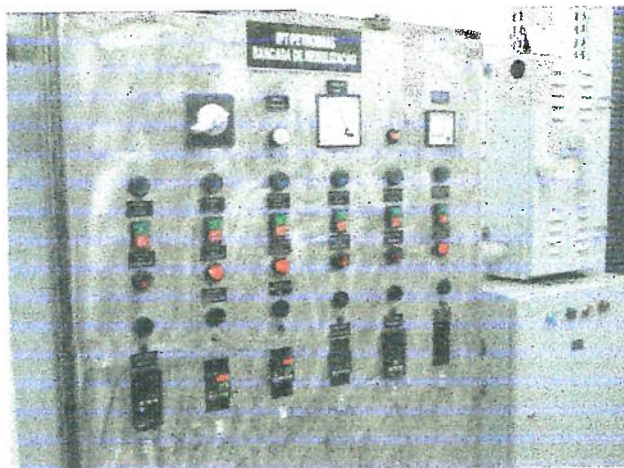


Figura 3.9 – Painéis de comando

3.1.1 Sistema de Coordenadas

Foi definido um sistema de coordenadas cartesianas cuja origem está situada na interseção entre o eixo do feixe laser e a linha de centro do spray gerado pelo nebulizador, conforme mostra o esquema da figura 3.10.

Todas as medições foram feitas na seção transversal situada a uma distância de 250 mm da descarga do bocal ao plano XY. A distância entre os tubos-guias, d , foi estabelecida em 18 mm, o que resultou em um volume de medição cilíndrico de 18 mm diâmetro por 18 mm de comprimento.

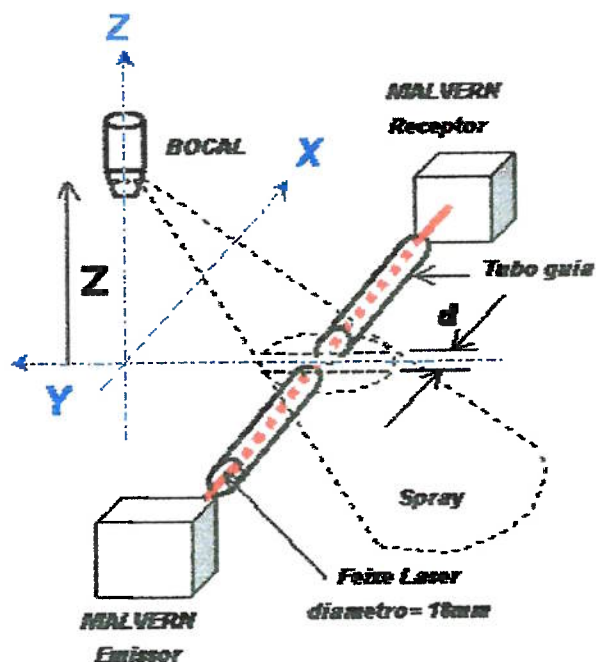


Figura 3.10 – Sistemas de coordenadas

A medição do diâmetro das gotas, ao longo de toda a seção, foi feita posicionando o bocal ao longo do eixo Y em pontos espaçados de 18 mm a partir da origem. O orifício de descarga de combustível do bocal é alinhado sobre o eixo y, posicionado do lado negativo do eixo, conforme mostra a figura 1.4.

3.1.2 Medição de Pressões, Temperaturas e Vazões de Ar e Combustível

As pressões e temperaturas do ar, P_a e T_a e do combustível, P_c e T_c , logo a montante do bocal, foram obtidas através de transdutores de pressão e termopares em locais onde a velocidade do fluido era baixa, na lança de alimentação do bocal, aproximando-se bastante dos valores de pressão e temperatura de estagnação do escoamento na entrada do bocal.

A vazão de ar foi medida por uma placa de orifício. As tomadas do diferencial de pressão da placa de orifício são do tipo “corner-taps”.

Para obter medidas mais precisas, foram utilizadas 2 placas de orifício, mostradas na figura 3.11, uma para vazões maiores e outra para vazões menores de ar. Pelo mesmo motivo, utilizaram-se dois transdutores para medir P_a .

Todos os termopares utilizados foram do tipo T.



Figura 3.11 – Placas de orifício para medições de vazão de ar

Os transdutores de pressão são mostrados na figura 3.12 e descritos resumidamente nas tabelas 3.1 e 3.2. No Anexo 1, apresenta-se os relatórios de calibração dos transdutores.



Figura 3.12 – Transdutores de pressão

Tabela 3.1 – Descrição da instrumentação para medição de pressões P_a e P_c

Grandeza	P_a	P_c
Descrição	Transdutor de pressão capacitivo	Transdutor de pressão capacitivo
Modelo	Gamma C719.21 (transdutor 1) Gamma C719.10 (transdutor 2)	Smar LD301M42I
Faixa de operação	0 a 7 bar (transdutor 1) 0 a 12 bar (transdutor 2)	0 a 15 bar
Saída	1 a 5 V para ambos	4 a 20 mA

Tabela 3.2 – Descrição da instrumentação para medição de pressões diferenciais

Grandeza	$\Delta P_a(1)$ e $\Delta P_a(2)$	P_{ha}
Descrição	Transdutor de pressão capacitivo	Transdutor de pressão capacitivo
Modelo	Rosemount DP4E12B1 (transdutor 1) Smar LD301D22I (transdutor 2)	Gamma C719.23
Faixa de operação	0 a 635 mmca (transdutor 1) 0 a 1000 mmca (transdutor 2)	0 a 21 bar
Saída	mV 4 a 20 mA (transdutor 2)	1 a 5 V

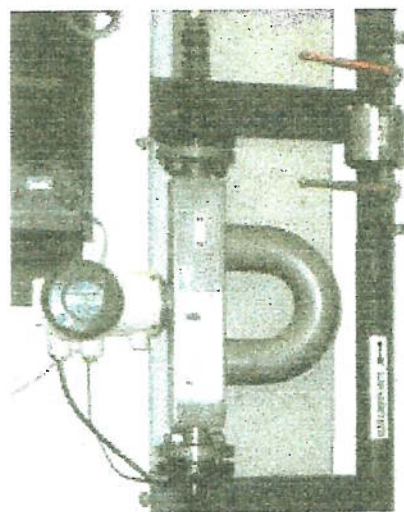


Figura 3.13 – Medidor de vazão tipo Coriolis

A vazão de óleo foi medida através de um medidor de vazão tipo Coriolis, mostrado na figura 3.13, descrito resumidamente na tabela 3.3 e detalhadamente no Anexo 2.

Tabela 3.3 – Descrição do medidor de vazão tipo Coriolis

Grandeza	W_c
Descrição	Medidor de vazão mássica tipo Coriolis
Modelo	Yokogawa, RCCT26
Faixa de operação	0 a 6000 kg/h
Saída	4 a 20 mA

3.1.3 Medição de Diâmetro de Gota

O diâmetro médio de gota e a distribuição de diâmetros são obtidos por um instrumento a laser cujo princípio de operação é baseado no fenômeno de difração da luz que ocorre durante a interação de um feixe de luz laser com as gotas de líquido do spray.

O instrumento de medição utilizado é o Malvern, modelo Mastersizer X (“Long-bed”), alterado em relação à configuração original, para adaptação à instalação, conforme a figura 3.14. O instrumento é constituído de dois conjuntos, emissor, à esquerda, e receptor, à direita na figura, entre os quais está situada a câmara onde se desenvolve o spray.



Figura 3.14 – Emissor e receptor do laser

É importante que as mesas que suportam tanto o emissor quanto o receptor de laser estejam niveladas e possuam um sistema de amortecimento para evitar vibrações que desalinhem o feixe.

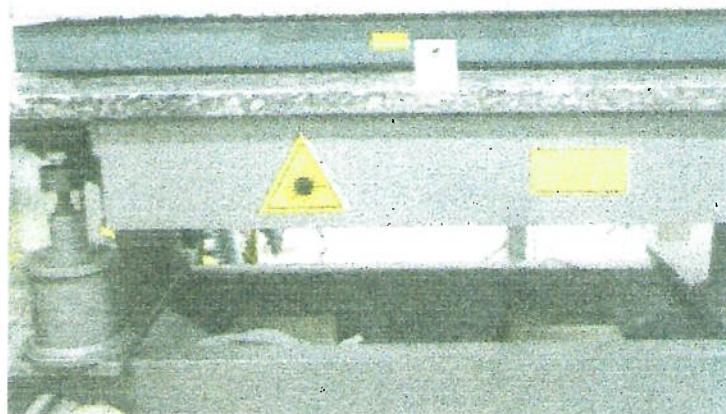


Figura 3.15 – Mesa do receptor do laser

O feixe de laser de Hélio-Neon, de 5 mW de potência, emerge do emissor do instrumento de forma cilíndrica, com 18 mm de diâmetro e cruza uma determinada seção transversal do spray. Parte da luz sofre difração devido à sua interação com as gotas, o que resulta espalhamento segundo ângulos que estão relacionados com o diâmetro das gotas. Quanto menor o diâmetro, maior o ângulo de espalhamento da luz.

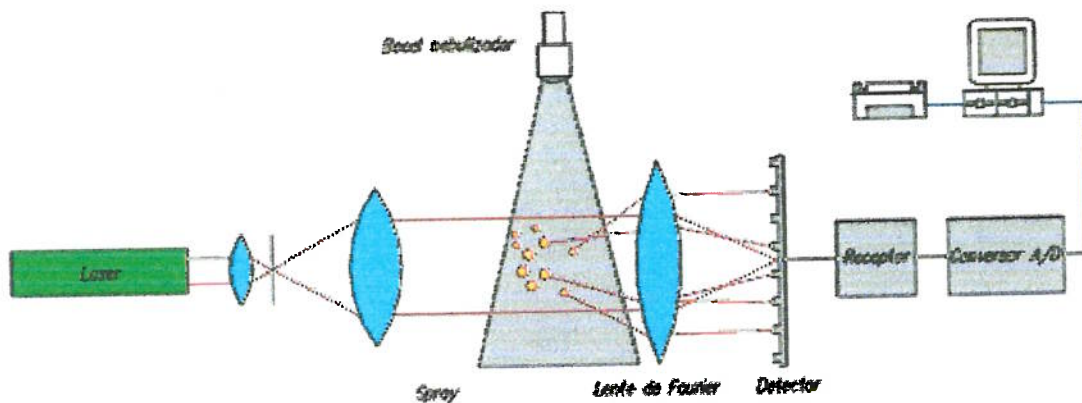


Figura 3.16 – Arranjo óptico do instrumento de medição

O feixe de laser resultante desta interação incide numa lente de Fourier, que é responsável pela manutenção do padrão de difração independentemente das posições das gotas no spray. O feixe emergente desta lente incide num conjunto de diodos foto-sensíveis de que se constitui o detector, situado no plano focal da lente. A parcela da luz não difratada incide em um diodo central, enquanto a parcela difratada incide em 33 diodos situados em anéis concêntricos ao diodo central.

Os sinais obtidos no detector são tratados, enviados para um computador e processados pelo software do instrumento. A curva de distribuição de diâmetros é obtida mediante o ajuste de modelos matemáticos de distribuição às curvas de distribuição de fluxo luminoso incidente nos diodos.

A partir da curva de distribuição ajustada é calculado o diâmetro médio expresso em diferentes formas. Estes resultados são apresentados também na forma de histogramas, curvas de frequência ou cumulativa como mostra a Figura 3.17.

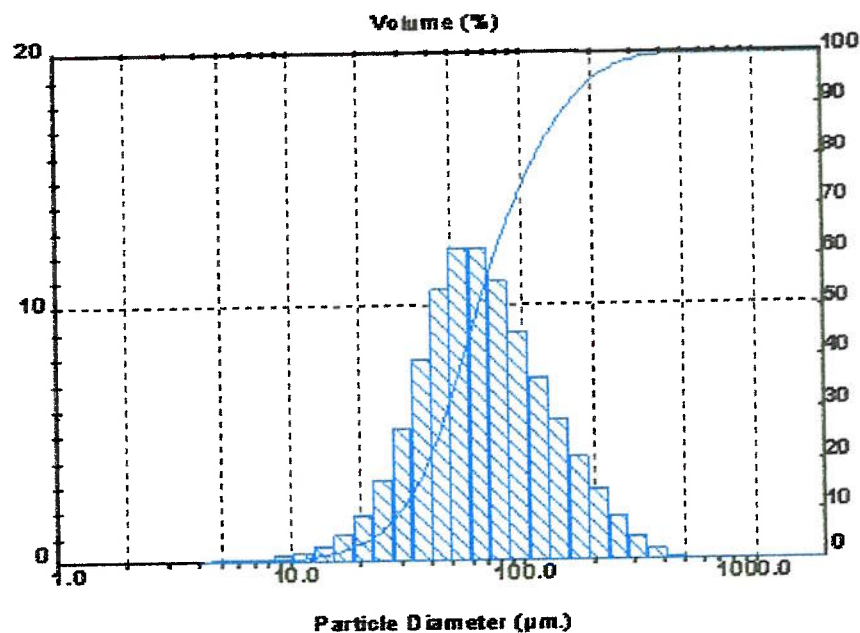


Figura 3.17 – Histograma e distribuição cumulativa do diâmetro das gotas (μm) de uma condição genérica feita pelo software do instrumento

O instrumento fornece o resultado do diâmetro médio de gota calculado com base no volume (ou na massa), D_V , e com base na razão volume sobre área superficial, $D_{[3,2]}$, ou SMD (Sauter Mean Diameter).

A distribuição dos diâmetros de gotas é representada pelos valores $D_{V[0,1]}$, $D_{V[0,5]}$ e $D_{V[0,9]}$, respectivamente os valores abaixo dos quais estão acumulados 10%, 50% e 90% das gotas em volume. O arranjo ótico montado no instrumento permite a medição de diâmetros de gotas compreendidos entre 4 e 2000 μm . A incerteza dos resultados fornecidos pelo instrumento é estimada em 2 %.

3.1.4 Medição da Distribuição de Líquido na Seção Transversal

Para determinar a distribuição de líquido na seção transversal do spray, utilizam-se dispositivos amostradores, conforme representado na figura 3.18. Esta medição é feita posicionado-se o dispositivo à mesma altura em relação ao bocal na qual são feitas as medições de diâmetro de gota ($Z = 250 \text{ mm}$)

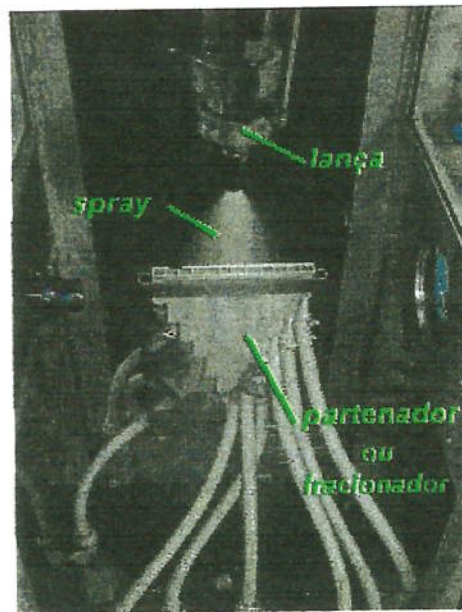


Figura 3.18 – Medição da distribuição de líquido em uma seção do spray

3.1.5 Medição do Ângulo do Spray

Pode-se obter uma medida aproximada do ângulo do spray através da obscurecimento determinada pelo receptor de laser. Segundo o manual de operação do instrumento, se a obscurecimento for menor que 5%, não é mais possível medir o diâmetro das gotas de forma confiável, já que praticamente não existem mais gotas no volume de medição.

Através da seqüência de posições da lança do bocal ao longo do eixo y , obtêm-se o comprimento positivo e negativo do spray ao longo desse eixo, a partir da sua origem. Sabendo a altura entre o feixe de laser e o bocal, calculam-se os ângulos do lado positivo (α^+) e negativo (α^-) do spray, através de relações trigonométricas. Neste caso, $\Delta z = 250$ mm. Outra forma de medição do ângulo de spray é o uso de técnicas fotográficas para registro de imagens.

$$\alpha^+ = \arctg\left(\frac{y^+}{\Delta z}\right) \quad (3.1)$$

$$\alpha^- = \arctg\left(\frac{y^-}{\Delta z}\right) \quad (3.2)$$

3.1.6 Medição da Pressão de Estagnação no Ponto de Mistura

O objetivo de medir a pressão de estagnação no ponto de mistura, P_{m0} , foi conseguir calcular a relação entre os fluxos de quantidade de movimento, Φ , para melhor compreender os fenômenos que ocorrem na câmara de mistura.

Em cada bocal, foi inserido um tubo de aço inox através do orifício de descarga de combustível, conforme o esquema da figura 3.19. Portanto, não há injeção de combustível nestas medições. Foram construídos 3 tubos para cada um dos 6 bocais construídos com furos de 1mm de diâmetro para tomada de pressão a diferentes distâncias, L_c , L_i e L_s para observar a assimetria do escoamento.

Desta forma, ao impor a pressão de ar, P_a , de 2 a 12 bar, media-se P_{m0} correspondente a uma das distâncias L_c , L_i ou L_s . Com estas medições, foi possível obter o perfil de velocidades do ar na seção de mistura. A tabela 3.4 resume, para os diferentes bocais ensaiados, as seguintes dimensões, em milímetros, da esquerda para a direita:

- diâmetro da câmara de mistura
- diâmetro do orifício de combustível
- diâmetro dos tubos de tomada de pressão
- distâncias dos furos das tomadas de pressão, conforme a figura 3.19

O transdutor para a medição de P_{m0c} , P_{m0i} e P_{m0s} foi o mesmo utilizado para a medição da pressão do combustível, P_c .

Tabela 3.4 – Dimensões em mm dos tubos de tomada de pressões

Bocal	d_m	d_c	d_t	L_c	L_i	L_s
Y1	4,5	3,0	2,9	2,3	1,1	3,4
Y2	3,5	2,4	2,0	1,8	0,9	2,6
Y3	3,3	2,6	2,0	1,7	0,8	2,5
Y4	4,5	3,0	2,9	2,3	1,1	3,4
Y5	3,7	2,4	2,0	1,9	0,9	2,8
Y6	3,7	2,4	2,0	1,9	0,9	2,8

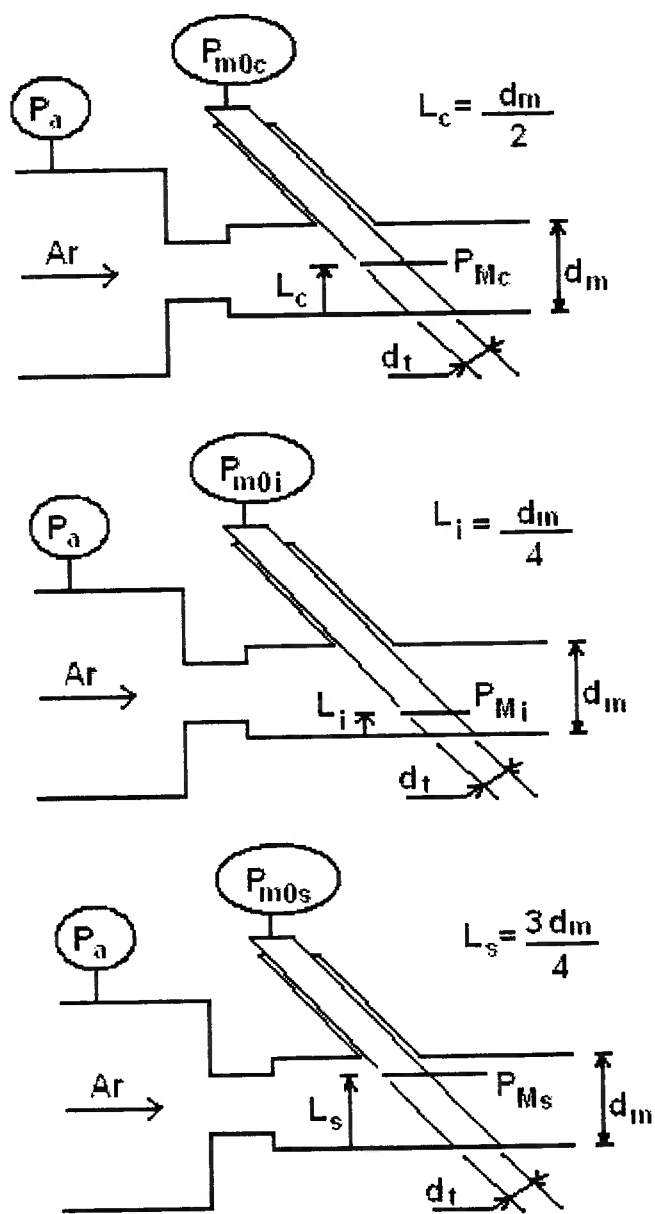


Figura 3.19 – Esquema da colocação dos tubos nos pontos P_{Mc} , P_{Mi} e P_{Ms}

3.2 Descrição dos Bocais Construídos e Ensaaiados

Foram ensaiados 6 bocais Y-jet, construídos na Oficina Mecânica da Divisão de Mecânica e Eletricidade (DME) do IPT. Estão representados na foto da figura 3.20 e suas dimensões e relações geométricas estão colocadas na tabela 3.5. Os comprimentos e diâmetros estão em milímetros.

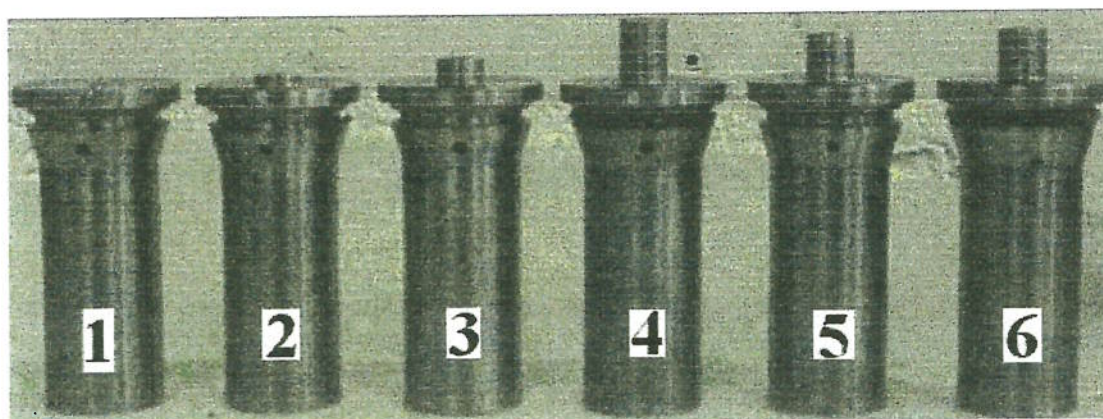


Figura 3.20 – Nebulizadores utilizados no trabalho

Tabela 3.5 – Configurações geométricas dos 6 bocais ensaiados

Bocal	d_m	d_a	d_c	l_m	l_a	l_c	l_l	θ	l_m/d_m	d_c/d_a	d_m/d_a
1	4,5	2,8	3,0	4,5	6,0	13,3	3,5	60°	1,0	1,07	1,61
2	3,5	2,2	2,4	7,0	6,0	13,8	3,0	60°	2,0	1,09	1,59
3	3,3	2,0	2,6	9,9	5,8	13,8	3,1	60°	3,0	1,30	1,65
4	4,5	2,8	3,0	18,0	6,0	13,2	3,5	60°	4,0	1,07	1,61
5	3,5	2,2	2,4	14,0	6,0	14,3	3,5	60°	4,0	1,09	1,59
6	3,5	2,2	2,4	14,0	6,0	15,2	4,8	45°	4,0	1,09	1,59

A figura 3.21 reproduz a figura 1.5 do Capítulo 1 para facilitar a leitura da tabela.

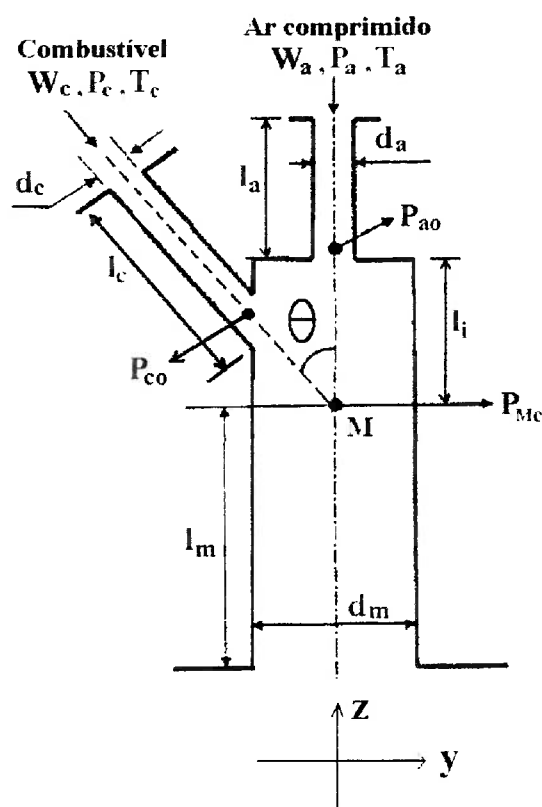


Figura 3.21 - Esquema dos bocais e sistema de coordenadas

Os projetos dos bocais foram baseados em recomendações do roteiro proposto por Mullinger e Chigier (1974), nas relações apresentadas por Pacífico (2000) para cálculo de Φ e ALR e na experiência de trabalhos realizados anteriormente pelo Agrupamento de Engenharia Térmica do IPT. A condição operacional de projeto foi estabelecida em: $W_c = 300 \text{ kg/h}$ e $P_a = 10,0 \text{ bar}$.

Todos os bocais construídos atendem às seguintes recomendações de Mullinger e Chigier (1974):

- As relações l_a/d_a e l_c/d_c são maiores que 2.
- O comprimento da câmara de mistura é maior $\frac{3}{4}$ do diâmetro do orifício de descarga de ar.

Alguns comentários sobre o projeto de cada um deles são apresentados a seguir. Basicamente, existem 3 conjuntos de bocais, diferenciados pelos valores de ALR e Φ calculados na condição de projeto:

- Bocais Y1 e Y4: valores de ALR alto e Φ baixo.
- Bocais Y2, Y5 e Y6: valores de ALR e Φ intermediários.
- Bocal Y3: valores de ALR baixo e Φ alto.

Os desenhos dos bocais estão em escala 2:1.

• Bocais Y1 e Y4

O bocal Y1 possui a câmara de mistura mais curta ($l_m/d_m = 1,0$). A relação d_c/d_a de 1,07 é maior que o recomendado pelos mesmos autores de 0,7. Isto diminui a perda de carga no orifício de descarga de combustível e, portanto, provoca pressões de suprimento de combustível, P_c , relativamente baixas.

Esta configuração provoca ALR relativamente alto e Φ baixo na maioria das condições operacionais. Para a condição de projeto, o ALR é próximo a 0,15. A relação Φ vale 0,83, calculada segundo Pacifico (2000).

O bocal Y4 difere do bocal Y1 pelo comprimento da câmara de mistura, ($l_m/d_m = 4$) Desta forma, o ALR é pouco menor, 0,14 e Φ próximo a 1,1. Em princípio, esta geometria provoca uma diminuição no diâmetro das gotas na periferia do spray, fato que foi observado, principalmente nos ensaios com viscosidade mais elevada como óleo lubrificante.

Os desenhos de ambos os bocais estão colcados nas figuras 3.22 e 3.23 em escala 2:1.

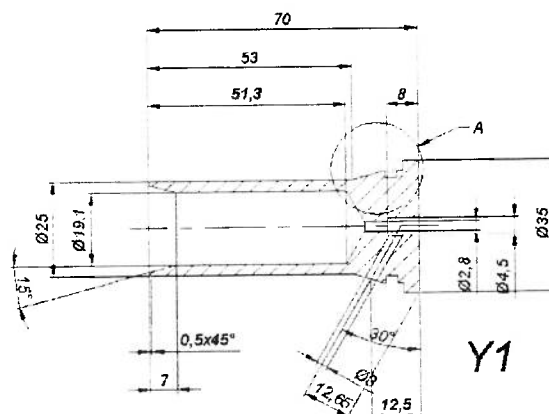


Figura 3.22 – Desenho do Bocal Y1 (escala 2:1)

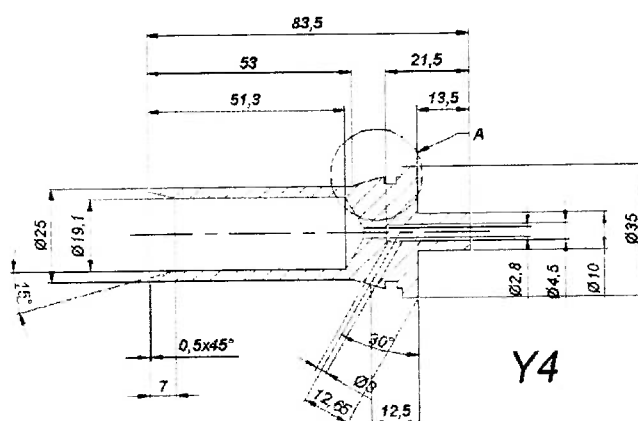


Figura 3.23 – Desenho do Bocal Y4 (escala 2:1)

• Bocais Y2, Y5 e Y6

Os bocais Y2 e Y5 possuem ALR menores e Φ maiores comparados aos bocais Y1 e Y4 para a mesma condição operacional, pois tanto d_m quanto d_a são menores, o que aumenta a resistência ao fluxo de ar no bocal. Além disso, a relação d_c/d_a é ligeiramente maior.

O diâmetro do orifício de descarga de combustível foi reduzido para aumentar a velocidade do combustível no ponto de mistura e, portanto, aumentar Φ . Assim, a perda de carga neste orifício tende a aumentar para a mesma vazão de combustível, quando comparada com os bocais anteriores, Y1 e Y4.

Na condição de projeto, ALR e Φ calculados valem 0,077 e 3,5 respectivamente, para o bocal Y2.

O bocal Y5 deve apresentar diâmetro médio das gotas na periferia do spray relativamente menor do que para o bocal Y2, pois foi construído com o dobro da relação (l_m/d_m) . Assim, os valores calculados de ALR e Φ na condição de projeto são 0,074 e 4,2 respectivamente.

O bocal Y6 difere do bocal Y5 pelo valor do ângulo θ que neste caso é 45° , enquanto nos demais é 60° . Esta diferença provoca valores de Φ menores, em torno de 3,7 na condição de projeto. A relação ALR permanece a mesma.

Os desenhos dos bocais Y2, Y5 e Y6 estão colocados, respectivamente, nas figuras 3.24, 3.25 e 3.26 em escala 2:1.

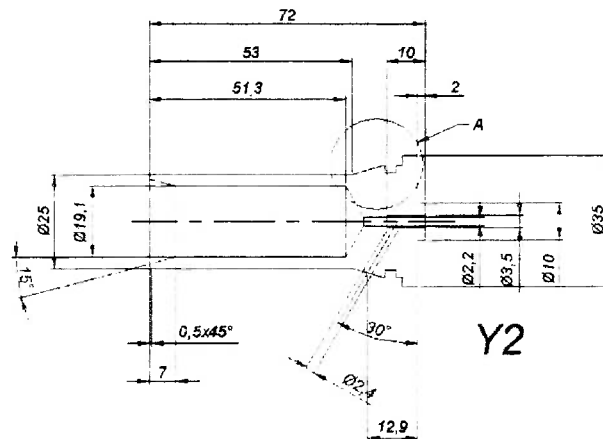


Figura 3.24 – Desenho do Bocal Y2 (escala 2:1)

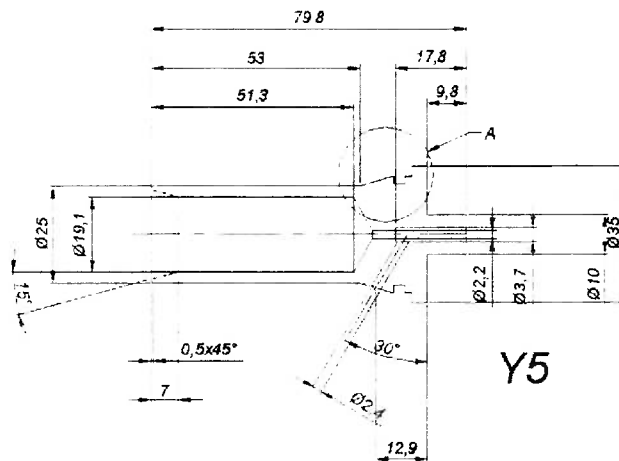


Figura 3.25 – Desenho do Bocal Y5 (escala 2:1)

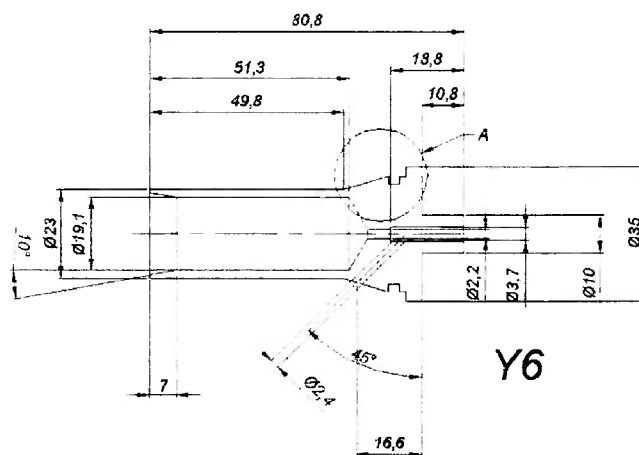


Figura 3.26 – Desenho do Bocal Y6 (escala 2:1)

• **Bocal Y3**

Este bocal foi projetado com o objetivo de se obter os menores valores de ALR e os maiores valores de Φ . Na condição de projeto, estes parâmetros valem 0,053 e 5,7 respectivamente. A figura 3.27 mostra o desenho do bocal Y3 em escala 2:1.

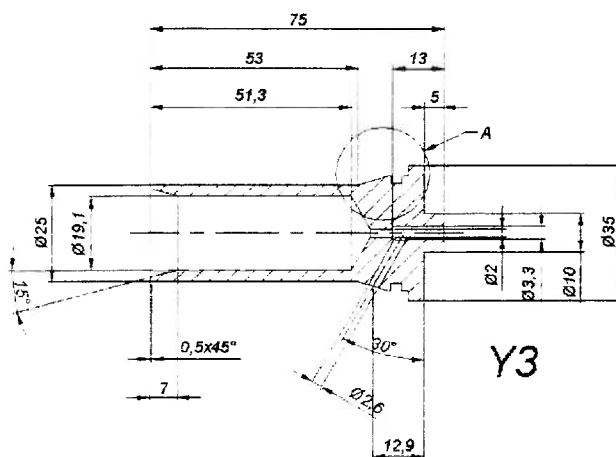


Figura 3.27 – Desenho do Bocal Y3 (escala 2:1)

CAPÍTULO 4

CONDIÇÕES OPERACIONAIS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Condições Operacionais

Os ensaios dos bocais Y1, Y2, Y3, Y4 e Y5 foram realizados utilizando ar comprimido para nebulizar querosene ou óleo lubrificante para simular as principais propriedades dos óleos combustíveis. O bocal Y6 foi ensaiado apenas com óleo lubrificante, pois foi construído após os ensaios dos demais bocais e o volume de querosene restante não era suficiente para a realização dos ensaios do bocal Y6.

A tabela 4.1 reúne as condições operacionais estabelecidas. As propriedades do querosene e do óleo lubrificante BR OB25 estão na tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Condições operacionais dos ensaios

Parâmetro	Condição operacional
Vazão de combustível (kg/h)	100, 200 e 300
Pressão relativa do ar (bar)	2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 e 12

Tabela 4.2 – Propriedades do querosene e do óleo lubrificante

Propriedade	Querosene	Óleo lubrificante BR OB25
Tensão superficial (N/m)	0,024	0,020
Viscosidade cinemática (cSt)	2 @ 298 K	39 @ 303 K
Densidade (kg/m ³)	783	854

Os valores de tensão superficial e viscosidade do querosene foram obtidas em Bayvel e Orzechowski (1993), enquanto que as propriedades do óleo lubrificante foram obtidas no Laboratório de Caracterização de Propriedades Físicas do IPT. A densidade de ambos foi obtida na Estação de Avaliação de Sprays do Agrupamento de Engenharia Térmica do IPT.

Os ensaios com óleo lubrificante foram realizados utilizando resistências elétricas controladas para manter a temperatura do óleo no tanque de operação

próxima a 30 °C. Os ensaios com querosene foram realizados a temperatura ambiente, havendo, portanto, variação da viscosidade devido à variação da temperatura no laboratório. Porém, para os objetivos deste trabalho, esta variação foi considerada desprezível.

Para facilitar o entendimento dos resultados experimentais, se definirá W_o como sendo a vazão de óleo lubrificante com viscosidade de 39 cSt, enquanto que W_q será a vazão de querosene com viscosidade de 2 cSt.

Os resultados experimentais dos ensaios de nebulização serão apresentados, de forma geral, no item 4.2, através de gráficos que comparam condições semelhantes nos diferentes bocais.

O item 4.3 mostra a forma como se apresentarão os resultados das medições de pressão de estagnação na seção de mistura, além de um roteiro de cálculo para obter as velocidades do ar nesta seção.

O item 4.4 apresenta detalhadamente os resultados de cada um dos bocais, com análises e comparações que auxiliam na compreensão dos fenômenos envolvidos.

4.2 Nebulização

Previamente às medições de diâmetro de gota e fração de líquido, foram obtidas as curvas de pressão e vazão de ar e combustível de cada bocal para avaliar a influência das diferentes relações geométricas dos bocais sobre estes parâmetros. A figura 4.1 apresenta a comparação das curvas W_a em função de P_a para $W_o = 300$ kg/h dos 6 bocais.

O bocal Y3 apresentou a menor W_a , pois foi construído com menor d_a . Aumentando d_a , a vazão de ar aumenta e, portanto, os bocais Y2, Y5 e Y6 apresentam W_a superiores ao observado no bocal Y3 e inferiores aos medidos nos bocais Y1 e Y4.

A figura 4.2 mostra a influência da vazão e da viscosidade do fluido a ser nebulizado, W_c e ν_c sobre a vazão de ar, W_a para o bocal Y5. A partir dela, observa-se que a variação de W_c provoca uma variação significativa de W_a . Isto pode ser explicado pelo fato de que um aumento de W_c leva a um aumento de P_c , aumentando

a pressão no ponto de mistura P_m . Como a diferença entre P_a e P_m diminui, W_a é reduzida. Por outro lado, a viscosidade não tem praticamente influência sobre W_a .

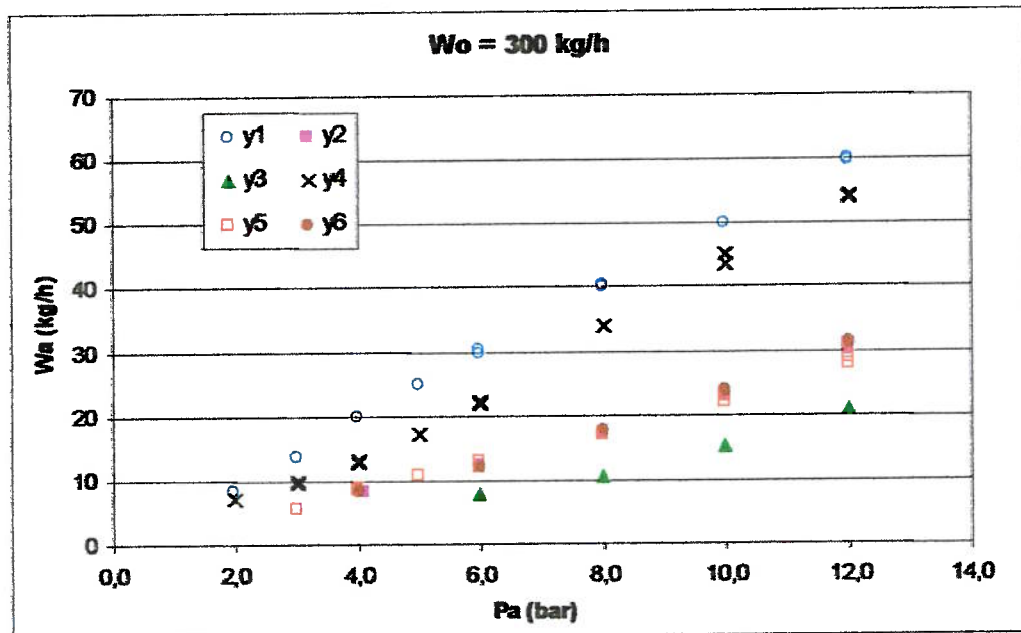


Figura 4.1 – Curva W_a x P_a para $W_o = 300$ kg/h

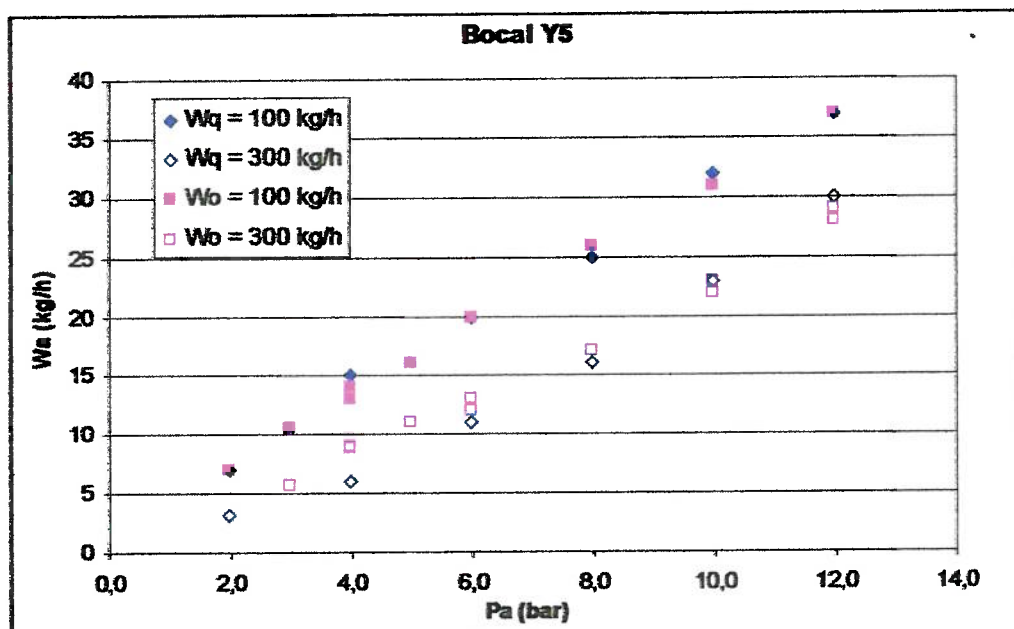


Figura 4.2 – Vazão de ar para diferentes condições do combustível

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam o SMD dos sprays para vazão de óleo de 300 kg/h, mostrando que o aumento de P_a e, conseqüentemente, ALR são fundamentais para reduzir o diâmetro das gotas.

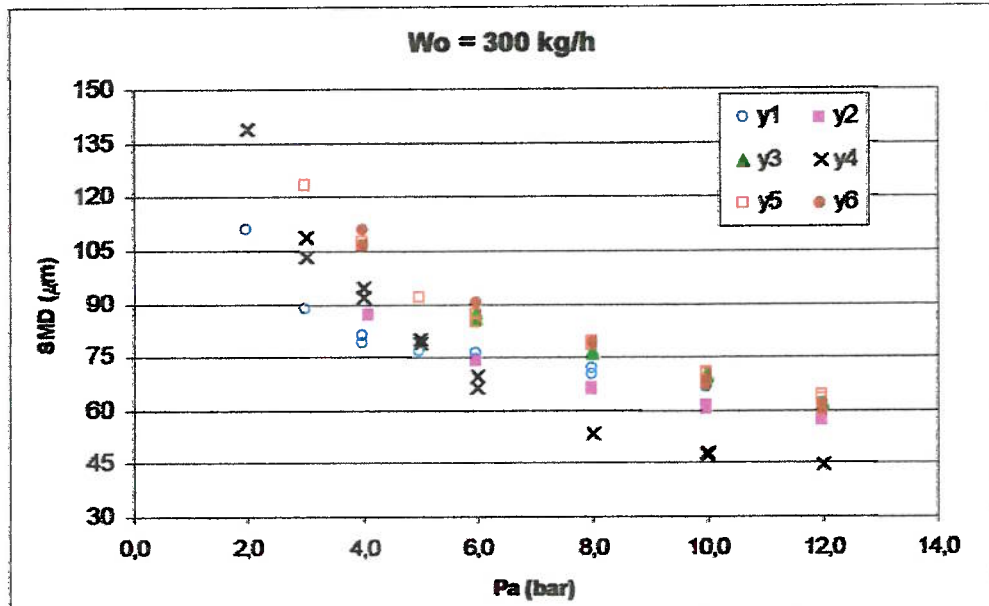


Figura 4.3 – SMD função de P_a para os 6 bocais com óleo

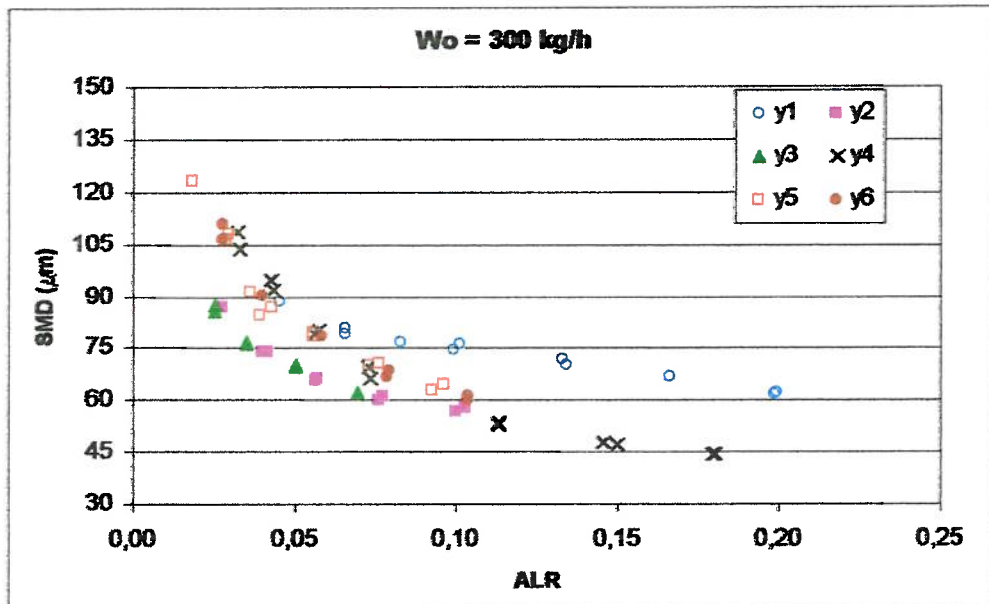


Figura 4.4 – SMD função de ALR para os 6 bocais com óleo

No caso do bocal Y4, por exemplo, o gráfico da figura 4.5 mostra que para se obter SMD em torno de 45 μm , o ALR deve estar próximo a 0,05 quando se opera com 300 kg/h de querosene. Para se obter SMD semelhante, com a mesma vazão de combustível, mas com fluido de viscosidade maior (óleo), é necessário aumentar o ALR para valores próximos a 0,18.

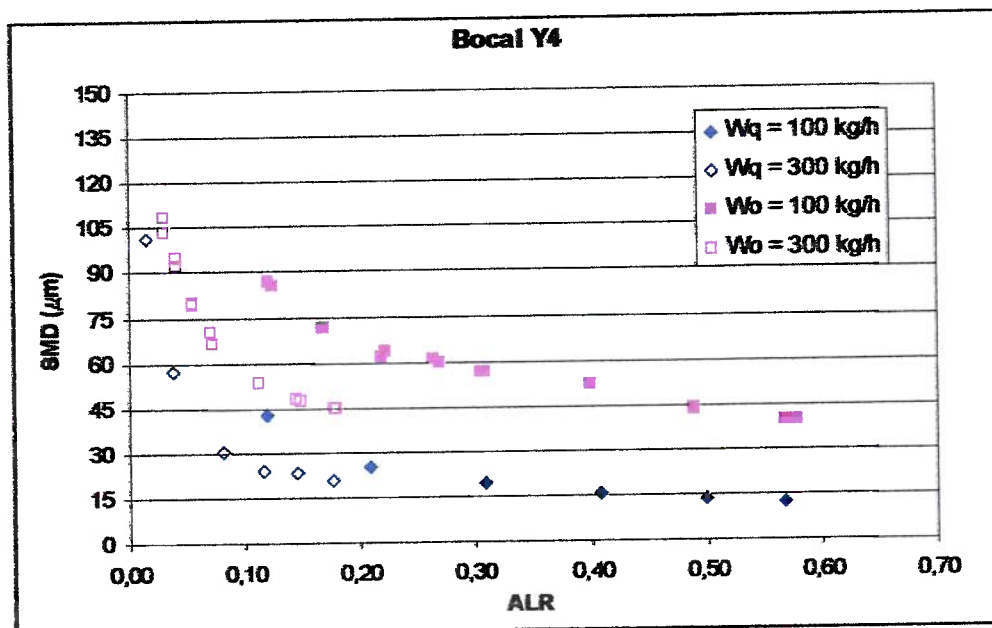


Figura 4.5 – Influência de ALR no bocal Y4

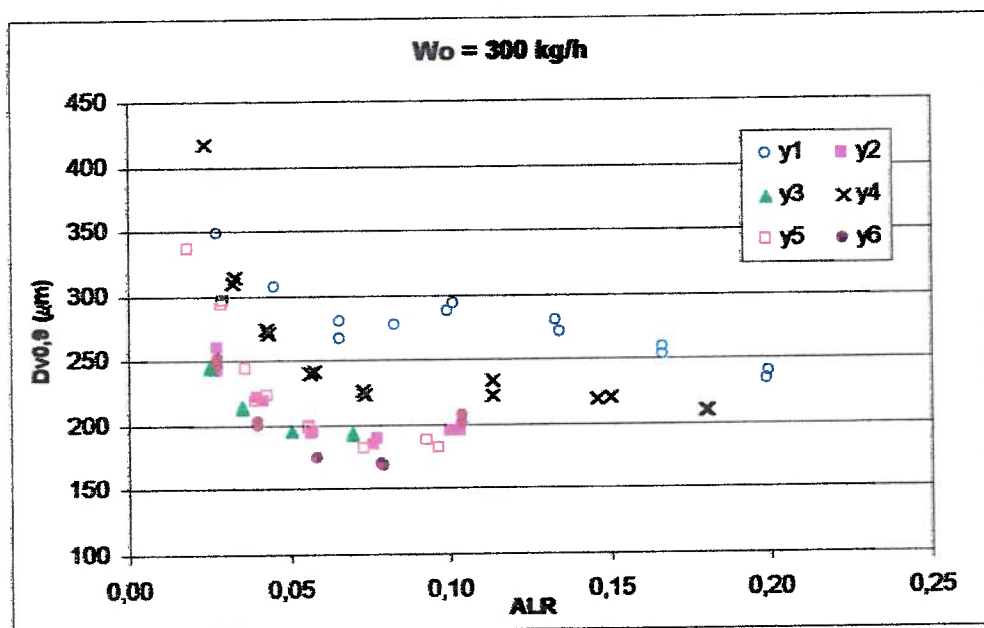


Figura 4.6 – Comportamento de $D_{v0,9}$ função de ALR nebulizando óleo

O comportamento de $D_{V10,91}$ é ligeiramente diferente ao SMD, em especial, para os bocais Y2, Y3, Y5 e Y6. Os gráficos da figura 4.6 e 4.7, construídos a partir dos ensaios com óleo e querosene com vazão de 300 kg/h, mostram que para estes bocais, $D_{V10,91}$ apresenta valores mínimos para ALR entre 0,06 e 0,08. Para ALR maiores, $D_{V10,91}$ aumenta novamente.

Nos bocais Y1 e Y4, $D_{V10,91}$ é mínimo para ALR entre 0,08 e 0,12 nebulizando querosene, enquanto que ao nebulizar óleo, $D_{V10,91}$ é mínimo quando ALR é máximo, em torno de 0,20.

Os ensaios do bocal Y3 com querosene apresentaram pulsações de período próximo a 1 segundo quando $W_q = 300$ kg/h em condições em que $P_a < 8,0$ bar. Para estas mesmas condições, os ensaios com óleo apresentaram pulsações bem menos frequentes, sem periodicidade definida. Para vazões menores, a operação foi estável em ambos os combustíveis. Não foram realizadas medições de diâmetro das gotas para as condições que apresentaram fortes instabilidades.

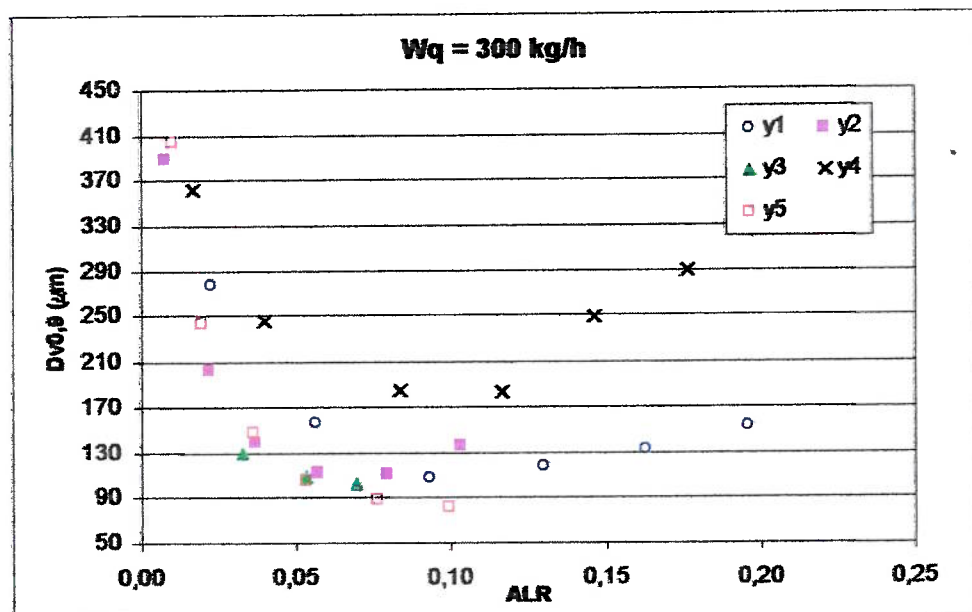


Figura 4.7 - Comportamento de $D_{V10,91}$ função de ALR nebulizando querosene

Na “Análise dos Resultados”, seção 4.4, estão apresentados, com maiores detalhes, os resultados sobre diâmetro médio das gotas, SMD e $D_{V10,91}$, da seção transversal do spray a 250 mm do orifício de saída de cada bocal, em várias

condições operacionais. Estão também apresentados os perfis de SMD ao longo do eixo y e as medições de fração de líquido feitas com o fracionador.

4.3 Pressão de Estagnação no Ponto de Mistura

A partir do arranjo experimental esquematizado na figura 3.9, foram traçadas 3 curvas para as pressões de estagnação medidas no interior da câmara de mistura, P_{m0c} , P_{m0i} e P_{m0s} em cada bocal, variando-se P_a de 2 a 12 bar, de 2 em 2 bar.

Supondo que o escoamento do ar ocorra em regime permanente e que não troque calor com as paredes do bocal do ponto P_A até P_M , admitiu-se que a temperatura de estagnação do escoamento, T_a , é constante em todo este trecho.

Portanto, sabendo os valores da temperatura e pressão de estagnação e vazão de ar no seção de mistura, respectivamente, T_a , P_{m0c} e W_a , é possível calcular a velocidade do ar, V_{am} e, então, a relação entre os fluxos de quantidade de movimento, Φ , conforme a eq. (1.8) repetida a seguir.

$$\Phi = \frac{G_c^2}{G_{a,m}^2} \frac{\rho_{a,m}}{\rho_c} \frac{d_c^2}{d_m^2} \text{sen}\theta \quad (1.8)$$

A partir das medições feitas, é possível calcular a diferença entre a pressão do ar a montante do bocal, P_a e a pressão de estagnação medida nos pontos da seção de mistura nos pontos central, inferior e superior, respectivamente, P_{Mc} , P_{Mi} e P_{Ms} , conforme as figuras 3.19 e 3.21. Estas diferenças são denominadas dP_{m0c} , dP_{m0i} e dP_{m0s} . Os resultados destas medições estão na seção 4.4, “Análise dos Resultados”.

$$dP_{m0c} = P_a - P_{m0c} \quad (4.1)$$

$$dP_{m0i} = P_a - P_{m0i} \quad (4.2)$$

$$dP_{m0s} = P_a - P_{m0s} \quad (4.3)$$

4.4 Análise dos Resultados

• Ensaio com o bocal Y1

Através de ábacos, como o da figura 4.8, é possível relacionar, com maior clareza, condições operacionais com qualidade de nebulização para as viscosidades ensaiadas. A finalidade destes diagramas é auxiliar o operador da caldeira a definir limites dentro dos quais se obtêm boa nebulização. Neste caso, o ábaco reúne os ensaios em que se nebulizou querosene no bocal Y1. As coordenadas representam a pressão do ar, P_a , e a pressão do querosene, P_q .

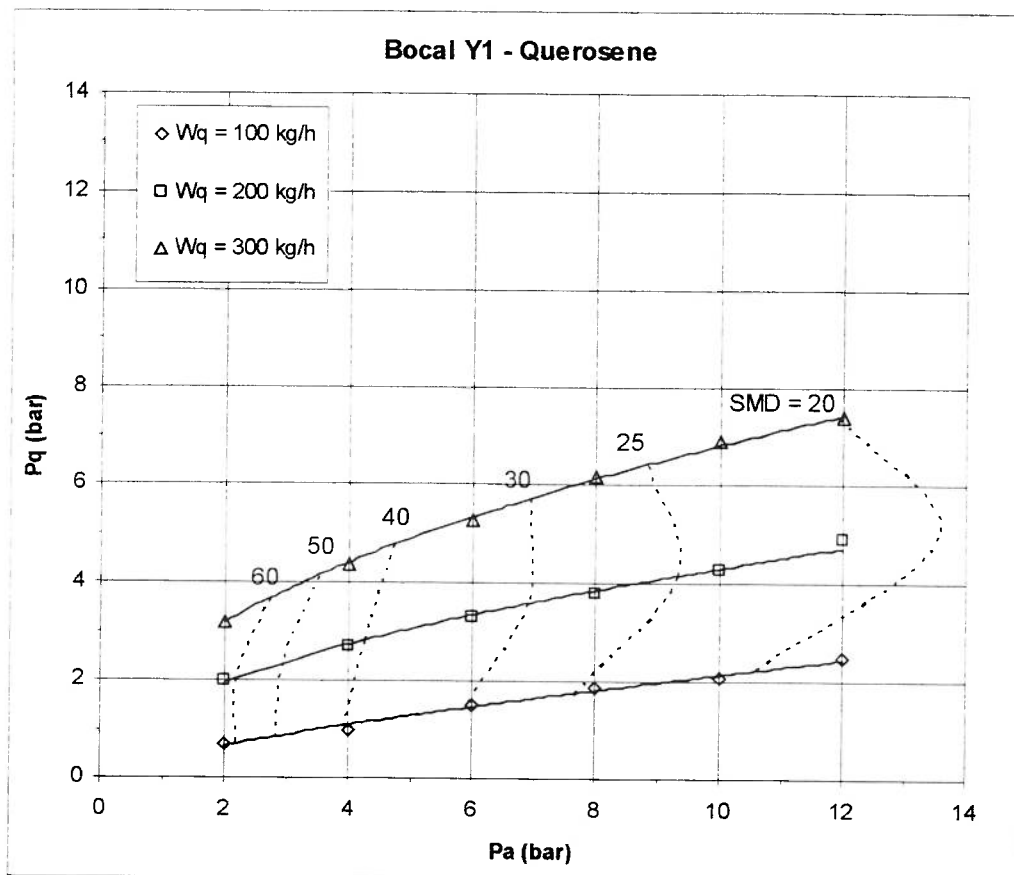


Figura 4.8 – Ábaco para o bocal Y1 operando com querosene

As curvas contínuas representam os resultados para as vazões de combustível constante iguais a 100, 200 e 300 kg/h, conforme mostra a legenda. Para uma determinada P_a , P_q aumenta com o aumento da vazão de combustível. A regularidade

destas curvas ocorre para todos os bocais, o que facilita a interpolação quando se utiliza uma vazão intermediária entre as vazões ensaiadas.

O bocal Y1 apresenta valores relativamente baixos da pressão do combustível, uma vez que, para este bocal, o diâmetro do orifício de entrada de combustível, d_c , é maior do que para os demais bocais, à exceção feita para o bocal Y4. Assim, para a mesma vazão de combustível, a perda de carga neste orifício do bocal Y1 é menor.

As curvas tracejadas representam as curvas de SMD constante, desde 20 μm , à direita, até 60 μm à esquerda.

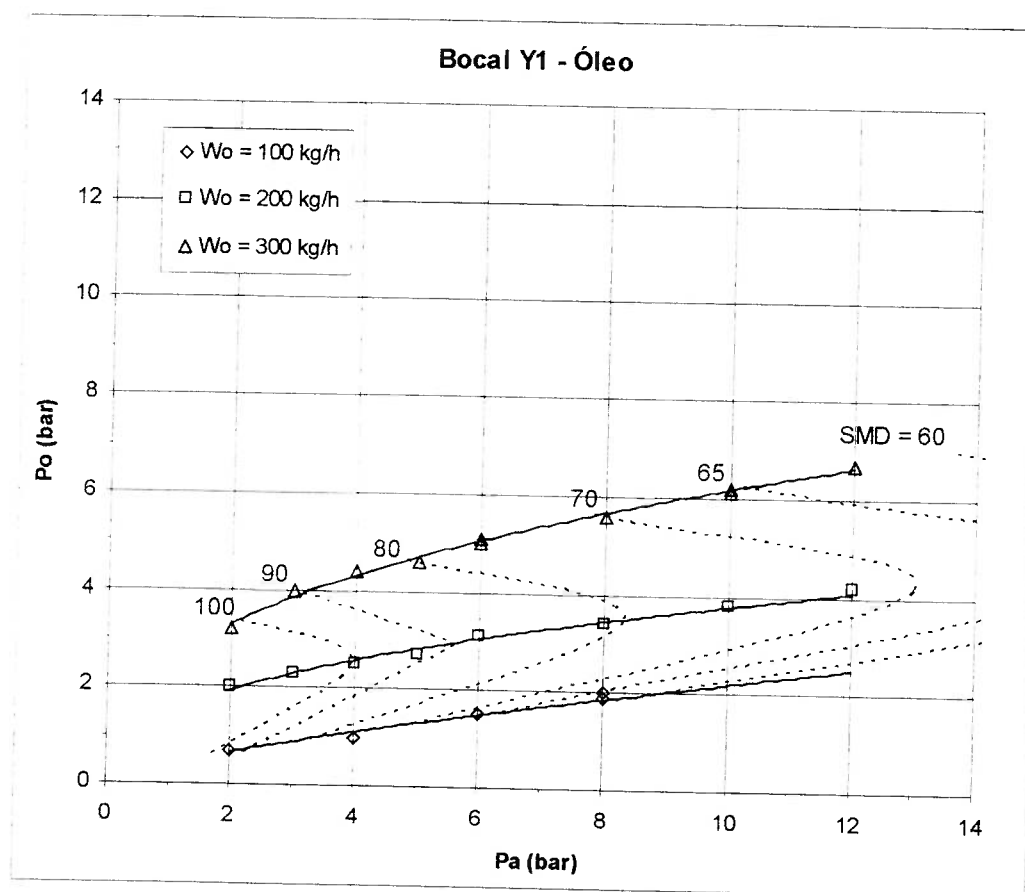


Figura 4.9 – Ábaco para o bocal Y1 operando com óleo

Na figura 4.9, onde são apresentadas os resultados dos ensaios para a nebulização de óleo, nota-se que as gotas maiores ocorrem com $W_o = 200 \text{ kg/h}$, devido à forma das curvas tracejadas. Tal comportamento só foi detectado neste bocal.

Conforme mostra a figura 4.10, o bocal Y1 apresenta valores de SMD muito próximos para qualquer vazão de querosene para determinada P_a , o que facilita a operação do nebulizador. Se houver necessidade de alterar a vazão de um combustível com viscosidade baixa, obtém-se a mesma qualidade de nebulização se for mantido o valor de P_a . Esta vantagem operacional não foi verificada nos ensaios com óleo.

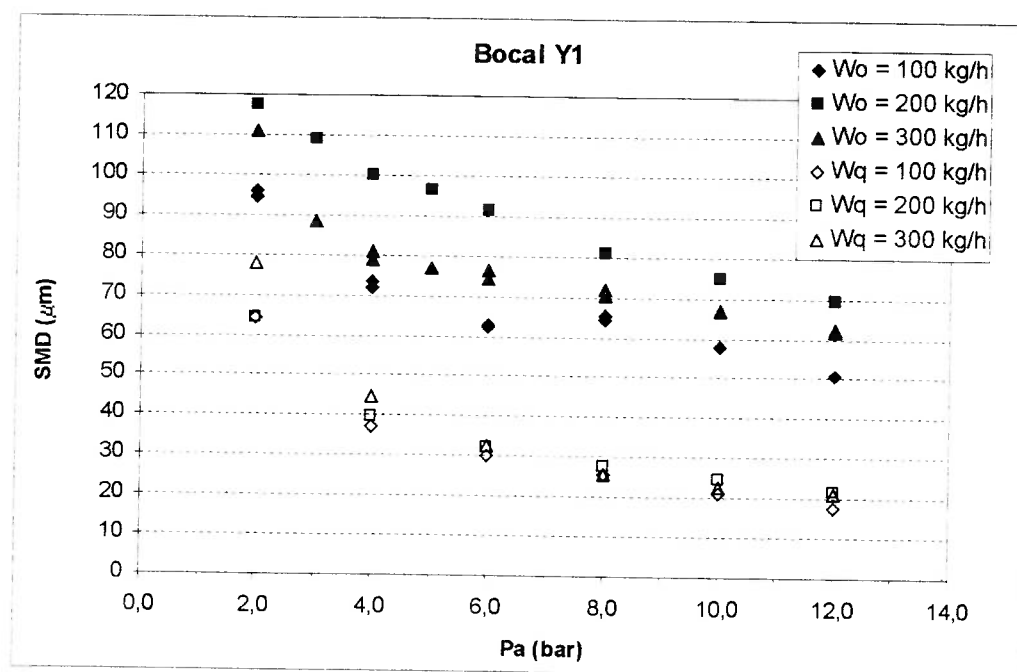


Figura 4.10 – Comportamento de SMD para o bocal Y1 com querosene

Operando com viscosidade mais elevada, os valores de SMD aumentam bastante, principalmente na região onde P_a é maior. Como já foi observado no ábaco, as gotas são maiores para $W_o = 200$ kg/h.

Ao contrário do comportamento de SMD, a influência da vazão de combustível no $D_{V[0,9]}$ médio do spray é mais significativa para a viscosidade menor. Na figura 4.11, a vazão mínima de querosene apresenta os maiores valores de $D_{V[0,9]}$. Além disso, os valores mínimos de $D_{V[0,9]}$ ocorrem para P_a entre 6 e 8 bar.

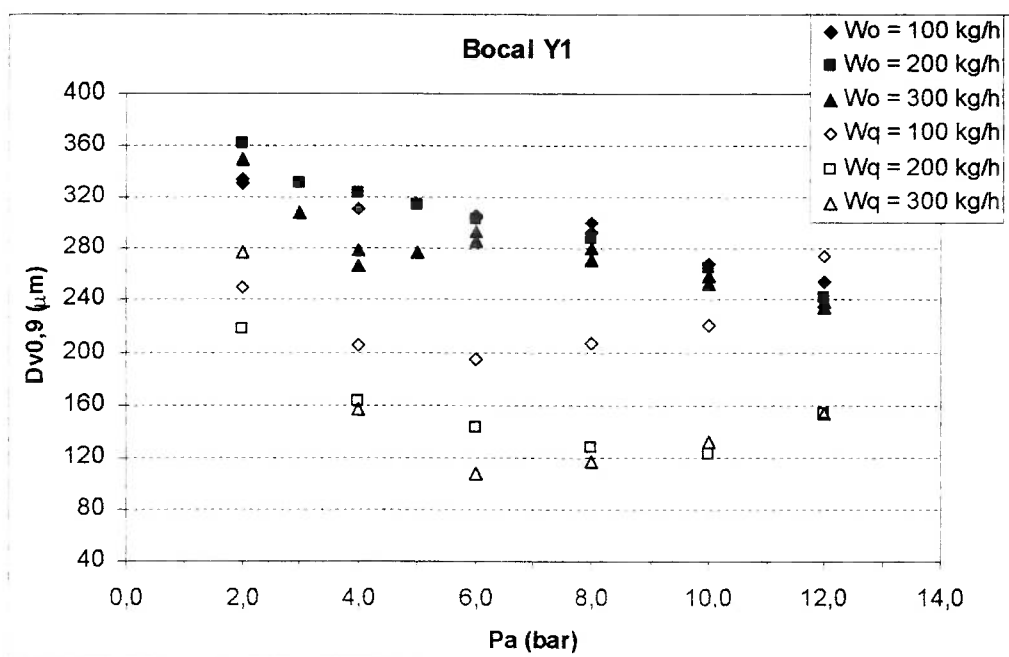


Figura 4.11 – Comportamento de $D_{v[0,9]}$ para os ensaios do bocal Y1

Os valores de $D_{v[0,9]}$ medidos para diferentes vazões são quase sempre bem maiores para viscosidade mais elevada, além de possuir tendência bastante diferente a dos ensaios com querosene em relação à variação de P_a .

Para o cálculo de Φ no ponto de mistura, será utilizada, como exemplo, a condição operacional de projeto: $P_a = 10$ bar e $W_c = 300$ kg/h.

A figura 4.12 mostra as diferenças de pressão, dP_m , calculados através das equações 4.1 a 4.3, repetidas a seguir.

$$dP_{m0c} = P_a - P_{m0c} \quad (4.1)$$

$$dP_{m0i} = P_a - P_{m0i} \quad (4.2)$$

$$dP_{m0s} = P_a - P_{m0s} \quad (4.3)$$

Nota-se que tais diferenças aumentam conforme aumenta a pressão do ar a montante do bocal, P_a , fato constatado em todos os bocais.

Na condição de projeto, operando com querosene, por exemplo, a vazão de ar, W_a , é próxima a 50 kg/h. A pressão de estagnação medida no ponto de mistura,

P_{m0c} , é próxima a 9,6 bar, uma vez que dP_{m0c} está em torno de 0,4 bar para P_a igual a 10 bar, segundo o gráfico da figura 4.12.

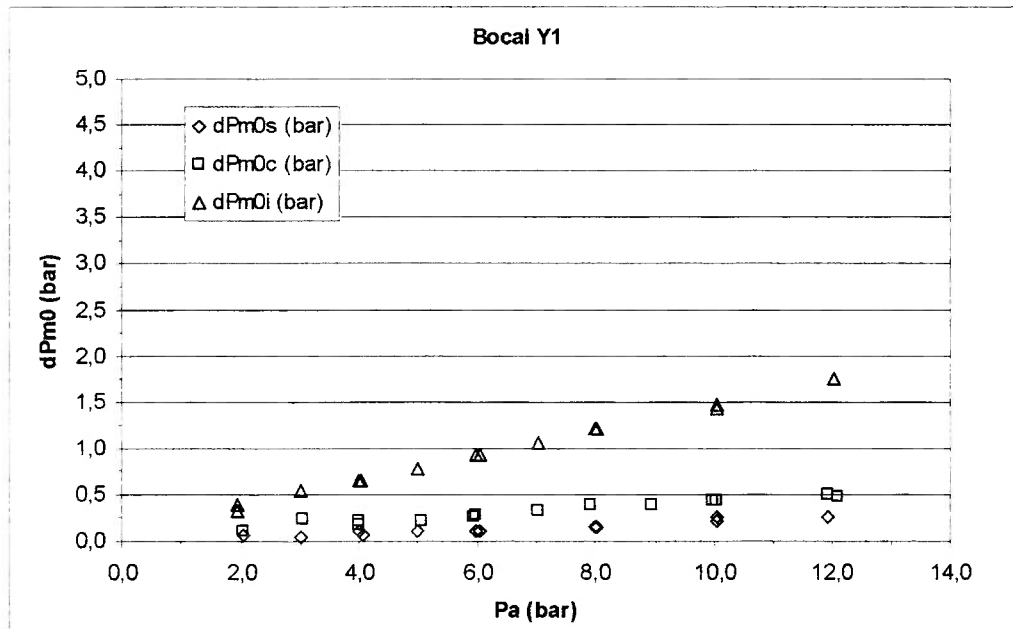


Figura 4.12 – dP_{m0} para o bocal Y1

A partir do roteiro colocado no item 4.3 e dos valores de W_a e P_{m0c} medidos, pode-se obter para o ponto P_M os seguintes valores para velocidade do ar, no caso V_{ac} , e para o número de Mach, M :

- Velocidade do ar: $V_{ac} = 71$ m/s
- Número de Mach: $M = 0,21$

Admitindo que o ar se comporte como gás perfeito, calcula-se sua densidade para obter Φ . Neste caso, chega-se a $\Phi = 1,1$.

Para outras condições de operação, obtém-se o gráfico da figura 4.13, onde o eixo dos valores de Φ está em escala logarítmica.

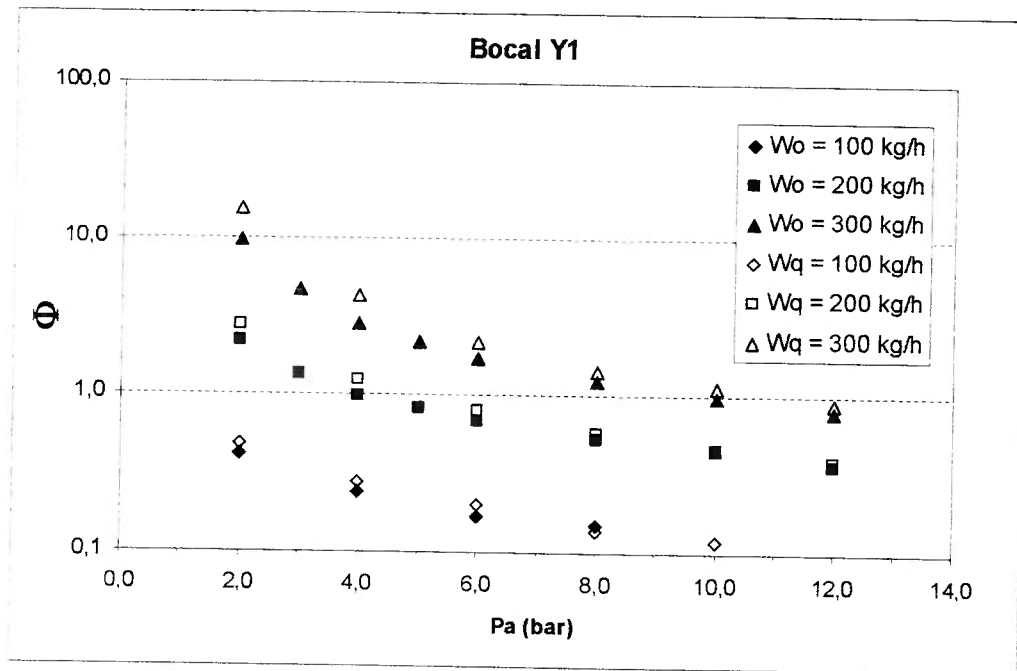


Figura 4.13 – Valores de Φ para o bocal Y1

A partir da figura 4.13, constata-se que os valores de Φ são muito semelhantes para a mesma condição operacional utilizando óleo ou querosene.

De fato, as diferenças entre as vazões de ar medidas na mesma condição para ambos os combustíveis são pequenas, o que implica em perfis de pressão do ar ao longo das passagens do bocal bastante semelhantes. Esta constatação pode ser estendida aos outros bocais.

Observa-se, também, que para a maioria das condições operacionais, os valores de Φ são menores do que 2. Desta forma, a maior parte do líquido é nebulizada pelo arraste da película que se forma na parede da câmara de mistura, no lado negativo do eixo y , junto ao orifício de descarga de combustível.

As medições de fração de líquido do spray gerado pelo bocal Y1 apresentaram, para todas as condições, valores maiores no lado negativo do eixo y , justamente o lado do orifício de entrada de combustível, como foi mostrado na figura 1.5 reproduzida na figura 4.2.

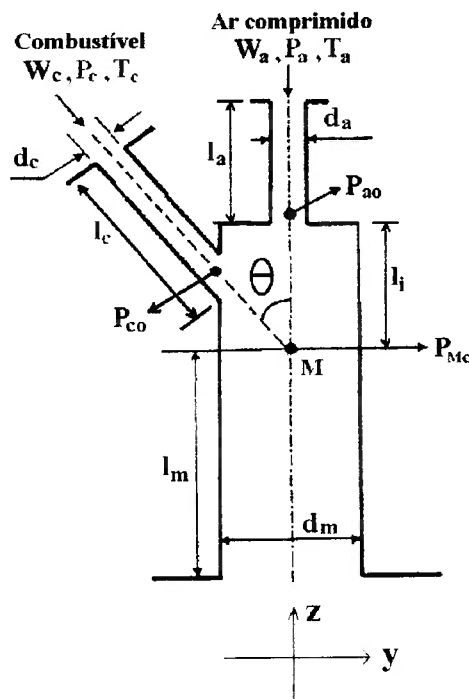


Figura 4.2 - Esquema dos bocais e sistema de coordenadas

Além disso, a câmara de mistura curta, $l_m/d_m = 1$, não permite que a espessura da película de combustível se uniformize e se reduza no interior da câmara, o que acentua a assimetria do spray, conforme mostram as figuras 4.14 a 4.19.

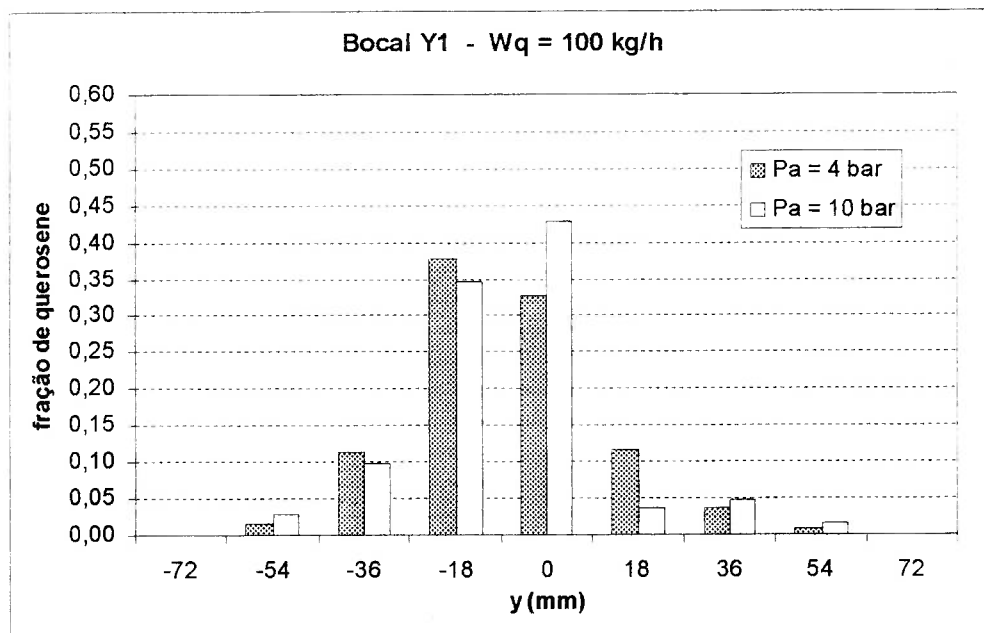


Figura 4.14 – Distribuição de querosene para o bocal Y1 (W_q = 100 kg/h)

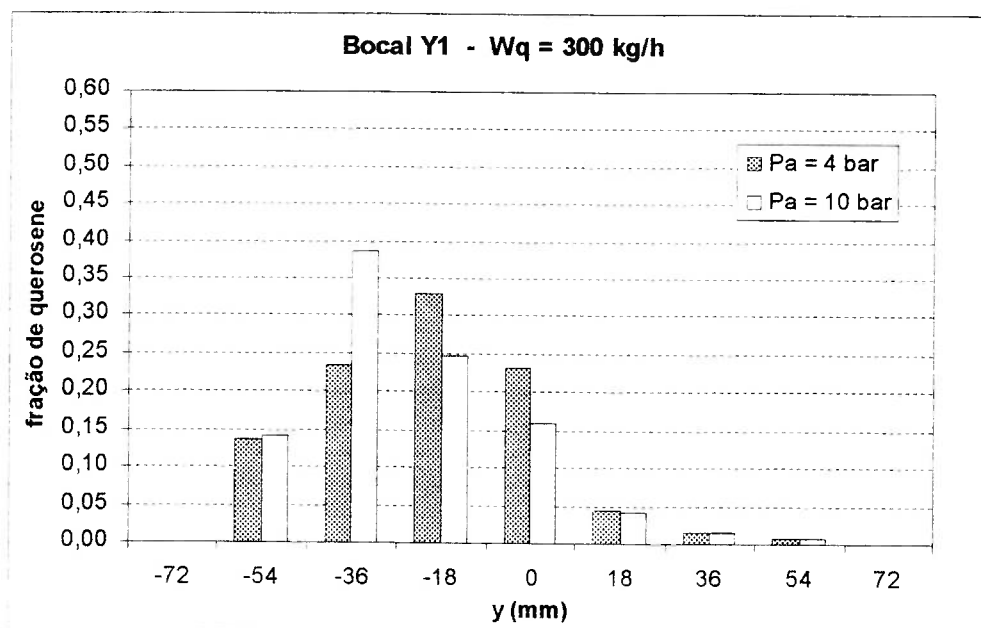


Figura 4.15 – Distribuição de querosene para o bocal Y1 ($W_q = 300 \text{ kg/h}$)

As figuras 4.14 e 4.15 mostram as frações de querosene a cada 18 mm do centro do sistema de coordenadas para vazões de 100 kg/h e 300 kg/h, para pressão de ar, $P_a = 4,0 \text{ bar}$ e $P_a = 10,0 \text{ bar}$. As figuras 4.16 e 4.17 apresentam as mesmas medições nebulizando óleo.

Na figura 4.15, é interessante notar que o aumento de P_a , de 4 para 10 bar, acentua a assimetria com relação à fração de querosene devido à diminuição da relação entre os fluxos de quantidade de movimento, Φ . Para vazão de combustível menor, $W_q = 100 \text{ kg/h}$, este comportamento não foi detectado.

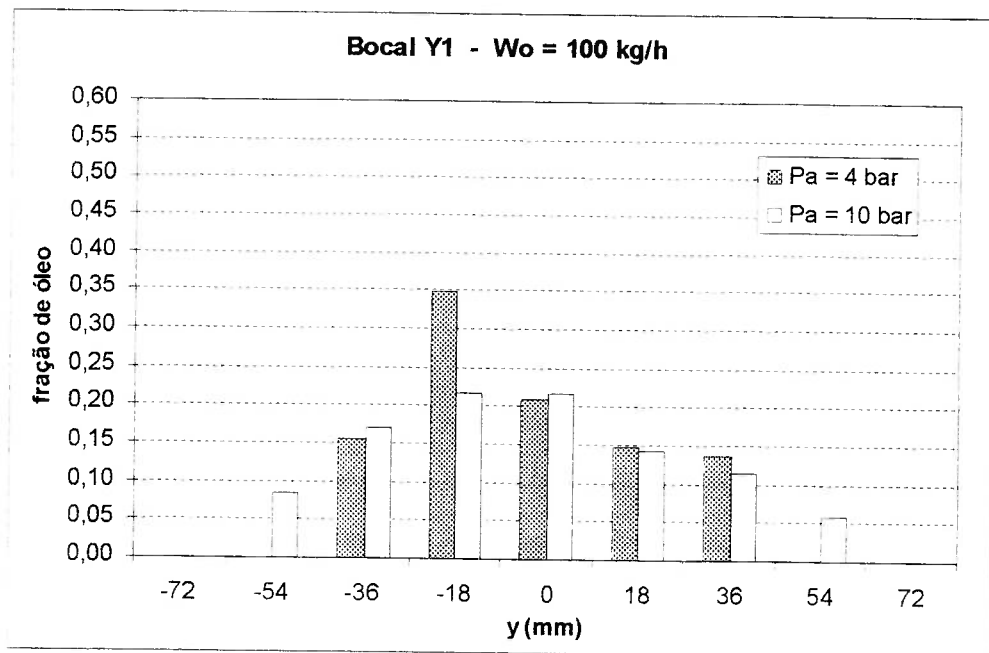


Figura 4.16 – Distribuição de óleo ao longo do eixo y para $W_o = 100$ kg/h

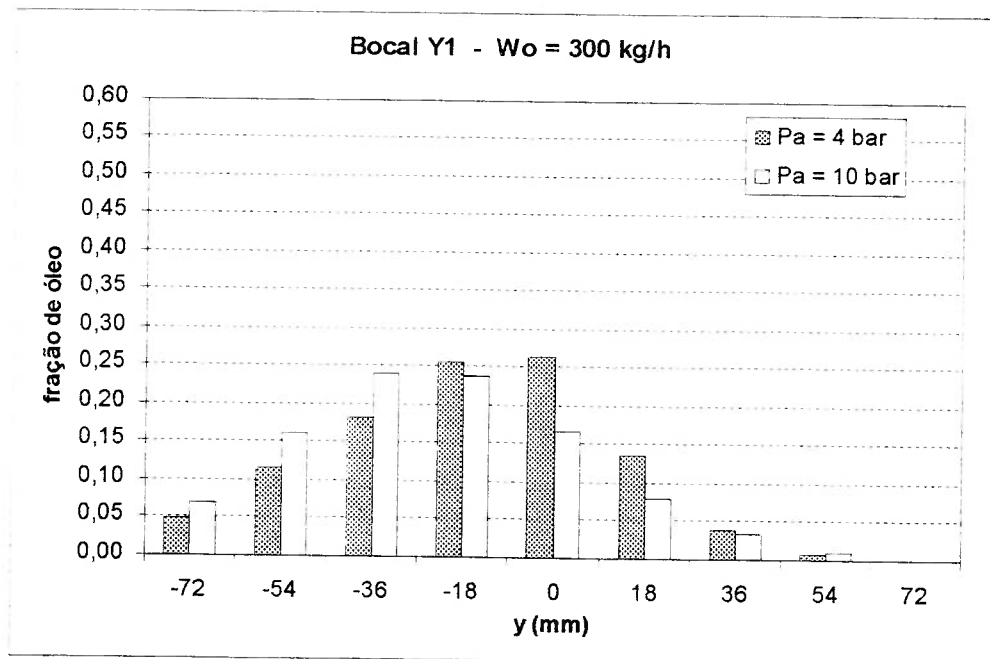


Figura 4.17 – Distribuição de óleo ao longo do eixo y para $W_o = 300$ kg/h

Tanto a nebulização de querosene quanto a de óleo provocaram assimetria semelhante com relação aos perfis de SMD, com gotas maiores no lado negativo do eixo y e gotas menores no centro do spray, como mostram as figuras 4.18 e 4.19.

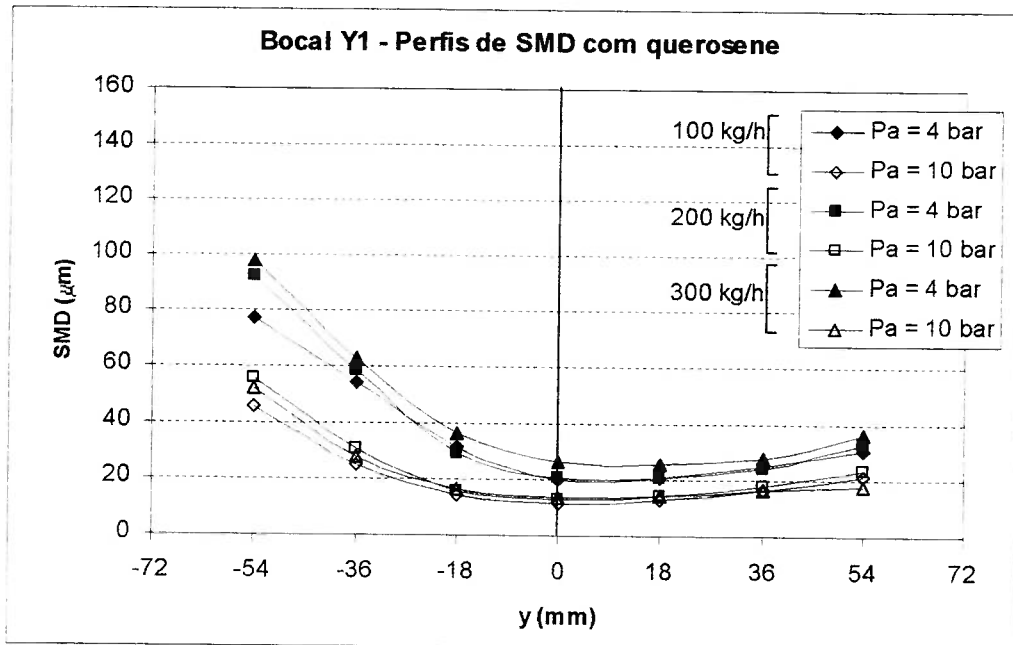


Figura 4.18 – Perfis de SMD para o bocal Y1 nebulizando querosene

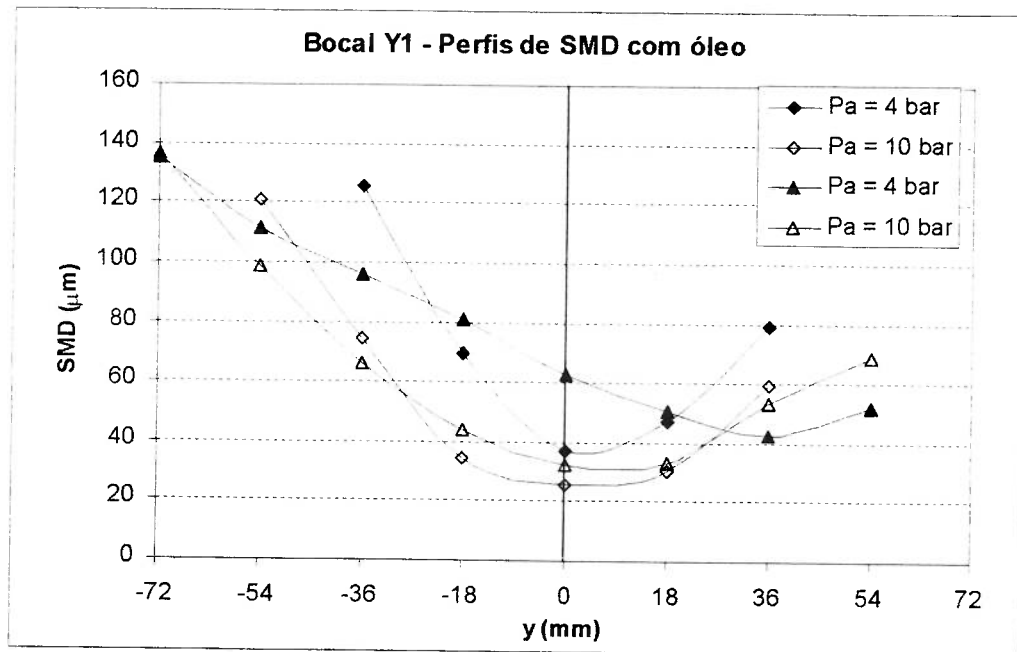


Figura 4.19 – Perfis de SMD para o bocal Y1 nebulizando óleo

Para construir o perfil de velocidades do ar na seção de mistura em determinada condição, aplica-se o mesmo roteiro de cálculo indicado no item 4.2 com os dados da figura 4.12 que indicam P_{m0i} e P_{m0s} , respectivamente, 8,6 e 9,8 bar.

para $P_a = 10$ bar. Desta forma, as velocidades do ar para os pontos inferior e superior são, respectivamente:

- $V_{ai} = 80$ m/s
- $V_{as} = 70,6$ m/s

Com estes resultados, é possível construir o perfil de velocidades do escoamento de ar, conforme a figura 4.20.

Constata-se que a maior velocidade ocorre no ponto inferior, enquanto que as pressões P_{m0s} e P_{m0c} são mais próximas a P_a . Isto mostra que o escoamento não é simétrico devido às diferenças consideráveis entre as pressões e velocidades provocadas pela inclinação do jato de combustível.

Além disso, como o ponto inferior apresenta o menor valor de pressão de estagnação, P_{m0i} , e a maior velocidade na seção de mistura, ele também apresenta o menor valor de pressão estática, P_{mi} , fazendo com que a maior parcela da vazão de ar passe pela região inferior da seção de mistura. Esta assimetria se verifica em maior ou menor intensidade nos outros bocais.

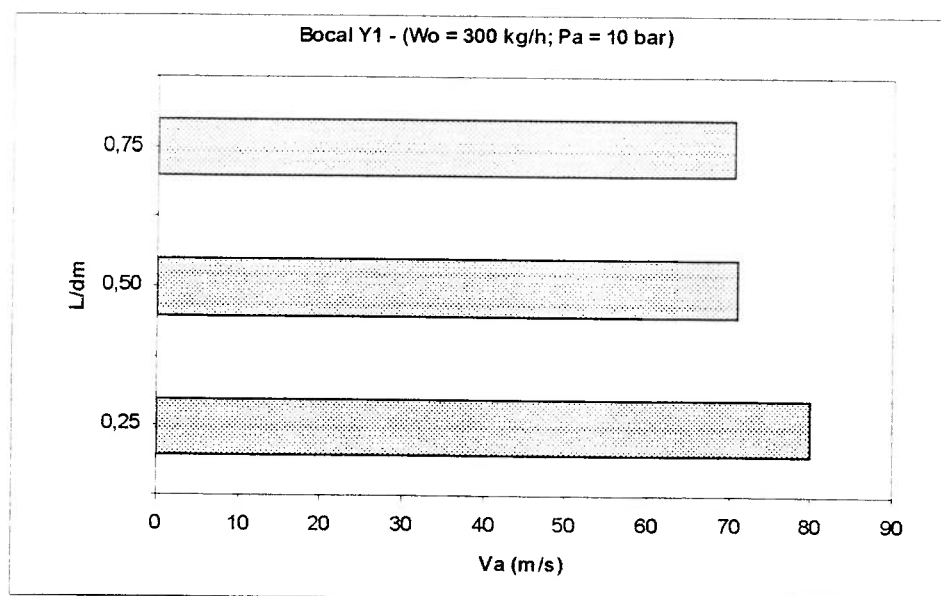


Figura 4.20 – Perfil de velocidades para o bocal Y1

É importante observar que a vazão de ar medida nos ensaios com a tomada de pressão inserida no bocal pelo orifício de entrada de combustível foi menor que a vazão de ar medida nos ensaios com querosene ou óleo, sob a mesma P_a .

A figura 4.21 mostra que as vazões de ar medidas nos ensaios em que se inseriram as tomadas de pressão são bastante semelhantes, já que os 3 tubos possuem diâmetros iguais, impondo a mesma resistência à passagem de ar.

Conforme P_a aumenta, as vazões de ar medidas nos ensaios com querosene aumentam em proporção maior que as vazões de ar dos ensaios com as tomadas de pressão, uma vez que o jato de combustível se adapta às condições do ar na seção de mistura, impondo resistência menor à passagem de ar do que os rígidos tubos de aço inox.

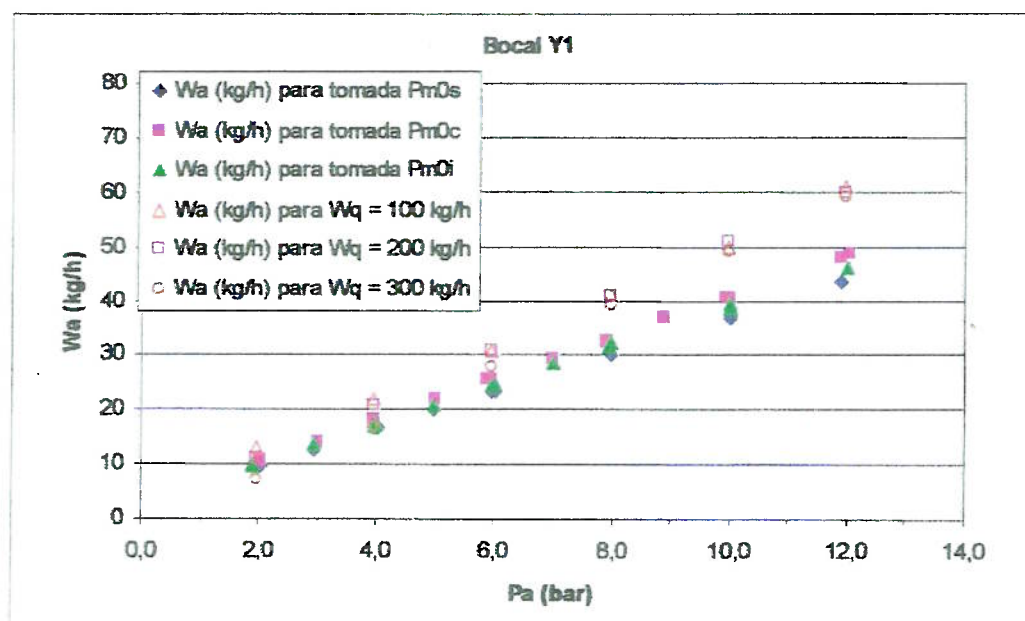


Figura 4.21 – Vazões de ar de diferentes ensaios

• Ensaios com o bocal Y4

Este bocal possui dimensões iguais às do Y1, mas com relação l_m/d_m igual a 4,0, o que provoca diâmetro médio das gotas menor devido ao maior tempo com que o ar transfere quantidade de movimento ao combustível, acelerando-o e reduzindo a espessura da película formada na parede da câmara de mistura.

Desta forma, seu comportamento é parecido ao do bocal Y1, mas com valores de SMD e $D_{V[0,9]}$ menores na grande maioria das condições.

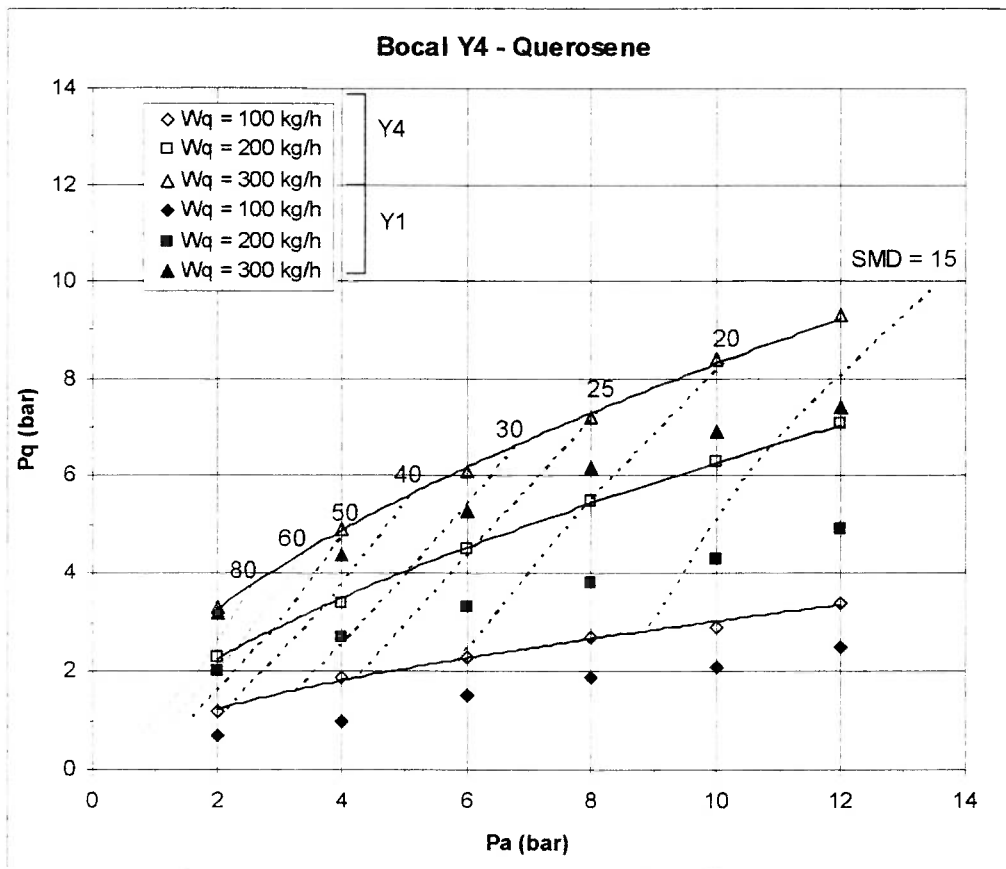


Figura 4.22 – Ábaco para o bocal Y4 operando com querosene

A figura 4.22 mostra o ábaco que reúne os ensaios em que se nebulizou querosene. O bocal Y4 apresenta curvas de vazão de combustível constante superiores do que as curvas do bocal Y1, representadas pelos pontos cheios da figura.

As medições de pressão de estagnação no ponto de mistura do bocal Y4 foram, em geral, maiores do que no bocal Y1, o que aumenta P_c para a mesma condição operacional, já que o comprimento e o diâmetro do orifício de entrada de combustível, l_c e d_c , são iguais para ambos os bocais. Pressões maiores na câmara de mistura, em geral são interessantes para gerar gotas menores.

Tanto na figura 4.22 quanto na 4.23, nota-se que as gotas maiores ocorrem com $W_c = 300$ kg/h, comportamento diferente ao do bocal Y1, quando as gotas maiores ocorreram para $W_o = 200$ kg/h.

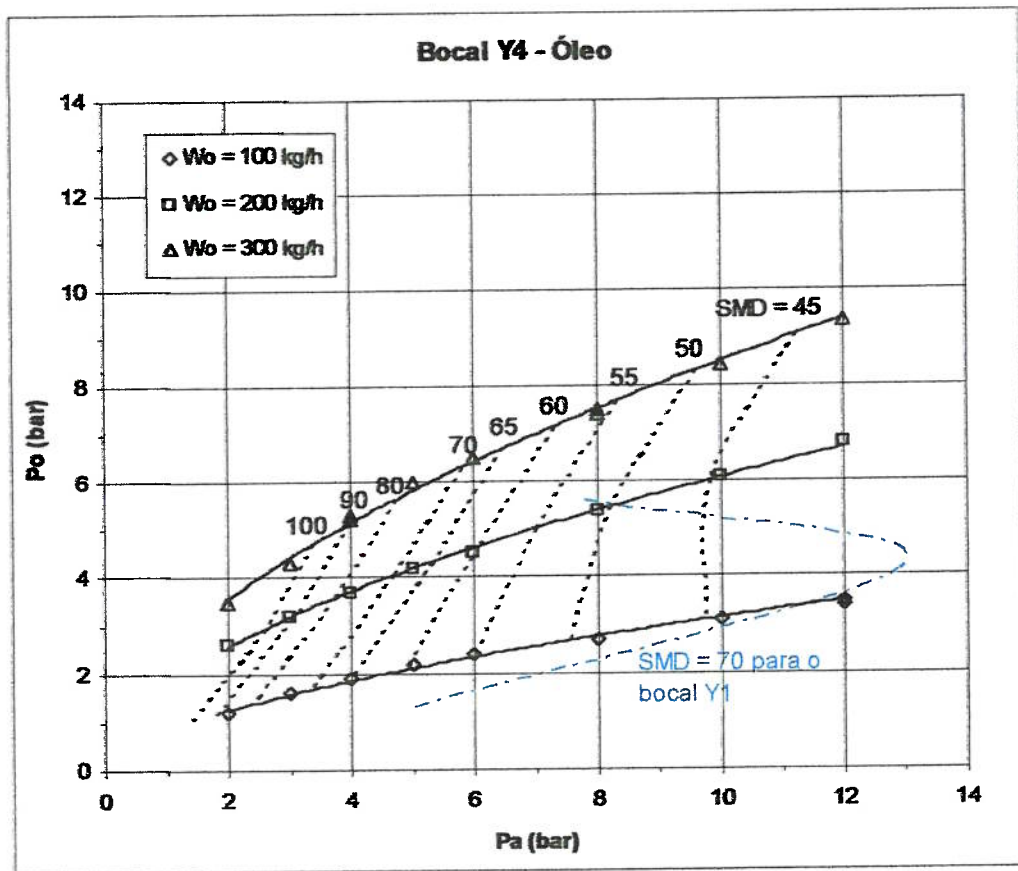


Figura 4.23 – Ábaco para o bocal Y4 operando com óleo

Comparando as curvas para $SMD = 70 \mu\text{m}$ para os bocais Y4 e Y1, percebe-se a importância do maior comprimento da câmara de mistura, já que a curva para o bocal Y4 está numa região de pressões menores do que a curva para o bocal Y1.

Portanto, para bocais operando com ALR relativamente elevados e Φ por volta de 1,0, a nebulização é melhor nos bocais com câmara de mistura com relação l_m/d_m maior.

A partir da figura 4.24, conclui-se que para P_a maiores do que 6 bar, o bocal Y4 gera sprays com SMD menores. Além disso, as curvas de SMD para as 3 vazões de óleo no bocal Y4 são coincidentes para P_a maior do que 8 bar, o que facilita a operação do nebulizador.

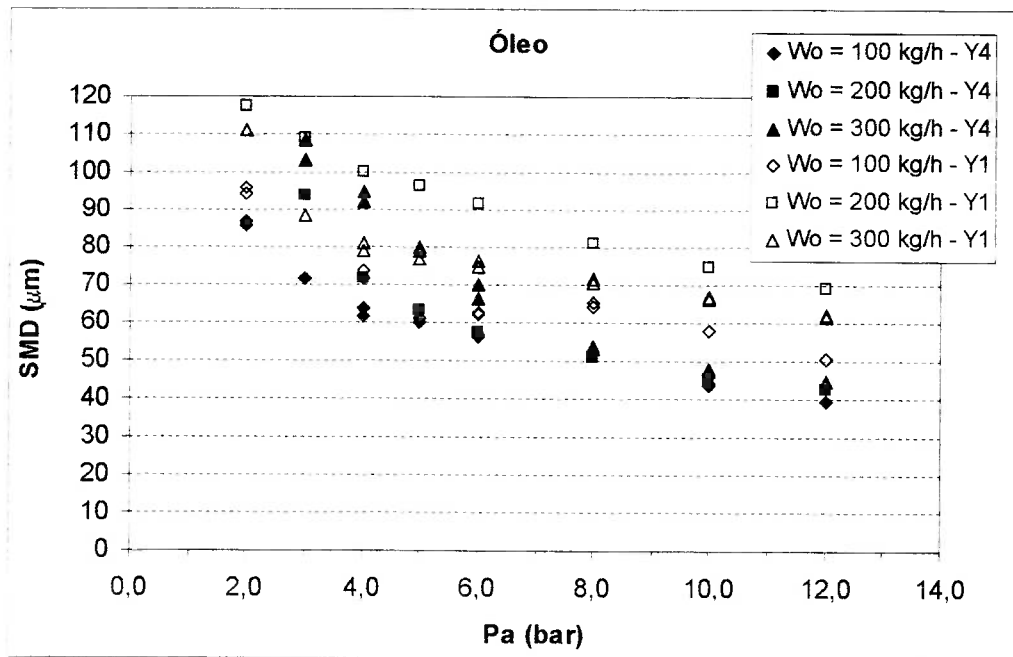


Figura 4.24 – Comportamento de SMD para os ensaios de Y4 e Y1 com óleo

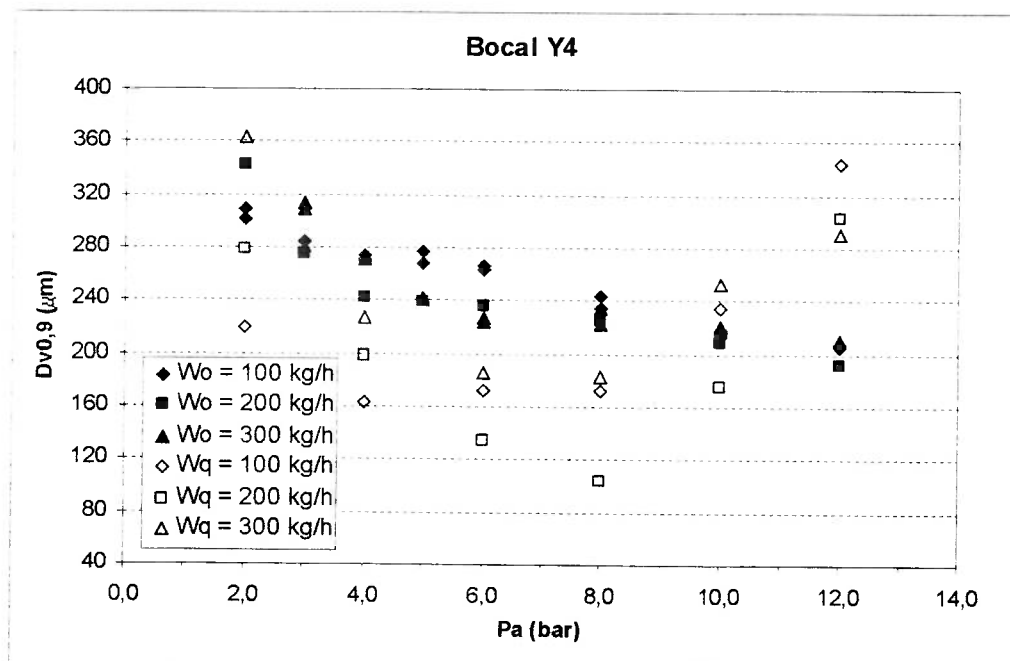


Figura 4.25 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os ensaios de Y4

Observa-se diferenças significativas no comportamento com relação a $D_{V[0,9]}$ para a operação com querosene e óleo. Na figura 4.25, o diâmetro das gotas é menor

para querosene em condições em que P_a se encontra entre 6 e 8 bar. Para P_a maiores, a nebulização de querosene apresenta gotas maiores do que a nebulização de óleo.

Portanto, com relação ao $D_{V[0,9]}$, a pressão de ar ideal para nebulizar combustíveis com viscosidade baixa, querosene, no bocal Y4 está por volta de 8 bar, enquanto que, para viscosidades elevadas, óleo, a melhor condição de nebulização ocorreu com a $P_a = 12$ bar, que foi a máxima pressão.

A figura 4.26 compara as diferenças de pressão dP_{m0} entre os bocais Y4 e Y1. Observa-se que, para o ponto inferior, as curvas para o bocal Y4 apresentam valores de diferença de pressão, dP_{m0} , levemente menores para a mesma P_a , comparado ao bocal Y1, o que resulta em pressões de estagnação, P_{m0i} , pouco maiores.

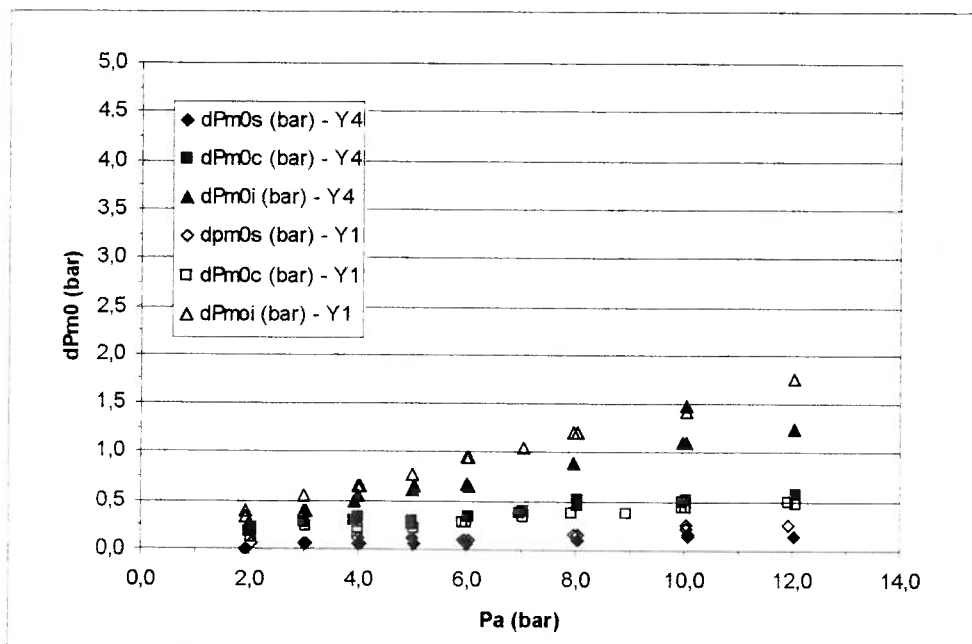


Figura 4.26 - dP_{m0} para os bocais Y4 e Y1

Partindo da hipótese que a pressão do ar à saída dos bocais seja a mesma, pressão atmosférica, o bocal Y4, com câmara de mistura mais comprida, provocaria uma perda de carga do escoamento de ar maior ao longo da câmara de mistura, o que aumentaria as pressões de estagnação na seção de mistura.

A maior perda de carga na câmara de mistura também causa menor vazão de ar, W_a , para as mesmas condições operacionais do bocal Y1, como visto na figura 4.1.

As curvas apresentadas para Φ em função de P_a para os bocais Y1 e Y4 são muito próximas, como mostra a figura 4.27 para operação com óleo, o que, em princípio, resultaria em distribuições de combustível e SMD ao longo do eixo y semelhantes para a mesma condição operacional.

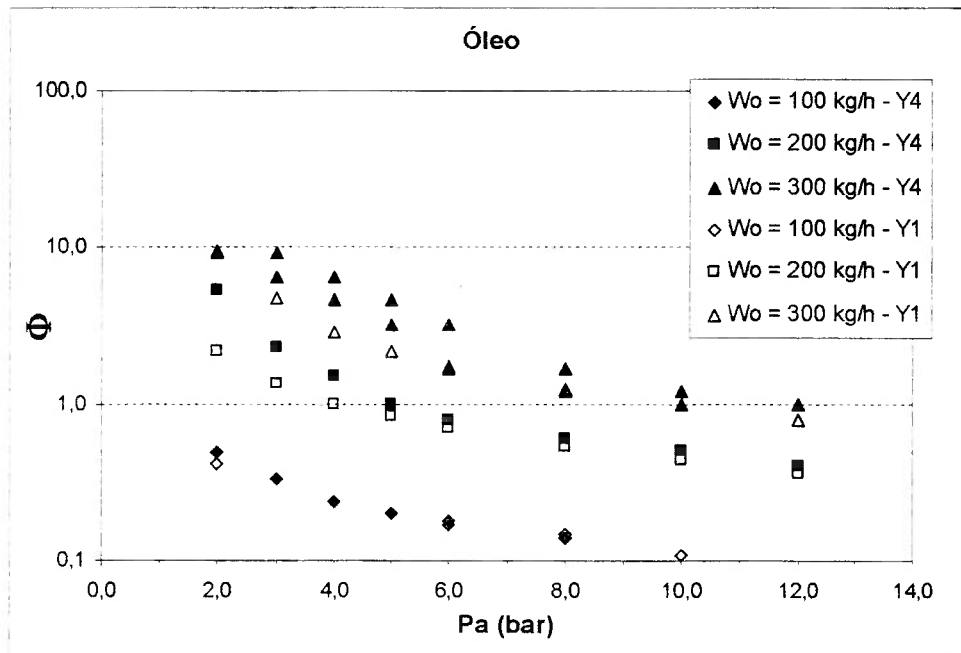


Figura 4.27 – Valores de Φ para os bocais Y1 e Y4

Os perfis de distribuição de combustível e SMD com relação ao eixo y do spray apresentados pelo bocal Y1 mostram assimetria bem maior que os perfis do bocal Y4.

Este fato, apresentado nas figuras 4.28 a 4.32, pode ser explicado pelo maior comprimento da câmara de mistura do bocal Y4, que é quatro vezes maior do que o do bocal Y1, o que aumenta o tempo em que o ar acelera a película de combustível, reduz sua espessura e diminui as assimetrias acentuadas provocadas por valores de Φ exageradamente baixos.

O bocal Y4 gera perfis de SMD mais simétricos, com diâmetros maiores na periferia positiva e negativa dos sprays, enquanto que no centro, os valores de SMD são significativamente menores, como mostra a figura 4.31.

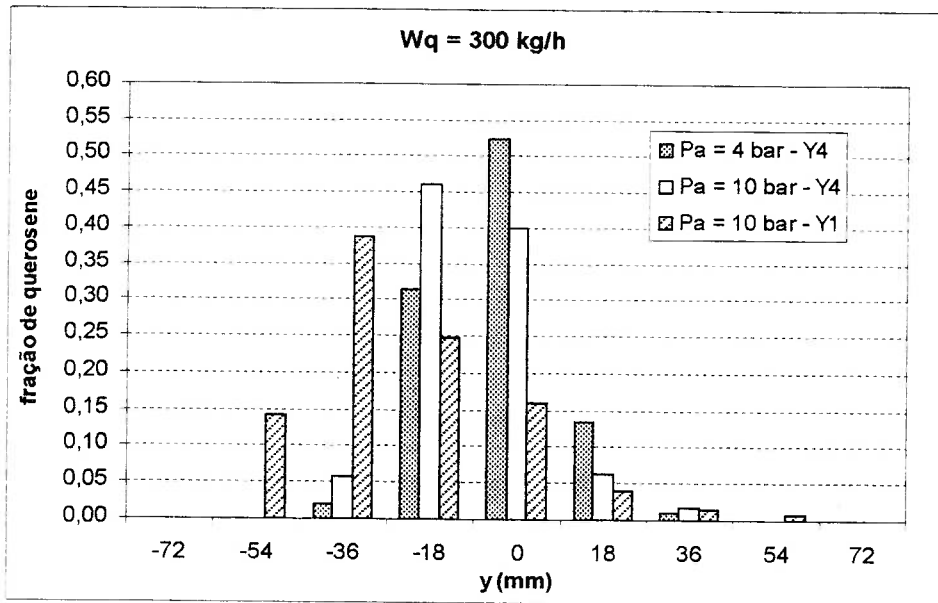


Figura 4.28 – Distribuição de querosene para os bocais Y4 e Y1

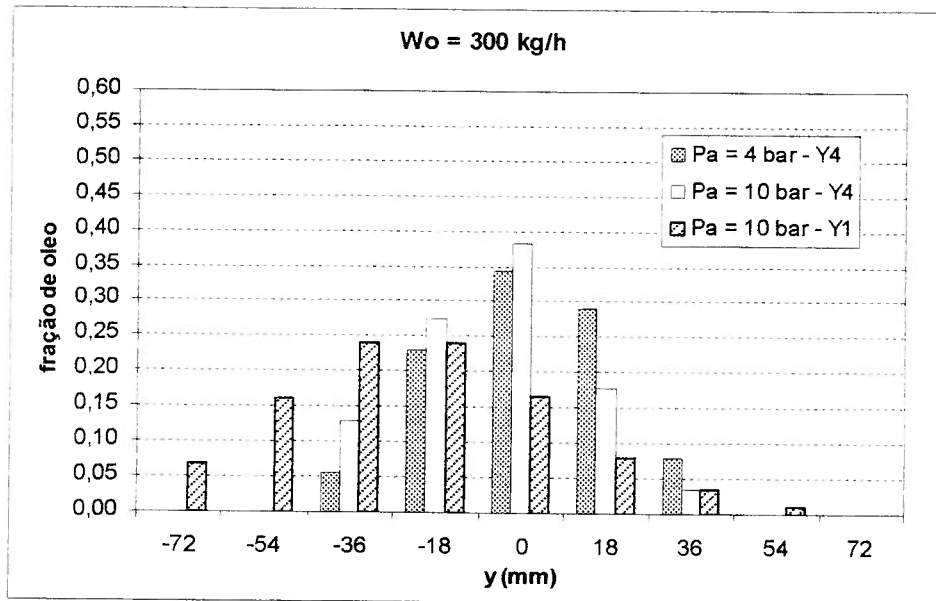


Figura 4.29 – Distribuição de óleo para os bocais Y4 e Y1

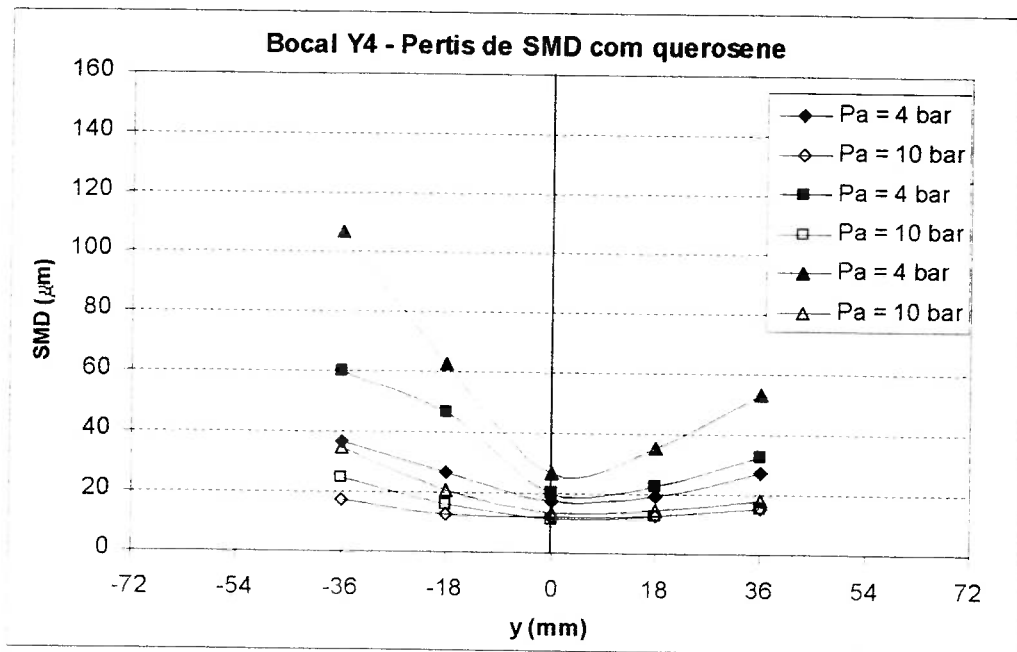


Figura 4.30 – Perfis de SMD para o bocal Y4 nebulizando querosene

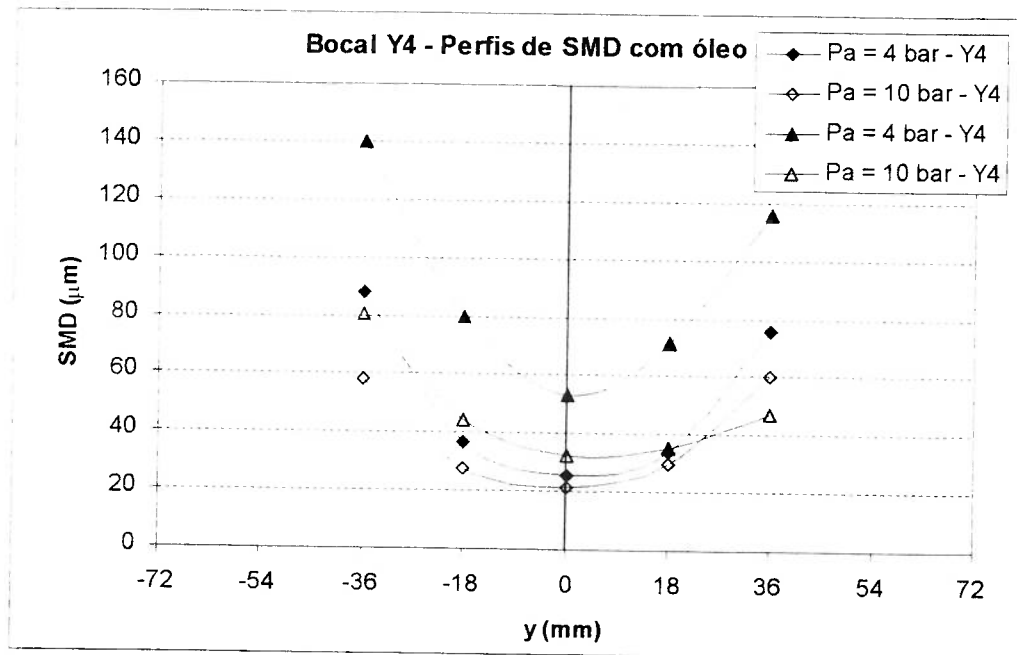


Figura 4.31 – Perfis de SMD para o bocal Y4 nebulizando óleo

A figura 4.32 compara os perfis de SMD para os bocais Y1 e Y4 nebulizando óleo com vazão de 300 kg/h. Observa-se que na parte central do spray, de -18 a +18mm, os valores de SMD são semelhantes, principalmente para $P_a = 10$ bar.

Isto mostra que a nebulização por colisão direta entre os jatos na seção de mistura ocorre de forma parecida, uma vez que as pressões de estagnação nesta seção, assim como as vazões de ar são próximas para a mesma condição.

A diferença maior ocorre na periferia do spray, principalmente no lado negativo, por onde é injetado o combustível na câmara de mistura. As gotas nesta região foram geradas pelo arraste da película de óleo formada na parede da câmara, cujo comprimento, para o bocal Y4, é quatro vezes maior que para o bocal Y1.

Desta forma, a película de óleo se torna mais fina, ao final da câmara de mistura mais comprida, devido ao maior tempo com que foi acelerada pela quantidade de movimento do ar, gerando gotas menores na periferia do spray. Além disso, a câmara de mistura mais comprida diminui o ângulo do spray, tanto no lado positivo, quanto no negativo.

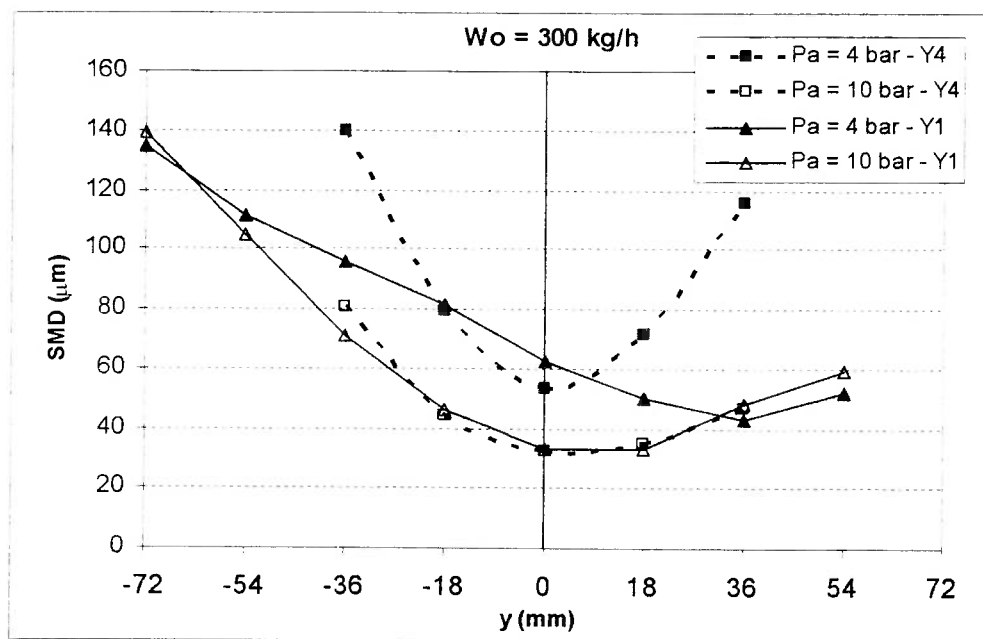


Figura 4.32 – Perfis de SMD para os bocais Y1 e Y4

A figura 4.33 mostra que a tendência do perfil de velocidades se mantém, ou seja: $V_{ai} > V_{ac} > V_{as}$. As velocidades para o bocal Y4 são menores que as velocidades do bocal Y1 devido à menor vazão de ar, W_a , para a mesma condição.

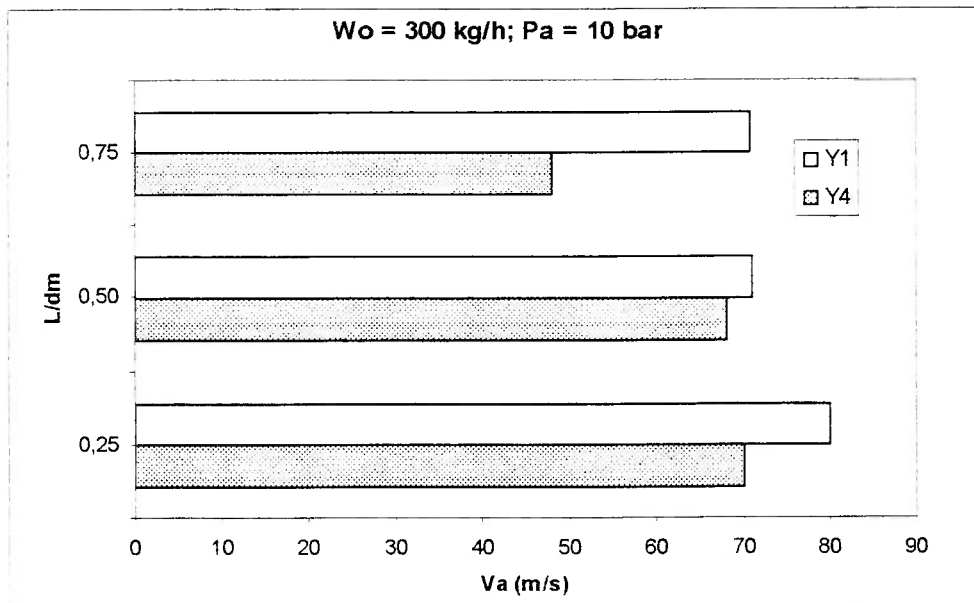


Figura 4.33 – Perfis de velocidade do ar para os bocais Y1 e Y4

• **Ensaio com o bocal Y2**

As figuras 4.34 e 4.35 apresentam os ábacos que reúnem os ensaios com querosene e óleo, respectivamente, no bocal Y2.

As curvas de vazão de combustível constante se localizam em regiões com pressões do fluido a nebulizar superiores em relação aos dados para o bocal Y4. Isto se deve ao fato de que o diâmetro do orifício de entrada do combustível, d_e , do bocal Y2 é 2,4 contra 3,0 mm no bocal Y4, o que aumenta a perda de carga neste orifício para a mesma vazão de combustível, aumentando P_c . No bocal Y2, como em todos os outros, a influência da viscosidade do combustível sobre estas curvas é desprezível.

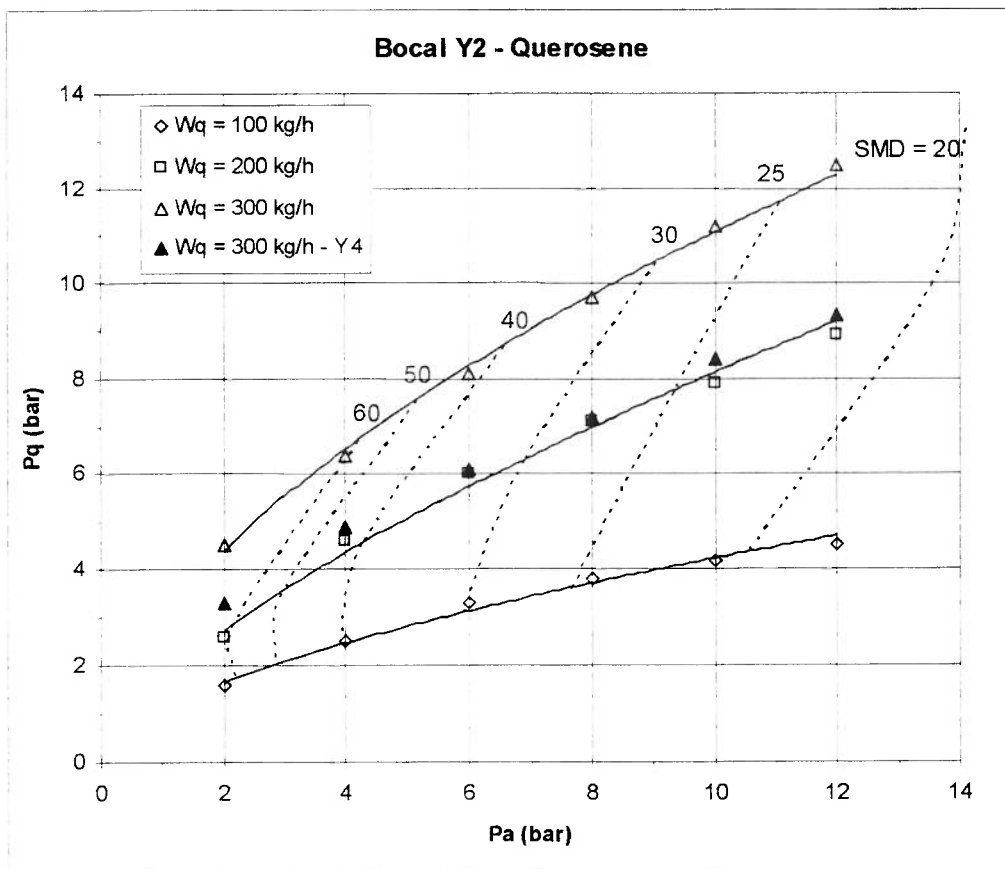


Figura 4.34 – Ábaco para o bocal Y2 operando com querosene

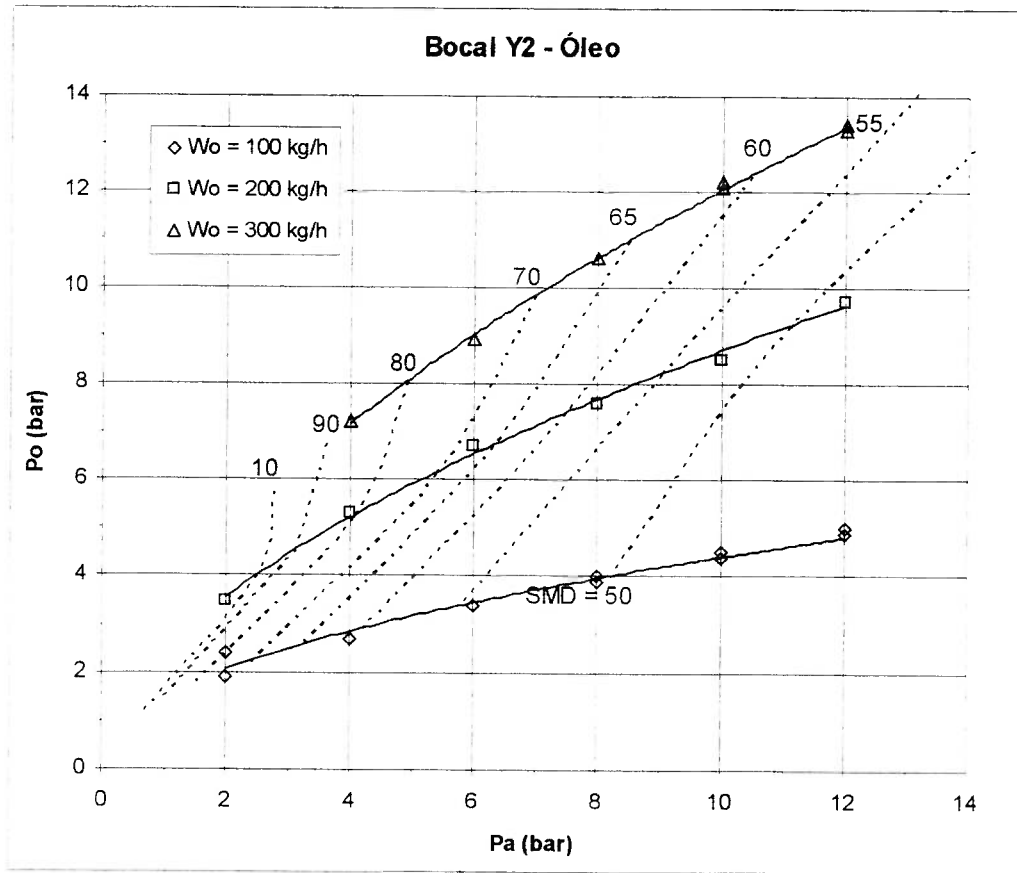


Figura 4.35 – Ábaco para o bocal Y2 operando com óleo

Os valores de SMD do bocal Y2, em geral, apresentaram-se maiores que os do bocal Y4 para a mesma condição operacional, conforme mostram as figuras 4.36 e 4.37.

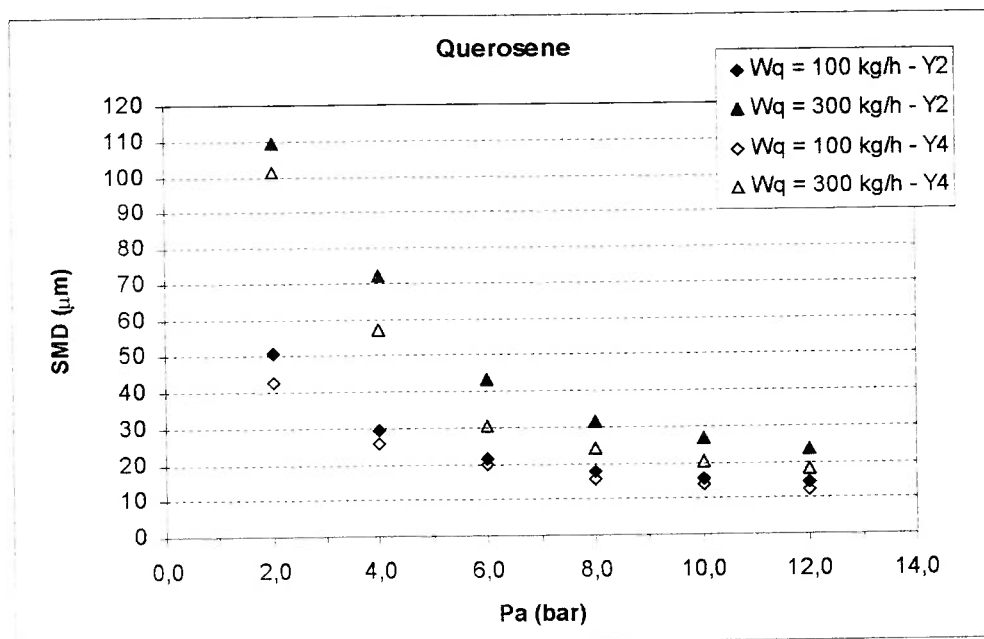


Figura 4.36 – Comportamento de SMD dos bocais Y2 e Y4 com querosene

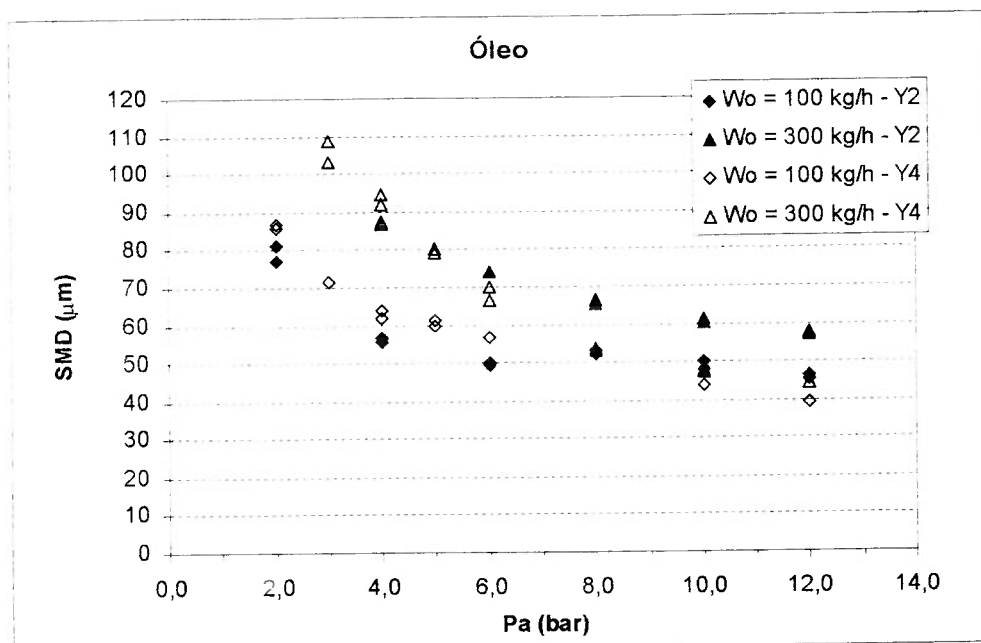


Figura 4.37 – Comportamento de SMD dos bocais Y2 e Y4 com óleo

Entretanto, se a comparação for feita em termos de ALR, o bocal Y2 apresenta gotas menores para a maioria das condições, como pode ser visto na figura 4.38 para nebulização de óleo.

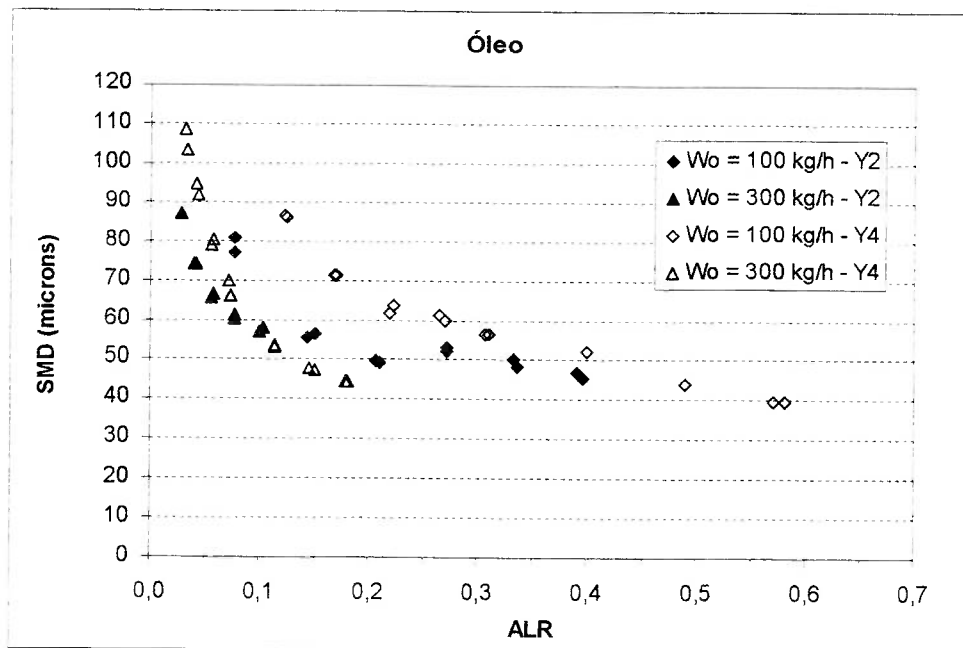


Figura 4.38 – Comportamento de SMD dos bocais Y2 e Y4 com óleo em função de ALR

Diante destes resultados, conclui-se que ao impor a mesma P_a aos bocais, o bocal Y4 gera gotas menores devido à maior W_a provocada pelo maior d_a . Por outro lado, o bocal Y2 gera gotas menores para o mesmo ALR, apesar da sua relação l_m/d_m ser a metade daquela do bocal Y4.

Observa-se, na figura 4.39, que o bocal Y2 apresenta queda de pressão de estagnação, dP_{m0} , maior nos três pontos medidos na seção de mistura.

Isto pode ser explicado pela relação entre o comprimento e o diâmetro do orifício de entrada de ar, l_a/d_a . Para o bocal Y4, esta relação vale 2,14, apresentando menor resistência à passagem do ar do que o bocal Y2, cuja relação vale 2,73.

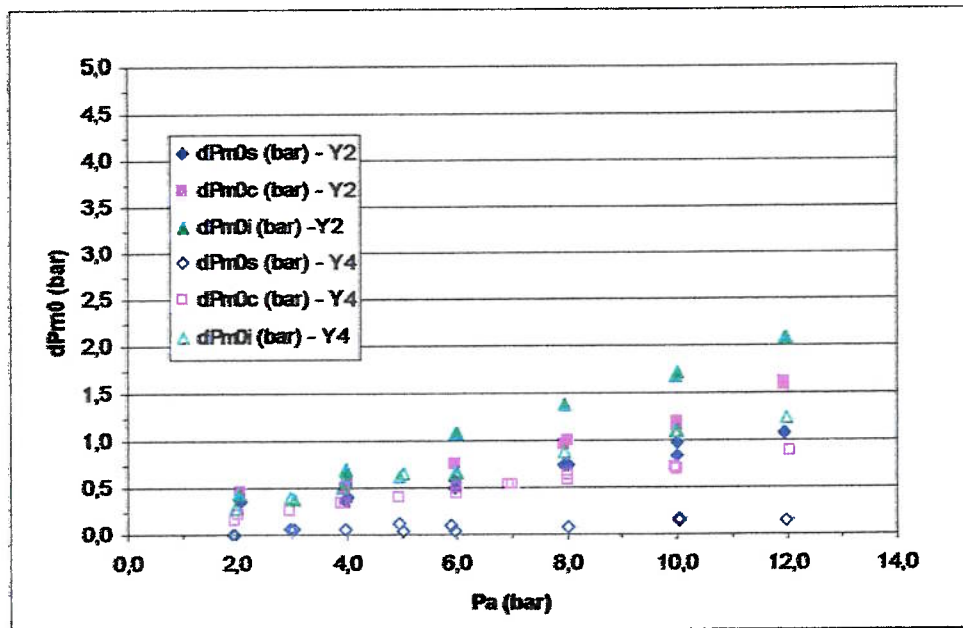


Figura 4.39 – dP_{m0} para os bocais Y2 e Y1

Além disso, o bocal Y2 possui d_n menor, o que faz com que a vazão de ar seja menor do que no bocal Y4, para a mesma condição operacional, o que diminui o ALR e aumenta Φ , como mostra a figura 4.40.

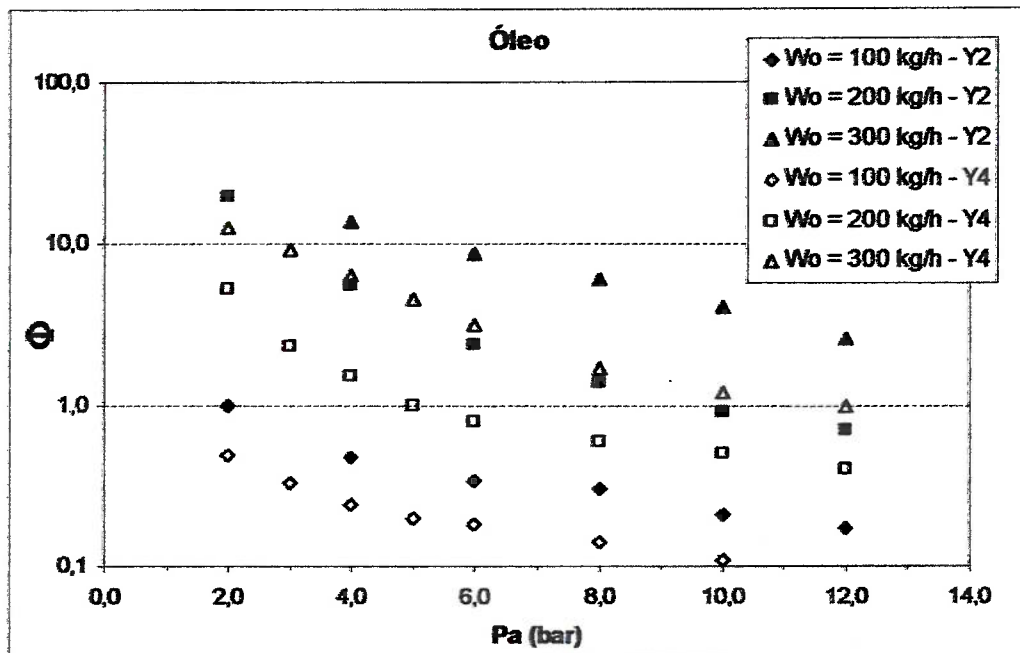


Figura 4.40 – Valores de Φ para os bocais Y2 e Y4 operando com óleo

Com relação ao $D_{V[0,9]}$, a comparação entre os bocais Y2 e Y4, através das figuras 4.41 e 4.42, mostra que nos ensaios com óleo, os valores de $D_{V[0,9]}$ são menores para o bocal Y2 no caso em que $W_c = 300$ kg/h.

A análise conjunta dos resultados relativos a SMD e $D_{V[0,9]}$ para ambos os bocais, Y2 e Y4, mostra maior uniformidade da distribuição do diâmetro das gotas dos sprays gerados pelo bocal Y2, que possui menor diferença entre $D_{V[0,9]}$ e SMD.

Os maiores valores de Φ para o bocal Y2 fazem com que maior parcela de combustível seja nebulizada por colisão direta, o que, em princípio, gera distribuições de diâmetro das gotas mais uniforme no spray.

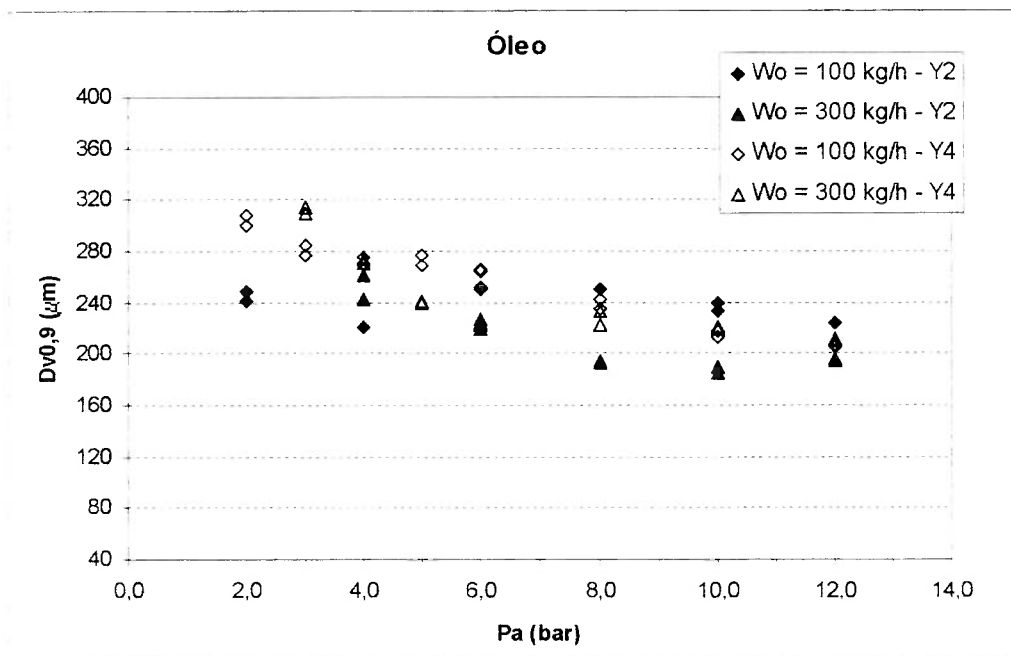


Figura 4.41 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ dos bocais Y2 e Y4 com óleo

As curvas para $W_c = 100$ kg/h em ambas as viscosidades mostram $D_{V[0,9]}$ menores para o bocal Y4. Os valores de Φ para ambos os bocais neste caso são pequenos, o que minimiza a fração de combustível nebulizada por colisão direta.

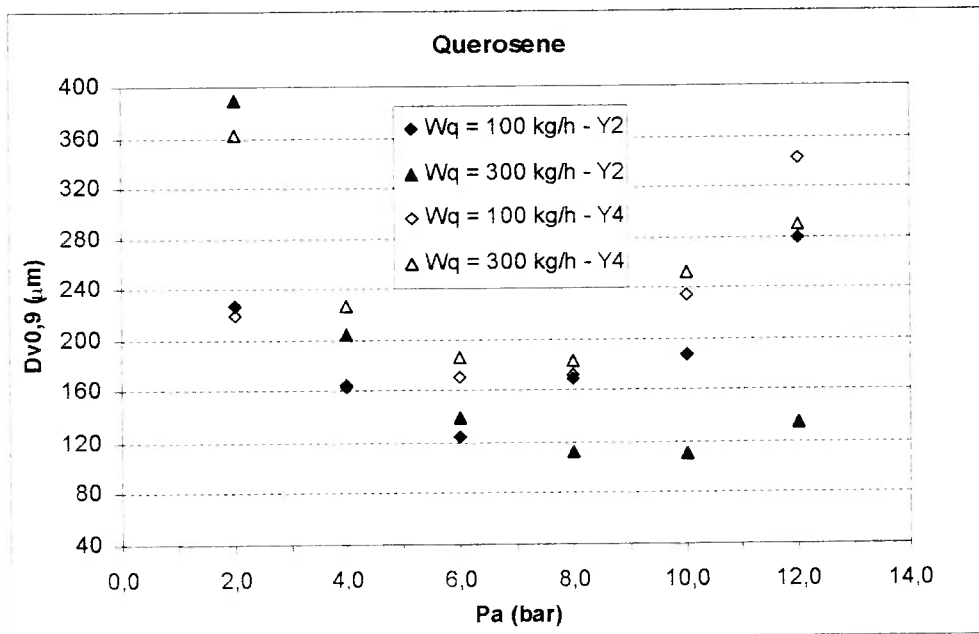


Figura 4.42 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ dos bocais Y2 e Y4 com querosene

O aumento de P_a é importante na redução do $D_{V[0,9]}$ para combustíveis de viscosidade elevada. Já para viscosidades menores, os resultados mostram que valores de P_a maiores do que 7 bar podem provocar aumento de $D_{V[0,9]}$, piorando a uniformidade da distribuição de diâmetro de gotas dos sprays. Esta observação é válida apenas para os bocais Y1, Y2 e Y4. Nos outros bocais, isto não foi verificado.

Um aumento da pressão do ar faz aumentar o ângulo α do spray como mostram as figuras 4.43 e 4.44, fato que ocorre com todos os bocais. A vazão de combustível produz o mesmo efeito, mas em intensidade menor.

A operação do bocal Y2, em condições de vazão de combustível elevada, faz com que a parte positiva do spray apresente ângulo menor que a parte negativa, onde está colocado o orifício de descarga do combustível. A viscosidade não altera ambas as partes positiva, α^+ e negativa, α^- do ângulo sobre o eixo y do spray.

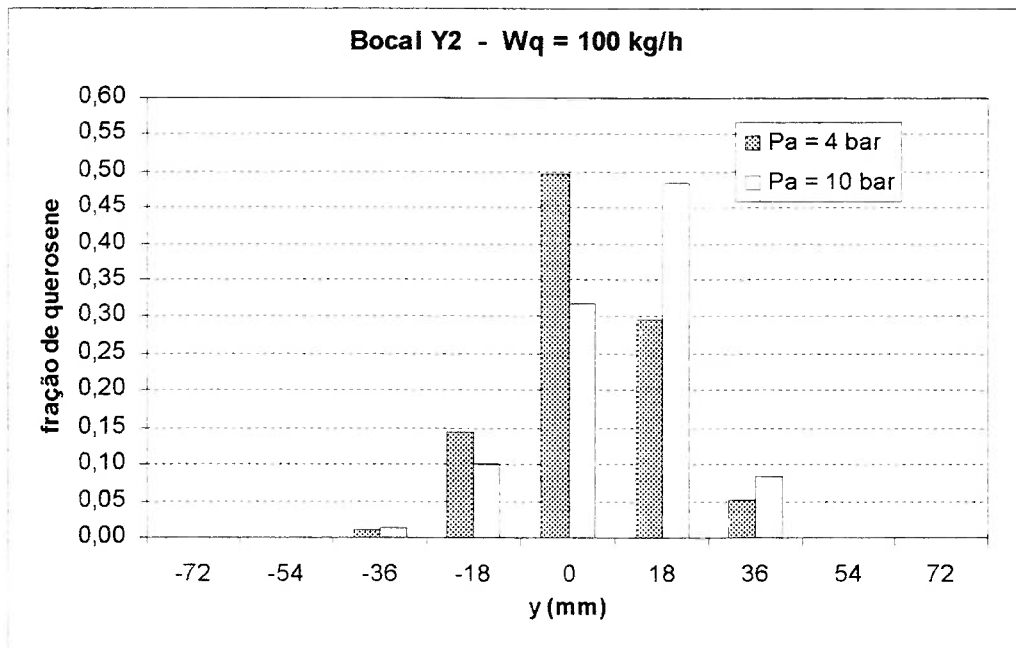


Figura 4.43 – Distribuição de querosene para o bocal Y2 ($W_q = 100$ kg/h)

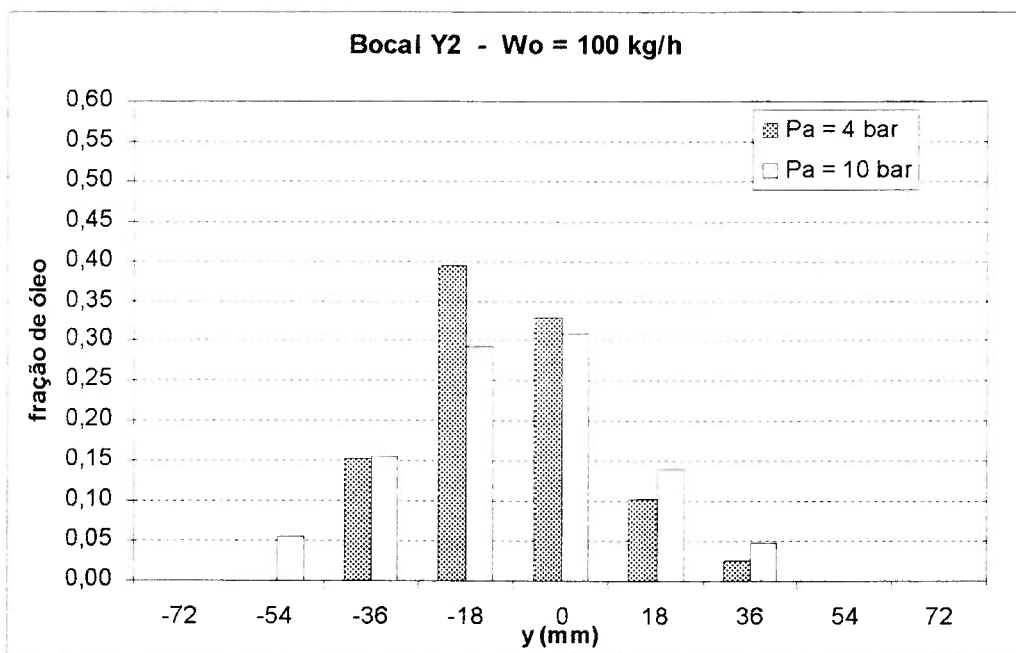


Figura 4.44 – Distribuição de óleo para o bocal Y2 ($W_o = 100$ kg/h)

Para a vazão de combustível de 100 kg/h, não se consegue visualizar a influência de P_a na distribuição de líquido dos sprays, fato explicado pelos valores muito pequenos de Φ para ambas as pressões de ar, 4 e 10 bar.

Já para $W_c = 300$ kg/h, em que Φ apresenta valores maiores, é possível visualizar a influência de P_a na distribuição de líquido nos sprays, através das figuras 4.45 e 4.46.

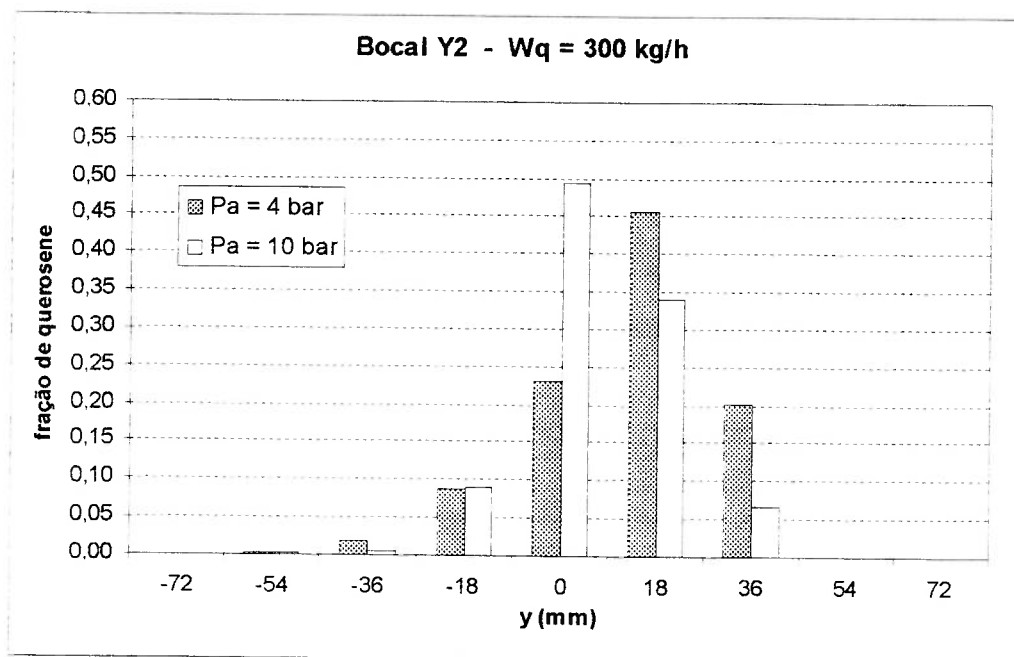


Figura 4.45 – Distribuição de querosene para o bocal Y2 ($W_q = 300$ kg/h)

Quando P_a vale 10 bar, as frações de combustível na parte negativa do spray são maiores que na condição em que P_a vale 4 bar. O maior fluxo de quantidade de movimento do ar para P_a mais elevada faz com que maior fração de combustível forme a película na parede da câmara de mistura, junto ao orifício de descarga de combustível, aumentando a fração nebulizada por arraste desta película que formará gotas localizadas na parte negativa do eixo y no spray.

Além disso, na figura 4.46, observa-se que o ângulo α do spray do bocal Y2 é maior que o do bocal Y4 para as mesmas condições, uma vez que a câmara de mistura possui relação l_m/d_m menor, igual a 2.

O spray do bocal Y4 possui maiores frações de combustível do lado negativo do eixo, pois para $W_o = 300$ kg/h e $P_a = 10$ bar, Φ está em torno de 1,2. Já o bocal Y2 gera sprays com maior simetria, uma vez que Φ é aproximadamente 4,0 para as mesmas condições operacionais.

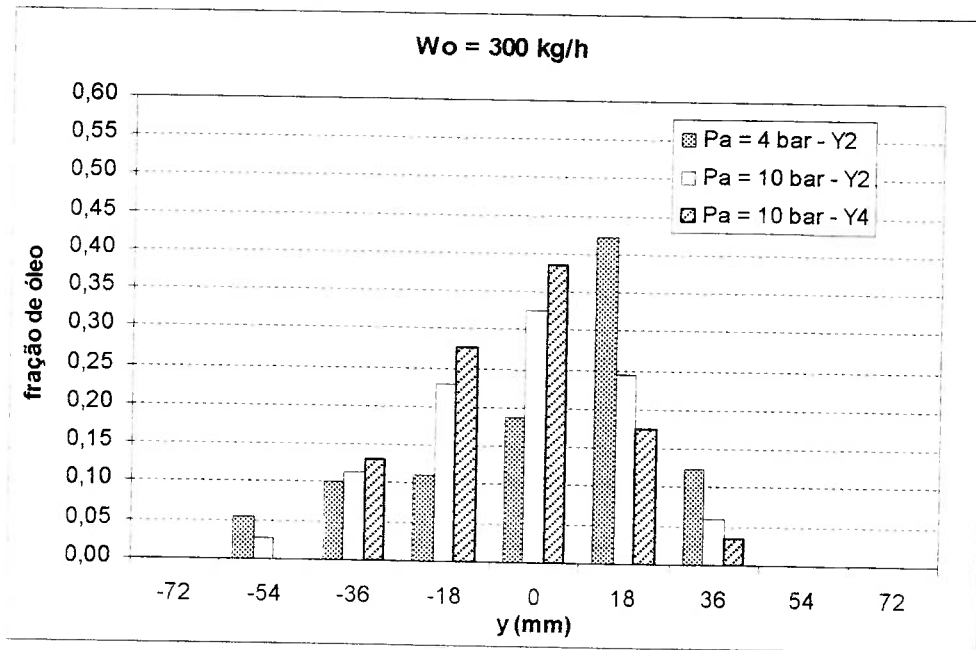


Figura 4.46 – Distribuição de óleo para o bocal Y2 ($W_o = 300$ kg/h)

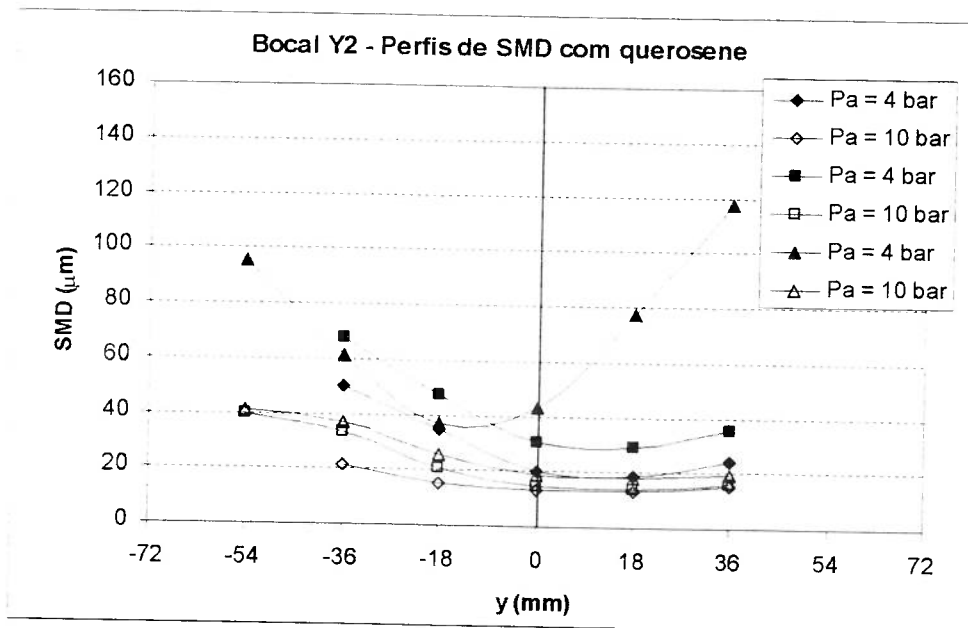


Figura 4.47 – Perfis de SMD para o bocal Y2 nebulizando querosene

Os valores de SMD na periferia negativa do spray na condição em que P_a vale 10 bar são significativamente maiores que os valores da periferia positiva. Para P_a em torno de 4 bar, gotas grandes ocorrem tanto na parte positiva quanto na parte negativa do spray, como mostram as figuras 4.47 e 4.48 nas curvas em que a vazão

de óleo é maior, 300 kg/h. Neste caso, a formação da película ocorre nos dois lados do eixo y, pois Φ é suficientemente alto para que o jato de combustível penetre com maior intensidade na parte positiva da parede da câmara de mistura.

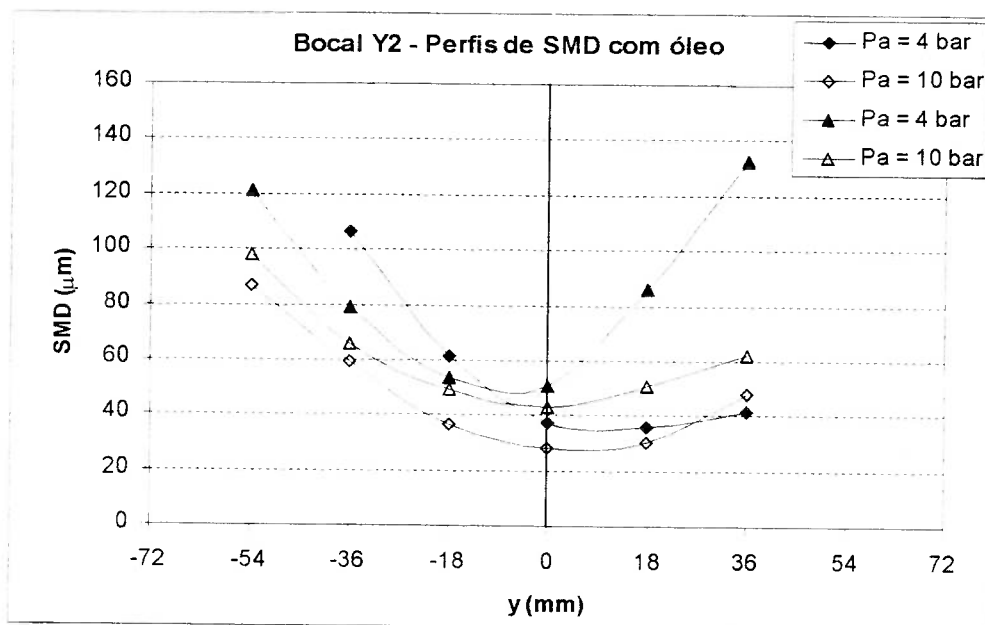


Figura 4.48 – Perfis de SMD para o bocal Y2 nebulizando óleo

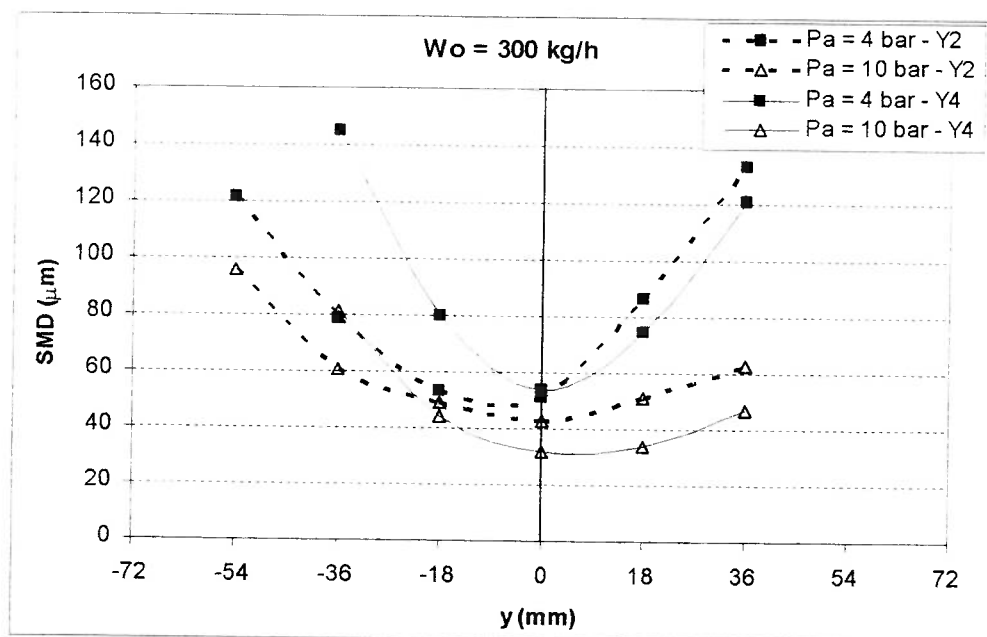


Figura 4.49 – Perfis de SMD para os bocais Y2 e Y4 nebulizando óleo

Em relação ao bocal Y4, o bocal Y2 apresenta SMD maiores na periferia positiva e SMD menores na periferia negativa dos sprays conforme a figura 4.49.

Valores mais elevados da relação Φ reduzem a resistência à penetração do jato de combustível na câmara de mistura, aumentando a fração de combustível que forma a película localizada na parte positiva do eixo y e diminuindo a fração na parte negativa da película.

Na parte central dos sprays, nota-se que o bocal Y2 gera gotas maiores que o bocal Y4, principalmente quando $P_a = 10$ bar. Devido à relação l_a/d_a ser maior para o bocal Y2, as pressões de estagnação do ar na seção de mistura são menores que as pressões de estagnação do ar na seção de mistura do bocal Y4, como mostrado na figura 4.39. Além disso, as velocidades do ar na seção de mistura do bocal Y2 também são menores, conforme mostra a figura 4.50. Estes dois fatores certamente prejudicam a nebulização por colisão direta, principal responsável pela formação das gotas na região central do spray.

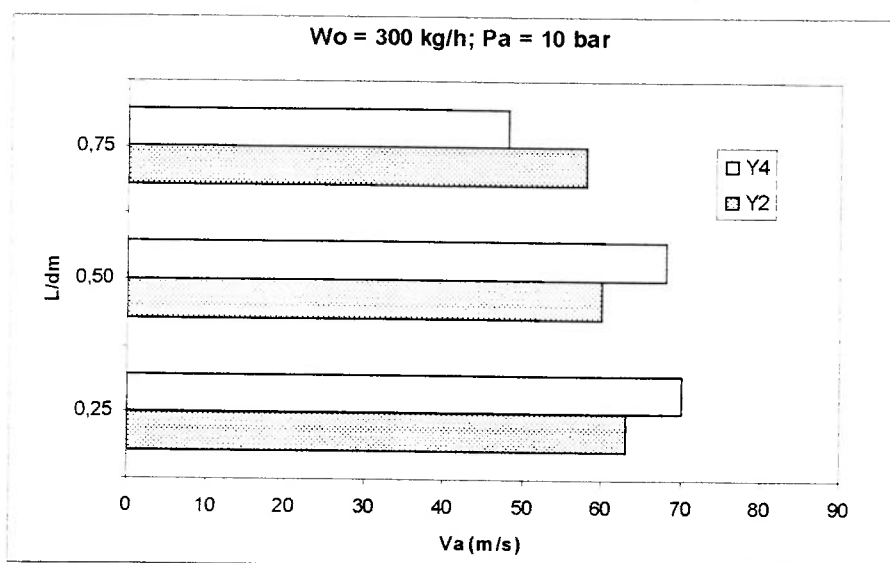


Figura 4.50 – Perfis de velocidade do ar para os bocais Y4 e Y2

• Ensaios com o bocal Y5

O bocal Y5 é idêntico ao bocal Y2 a menos da relação l_m/d_m , que neste caso é igual a 4,0. O ábaco da figura 4.51 mostra que as curvas de vazão de querosene constante são muito próximas, o que torna as curvas de ALR e Φ também próximas, conforme mostra a figura 4.52.

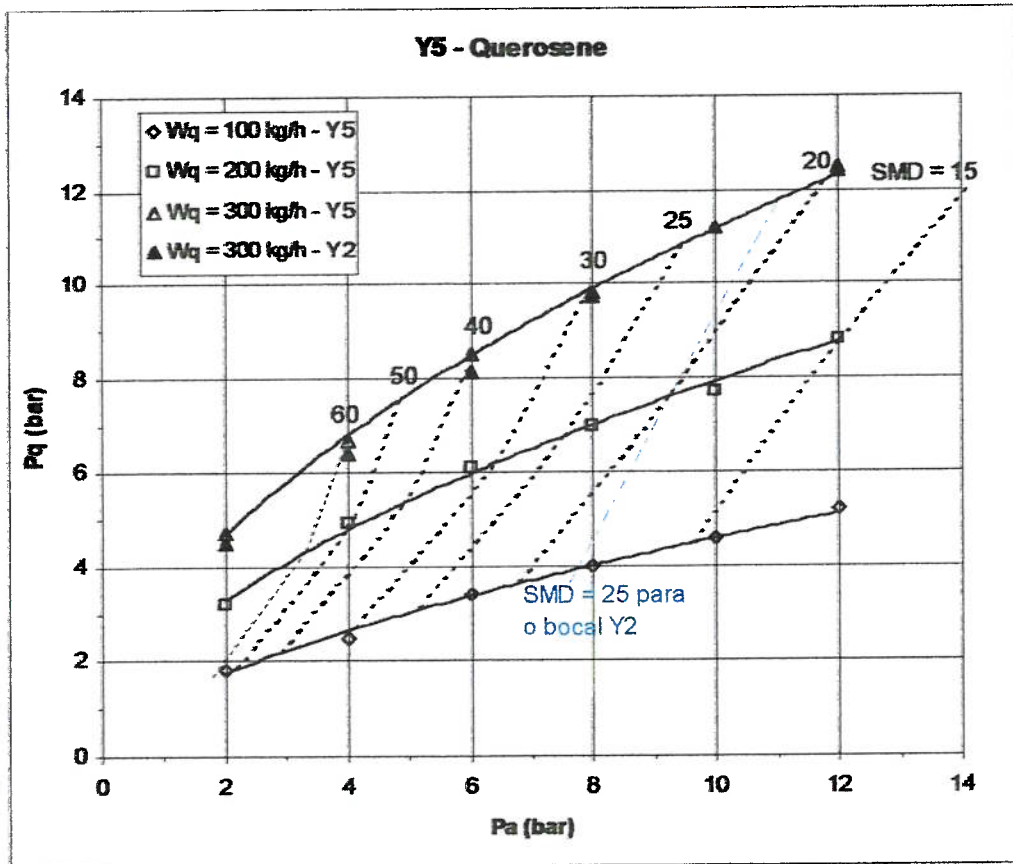


Figura 4.51 – Ábaco para o bocal Y5 operando com querosene

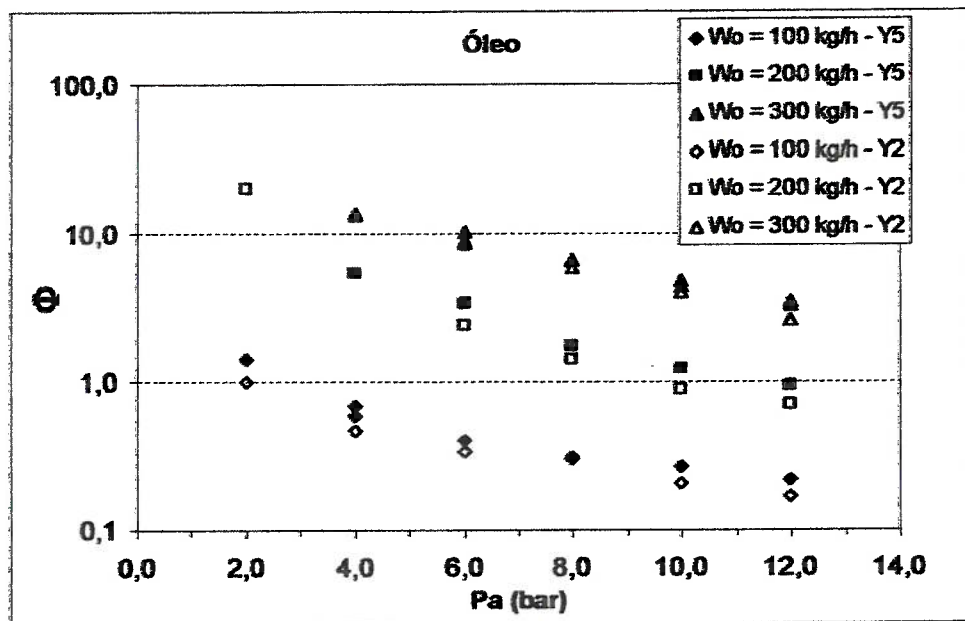


Figura 4.52 – Valores de Φ para os bocais Y5 e Y2

As gotas geradas pelo bocal Y2, em geral, são pouco maiores que as gotas geradas pelo bocal Y5, operando com querosene, como apresenta a figura 4.53.

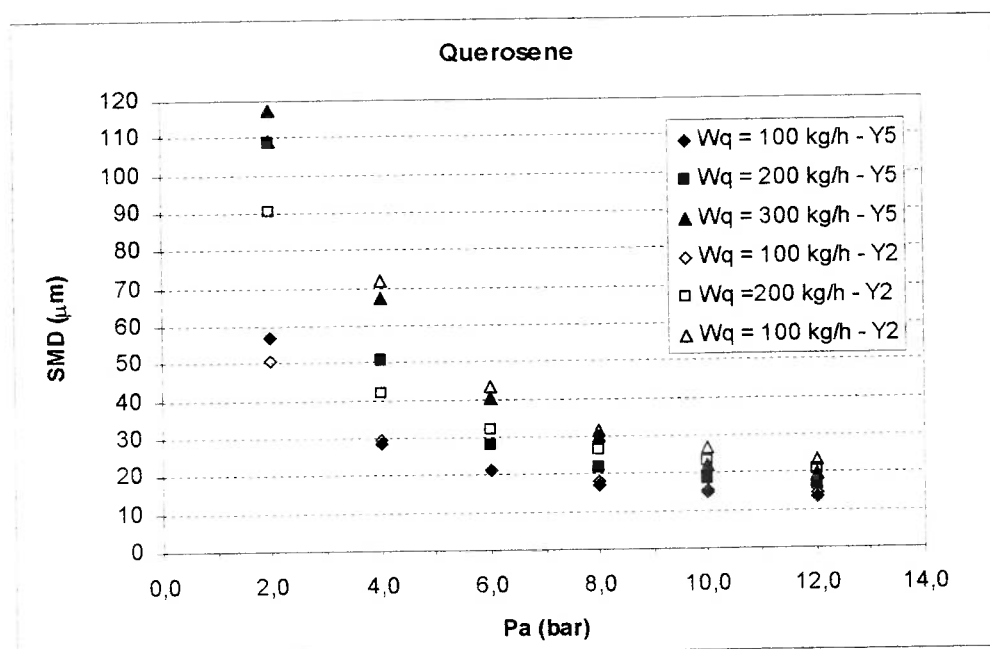


Figura 4.53 – Comportamento de SMD para os bocais Y5 e Y2 com querosene

A nebulização de óleo, entretanto, se comporta de forma oposta, como mostram as figuras 4.54 e 4.55. Diferentemente do ocorrido na comparação entre os bocais Y1 e Y4, os valores de SMD em geral foram maiores para o bocal Y5, que possui o dobro da relação l_m/d_m do que o bocal Y2.

Portanto, a nebulização de combustíveis de viscosidades elevadas, em bocais projetados para operar com ALR relativamente menores e Φ maiores, é melhor nos bocais com câmara de mistura cuja relação l_m/d_m seja menor, por exemplo, igual a dois.

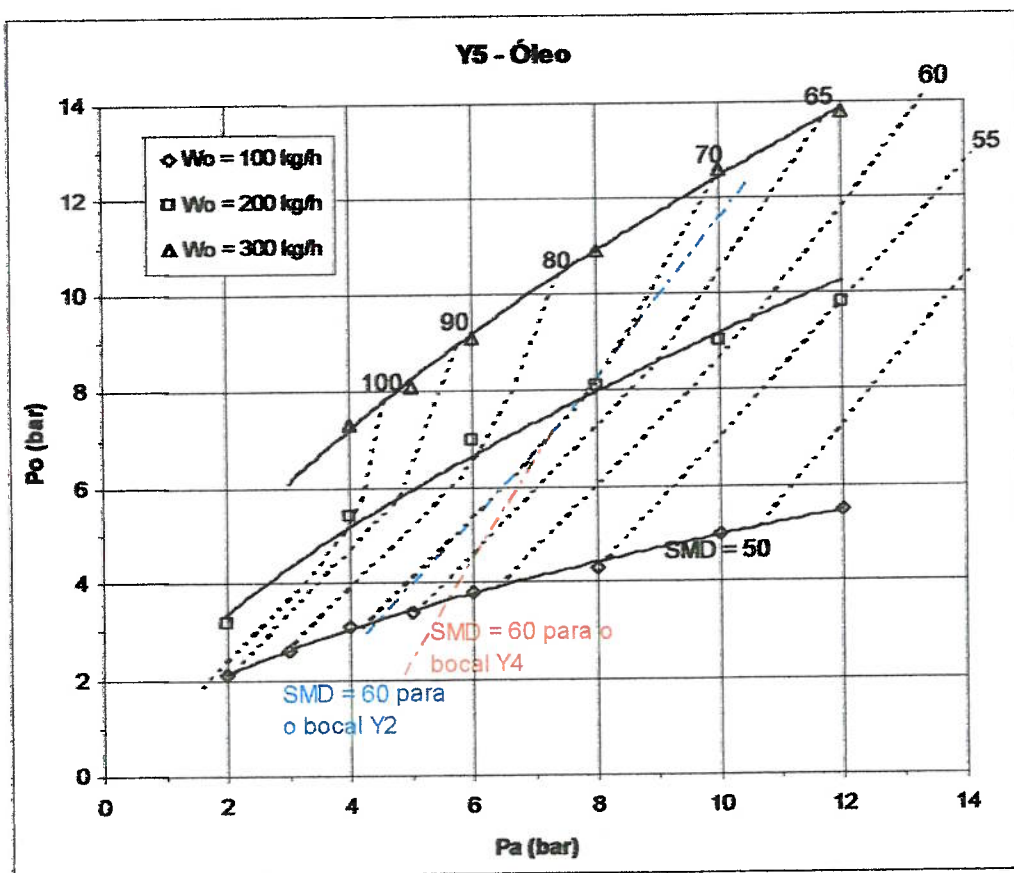


Figura 4.54 – Ábaco para o bocal Y5 operando com óleo

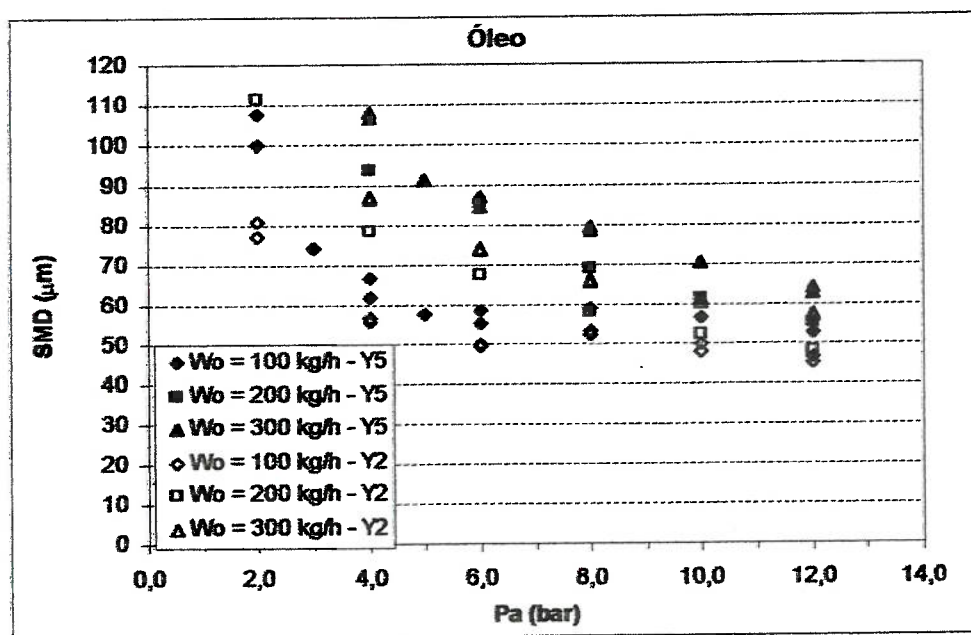


Figura 4.55 – Comportamento de SMD para os bocais Y5 e Y2 com óleo

Para vazão de combustível de 300 kg/h, a maior parte do líquido se situa no lado positivo do spray em todas as condições. Mesmo quando P_a vale 10,0 bar, a maior fração de combustível ocorre no centro do spray, mas a parcela contida do lado positivo do spray ainda é maior que a do lado negativo, fato que ocorre para qualquer viscosidade de combustível, como mostram as figuras 4.56 e 4.57.

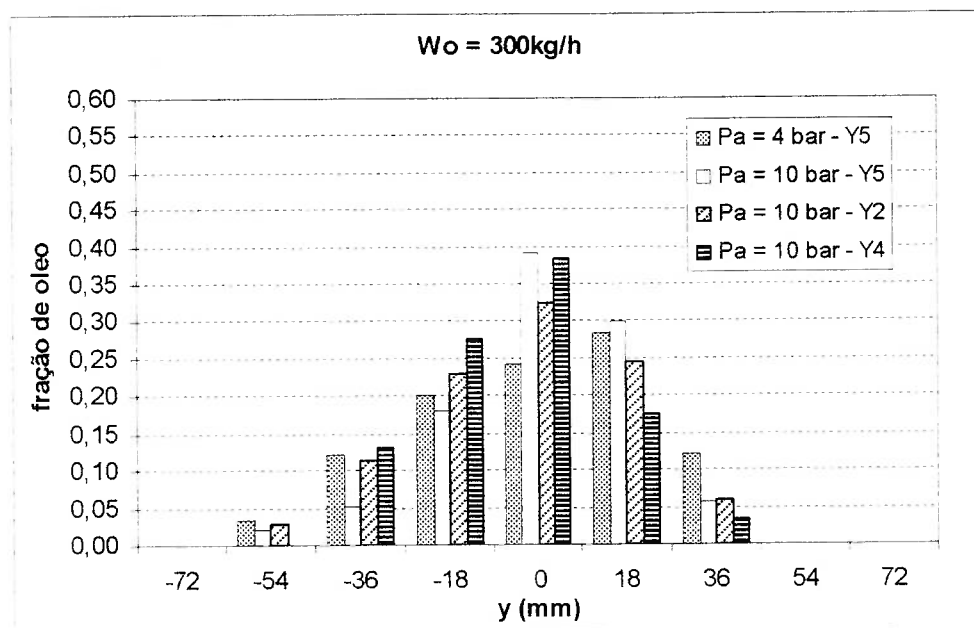


Figura 4.56 – Distribuição de óleo para os bocais Y5, Y2 e Y4

As frações de combustível do bocal Y2 na parte negativa do spray são maiores que as do bocal Y5, tanto na operação com querosene quanto com óleo. No entanto, a figura 4.57 mostra que as frações de querosene do lado positivo do spray gerados por ambos os bocais são bastante maiores que as frações do lado negativo, fato que não ocorre na nebulização de óleo, que gera sprays mais simétricos.

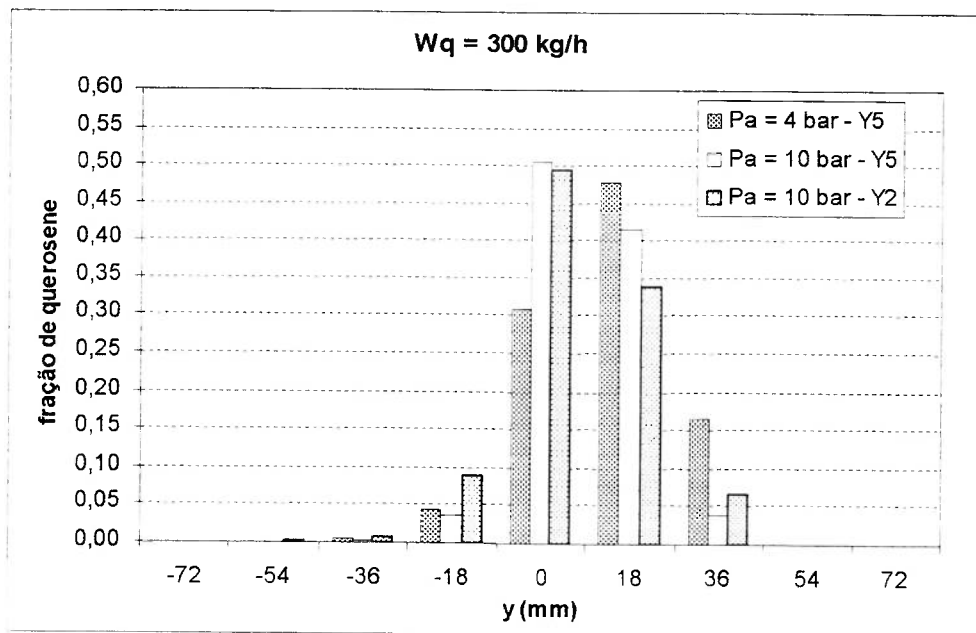


Figura 4.57 – Distribuição de querosene para os bocais Y5 e Y2

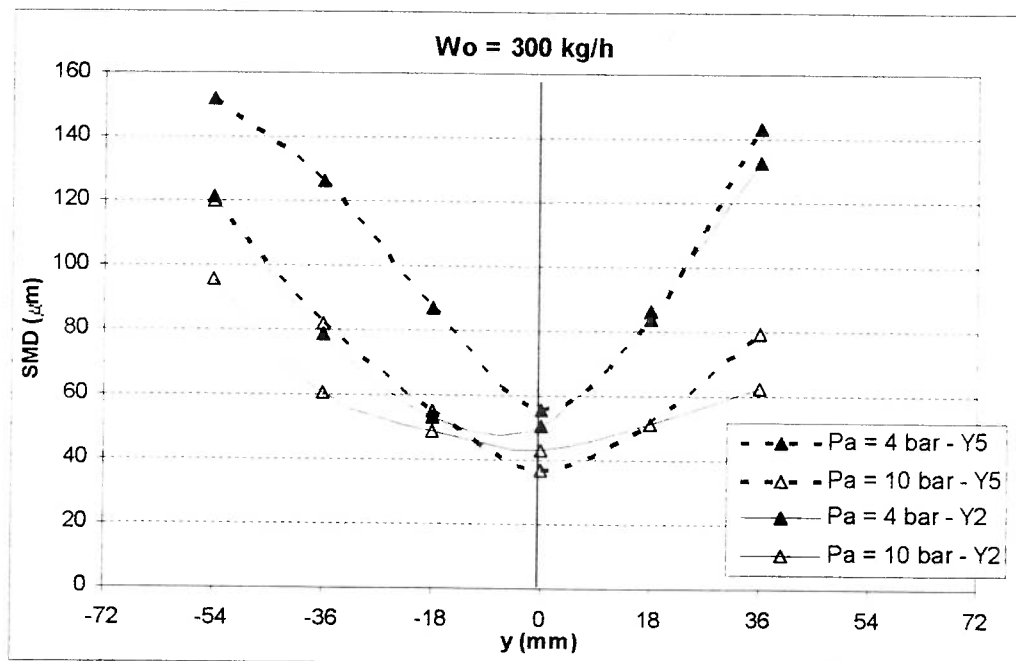


Figura 4.58 – Perfis de SMD para os bocais Y5 e Y2 nebulizando óleo

A figura 4.58 mostra que as gotas geradas pelos bocais Y5 e Y2 na região central do spray apresentam SMD muito próximos, pois ALR , Φ e dP_{m0c} são parecidos para a mesma condição operacional como visto nas figuras 4.52 e 4.59.

A pressão de estagnação no ponto de mistura no ponto central, P_{m0c} é maior para o bocal Y4 cuja relação l_a/d_a é menor do que a dos bocais Y5 e Y2. Como o bocal Y5 apresenta pressões de estagnação e vazões de ar menores que as dos bocais Y2 e Y4, seu perfil de velocidades também é menor, conforme mostra a figura 4.60.

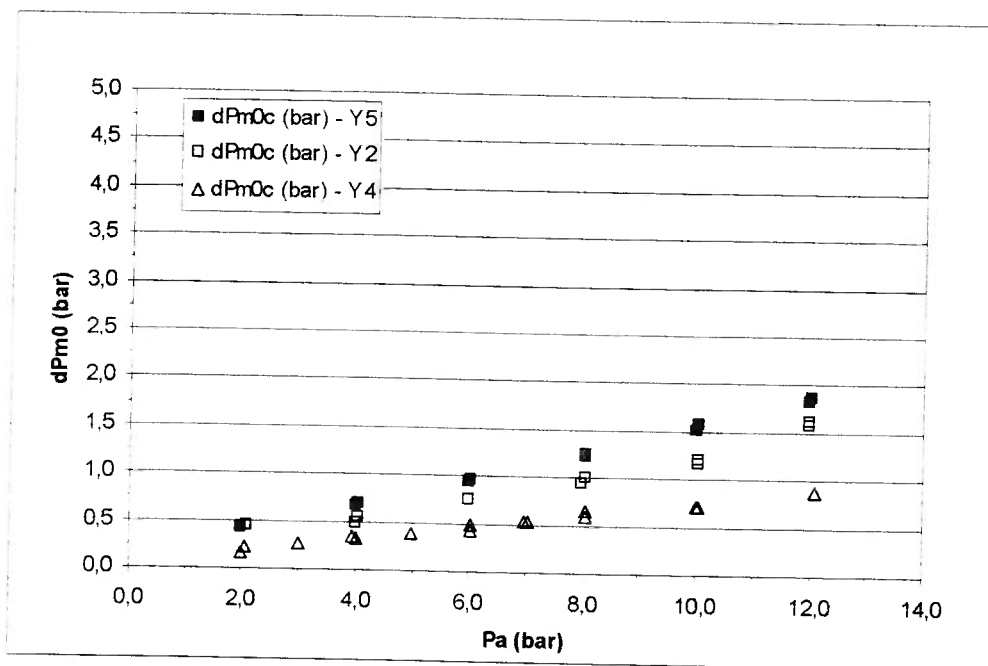


Figura 4.59 – dP_{m0c} para os bocais Y5, Y2 e Y4

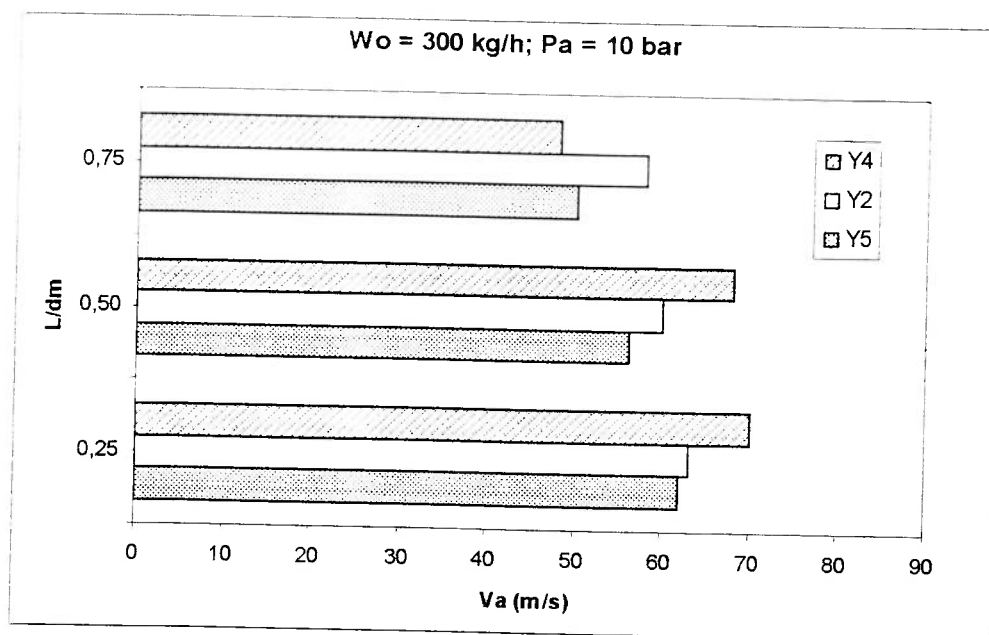


Figura 4.60 - Perfis de velocidade do ar para os bocais Y5 e Y2

Na periferia dos sprays, o bocal Y5 gera gotas maiores do que o bocal Y2, sendo este o principal motivo pelo maior SMD médio da seção transversal do spray para a maioria das condições, como mostrado na figura 4.55.

As medições realizadas com o fracionador mostram frações elevadas de combustível na região central do spray gerado pelo bocal Y5, quaisquer que sejam a viscosidade e a vazão de combustível, assim como o bocal Y4. Isto se deve ao maior comprimento da câmara de mistura que também reduz o ângulo α do spray.

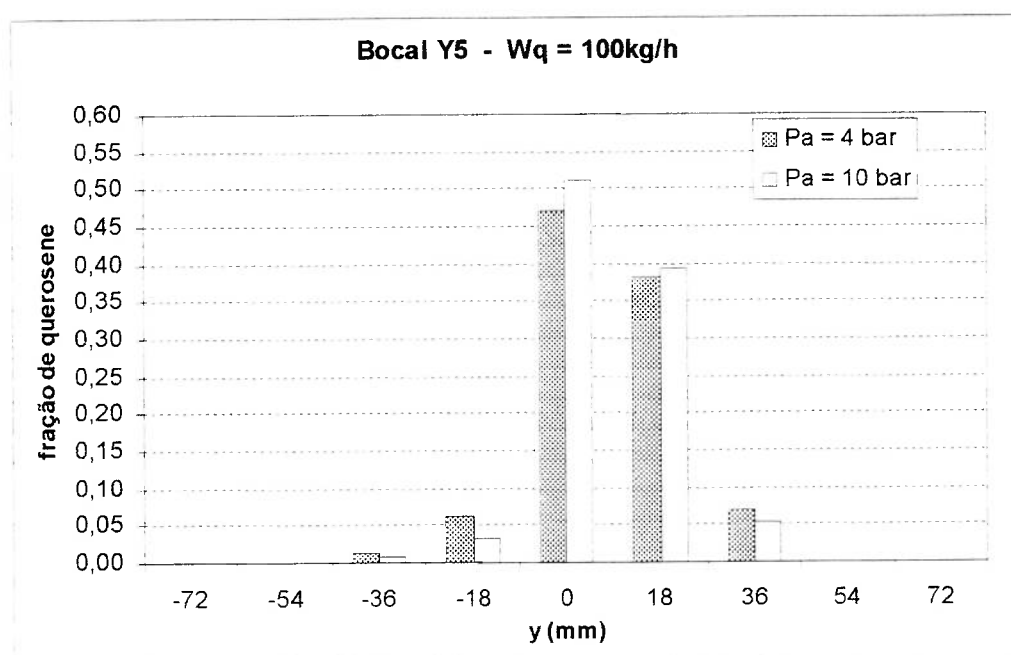


Figura 4.61 – Distribuição de querosene para o bocal Y5

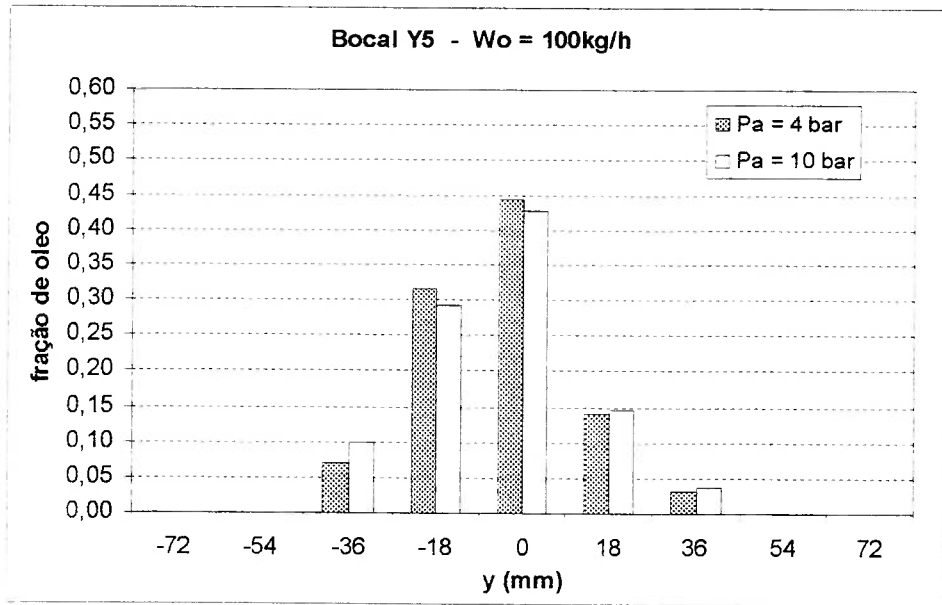


Figura 4.62 – Distribuição de óleo para o bocal Y5

Analisando a figura 4.63, nota-se que, mesmo quando a comparação é feita em termos de ALR, o bocal Y4, que possui a mesma relação l_m/d_m que o bocal Y5, gera sprays com SMD menores que o bocal Y5 na maioria dos casos, principalmente quando a vazão de óleo é maior.

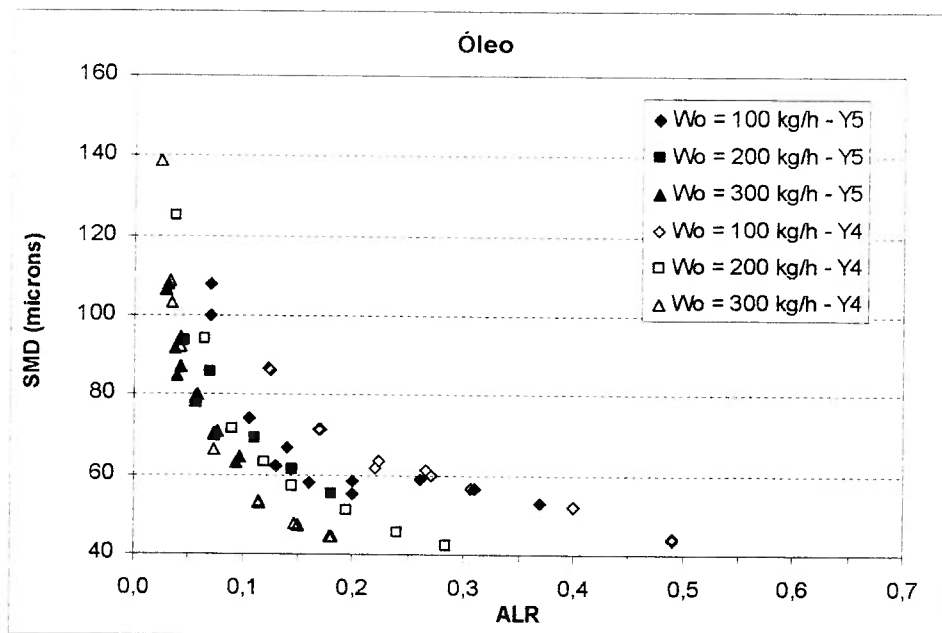


Figura 4.63 – Comportamento de SMD em função de ALR dos bocais Y5 e Y4 com óleo

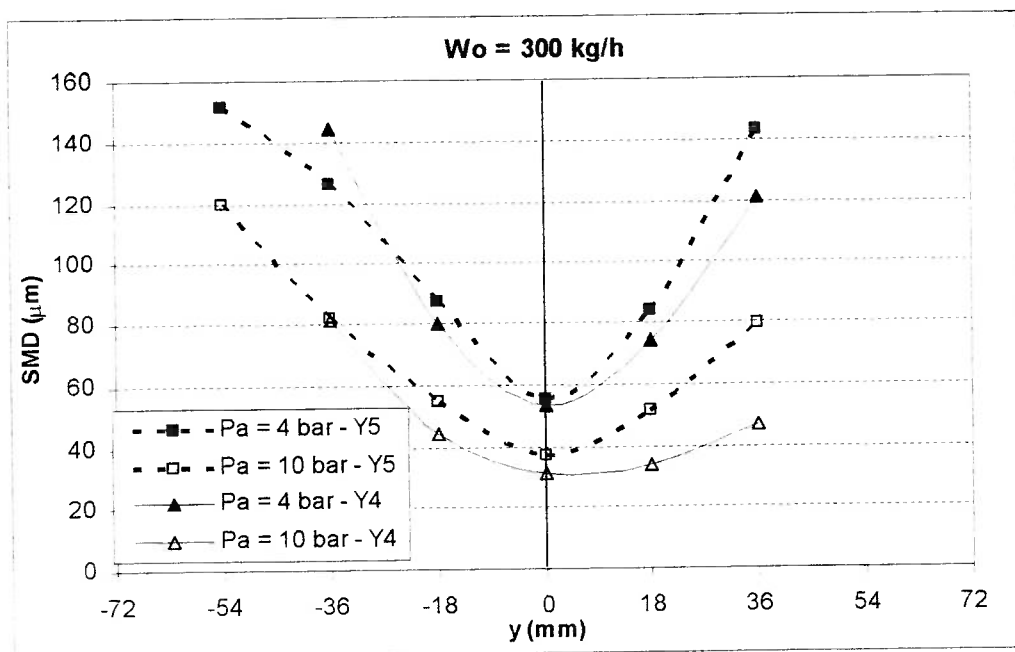


Figura 4.64 - Perfis de SMD para os bocais Y5 e Y4 com óleo

Os perfis de SMD se apresentam com valores baixos no centro do spray, onde se concentra a maior parte do combustível, principalmente quando nebulizando com valores de P_a elevados. Embora os valores de Φ , P_{m0c} e W_a sejam bastante diferentes para os bocais Y5 e Y4, a figura 4.64 mostra que o diâmetro das gotas no centro do spray são parecidos. Na periferia, os sprays do bocal Y5 apresentam gotas um pouco maiores que as gotas do bocal Y4.

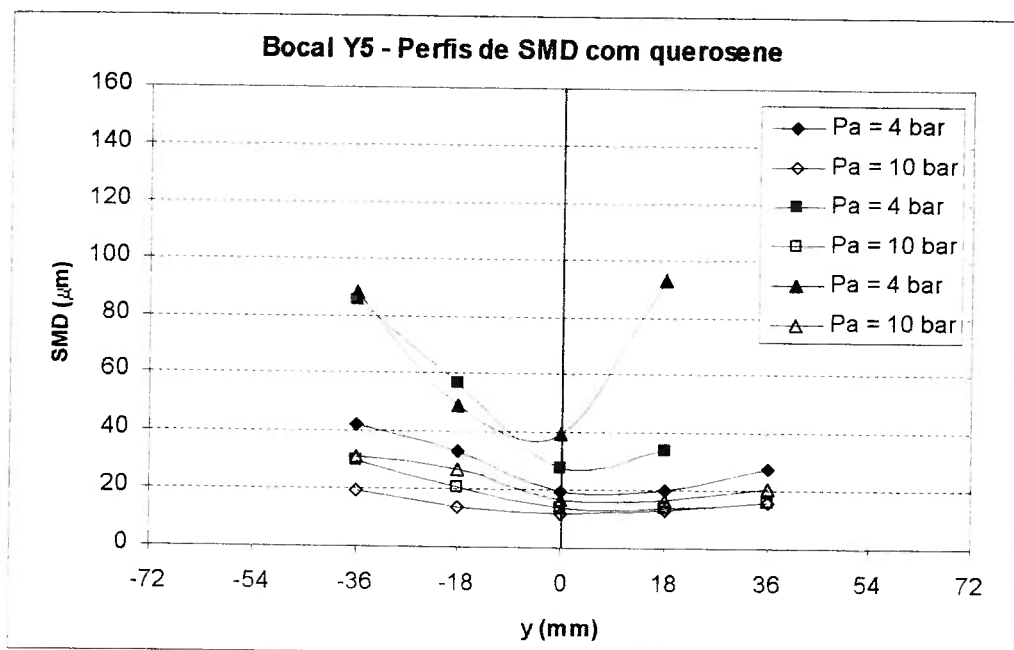


Figura 4.65 – Perfis de SMD para o bocal Y5 nebulizando querosene

Em relação ao $D_{V[0,9]}$, os resultados mostram que para vazão de óleo de 300 kg/h, o bocal Y5 gera gotas menores que o bocal Y4, quando P_a é maior que do 8 bar, como mostra a figura 4.68. A figura 4.69 apresenta curvas bastante parecidas entre os bocais Y5 e Y2.

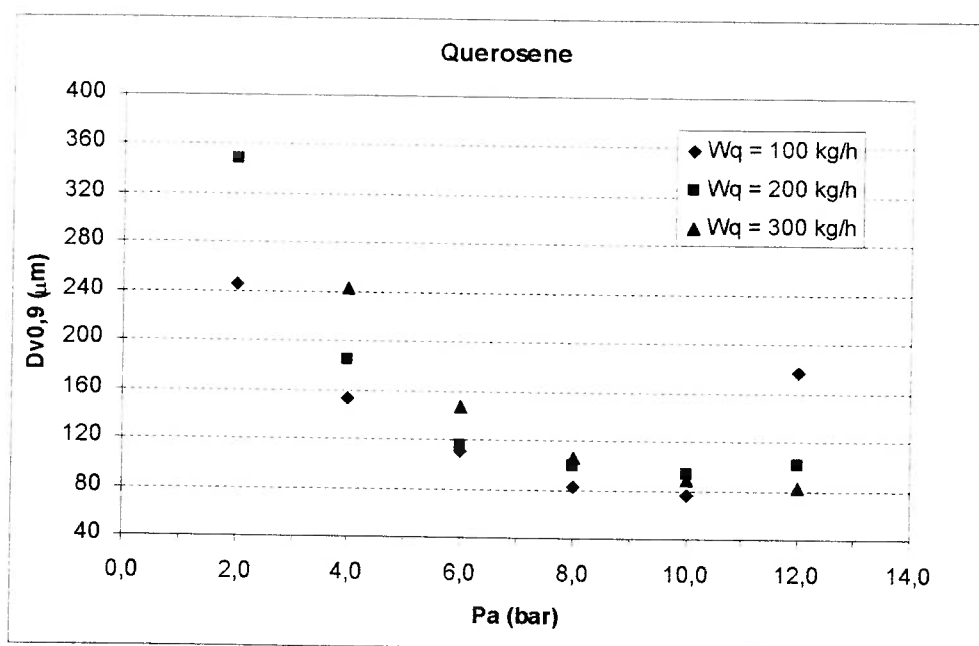


Figura 4.67 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os ensaios de Y5 com querosene

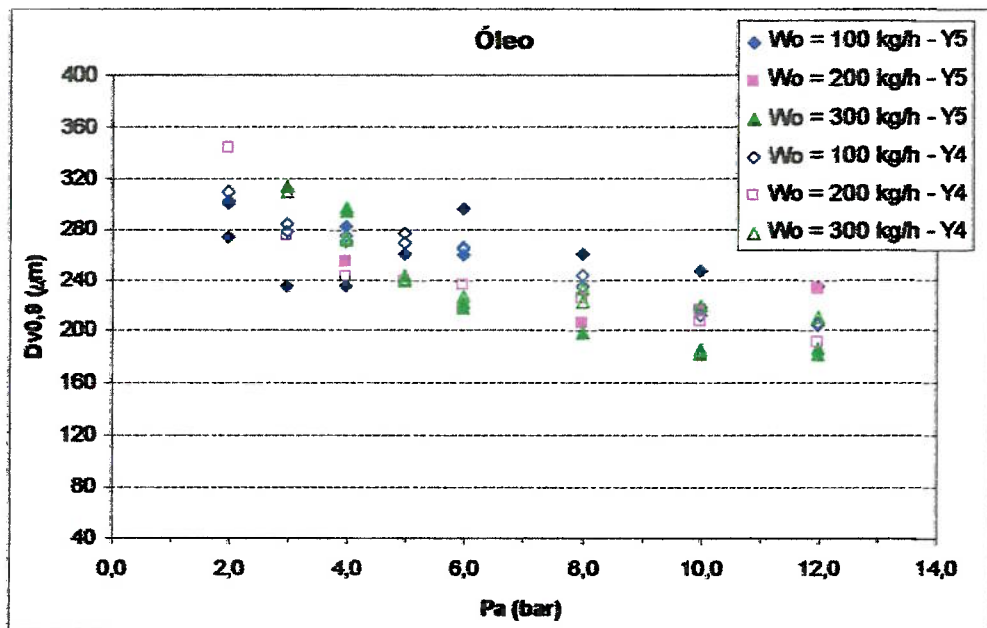


Figura 4.68 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os bocais Y5 e Y4 com óleo

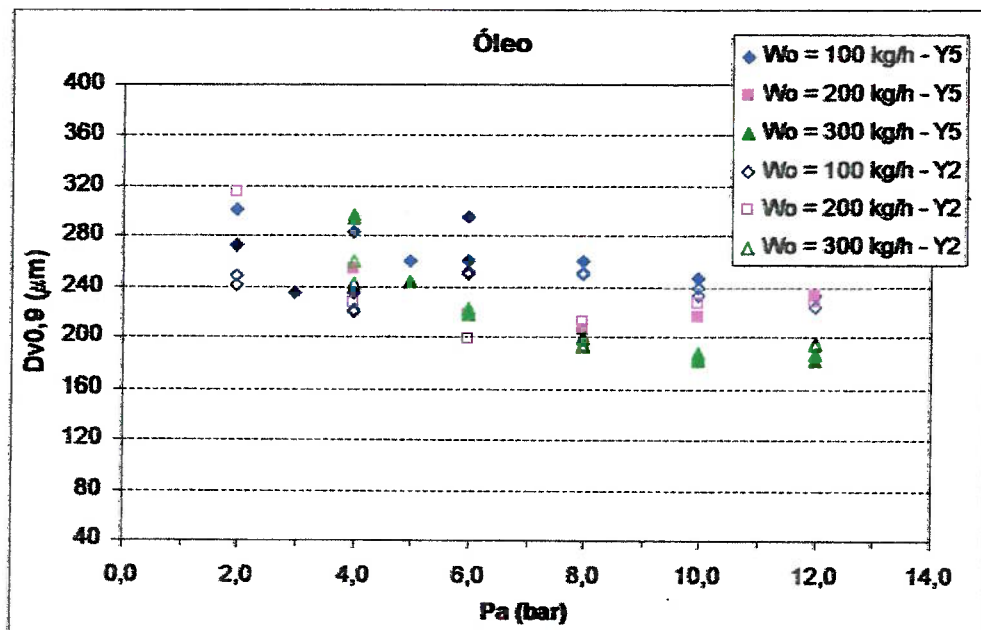


Figura 4.69 – Comportamento de $D_{V[0,9]}$ para os bocais Y5 e Y2 com óleo

• Ensaio com o bocal Y6

Este bocal possui relações Φ ligeiramente inferiores aos valores para o bocal Y5, já que a única diferença entre ambos é o ângulo θ , agora de 45° .

A figura 4.70 mostra que o comportamento do escoamento de ar no interior deste bocal é bastante diferente, pois as pressões de estagnação, P_{m0s} , P_{m0c} e P_{m0i} , são bem menores que as pressões de qualquer outro bocal.

Como as vazões de ar dos bocais Y5 e Y6 são muito próximas sob as mesmas condições operacionais, os perfis de velocidade do bocal Y6 são maiores, apresentando valores de Φ um pouco menores que os valores do bocal Y5, conforme as figuras 4.71 e 4.72.

Apesar das dimensões geométricas semelhantes e vazões de ar próximas para as mesmas condições operacionais, há diferenças significativas no escoamento no interior do bocal, refletindo-se em valores de velocidade do ar e Φ ligeiramente diferentes, devido apenas à mudança no ângulo θ .

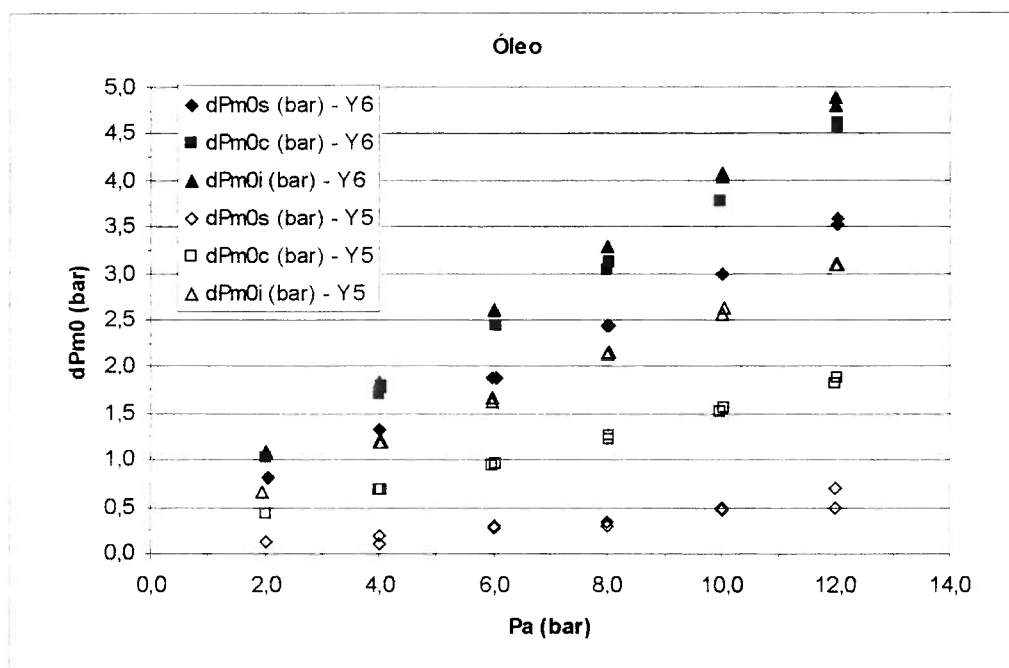


Figura 4.70 – dP_{m0} para os bocais Y5 e Y6

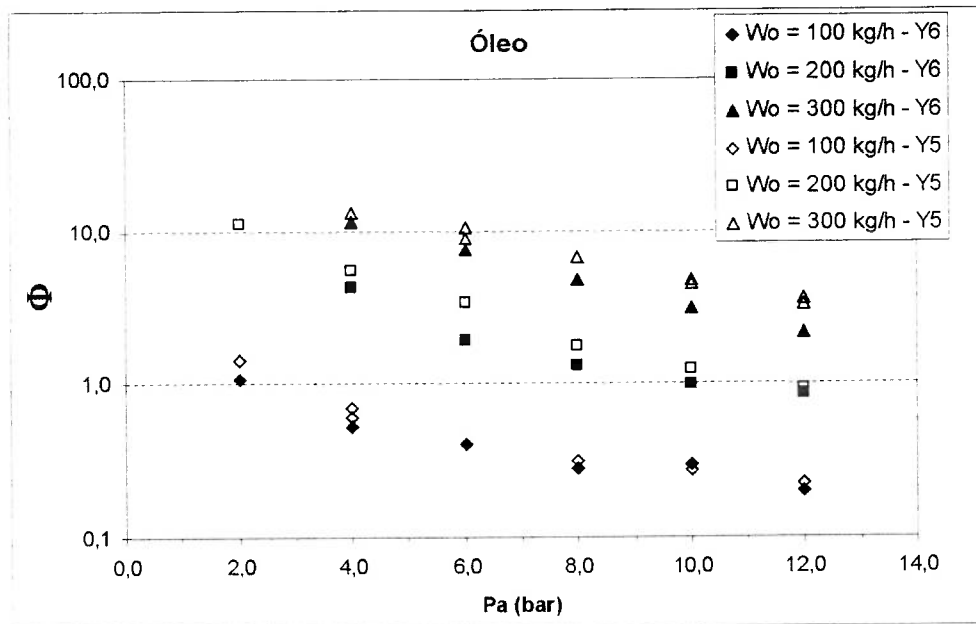


Figura 4.71 – Valores de Φ para os bocais Y6 e Y5

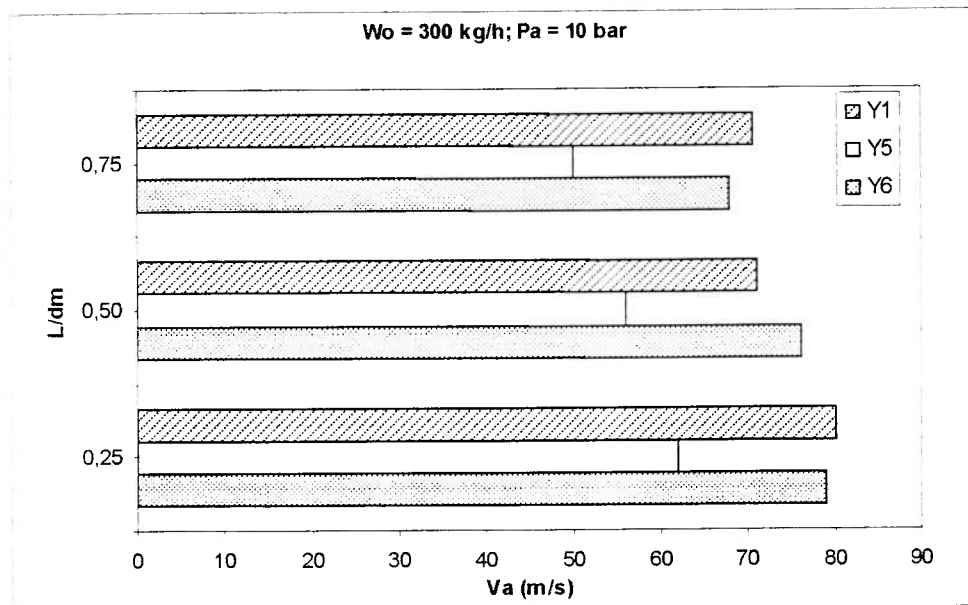


Figura 4.72 – Perfis de velocidade para os bocais Y6 e Y5

Os valores de SMD para os bocais Y5 e Y6 são muito próximos para P_a maiores que 8 bar, em qualquer vazão de óleo. Para P_a menores, existem diferenças significativas, principalmente para $W_o = 100$ kg/h.

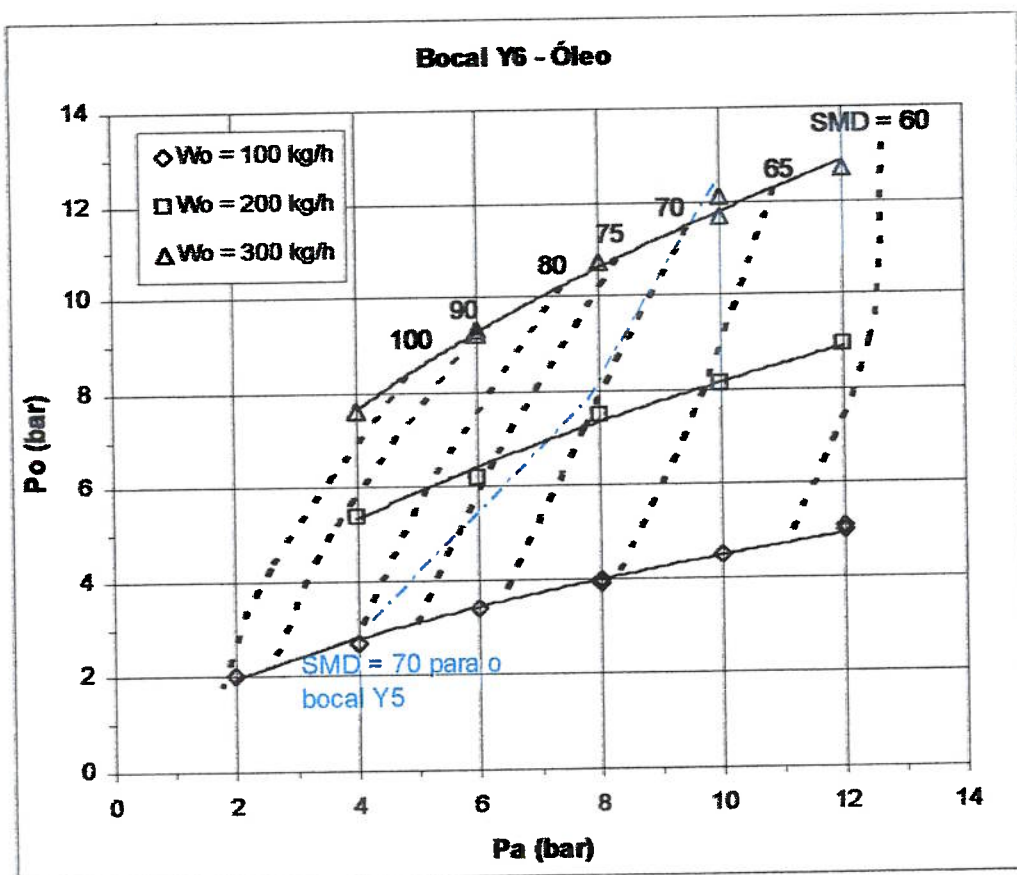


Figura 4.73 – Ábaco para o bocal Y6 operando com óleo

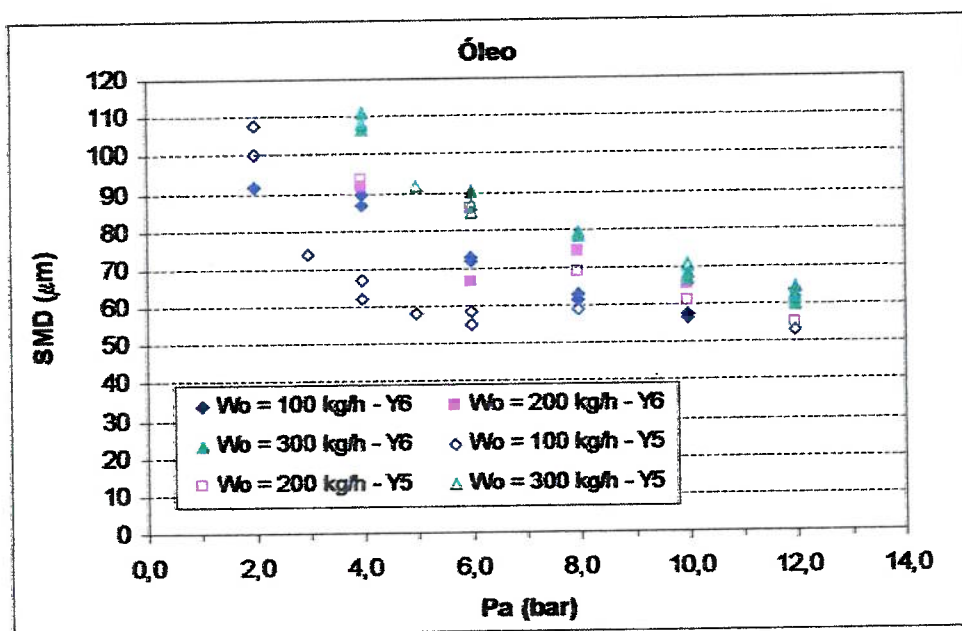


Figura 4.74 – Comportamento de SMD para os bocais Y6 e Y5 com óleo

Os valores de $D_{V10,91}$ são um pouco menores para a maioria dos casos, o que mostra melhor distribuição do diâmetro de gota na seção dos sprays analisada.

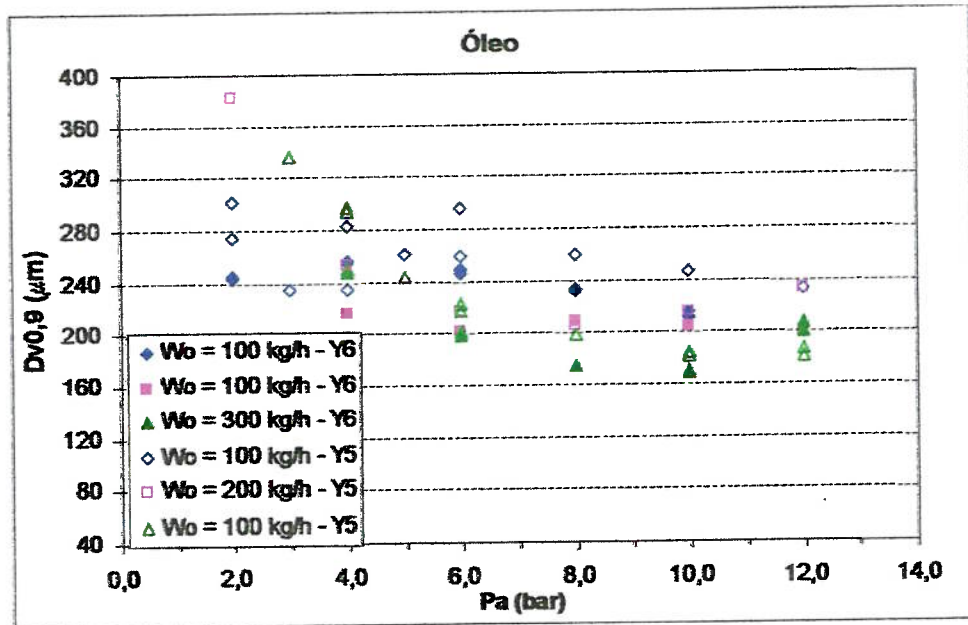


Figura 4.75 – Comportamento de $D_{V10,91}$ para os bocais Y6 e Y5 com óleo

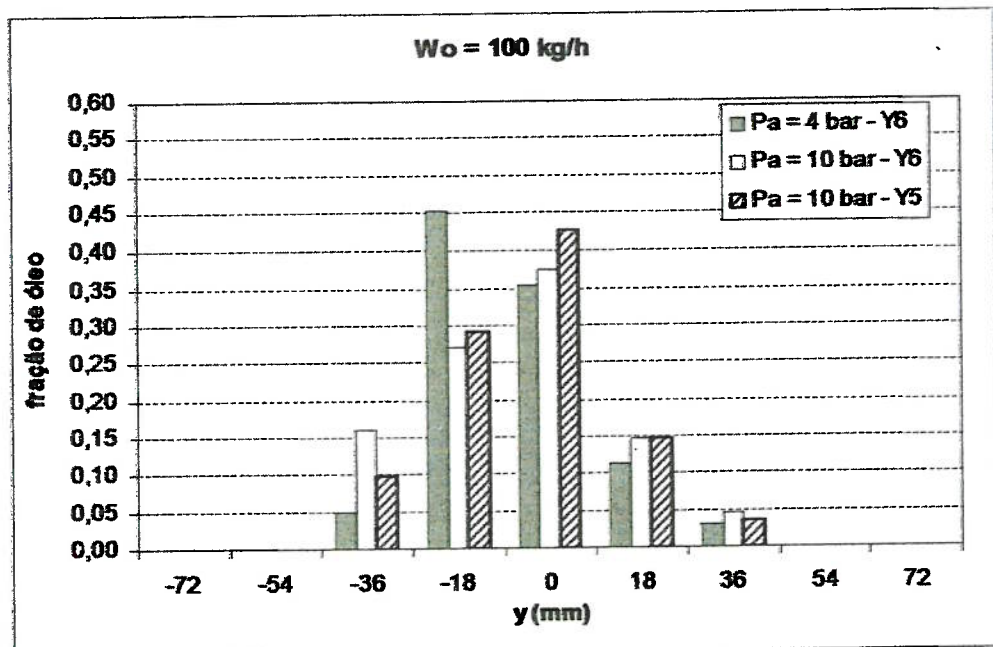


Figura 4.76 – Distribuição de óleo para os bocais Y6 e Y5

Para vazão de óleo de 300 kg/h, a influência do aumento de P_a e conseqüente diminuição de Φ provocam um deslocamento das maiores frações de líquido para a parte negativa do spray, como ocorre em todos os bocais e como mostra a figura 4.77.

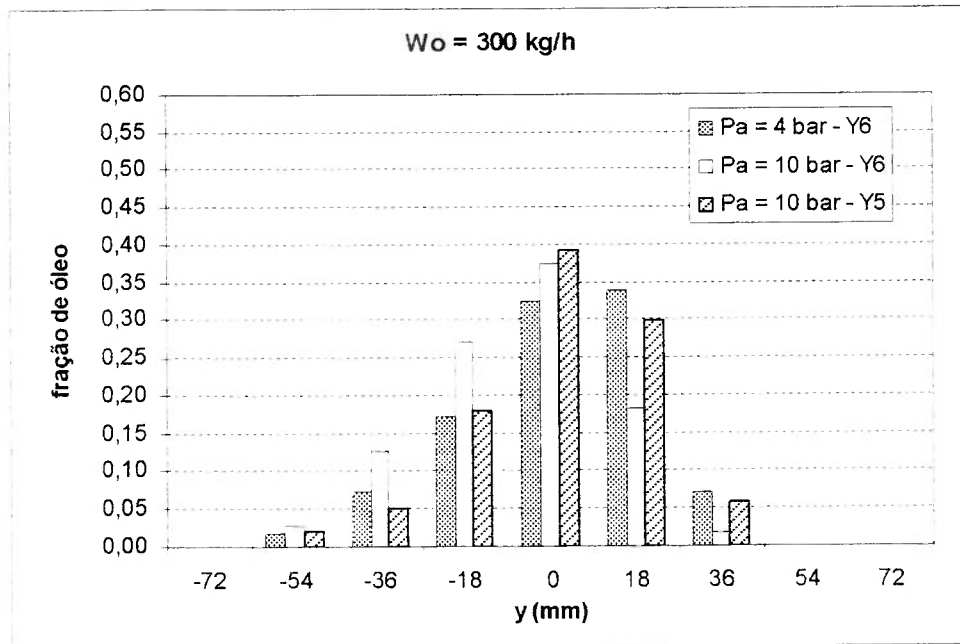


Figura 4.77 – Distribuição de óleo para o bocal Y6 ($W_o = 300 \text{ kg/h}$)

Além disso, o bocal Y6 gera sprays com frações de óleo maiores no lado negativo do eixo y , comparado aos sprays do bocal Y5, que possui Φ um pouco maior que o do bocal Y6. Para $P_a = 10 \text{ bar}$, nota-se que a alteração do ângulo θ provoca diferenças significativas na distribuição de combustível ao longo do eixo y .

Na figura 4.78, apresentam-se os perfis de SMD para as vazões de óleo de 100 kg/h, representada pelas 2 primeiras linhas da legenda, e 300 kg/h, representada pelas 2 últimas linhas.

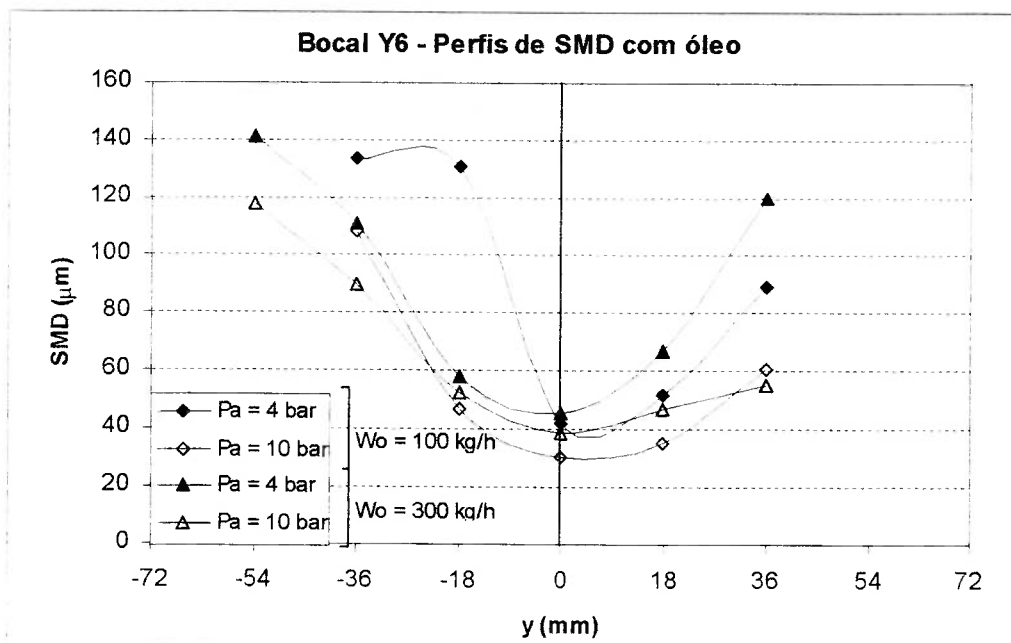


Figura 4.78 – Perfis de SMD para o bocal Y6 nebulizando óleo

Na comparação entre os bocais Y6 e Y5 feita na figura 4.79, nota-se que os perfis de SMD são parecidos para $W_o = 300$ kg/h.

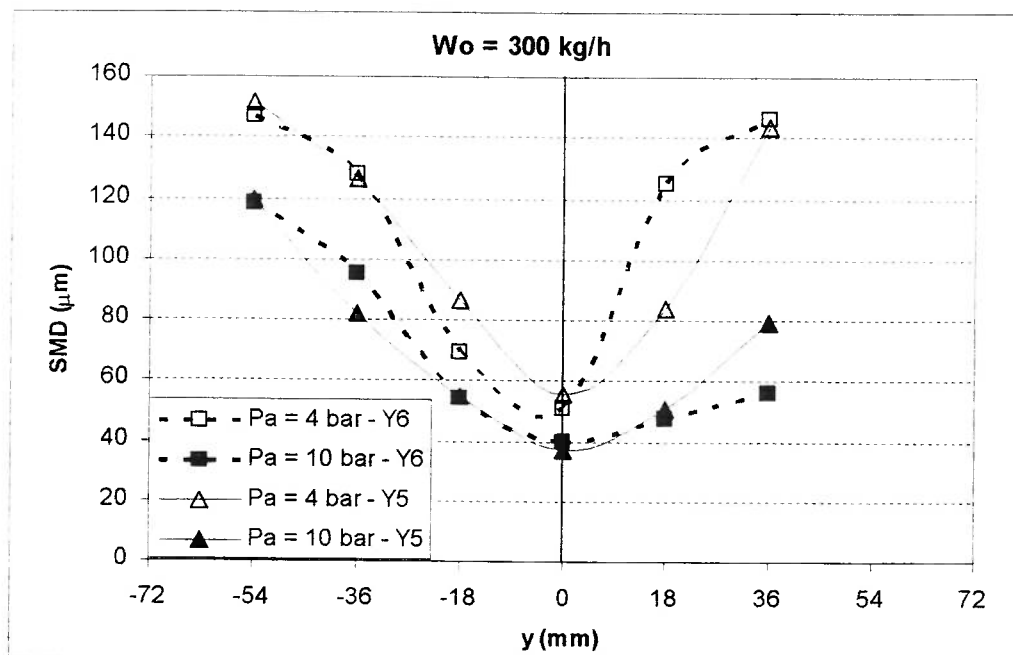


Figura 4.79 – Perfis de SMD para os bocais Y6 e Y5 nebulizando óleo

• Ensaio com o bocal Y3

Este bocal apresenta os menores valores de ALR e os maiores de Φ entre os bocais para a mesma condição de operação.

Os ensaios deste bocal não foram completados devido a instabilidades quando se nebulizou a vazão máxima de querosene, 300 kg/h. Para P_a menores que 8,0 bar, inclusive, ocorreram pulsações de período em torno de 1 segundo, percebidas visualmente nas oscilações do spray e nas indicações dos transdutores de pressão.

Os triângulos maiores das figuras a seguir foram obtidos em operação instável ($P_a = 8$ bar) e, portanto, não representam medições confiáveis.

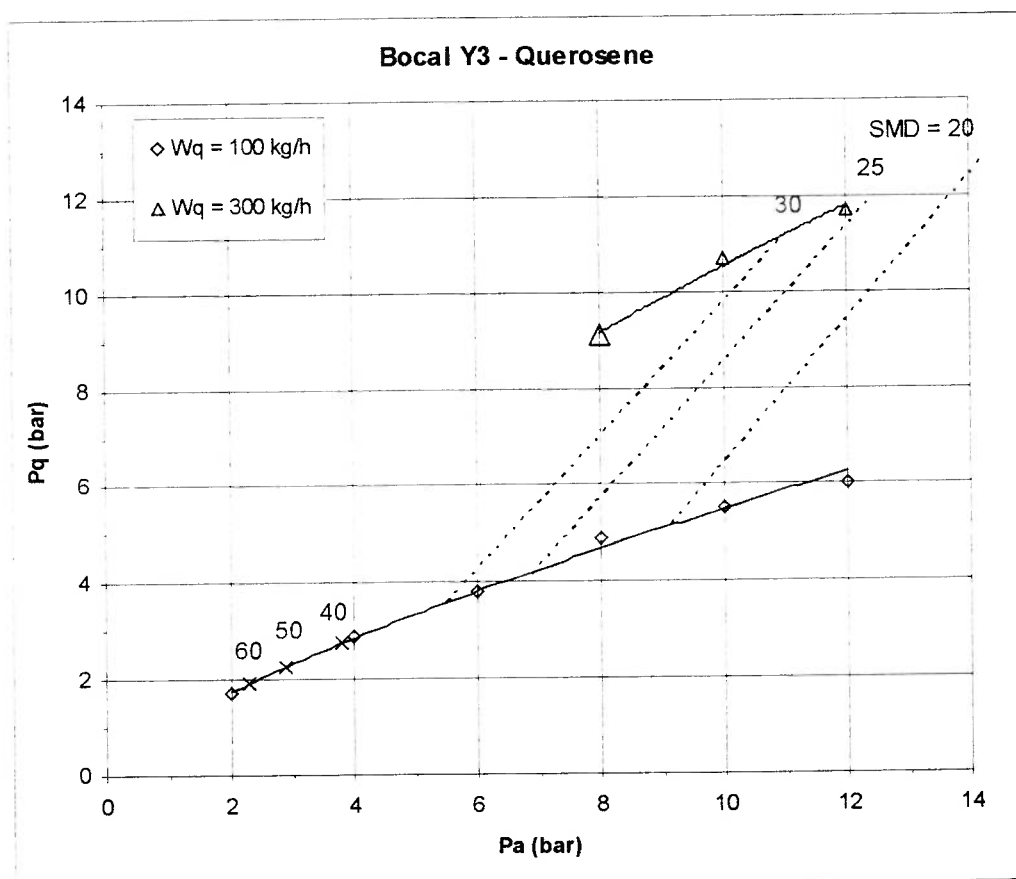


Figura 4.80 - Ábaco para o bocal Y3 operando com querosene

Além das pulsações ocorridas para $W_q = 300$ kg/h, o bocal Y3 gerou gotas maiores para $W_q = 100$ kg/h, quando comparado aos bocais Y2 e Y5, por exemplo, conforme a figura 4.81.

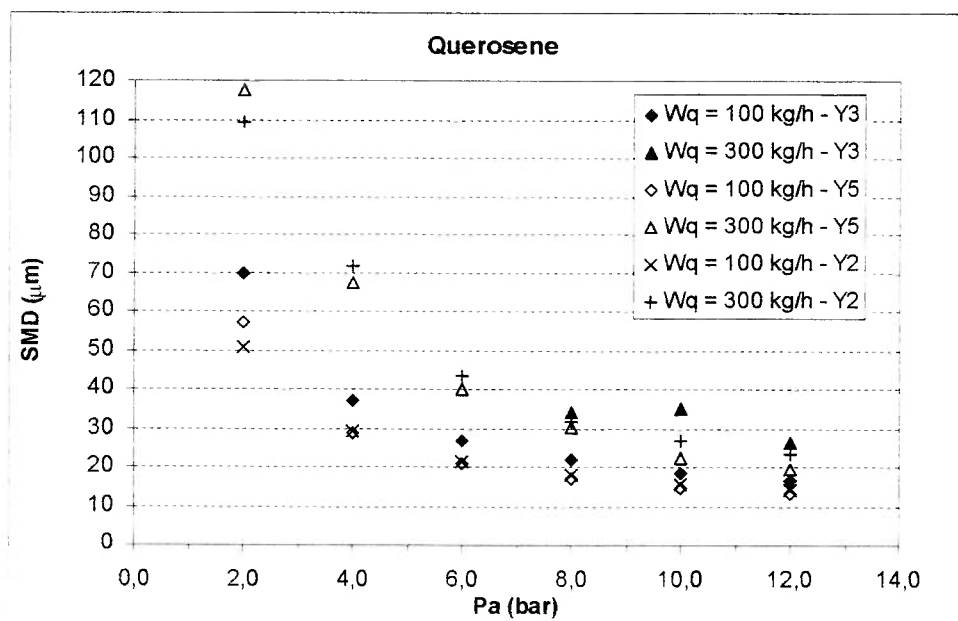


Figura 4.81 – Comportamento de SMD para o bocal Y3 com querosene

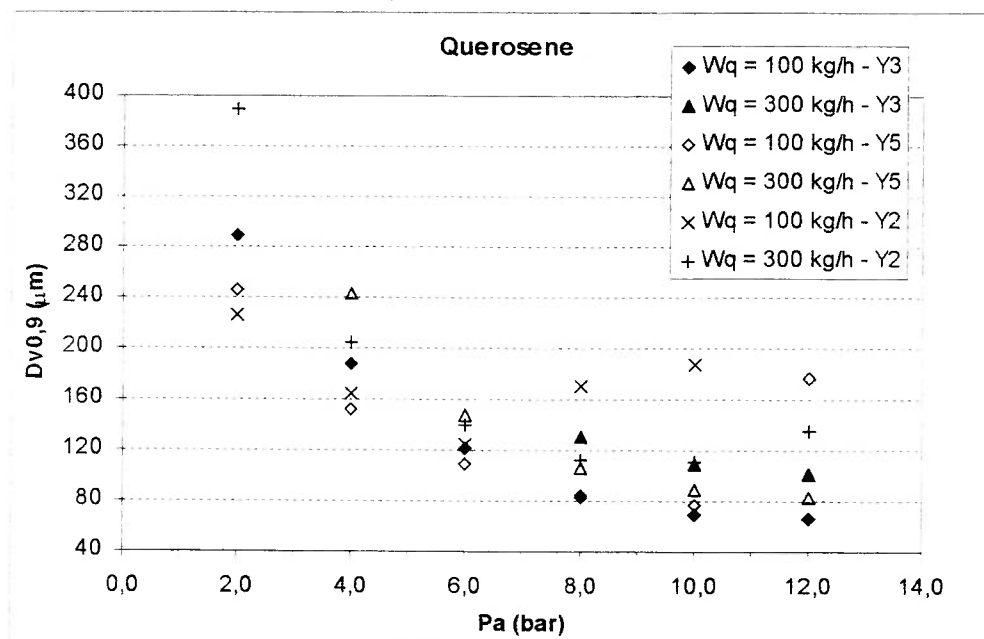


Figura 4.82 – Comportamento de $D_{v[0,9]}$ para o bocal Y3 com querosene

Nos ensaios com óleo, as pulsações para vazão de 300 kg/h em valores de P_a menores ou iguais a 8 bar ocorriam raramente e sem frequência definida. Mesmo nessas condições, foram realizadas as medições de diâmetro de gota e de distribuição de líquido com o fracionador.

Analisando a figura 4.83, nota-se que as pressões medidas nos pontos central e inferior, P_{m0c} e P_{m0i} , são muito próximas, ao contrário do que ocorre nos outros bocais, em que a pressão de estagnação no ponto central é mais próxima à pressão de estagnação do ponto superior, P_{m0s} . Assim, as velocidades do ar nos pontos central e inferior também são próximas, de forma a tornar o perfil de velocidades na seção de mistura menos inclinado do que nos outros bocais, como mostra a figura 4.84, onde se comparam os perfis de velocidade dos bocais Y3 e Y5.

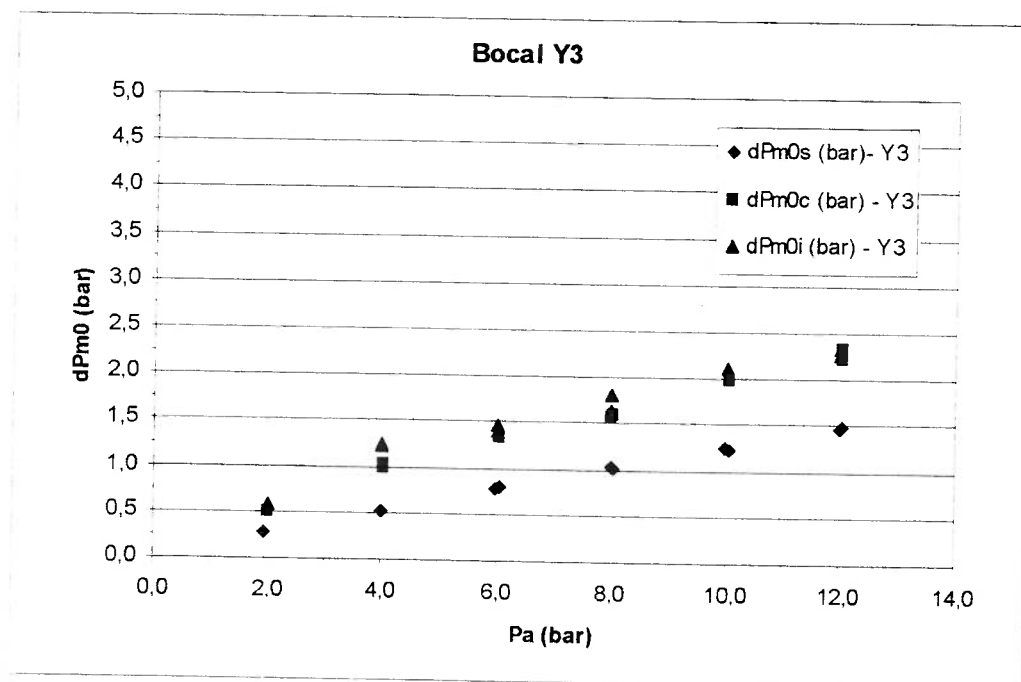


Figura 4.83 – dP_{m0} para o bocal Y3

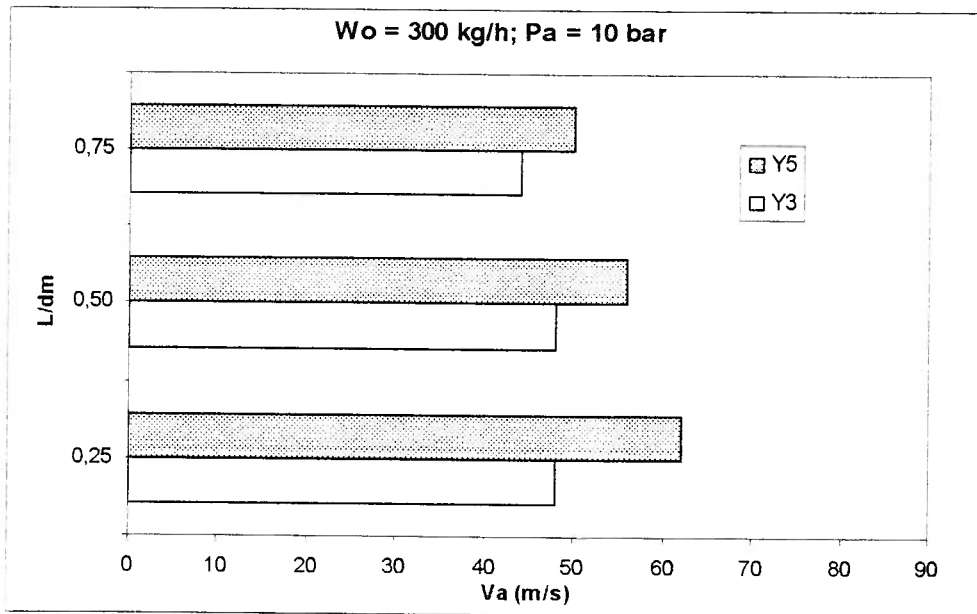


Figura 4.84 – Perfis de velocidade para os bocais Y3 e Y5

O bocal Y3 possui as menores velocidades na seção de mistura devido às menores vazões de ar para a mesma pressão P_a . Sendo assim, os valores de Φ são superiores aos dos outros bocais, principalmente quando $W_c = 300$ kg/h, conforme a figura 4.85.

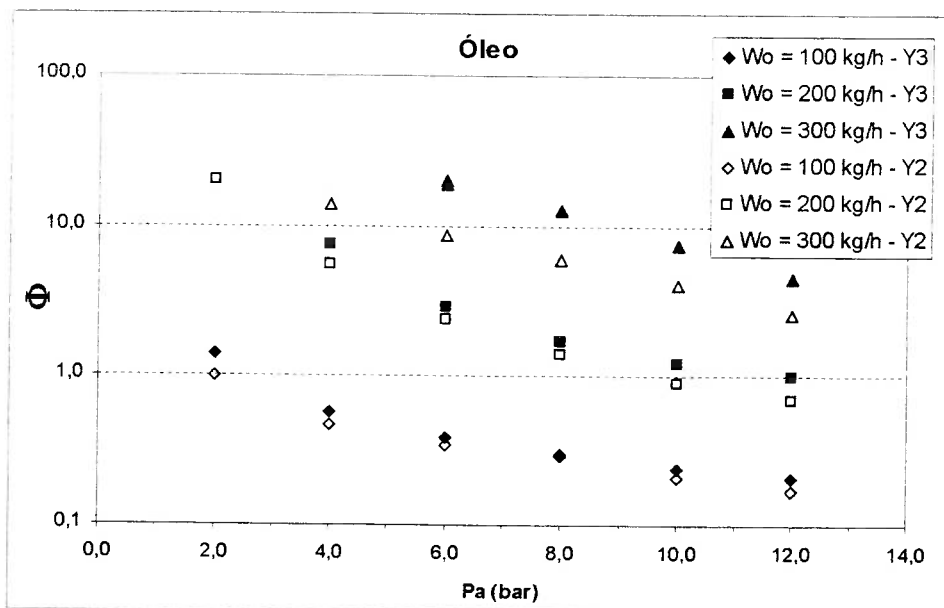


Figura 4.85 – Valores de Φ para os bocais Y3 e Y2

Embora o bocal Y3 apresente relação L_m/d_m 50% maior que o bocal Y2, os valores de SMD são maiores que os do bocal Y2 operando com óleo, mas muito próximas aos do bocal Y5, cuja relação é quatro, como mostram as figuras 4.86 e 4.87.

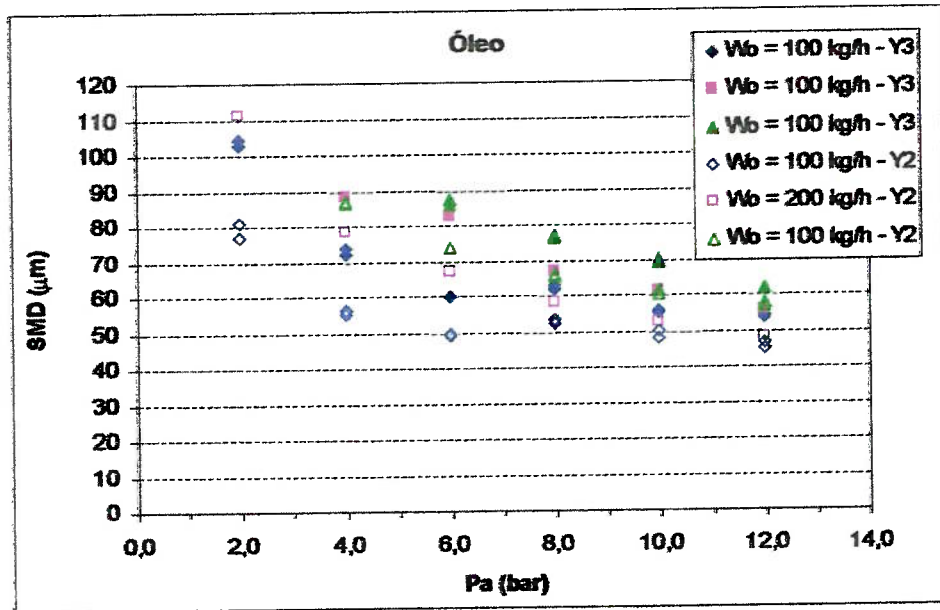


Figura 4.86 – Comportamento de SMD para os bocais Y3 e Y2 com óleo

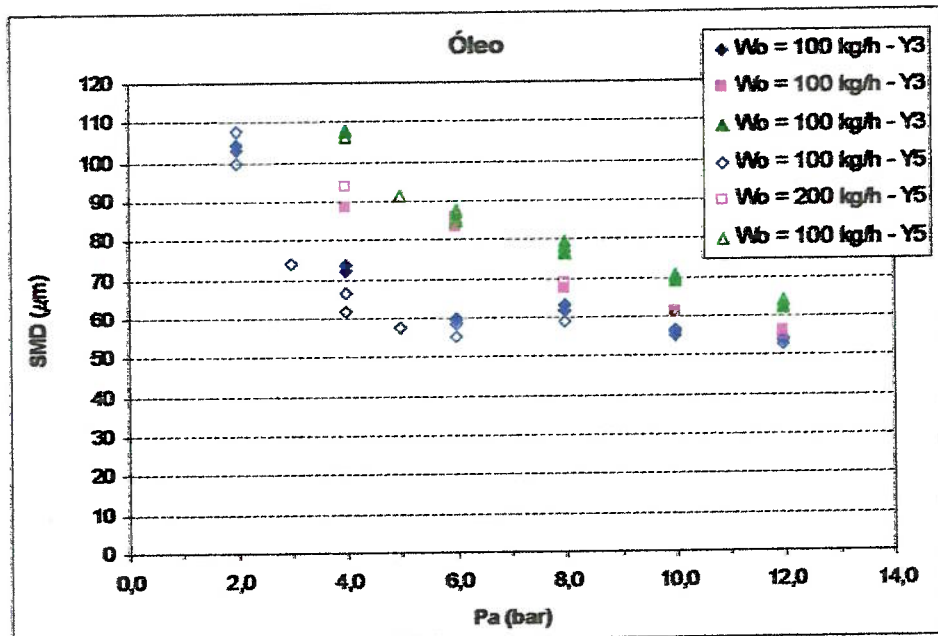


Figura 4.87 – Comportamento de SMD para os bocais Y3 e Y5 com óleo

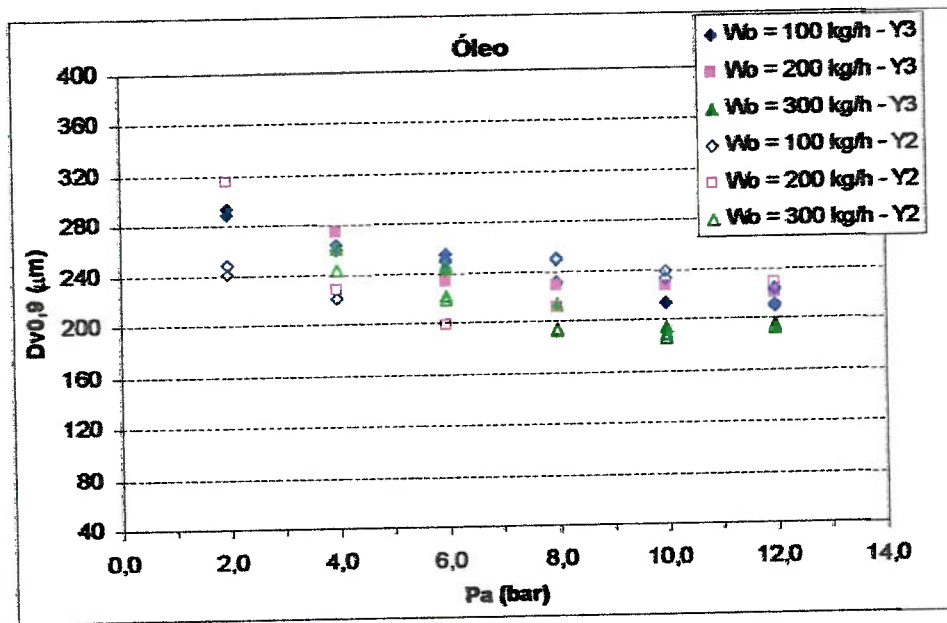


Figura 4.87 – Comportamento de $D_{V_{10,9}}$ para os bocais Y3 e Y2 com óleo

O bocal Y3 apresenta valores de $D_{V_{10,9}}$ superiores aos do bocal Y2 para W_o igual a 200 e 300 kg/h. Novamente, com relação ao bocal Y5, tais diâmetros são próximos, a menos nas condições em que $W_o = 100 \text{ kg/h}$.

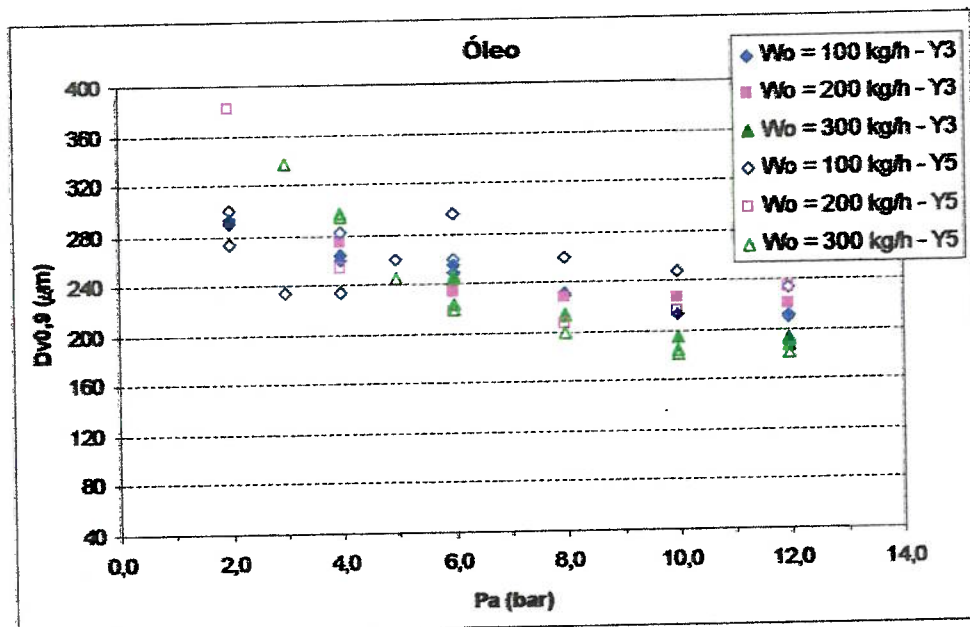


Figura 4.88 – Comportamento de $D_{V_{10,9}}$ para os bocais Y3 e Y5 com óleo

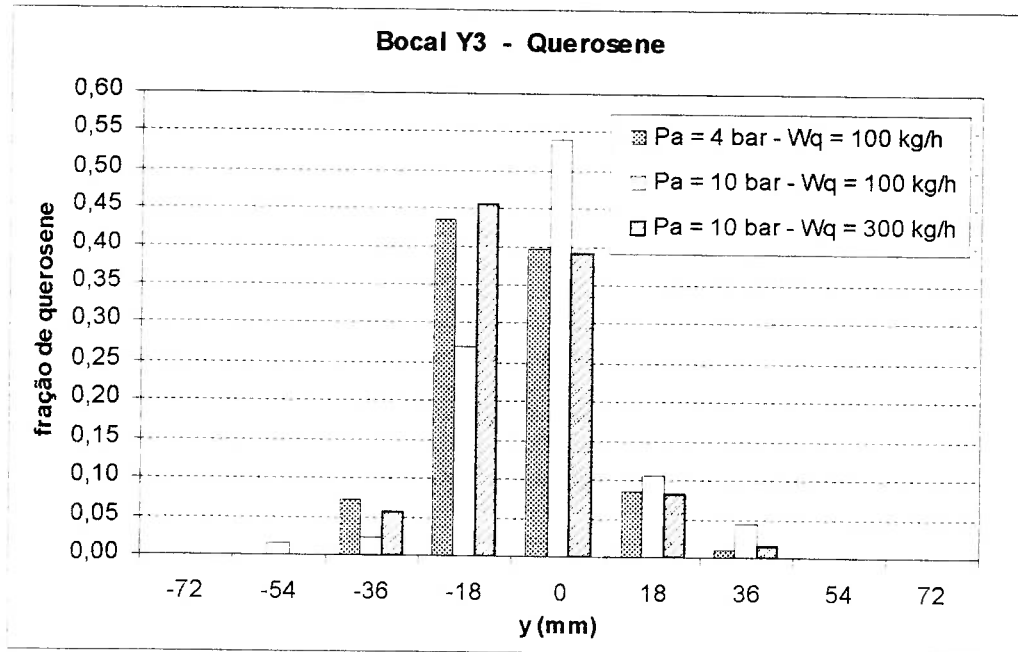


Figura 4.89 – Distribuição de querosene para o bocal Y3

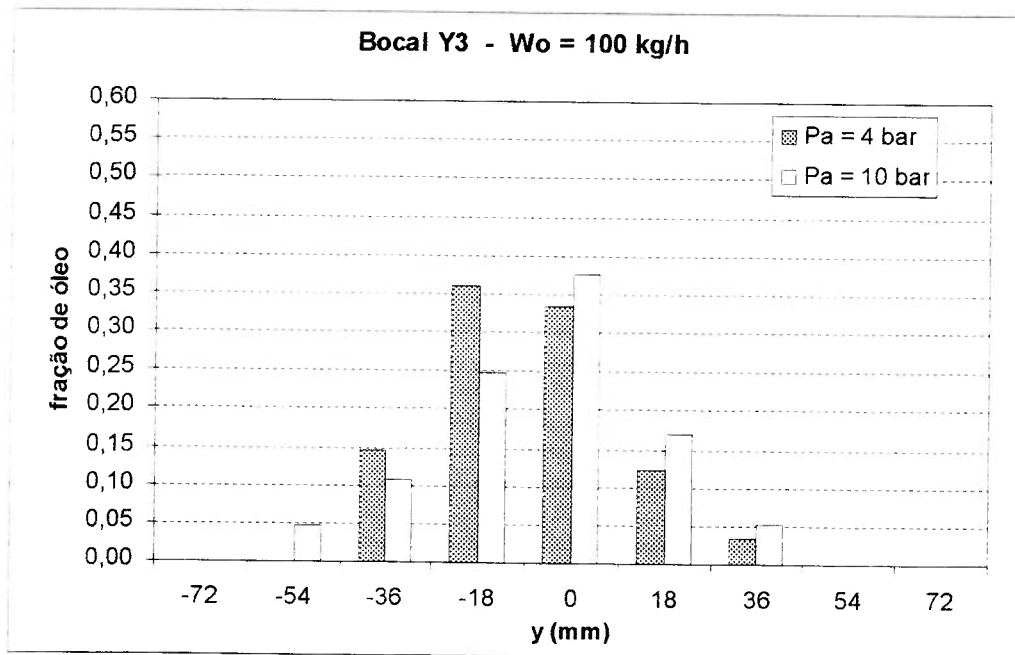


Figura 4.90 – Distribuição de óleo para o bocal Y3 ($W_o = 100$ kg/h)

Para a vazão de óleo de 300 kg/h, constata-se que o spray possui ângulo α na parte positiva do eixo y menor que na parte negativa, assim como para os bocais Y2 e Y5. As distribuições de combustível dos sprays gerados pelos bocais Y2 e Y3 são

parecidas, enquanto que o bocal Y5 possui, relativamente, maiores frações na parte positiva do spray.

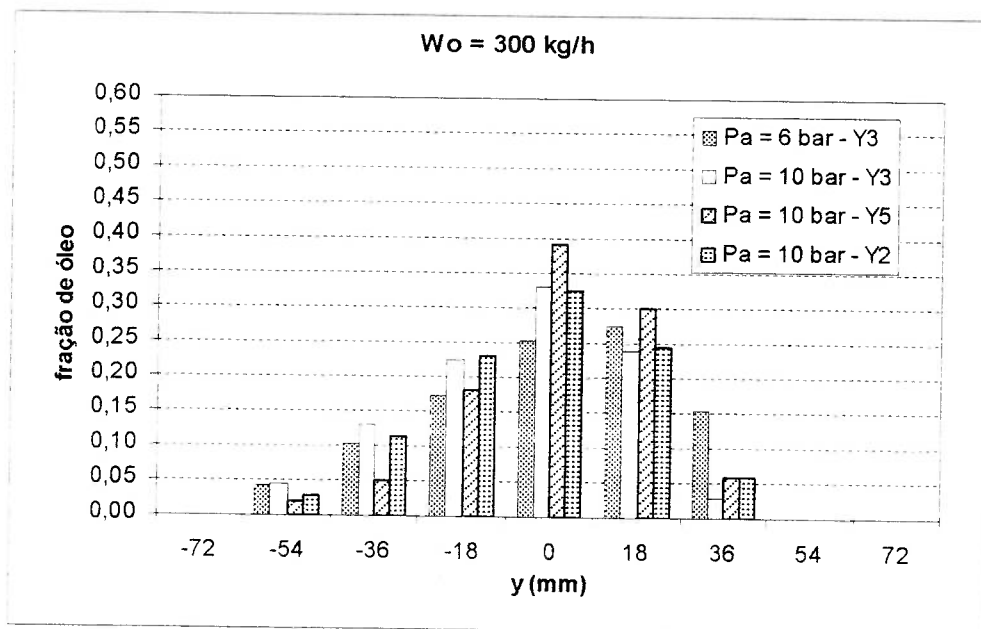


Figura 4.91 – Distribuição de óleo para o bocal Y3 ($W_o = 300$ kg/h)

Na figura 4.92, as duas primeiras linhas da legenda correspondem a $W_o = 100$ kg/h, enquanto que a última corresponde a $W_o = 300$ kg/h.

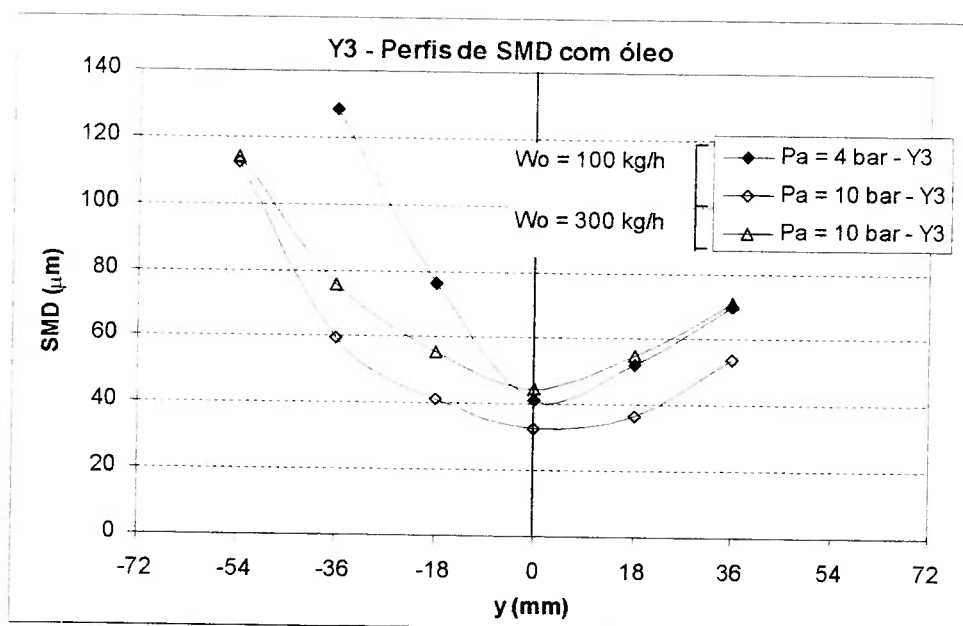


Figura 4.92 – Perfis de SMD para o bocal Y3 nebulizando óleo

Comparando os perfis de SMD dos bocais Y3, Y2 e Y5 através da figura 4.93, nota-se que o bocal Y2 possui diâmetro de gota menor na periferia e maior no centro, ao contrário dos outros dois bocais, que possuem perfis muito semelhantes.

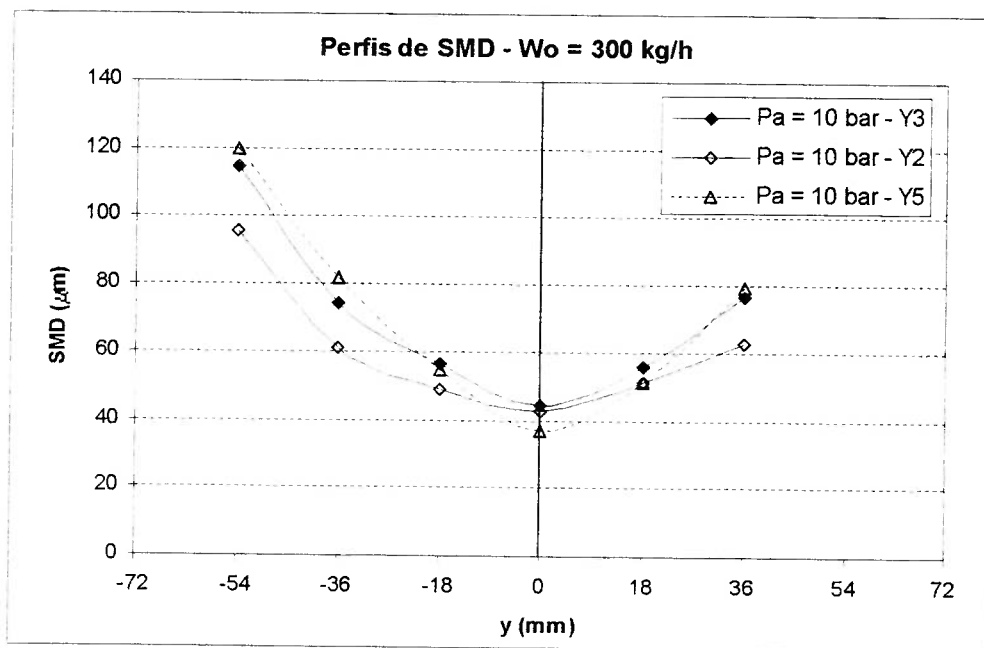


Figura 4.93 – Perfis de SMD para os bocais Y3, Y2 e Y5 nebulizando óleo

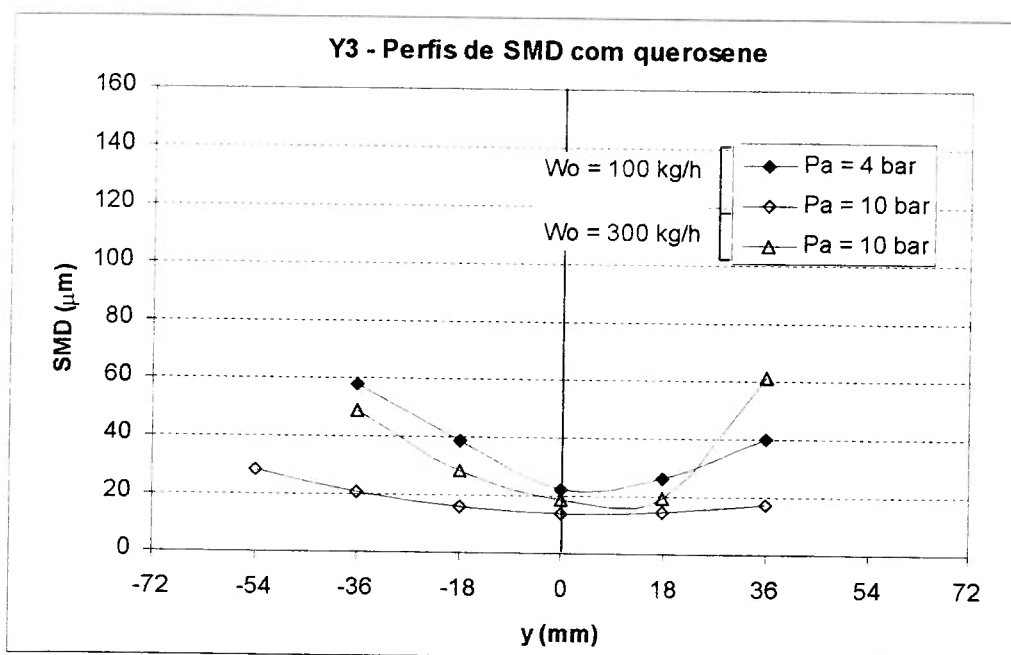


Figura 4.94 – Perfis de SMD para o bocal Y3 nebulizando querosene

Analisando apenas a figura 4.93, afirma-se, em princípio, que o bocal Y2 gera SMD médio do spray menor que o SMD médio do bocal Y5. De fato, o bocal Y2 apresenta SMD em torno de 60 μm , enquanto que o bocal Y5, 70 μm para a condição da figura.

Entretanto, o bocal Y5 gera spray com SMD médio ponderado pela fração de óleo, SMD_p , menor do que para o bocal Y2. O SMD_p é calculado pela eq. (4.4), através da somatória da multiplicação, para cada coordenada (i) do eixo y, do SMD_i pela fração de combustível, f_i .

$$SMD_p = \sum_i (SMD_i \cdot f_i) \quad (4.4)$$

Onde SMD_i e f_i são, respectivamente, o SMD e a fração de combustível da coordenada (i) do eixo y.

Desta forma, para o bocal Y2 obteve-se $SMD_p = 52 \mu\text{m}$ e, para o bocal Y5, obteve-se $SMD_p = 49 \mu\text{m}$.

Em outras palavras, o bocal Y5 gera grande quantidade de gotas pequenas na região central, onde a fração de combustível é alta, enquanto que o spray do bocal Y2 possui, relativamente, menor quantidade de gotas nesta região, e maior na sua periferia, onde SMD é maior.

A figura 4.56, repetida a seguir, mostra que o bocal Y2 apresenta frações de óleo maiores na periferia do spray com relação ao bocal Y5, na região onde SMD é maior para ambos os bocais.

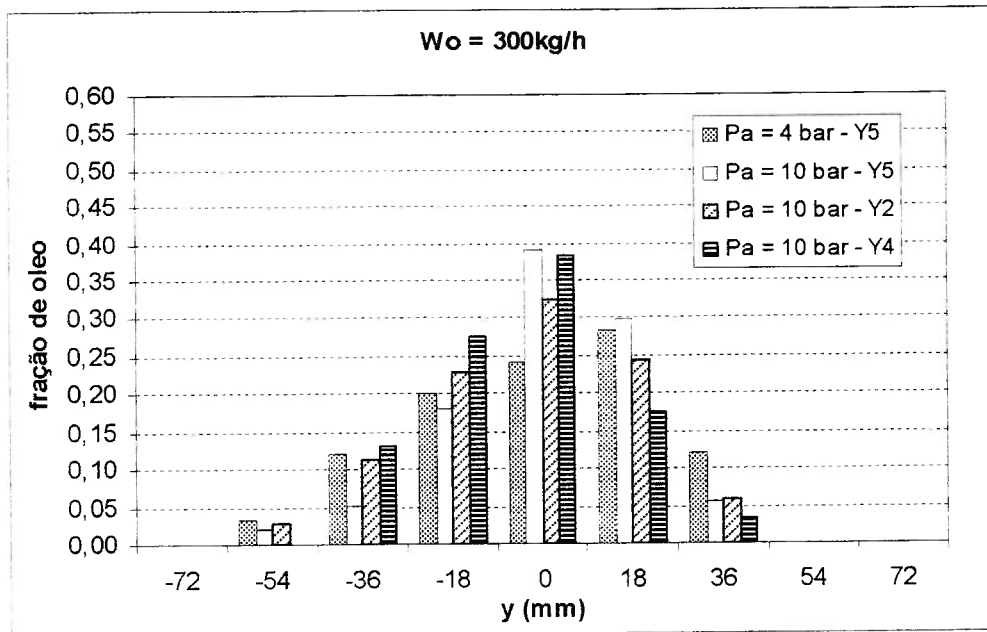


Figura 4.95 – Distribuição de óleo para os bocais Y5 e Y2

Da mesma forma, é possível analisar $D_{V[0,9]}$ ponderado pela fração de combustível utilizando equação análoga à eq. (4.4).

$$D_{V[0,9]p} = \sum_i (D_{V[0,9]pi} \cdot f_i) \tag{4.5}$$

Acredita-se que tanto a análise de SMD como $D_{V[0,9]}$ ponderados pela fração de líquido se tornam importantes em relação à concentração de poluentes, como MP, CO e NO_x nos gases efluentes, uma vez que as reações químicas na câmara de combustão dependem das transferências de calor e massa locais entre o combustível e o comburente.

Os diagramas a seguir comparam duas condições de operação. As colunas à direita se referem ao SMD_p para a condição de projeto, $W_c = 300 \text{ kg/h}$, $P_a = 10 \text{ bar}$. As colunas à esquerda se referem ao SMD_p para a condição de verificação, $W_c = 100 \text{ kg/h}$, $P_a = 4 \text{ bar}$.

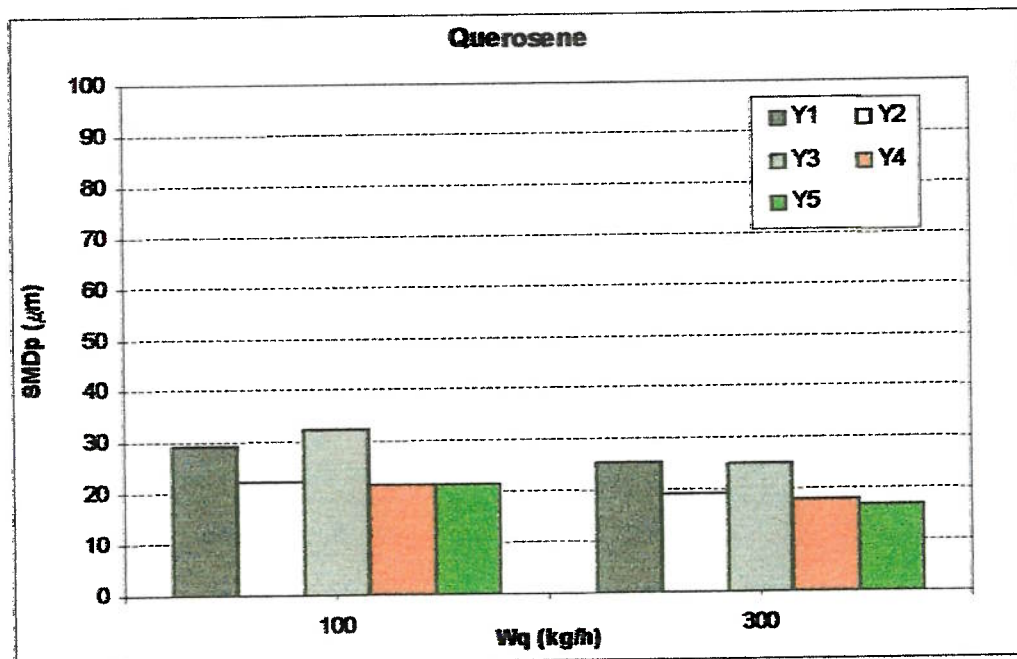


Figura 4.96 – SMD_p dos sprays dos bocais operando com querosene

A partir das figuras 4.96 e 4.97, observa-se que tanto os bocais Y1 quanto Y3 geram sprays com os maiores SMD_p. Na operação com querosene, os bocais Y4, Y5 e Y2 apresentaram SMD_p menores e bastante próximos para ambas as condições colocadas nos gráficos.

Para a condição em que $W_o = 100 \text{ kg/h}$ e $P_a = 4 \text{ bar}$, o bocal Y4 gerou spray com SMD_p menor do que os outros bocais, uma vez que grandes frações de óleo se concentraram na região central do spray, onde estão as menores gotas. Os bocais Y1, Y3 e Y6 apresentaram SMD_p elevados nesta condição, já que a parte negativa dos seus sprays apresentaram os maiores SMD e as maiores fração de óleo.

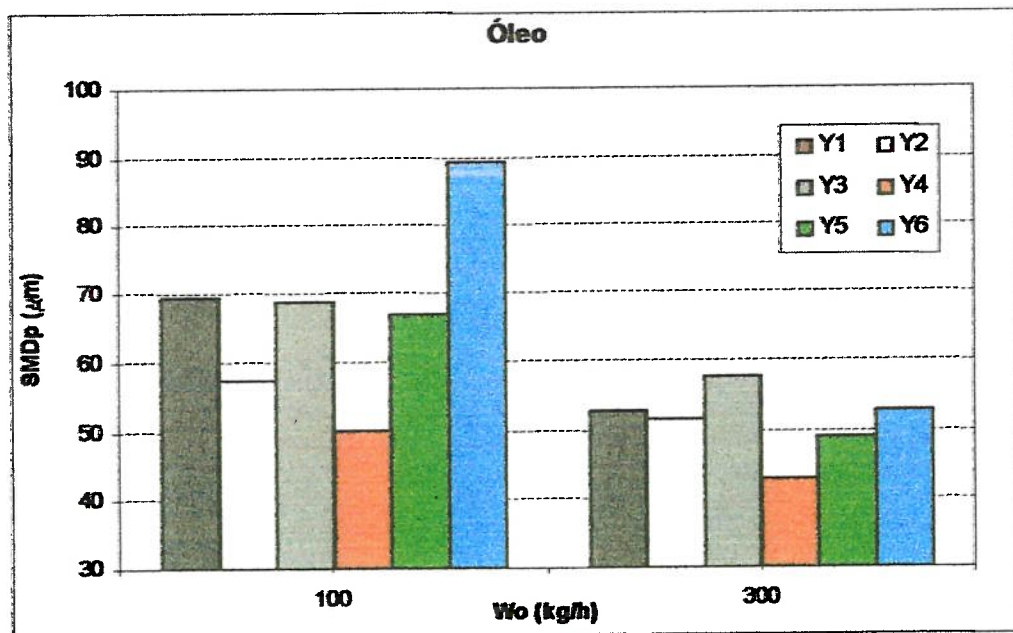


Figura 4.97 – SMD_p dos sprays dos bocais operando com óleo

Para $W_o = 300$ kg/h, as diferenças são bem menores, embora o bocal Y3 se destaque, novamente, pelo maior SMD_p.

Os bocais Y4 e Y5 alcançaram valores de SMD_p próximos, pois ambos geram sprays com maiores frações de óleo no centro, região onde as gotas são menores. Os bocais Y1, Y2 e Y6 geram SMD_p maiores, em torno de 52 µm.

É importante lembrar que as transferências de calor e massa entre as gotas de combustível e o ar no processo de combustão ocorrem nas superfícies destas gotas que, por sua vez, são proporcionais ao quadrado dos seus diâmetros.

Na figura 4.97, para $W_o = 300$ kg/h, o bocal Y5 gera spray com SMD_p de 49 µm, enquanto que o bocal Y2, em torno de 52 µm, 6% maior. Com relação à área superficial das gotas, a diferença é mais significativa, 12%.

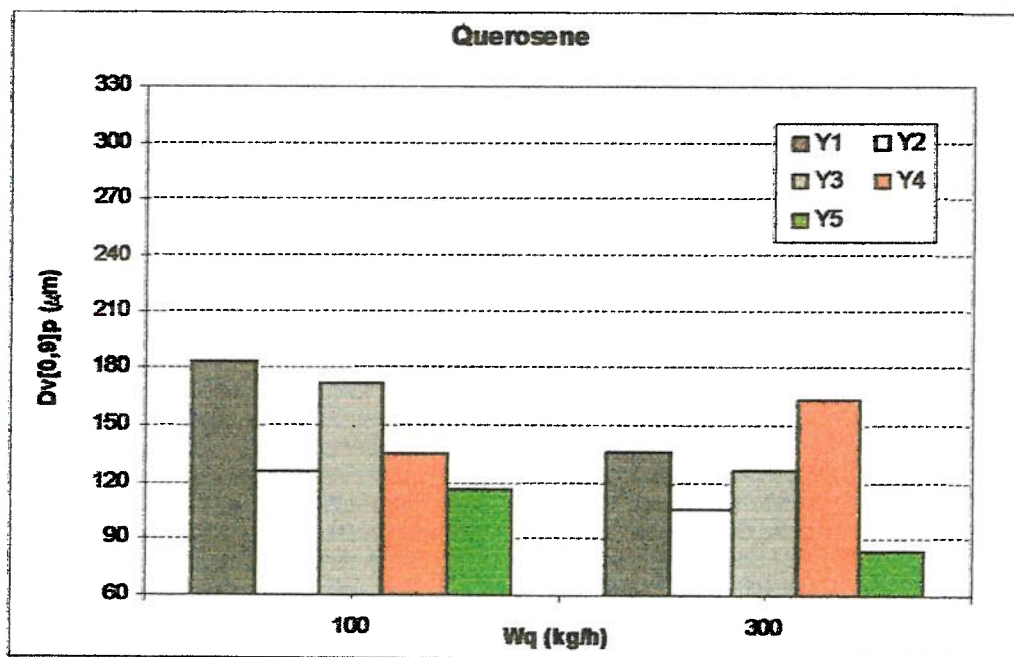


Figura 4.98 – $D_{v[0,9]p}$ dos sprays dos bocais operando com querosene

A mesma análise pode ser feita com respeito ao $D_{v[0,9]p}$ para comparar a uniformidade na distribuição das gotas no spray.

Na condição de vazão mínima de querosene, os bocais Y1 e Y3 também apresentam os maiores $D_{v[0,9]p}$. Já para a vazão máxima, o spray com maior $D_{v[0,9]p}$ é gerado pelo bocal Y4, como mostra a figura 4.98.

Os bocais que geram sprays com os menores $D_{v[0,9]p}$, em ambas as vazões de querosene, são os bocais Y2 e Y5. Como os sprays gerados pelos bocais Y2, Y5 e Y4 apresentam SMD_p muito semelhantes na nebulização de querosene, o bocal Y4 apresenta a distribuição de gotas menos uniforme entre eles.

A figura 4.99 mostra a diferença entre $D_{v[0,9]p}$ e SMD_p para os 5 bocais operando com querosene. De fato, para $W_q = 300$ kg/h, o bocal Y4 apresenta a maior diferença.

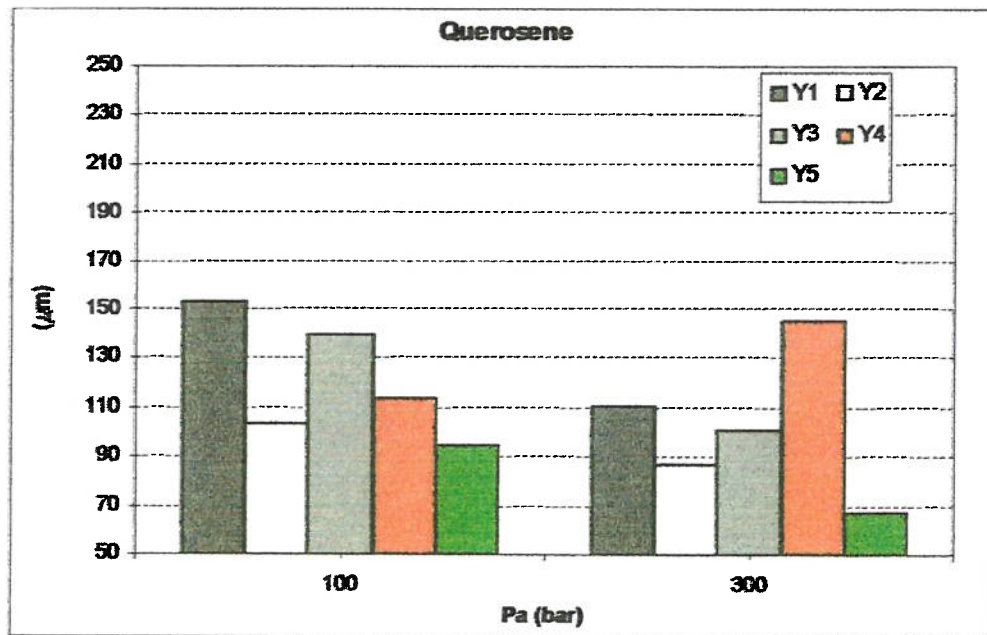


Figura 4.99 – Diferenças entre diâmetros dos sprays dos bocais operando com querosene

A nebulização de óleo do bocal Y1 gera os maiores $D_{v[0,9]p}$ em ambas as vazões. Nota-se, na figura 4.100, que o bocal Y6 apresenta o segundo maior $D_{v[0,9]p}$ para $W_o = 100$ kg/h e o menor $D_{v[0,9]p}$ para $W_o = 300$ kg/h.

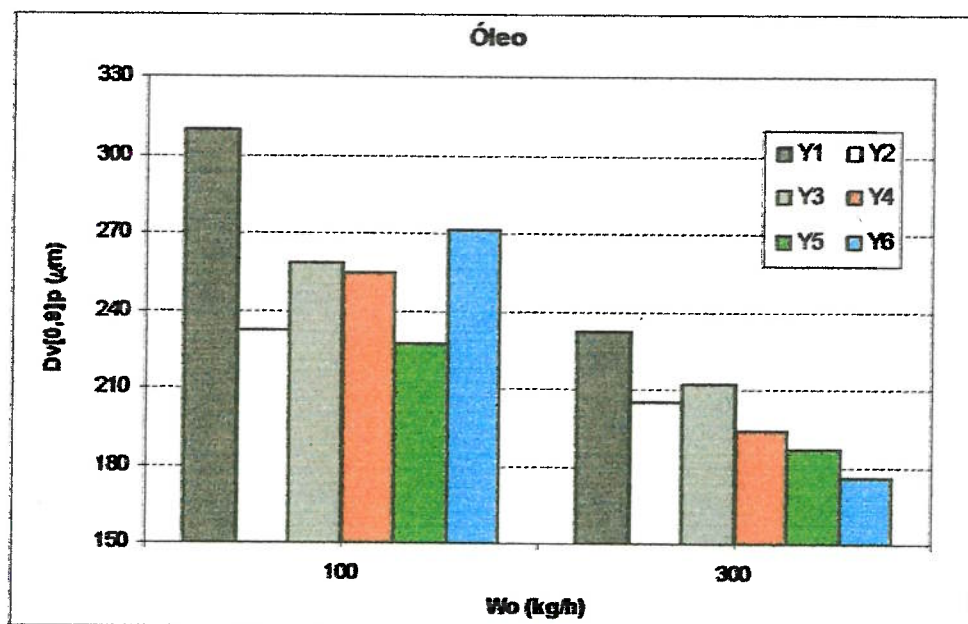


Figura 4.100 – $D_{v[0,9]p}$ dos sprays dos bocais operando com óleo

De acordo com a figura 4.101, os bocais Y5 e Y6 apresentam as menores diferenças entre SMD_p e $D_{v10,91p}$, para $W_o = 300$ kg/h, gerando sprays com distribuição de diâmetros de gota mais uniforme.

Conclui-se, a partir dos resultados dos ensaios mostrados na figura 4.101, que a uniformidade da distribuição dos diâmetros de gota é influenciada pelo ângulo θ para $W_o = 300$ kg/h. Analisando em conjunto as duas vazões de óleo, o bocal Y5 também apresenta bom desempenho quanto à uniformidade do spray.

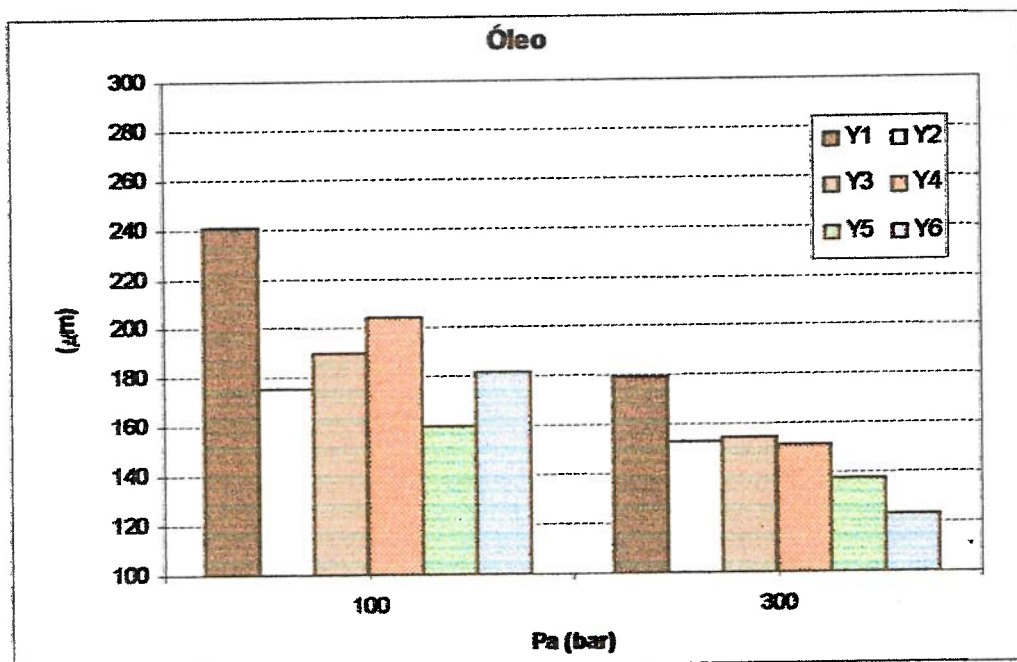


Figura 4.101 – Diferenças entre diâmetros dos sprays dos bocais operando com óleo

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Os resultados experimentais de Mullinger e Chigier (1974) mostram, através de medições da distribuição de pressão nos bocais, que o escoamento de ar até o ponto de mistura é subsônico, fato também constatado neste trabalho através das medições de pressão de estagnação do ar no ponto de mistura.

Tais medições, feitas em 3 pontos na seção de mistura, mostram que o escoamento de ar não é simétrico devido às diferenças consideráveis entre as pressões e velocidades provocadas pela entrada inclinada do jato de combustível na câmara de mistura.

Mullinger e Chigier (1974) recomendam que a relação l_m/d_m seja próxima a 4. Os resultados do trabalho atual mostram que esta recomendação é importante nos bocais projetados para operar com ALR relativamente altos e Φ baixos.

De fato, valores de Φ relativamente baixos fazem com que a película de combustível na parte negativa do eixo y da câmara de mistura seja maior. Para reduzir sua espessura, é necessário que a câmara de mistura seja comprida o suficiente para que o ar acelere a película, uniformizando sua espessura.

Em outras palavras, a nebulização por arraste da película é preponderante no caso em que se opera com valores de Φ menores que 1,5, tornando-se fortemente dependente das propriedades do combustível, como a viscosidade e a tensão superficial. Neste caso, é importante que l_m/d_m seja maior, em torno de 4.

Os resultados relativos aos bocais Y1 e Y4 mostram que a recomendação de Mullinger e Chigier (1974) uniformiza a distribuição de combustível ao longo do eixo y .

Outro efeito importante na análise da relação l_m/d_m se refere ao ângulo do spray, que aumenta conforme tal relação diminui. Já a vazão e a viscosidade do combustível, assim como a vazão de ar não alteram significativamente o ângulo do spray.

Apesar da relação l_a/d_a obedecer a recomendação de Mullinger e Chigier (1974) em todos os bocais, $l_a/d_a > 2$, ela influencia a pressão de estagnação no ponto

de mistura. O bocal Y2, cuja relação vale 2,73, apresenta pressões de estagnação e velocidades do ar menores que o bocal Y4, cuja relação vale 2,14, apresentando SMD levemente maiores no centro do spray. Como Φ é fortemente dependente das condições do ar no ponto de mistura, a relação l_a/d_a se torna importante na distribuição de combustível no spray.

Já a comparação entre os bocais Y2 e Y5, mostra que Φ e ALR, muito próximos para ambos os bocais, independem da relação l_m/d_m . Em princípio, as parcelas de combustível nebulizada por colisão direta e arraste da película são parecidas, gerando perfis de diâmetros de gota e frações de combustível semelhantes. Entretanto, apenas os diâmetros de gota no centro do spray são próximos.

Os bocais Y2 e Y5 apresentam diferenças significativas na periferia dos sprays, onde o bocal com maior l_m/d_m apresenta gotas maiores. As chances de que as gotas formadas por colisão direta na seção de mistura se juntem à película formada na parede da câmara de mistura são maiores para o bocal Y5, cuja relação l_m/d_m é maior. Desta forma, a película do bocal Y5 se torna maior que a do bocal Y2, aumentando o diâmetro das gotas na periferia, como mostra a figura 4.58.

Por outro lado, o bocal Y5, por possuir l_m/d_m maior, apresenta maiores frações de combustível na região central do spray, onde as gotas são menores. Sendo assim, a análise em conjunto dos resultados sobre o diâmetro de gota e frações de combustível ao longo do eixo y do spray se torna importante e é quantificada pelos valores de SMD_p e $D_{V[0.9]p}$, diâmetros médios de gota ponderados na fração de combustível.

O bocal Y5 apresenta, em geral, os menores diâmetros de gota ponderados. Em alguns casos, porém, os bocais Y4 e Y6 apresentam desempenho melhor que o bocal Y5. Já os bocais Y1 e Y3 invariavelmente geram gotas maiores.

A operação do bocal Y3 não é estável nos casos em que a vazão de combustível é maior, 300 kg/h, independente da viscosidade do combustível. Aparentemente, neste caso alcançou-se um limite máximo para a relação Φ , que não pode ultrapassar valores em torno de 6,5 na condição de projeto, sob pena de gerar fortes instabilidades em algumas condições operacionais.

A análise dos resultados do bocal Y6 mostra que a distribuição de combustível no spray não depende apenas da relação Φ , mas também do ângulo com

que o jato de combustível entra na câmara de mistura. O ângulo θ menor, 45° , altera o regime de escoamento do ar no interior da câmara de mistura, pois as pressões de estagnação do ar são bastante diferentes dos outros bocais.

CAPÍTULO 6

TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos futuros sobre bocais Y-jet podem se desenvolver em duas linhas.

Uma delas seria estudar o escoamento bifásico na câmara de mistura, baseado em trabalhos apresentados na “Revisão Bibliográfica”, Capítulo 2.

A outra linha seria elaborar um plano de avaliações experimentais dos bocais construídos neste trabalho, em uma câmara de combustão, analisando estabilidade e perfil de transferência de calor da chama, além da concentração de poluentes nos gases efluentes.

A segunda linha é bastante complexa, pois a combustão envolve vários fatores além da nebulização, como excesso de ar (comburente) e índice de swirl no interior da câmara de combustão, natureza e temperatura da carga aquecida pela chama, entre outros. Dificuldades adicionais estariam relacionadas à infra-estrutura necessária para a realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, J. D. Modern compressible flow. 2.ed. Maryland. Mc Graw-Hill, 1990.
- ANDREUSSI, P.; TOGNOTTI, L.; MICHELE, G. de; GRAZIADIO, M. Design and characterization of twin-fluid Y-jet Atomizers. *Atomization and Sprays*, v. 2, p. 45 - 59, 1992.
- ANDREUSSI, P.; GRAZIADIO, M.; NOVELLI, G.; PASQUALETTI, A.; TOGNOTTI, L. Measurement of liquid film thickness within a Y-jet atomizer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIQUID ATOMIZATION AND SPRAYS SYSTEMS, Rouen, França, 1994. ICLASS-94: Proceedings. Rouen, 1994. p. 632 - 639.
- BAYVEL, L.; ORZECOWSKI, Z. Liquid Atomization. London. Taylor & Francis, 1993.
- CHIGIER, N. An assessment of spray technology. *Atomization and Sprays*, v. 3, p. 365 - 371, 1993.
- CHIN, J. S.; LEFEBVRE, A. H. Flow patterns in internal-mixing, twin-fluid atomizers, *Atomization and Sprays*, v.3, p. 463 – 475, 1993.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos. 3.ed. Rio de Janeiro. Guanabara Dois, 1988.
- GRAZIADIO, M.; ANDREUSSI, P.; TOGNOTTI, L.; ZANELLI, S. Atomization of coal-water fuels by pneumatic internal mixing nozzle. *Atomization and Spray technology*, v.3, p. 187 – 208, 1987.

GRAZIADIO, M. L'atomizzazione dei combustibili nella generazione térmica. Pisa, Pacini Editore, 2001.

LEFEBVRE, A. H. Airblast atomization. Prog. Energy Combustion Science, v.6, p. 233 – 261, 1980.

LEFEBVRE, A. H. Atomization and Sprays. New York, Hemisphere Publishing, 1989.

MESSIAS, L. S. Combustão de Líquidos, In: Curso de Combustão Industrial. São Paulo, IPT/AET, 1995.

MESSIAS, L. S.; JEN, L. C. Reduction of particulate emission from a boiler through improvement of fuel oil atomization. In: 4th International Conference on Energy for a Clean Environment, CLEANAIR, Lisboa, 2001.

MICHELE, G. de; GRAZIADIO, M.; MORELLI, F.; NOVELLI, G. Characterization of the spray structure of a large scale HFO atomizer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIQUID ATOMIZATION AND SPRAYS SYSTEMS, Gaithersburg, MD, USA, 1991. ICLASS-91: Proceedings. Gaithersburg, 1991. p. 779 – 786.

MULLINGER, P. J.; CHIGIER, N. A. The design and performance of internal mixing multijet twin fluid atomizers. Journal of the Institute of Fuel, v. 47, p. 251 – 261, 1974.

PACÍFICO, A. L. Análise teórico-experimental do escoamento bifásico no interior de bocais nebulizadores tipo Y-jet, EPUSP, 2000. (Tese – Doutorado)

RIZK, N. K.; LEFEBVRE, A. H. Airblast atomization: studies on drop-size distribution. Journal of Energy, v. 6, n. 5, p. 323 – 327, 1982.

- RIZK, N. K.; LEFEBVRE, A. H. Spray characteristics of plain-jet airblast atomizers. *Journal of Engineering for gas Turbine and Power*, v. 106, p. 634 – 638, 1984.
- RIZKALLA, A. A.; LEFEBVRE, A. H. Influence of liquid properties on airblast atomizer spray characteristics. *Journal of Engineering for Power*, v. 97, n. 2, p. 173 – 179, 1975.
- SHAPIRO, A. H. *Compressible fluid flow*. New York, John Wiley & Sons, 1953.
- SONG, S. H.; LEE, S. Y. An examination of spraying performance of Y-jet twin-fluid atomizers: effect of mixing port length. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIQUID ATOMIZATION AND SPRAYS SYSTEMS*, Rouen, França, 1994. *ICLASS-94: Proceedings*. Rouen, França, 1994. p. 616 – 623.
- SONG, S. H.; LEE, S. Y. Study of atomization mechanism of gas/liquid mixtures flowing through Y-jet atomizers. *Atomization and Sprays*, v. 6, p. 193 – 209, 1996.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. 2.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1976.

ANEXO 1

RELATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO

OMAR - Divisao de Industrializacao - Transmissor Operativo

FICHA CALIBRACAO 10001

No. Serie : 100500 No. Sensor : H100045 O.D. : 0000/00000

Cliente : UTRACAZ Modelo : L00010001-TU04-011-A5/11

Calibracao : 0.0000 a 1000.0000 m=10000000

Taa: Falha : 0 : 0 :

OBSERVACOES

- [0] Servico: Transmissor Pressao Diferencial
- [0] Faixa: 1.05 a 50 kPa
- [0] Material Diafragma/Fluido Enchimento: Aco Inox 316/Fluorelato
- [1] Material dos Flanges, Adaptadores e Purges: Aco Inox 316
- [1] Material dos Anais de Vedacao da Celula: Teflon
- [0] Posicao Purga: Superior
- [0] Indicador Local: Sem
- [1] Conexao ao Processo: 1/2" - 14 NPT (Com Adaptador)
- [0] Conexao Eletrica: 1/2" - 14 NPT
- [1] Ajuste de Zero e Span: Com Ajuste Local
- [1] Selo: Tipo Plano, em Aco Carbono Pintado. Acessorios : Aco Carbono

NOTAS

- [0] Parafusos e Porcas em Aco Inox 316
- [1] Plaqueta de Identificacao EM

CARACTERISTICAS OPERATIVAS

Observacoes:
 Data Calibracao: 04/05/2000 Versao Software: 5.07
 Placa Principal: 00507036660 Placa Display:

CALIBRACAO

Processo m=10000000	Saida Ideal (mA)	Saida Atual (mA)
0.0000	4.000	3.997
349.4370	7.991	7.989
498.9080	11.983	11.987
748.3750	15.974	15.982
997.8100	19.965	19.966

Data Emissao: 26/05/2000 Controle C.P.D.: 330770

SMAR - Divisao de Industrializacao - Transmissor Capacitivo

FICHA CALIBRACAO 10301

Nº. Serie : 100504 Nº. Senso : 1100001 D.S. : 0000/00000

Cliente : ULTRADAX Modelo : 10001M01-TU04-011-A1/T1

Calibracao : 0,0000 a 15,0000 kgf/cm²

Taxa : Folha : 00 00

DESCRIÇAO

- C 0 1 Servico : Transmissor Pressao Manometrica
- C 1 1 Caixa : 42,5 a 2500 kPa
- C 2 1 Material Diafragma/Fluido Enchimento : Aço Inox 316L/Fluorolube
- C 3 1 Material dos Flanges, Adaptadores e Conexoes : Aço Inox 316
- C 4 1 Material dos Anéis de Vedacao da Celula : Teflon
- C 5 1 Posicao Purga : Superior
- C 6 1 Indicador Local : Sem
- C 7 1 Conexao ao Processo : 1/2" - 14 NPT (Com Adaptador)
- C 8 1 Conexao Eletrica : 1/2" - 14 NPT
- C 9 1 Ajuste de Zero e Span : Com Ajuste Local
- C 1 1 Suporte : Tipo Plano, em Aço Carbono Pintado. Acessorios : Aço Carbono

OPÇÕES

- C A 1 Parafusos e Porcas em Aço Inox 316
- C I 1 Placqueta de Identificacao EM

CARACTERISTICAS GERAIS

Observacoes :
 Data Calibracao : 03/05/2000 Versao Software : 5.07
 Placa Principal : 0052926640 Placa Display :

CALIBRACAO

Pressao kgf/cm ²	Saida Ideal (mA)	Saida Atual (mA)
0,0000	4,000	4,000
3,7500	8,045	8,046
7,5000	11,993	11,997
11,2500	16,027	16,031
15,0000	19,965	19,964

Data Emissao : 26/05/2000 Controle C.P.D. : 000771

PLANILHA DE CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO

1. IDENTIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR



1.1 Identificação (TAG)

Fabricante ROSEMOUNT
 Tipo de transdutor *Transdutor de pressão diferencial*
 Modelo DP4E12B1
 N° de série B5522
 Faixas de operação 0-635 mmH2O

1.2 Instrumento de leitura do sinal

Identificação (TAG) DA-01

1.3 Fonte de tensão

Identificação (TAG) EP-01 Voltagem 17 VDC

1.4 Patm

696.mmHg Temp. ambiente 23 °C

2. PADRÃO DE PRESSÃO

Identificação (TAG) PF-02

3. DADOS DA CALIBRAÇÃO

% da pressão máxima	pressão de referência [mmH2O]	Indicação [mV]			curva de calibração	
		crescente	decrecente	média	estimativa	desvio (%)
0	0	20.0	20.0	20	0.2	
20	100	36.0	36.0	36	100.0	0.0
40	200	52.0	52.0	52	199.7	-0.1
60	300	68.1	68.1	68.075	300.0	0.0
80	400	84.1	84.2	84.125	400.1	0.0
100	500	100.2	100.2	100.15	500.0	0.0

4. EQUAÇÃO DO TRANSDUTOR

Pressão [mmH2O] = (Vind -19.9725944) * 6.236632

5. OBSERVAÇÕES


Calibração realizada aplicando-se pressão positiva na tomada de "Hi" do transdutor
 Foi realizada uma "ZERAGEM" do transmissor

Responsável: José Carlos

Data: 04/12/97

PLANILHA DE CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO

1. IDENTIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR

PT-39 

1.1 Identificação (TAG)

Fabricante *Gamma*
 Tipo de transdutor *Transdutor de pressão estática*
 Modelo *C719.23*
 N° de série *91612*
 Faixas de operação *0 - 3.5/21 bar*

PRESSÃO ESTÁTICA NA PLACA
 CANAL 18

1.2 Instrumento de leitura do sinal

Identificação (TAG) _____

1.3 Fonte de tensão

Identificação (TAG) _____

Voltagem _____ VDC

1.4 Patm

_____ 700 _____

Temp. ambiente _____ 24 °C

2. PADRÃO DE PRESSÃO

Identificação (TAG) _____

3. DADOS DA CALIBRAÇÃO

% da pressão máxima	pressão de referência [kgf/cm2]	Indicação [V]			curva de calibração	
		crescente	decrecente	média	estimativa	desvio (%)
0	0.0	1.00	1.00	1.00	0.0	
20	2.0	1.80	1.80	1.80	2.0	0.2
40	4.0	2.59	2.59	2.59	4.0	-0.5
60	6.0	3.40	3.40	3.40	6.0	0.2
80	8.0	4.20	4.20	4.20	8.0	0.2
100	10.0	4.99	4.99	4.99	10.0	-0.1

4. EQUAÇÃO DO TRANSDUTOR

Pressão [kgf/cm2] = (Vind - 0.99950405) * 2.503552


5. OBSERVAÇÕES

Calibração realizada aplicando-se pressão positiva na tomada de "Hi" do transdutor
 Foi realizada uma "ZERAGEM" do transmissor através do comando "TRIM" do Syscon

Responsável: Data: 

PLANILHA DE CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO

1. IDENTIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR

PT-39 

1.1 Identificação (TAG)

Fabricante *Gamma*
 Tipo de transdutor *Transdutor de pressão diferencial*
 Modelo *C719.10*
 N° de série *91607*
 Faixas de operação *0 - 12 / 70 bar*

PRESSÃO DE ÓLEO NO PLACA

CANAL 19

1.2 Instrumento de leitura do sinal

Identificação (TAG) _____

1.3 Fonte de tensão

Identificação (TAG) _____

Voltagem _____ VDC

1.4 Patm

_____ 700 _____

Temp. ambiente _____ 24 °C

2. PADRÃO DE PRESSÃO

Identificação (TAG) _____

3. DADOS DA CALIBRAÇÃO

% da pressão máxima	pressão de referência [kgf/cm2]	Indicação [V]			curva de calibração	
		crescente	decrescente	média	estimativa	desvio (%)
	0.0	1.00	1.00	1.00	0.0	
	2.0	1.67	1.67	1.67	2.0	0.1
	4.0	2.34	2.34	2.34	4.0	0.5
	6.0	3.00	3.00	3.00	6.0	0.1
	8.0	3.66	3.67	3.67	8.0	0.1
	10.0	4.32	4.32	4.32	10.0	-0.2
	12.0	4.99	4.99	4.99	12.0	0.0

4. EQUAÇÃO DO TRANSDUTOR

Pressão [kgf/cm2] = (Vind -1.00551627) * 3.011533

5. OBSERVAÇÕES


Calibração realizada aplicando-se pressão positiva na tomada de "Hi" do transdutor
 Foi realizada uma "ZERAGEM" do transmissor através do comando "TRIM" do Syscon

Responsável: Jon Carlos

Data: 11

PLANILHA DE CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO

1. IDENTIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR

PT-39 

1.1 Identificação (TAG)

Fabricante *Gamma*
 Tipo de transdutor *Transdutor de pressão estática*
 Modelo *C719.21*
 N° de série *901600*
 Faixas de operação *0 - 1.2 / 7 bar*

PRESSÃO DE ÓLEO NO BOCAL

CANAL 13

1.2 Instrumento de leitura do sinal

Identificação (TAG) _____

1.3 Fonte de tensão

Identificação (TAG) _____

Voltagem _____ VDC

1.4 Patm

_____ 700 _____

Temp. ambiente _____ 24 °C

2. PADRÃO DE PRESSÃO

Identificação (TAG) _____

3. DADOS DA CALIBRAÇÃO

% da pressão máxima	pressão de referência [kgf/cm ²]	Indicação [V]			curva de calibração	
		crescente	decrecente	média	estimativa	desvio (%)
0	0.0	1.00	1.00	1.00	0.0	
20	1.5	1.86	1.86	1.86	1.5	0.4
40	3.0	2.71	2.71	2.71	3.0	-0.1
60	4.0	3.28	3.28	3.28	4.0	0.0
80	5.5	4.13	4.14	4.14	5.5	0.0
100	7.0	4.99	4.99	4.99	7.0	0.0

4. EQUAÇÃO DO TRANSDUTOR

$$\text{Pressão [kgf/cm}^2\text{]} = (\text{Vind} - 1.00189063) * \underline{1.755316}$$

5. OBSERVAÇÕES

Calibração realizada aplicando-se pressão positiva na tomada de "Hi" do transdutor
 Foi realizada uma "ZERAGEM" do transmissor através do comando "TRIM" do Syscon

Responsável: _____ Data: _____ 

ANEXO 2

DESCRIÇÃO DO MEDIDOR TIPO CORIOLIS

3. PRODUCT DESCRIPTION

3-1. About Compact-ROTAMASS

This coriolis mass flowmeter measures liquids (and gases) mass flow rates, density and temperature and it provides two analog outputs, one pulse output, one status - out and one status - in as standard I/O.

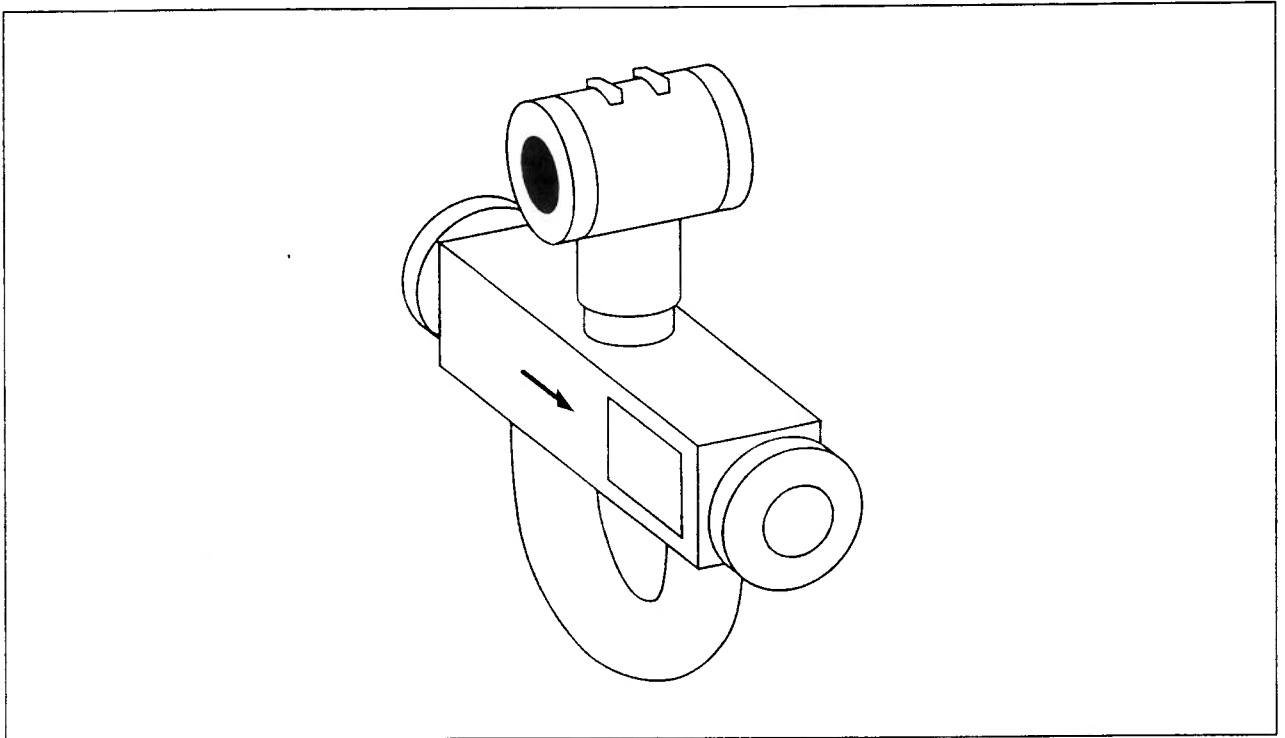


Fig. 3-1.

3-2 Product description

3-2. Standard specifications

Model : RCCT 24 to 29

Fluid to be measured: Liquid

Measurement items : Mass flow, density, temperature (and calculation of volume flow)

Mass flow measurement

Measuring range : refer to table 3-1.

Table 3-1.

		RCCT24	RCCT26	RCCT28	RCCT29
Q_{max}	t/h	3	15	50	120
Q_{nom}	t/h	1.6	6	20	60
Q.F.S. _{min}	kg/h	80	300	1000	3000

Q_{nom} is the water flow rate at about 0.5 bar pressure drop.

Q.F.S._{min} is the minimum settable flow span

Accuracy

- RCCT24 to 29 : 0.05 % Q_{nom} (pulse output)

Density measurement

Measuring range : 0.3 to 2.5 kg/l

Accuracy

- RCCT24 : ± 3 g/l
- RCCT26 : ± 2.2 g/l
- RCCT28, 29 : ± 1.5 g/l
- Optional : ± 1 g/l (with special calibration)

Temperature measurement

Measuring range : -200 to 230 °C

Accuracy

: ± 1 °C, ± 0.5 % of reading

Process temperature range

- Standard : -40 to +120 °C
- Ex version : Refer to table 2. For max. temp. please do not cover the converter with insulating material

Process pressure limits

: 0 to 40 bar (higher pressure on request)

Ambient temperature limits

: -20 to 50 °C (for standard and Ex version)

Table 3-2. Temperature classification of Ex version (integral type)

Temp. class	Ambient temp.	Process temperature
T6	≤ 50 °C	≤ 65 °C
T5	≤ 50 °C	≤ 80 °C
T4	≤ 50 °C	≤ 115 °C
T3	≤ 50 °C	≤ 120 °C

Ambient humidity limits

: 5 to 95 % R.H. non condensing

Pressure loss

: Pressure loss depends on velocity, viscosity and density of the fluid. For newtonian fluids the pressure loss is shown in table 3-3 and figures 3-3 to 3-6.

Table 3-3. Pressure loss (water at 20°C)

Press. loss		RCCT24	RCCT26	RCCT28	RCCT29
at Q_{max}	bar	1.82	3.1	3.75	2.4
at Q_{nom}	bar	0.52	0.5	0.6	0.6

Gas content limits : Refer to table 3-4

Table 3-4. Limit of gas content

		RCCT24	RCCT26	RCCT28	RCCT29
Gas content	Vol. %	< 12	< 2.5	< 1.5	< 1

NOTES:

1. With liquid/gas mixtures the specified accuracy will not be achieved
2. Under Ex-condition gas bubbles should be avoided.

Power supply and power consumption

: 90 to 264 V AC, 47-63 Hz, 22 VA, 9 W
or 21.6 to 26.4 V DC, 9 W
For Ex version 250 V AC max.

Fuse in power unit

- AC (90 - 264 V) 1.25 A, T (Time, Lag)
- DC (21.6 - 26.4 V) ... 5 A, T (Time, Lag)
- External circuit breaker rating : 5A, 250 V
(No power switch is mounted in the converter). Must be conform IEC 947-1 or IEC 947-3 standard.
When mounting the flowmeter, please install circuit breaker. And it shall be marked as the disconnection device for the flowmeter.

I/O signal

- Two current outputs : 4 to 20mA DC, galvanically separated from other signals, not galvanically separated between two current outputs. (Load resistance : 0 to 750 Ohm)
- Pulse Output : Transistor contact output
Output Rate: 0.0001 to 1000 p/s
(Contact rating : 30V DC, 200mA)
- Status Output : Transistor contact output
(Contact rating : 30V DC, 200mA)
- Status Input : Voltage-free contact
(Close: ≤ 200 Ohm.,
Open: ≥ 100 kOhm.)

Digital communication

- : BRAIN communication signal, superimposed on a 4 -20 mA DC signal ($I_{out} 1$)
- Load resistance : 250 - 600 Ohm (including cable)
- Load capacitance : ≤ 0.22 μF
- Load inductance : ≤ 0.33 mH
- Power line spacing : 15 cm or more, avoid parallel wiring
- Instrument impedance for receiving the signal : 10 kOhm or more at 2.4 kHz
- Cable length : ≤ 2 km when „CEV“ cables are used

Span setting functions

: Parameter setting is possible by setting the switches on the display or with the BRAIN hand-held terminal

Display functions : Instantaneous flow rate, density, temperature or totalized flow can be displayed

Damping functions : Settable from 0.4 seconds (63 % response time) to 200 seconds

Semi-automatic zero adjustment function

: Zero point can be adjusted automatically either by setting the switches on display or with the BRAIN hand-held terminal or with status input when the fluid is stopped.

Data security during power failure

: Data storage by EEPROM, no back-up battery required.

Explosion proof : CENELEC EExde [ib] IIC T6..T3 and CENELEC EExd [ib] IIC T6..T3

Protection class : IP67

Materials

- Detector housing: SS 1.4301 (304)
- Converter housing
 - : Aluminium alloy with Polyurethane corrosion-resistant coating

Materials of wetted parts

- Measuring tubes: SS 1.4404 (316L) or Hastelloy C
- Process connections
 - : SS 1.4404 (316L)/1.4571 (316Ti) or Hastelloy C

Coating colour

- Converter/terminal box case
 - : Frosty white
- Converter/terminal box cover
 - : Deep sea moss green

Calibration : The ROTAMASS Flowmeters are factory-calibrated with water.

Condition

- Water : 22.5 °C, ±12.5 °C
- Ambient temp. : 22.5 °C, ±12.5 °C
- Pressure : 1 - 1.5 bar
- Density : Density calibration with specific customer-supplied fluids on request.

NOTE:

- Figures 3-3 to 3-6 show the pressure loss for newtonian fluids. Please inquire pressure losses for non-newtonian fluids from your Yokogawa representative.
- The pressure losses are valid for stationary flows. Pulsating flow causes a considerably higher pressure loss on average.
- For all fluids with flow as basis, please proceed as follows:
 - a. Determine the pressure loss from the figures. Read the pressure loss for the given mass flow and viscosity on the ordinate. For pastes and slurries (thixotrope liquids), the pressure loss is often 2 - 4 times lower than the given value.
 - b. Determine measuring uncertainty from fig. 3-7. Take the preferred flow and the sensor type, find the corresponding point in the error curve and read the uncertainty on the ordinate.

- Evaluation :

- a. If the pressure loss calculated is too high, take the larger size detector at reduced accuracy.
- b. If the accuracy is too low, take the smaller size detector at enhanced pressure loss.

Insulation resistance of converter*

- between power and ground terminal : 100MΩ/500 V DC
- between power and I/O terminals : 20 MΩ/100 V DC
- between I/O terminals and ground : 20 MΩ/100 V DC

Dielectric strength*

- between power and ground terminal : 1,500 V AC for 1 min.

*When remove surge arrestors.

Before testing the insulation resistance and dielectric strength, remove the screw shown in right Figure. After testing, this screw must be return to its original position.

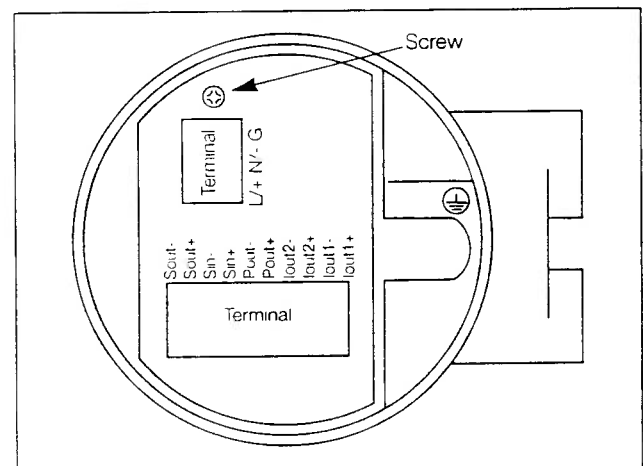


Fig. 3-2.

3-4 Product description

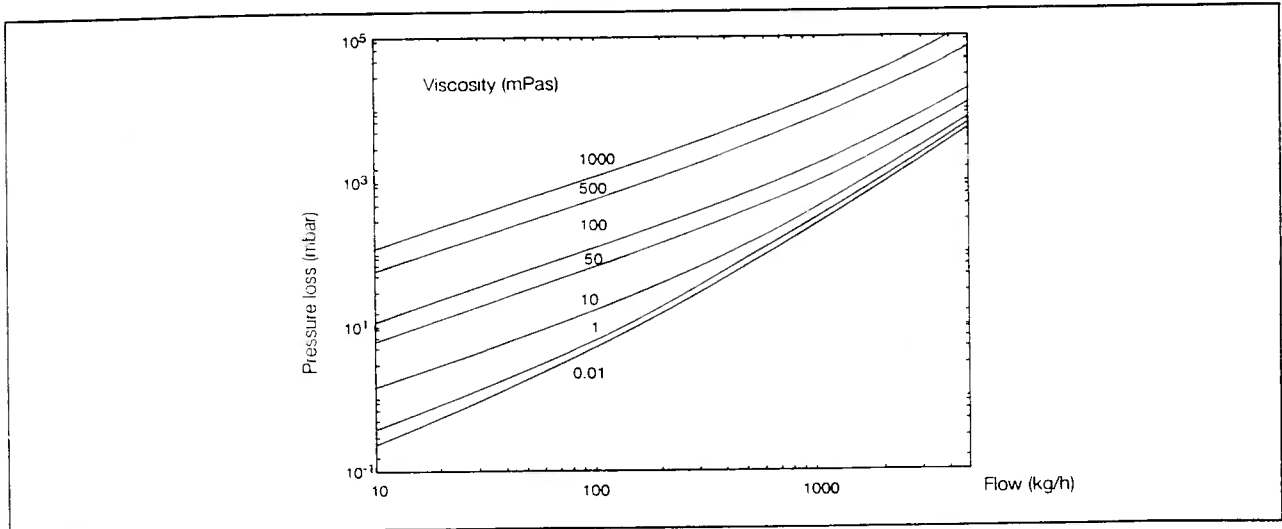


Fig. 3-3. Pressure loss RCCT24

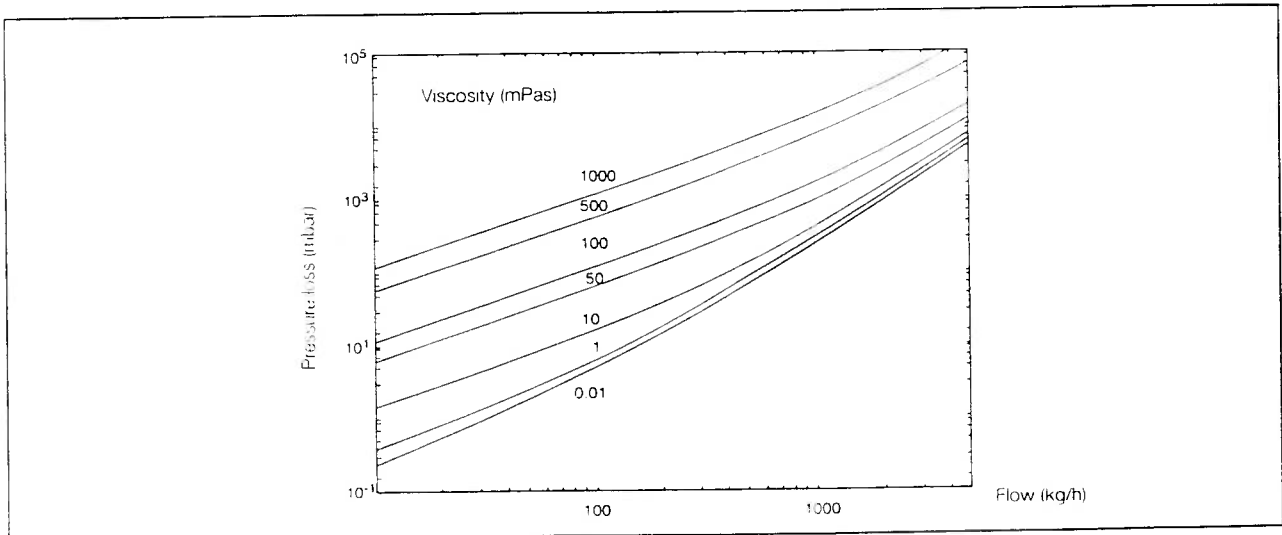


Fig. 3-4. Pressure loss RCCT26

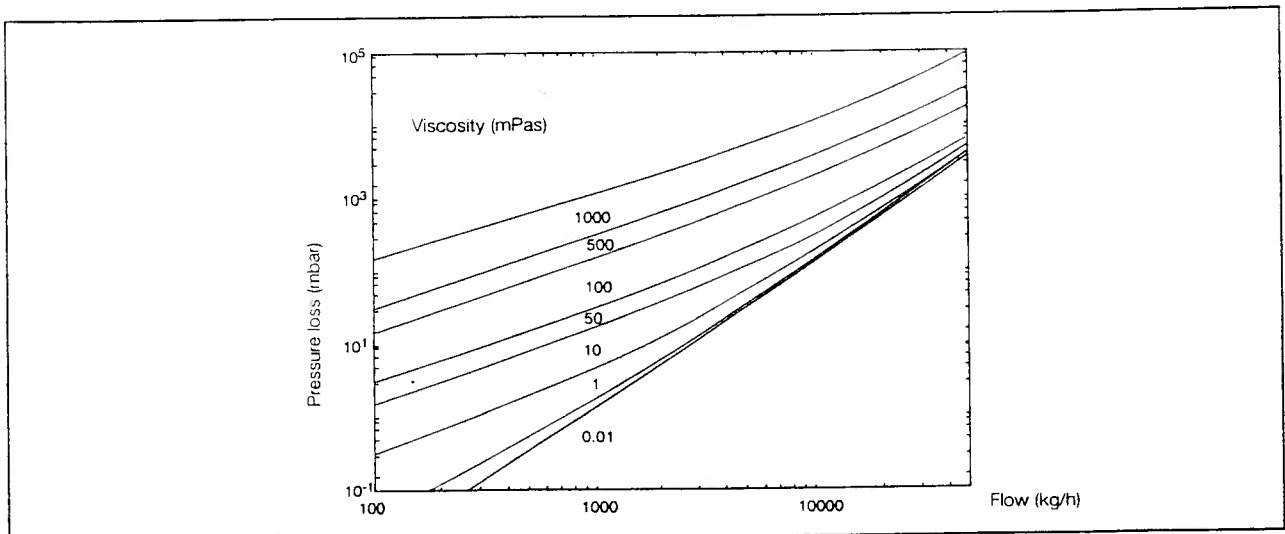


Fig. 3-5. Pressure loss RCCT28

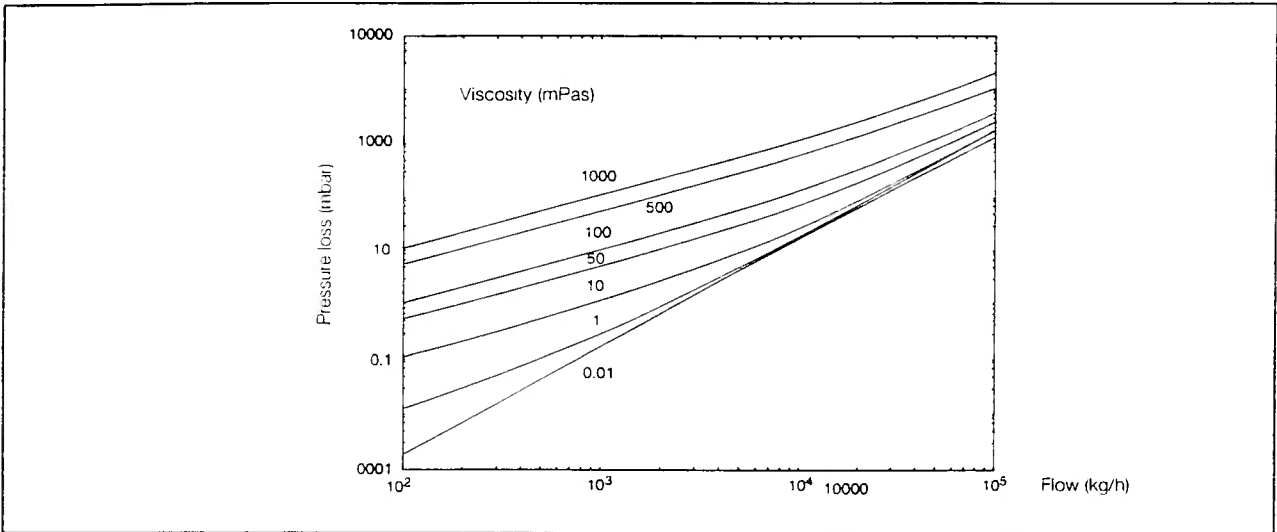


Fig. 3-6. Pressure loss RCCT29

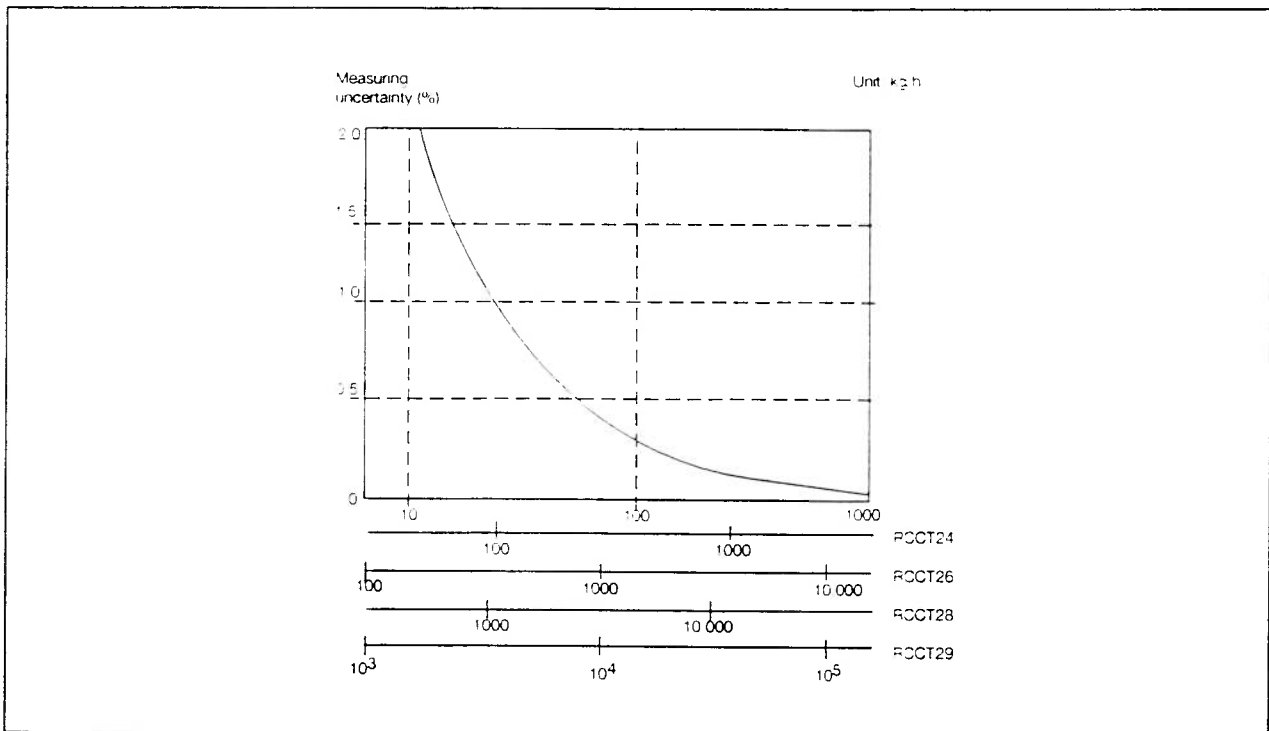


Fig. 3-7. Measuring uncertainty

3-6 Product description

3-3. Model and suffix codes

Model	Suffix code	Option code	Description
RCCT24.....			Nominal value: 1.6 t/h = 26.7 kg/min
RCCT26.....			Nominal value: 6 t/h = 100 kg/min
RCCT28.....			Nominal value: 20 t/h = 333 kg/min
RCCT29.....			Nominal value: 60 t/h = 1000 kg/min
Explosion proof	-G..... -X.....		Not explosion proof CENELEC EExde (ib) IIC T6 .. T3 CENELEC EExd (ib) IIC T6 .. T3
Power supply	A..... D.....		100 - 240 V AC 24 V DC
Indicator direction	H..... V..... N.....		Detector installation horizontal Detector installation vertical Without indicator
Cable conduit connection	D..... A.....		DIN PG 13.5 ANSI 1/2 NPT
Process connection size	01..... 02..... 04..... 05..... 06..... 08..... 10..... 12.....		DN15, 1/2" DN25, 1" DN40, 1 1/2" DN50, 2" DN65, 2 1/2" DN80, 3" DN100, 4" DN125, 5"
Process connection rating and style	A1..... A2..... D4..... S2..... S4..... S8.....		ANSI flange 150 lbs RF ANSI flange 300 lbs RF DIN flange PN40 Screwing DIN 11851 Tri-Clamp, DIN inside diameter Tri-Clamp, ANSI inside diameter
Material of wetted parts	SG..... HC.....		316L (1 4404) / 316Ti (1 4571) HASTELLOY C
Style	A.....		Style A

3-3-1. Selection table process connection

Size		-01 DN15, 1/2"	-02 DN25, 1"	-04 DN40, 1 1/2"	-05 DN50, 2"	-06 DN65, 2 1/2"	-08 DN80, 3"	-10 DN100, 4"	-12 DN125, 5"
RCCT24	Material	A1,A2,D4 SG	A1,A2,D4 SG, HC						
	Material		S2, S4, S8 SG						
RCCT26	Material		A1,A2,D4 SG	A1,A2,D4 SG, HC	A1,A2,D4 SG, HC				
	Material			S2, S4, S8 SG					
RCCT28	Material			D4 SG	A1,A2,D4 SG, HC	A1,A2 SG, HC	A1, A2, D4 SG, HC		
	Material				S2, S4, S8 SG				
RCCT29	Material						A1,A2,D4 SG	A1,A2,D4 SG	A1,A2 SG
	Material							S2, S4, S8 SG	

3-4. Optional specifications

	Option code	Description
Tag number	/BG.....	With Tag number
Special calibration	/K1..... /K2..... /K3..... /K4..... /K5.....	Massflow: customer specified full scale value Massflow: customer specified measuring points Density: with several liquids $0.7 < \rho < 1.3 \text{ kg/l}$ Density: with customer specified liquid Massflow: with DKD certificate
Certificates	/P2..... /P4..... /P6.....	with compliance of the order: '2.1' EN 10204 Test report: '2.2' EN 10204 (DIN 50049) Inspection certificate: '3.1B' EN 10204 (DIN 50549)
Housing pressure test	/J1.....	Pressure proof housing: 40 bar (RCCT24, 26), 25 bar (RCCT28), 10 bar (RCCT29)
Special order	/Z.....	Special design must be specified in an extra text

3-5. Weight and dimensions

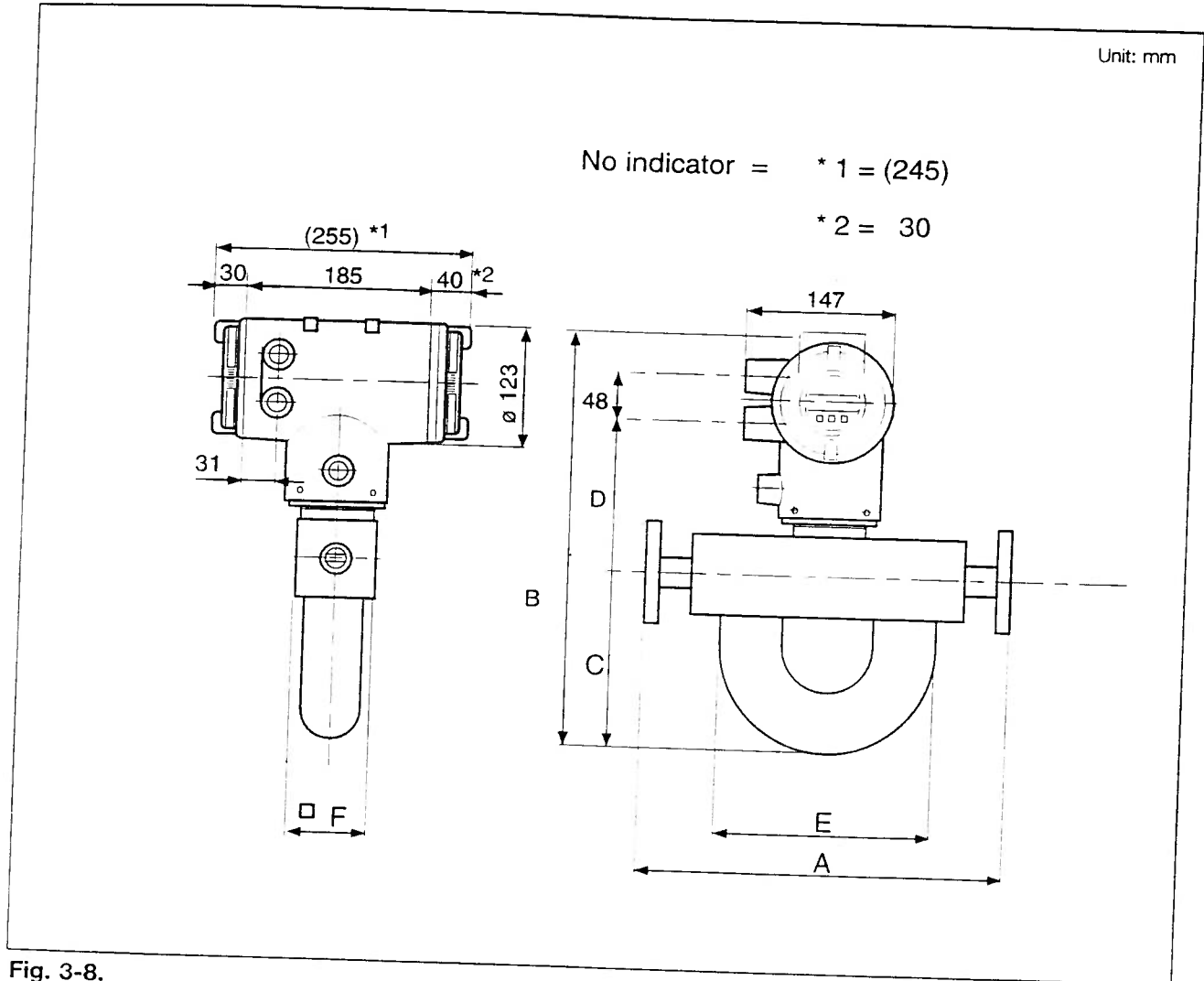


Fig. 3-8.

Type	A	B	C	D	E	F	Weight
RCCT24	370	430	180	160	220	80	13
RCCT26	500	480	240	160	270	80	17
RCCT28	600	520	270	170	270	100	26
RCCT29	1000	700	440	180	380	120	64

Dimensions in mm
Weight in kg

Installation length (dimension A) for process connections S2, S4 and S8

Type	S2	S4	S8
RCCT24	408	385	385
RCCT26	540	520	530
RCCT28	625	610	600
RCCT29	1050	1020	1020

Dimensions in mm

4. INSTALLATION

When installing the flowmeter, refer to section 2-5, Installation Area Selection, section 9 for CENELEC explosionproof for EEx version, and section 3-2 to 3-5, Standard specifications etc....

4-1. Piping

1. The upstream and downstream piping's length has no influence on the functioning of the instrument.
2. Piping requirements for Proper Operation
A coriolis mass flowmeter can be installed vertically, horizontally or at any angle from the horizontal position. However, the piping must be installed to ensure that the measuring tube is always filled with liquid.

a. Vertical installation with upward flow

is recommended because it

- makes full liquid condition easier,
- helps gas bubbles to escape
- enables selfdraining

b. Horizontal installation

Please install the flowmeter so that the direction of measuring tube's portion is located below. In this condition, gas bubbles in the liquid are not trapped in the measuring tube of flowmeter.

c. Installation at highest point

This should be avoided because this condition will lead to the collection of gas bubbles.

d. Steep downward installation

should be also avoided because gas bubbles can be sucked into the measuring tubes and it will cause incorrect measurements.

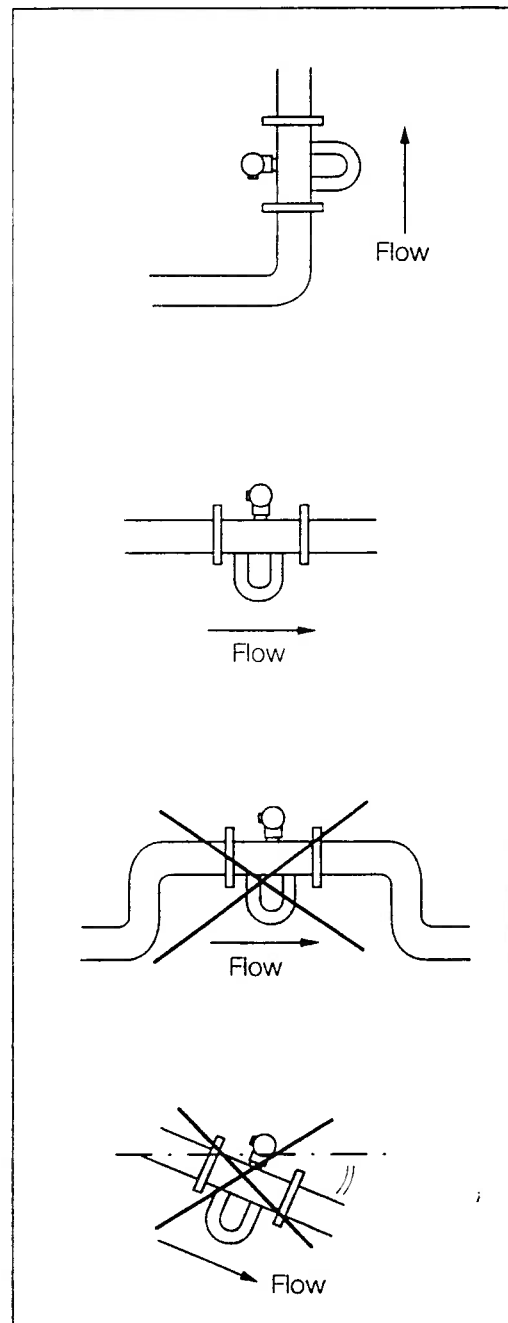


Fig. 4-1.